

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS



TESIS DOCTORAL

**Visión inteligente para el control de calidad in situ de
lubricantes en vehículos militares desplegados a zona cero de
operaciones**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

Carlos López Pingarrón

DIRIGIDA POR

José Santiago Torrecilla Velasco
Carlos Jesús Vega Vera

Madrid

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS



TESIS DOCTORAL

VISIÓN INTELIGENTE PARA EL CONTROL DE CALIDAD *IN SITU* DE
LUBRICANTES EN VEHÍCULOS MILITARES DESPLEGADOS A
ZONA DE OPERACIONES

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

Carlos López Pingarrón

DIRECTORES

José Santiago Torrecilla Velasco

Carlos Jesús Vega Vera

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS

PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA QUÍMICA



VISIÓN INTELIGENTE PARA EL CONTROL DE CALIDAD *IN SITU* DE
LUBRICANTES EN VEHÍCULOS MILITARES DESPLEGADOS A
ZONA DE OPERACIONES

Tesis Doctoral

Carlos López Pingarrón

Directores:

José Santiago Torrecilla Velasco

Carlos Jesús Vega Vera

Agradecimientos

Agradecimientos

En primer lugar, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi hermana Laura y a su marido Joaquín. El origen de toda esta aventura se debe al hecho de que ellos conocieran al Coronel Pita, quien fue clave para que yo pudiera entrar en contacto con ese gran científico y amigo que hoy es mi director de tesis. Siempre he admirado a Laura y Joaquín por su capacidad investigadora y los he tenido como referentes, no solo en el ámbito académico, sino también por su dedicación y perseverancia. A través de su ejemplo, he aprendido a enfrentar los retos con la misma pasión y rigor que ellos han demostrado en sus propias carreras. Su apoyo y su conexión fueron fundamentales para que pudiera iniciar este camino académico, y su influencia ha sido una inspiración constante a lo largo de todo el proceso.

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a tres coroneles, quienes me han apoyado de maneras distintas, pero igualmente valiosas durante la realización de este doctorado. El Coronel Federico Ramírez Santa Pau fue quien, en mi primera etapa en el Laboratorio Central del Ejército (LCE), plantó la semilla de la idea de realizar un doctorado. Al Coronel Ramón Máiquez López, con quien inicié esta aventura, le agradezco profundamente no solo su apoyo incondicional y las numerosas facilidades que me brindó, sino también su capacidad para motivar y contagiar entusiasmo en los momentos más difíciles. Su compromiso y cercanía fueron una fuente constante de inspiración para seguir adelante. Y al Coronel Carlos Manuel Canencia González, cuya determinación y confianza en mi trabajo fueron clave en la recta final de este proyecto. Sus consejos sobre salud, ejercicio y alimentación me ayudaron a sobrellevar las tensiones propias de esta etapa, brindándome el equilibrio físico y mental necesario para afrontar los desafíos y culminar con éxito esta tesis. Sin la ayuda de ellos, este proyecto no habría sido posible.

A mi director de tesis, el profesor Don Santiago Torrecilla Velasco, Catedrático de Ingeniería Química, un magnífico profesional y, sobre todo, una excelente persona. Su presencia en mi vida fue una casualidad por la que siempre estaré siempre agradecido. Le considero no solo mi mentor, sino también un amigo, siempre dispuesto a apoyarme, guiarme y orientarme. Trabajar con él ha sido un verdadero privilegio. Recuerdo con claridad cuando, en mi despacho del Laboratorio Central del Ejército, comenzamos a pensar en cómo orientar esta investigación sin apenas conocernos, y de repente vi en su rostro esa expresión de científico que descubre algo nuevo y exclama: *¡eureka!*. Así nació la tesis que hoy culmina. Gracias a su guía y compromiso, pude superar los obstáculos de

Agradecimientos

este proceso. Su apoyo ha sido fundamental en la culminación de esta tesis, y por ello siempre le estaré agradecido. Tampoco olvido a su amigo Carlos, cuyas valiosas aportaciones desde nuestra primera reunión virtual fueron clave en este trabajo.

A mi codirector de tesis, el Teniente Coronel Carlos Jesús Vega Vera, Jefe de Estudios de la Escuela Politécnica del Ejército de Tierra, le debo un profundo agradecimiento por su constante apoyo, orientación y ánimo, especialmente en los momentos más difíciles de esta travesía. Es increíble pensar que, hace ya 20 años, dedicaba largas llamadas telefónicas para guiarme y aconsejarme sobre cómo ingresar al Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Tierra. Nunca imaginé que ese mismo mentor terminaría codirigiendo mi tesis doctoral. Su entrega y generosidad al compartir su tiempo y conocimiento han sido invaluable, cualidades difíciles de encontrar hoy en día. A lo largo del proceso, su acompañamiento y orientación fue esencial para mantenerme enfocado y superar los desafíos que surgieron, permitiéndome avanzar con firmeza en este proyecto.

Quiero agradecer también a todo el personal del Laboratorio Central del Ejército, y en especial a mis compañeros y amigos de la 2ª Sección: Fernando, Ruth y Esaú. Su compañerismo y apoyo han sido un pilar en esta experiencia, y su amistad, sin duda, perdurará más allá de estos años. Además, quiero destacar a José Luis Peñas y al Capitán Fernando Moreno, con quienes he compartido momentos inolvidables que hicieron este recorrido mucho más enriquecedor. Su lealtad y disposición para acompañarme en los buenos y malos momentos han sido fundamentales para mantener el ánimo y continuar con determinación. Vuestra amistad ha sido clave para que esta travesía fuera mucho más llevadera y gratificante. También quiero expresar mi agradecimiento al Teniente Coronel Manuel Jorge Onievas, uno de los mejores profesionales que conozco en el Ejército, cuya mejor carta de presentación es preguntar por sus antiguos destinos para comprobar que es de los mejores. Su ejemplo y profesionalidad han sido una fuente de inspiración constante.

A mis padres, los principales impulsores de este logro. Durante estos años, cada tarde, sus llamadas me daban el impulso necesario para continuar trabajando, especialmente después de largas jornadas en el LCE. Su apoyo incondicional y confianza en mis capacidades han sido pilares fundamentales para superar los momentos más difíciles. Mi padre, con su especial inteligencia emocional, siempre sabía qué decirme: “Si yo a mis 71 años logré obtener el doctorado, ¿cómo no lo vas a conseguir tú?” También me repetía a menudo su sabia frase: “*Lo que sucede, conviene*”, recordándome que cada obstáculo en este proceso era una oportunidad para aprender y mejorar. ¡Misión cumplida, papá!

Agradecimientos

¿Algún reto nuevo? Gracias, papá y mamá, este doctorado es también en parte para vosotros. No solo por vuestro apoyo, sino también por el ejemplo de perseverancia, esfuerzo y valores que me habéis inculcado siempre.

A mi abuela Ami, a quien no he podido ver tanto como hubiese querido debido al tiempo que he tenido que dedicar al doctorado. Aun así, sigo aprendiendo de ella, gracias a su mente prodigiosa a sus 97 años. Siempre me ha recordado: “*Carlos, no des cuerda al sol*”, una frase que me ha enseñado a ser paciente y a entender que, por más que intentemos apresurar las cosas, todo llega a su debido tiempo. Esa lección me ha acompañado durante la ejecución de este doctorado, recordándome que el esfuerzo constante es lo que da sus frutos. Su sabiduría y fortaleza han sido una inspiración constante, incluso en la distancia.

Por último, pero no menos importante, quiero expresar mi infinito y más sincero agradecimiento a mi mujer, Carmen María. Su apoyo incondicional ha sido el pilar sobre el que se ha sostenido todo este proceso, y estoy absolutamente convencido de que sin ella no habría podido completar esta ardua y exigente travesía que es un doctorado. Desde el primer momento, hasta el último, ha sido mi mayor apoyo, no solo asumiendo con dedicación y entrega mayores responsabilidades con nuestras hijas, sino también brindándome el espacio y tiempo necesarios para que pudiera concentrarme en el estudio. Además de ser una madre excepcional, cuya dedicación, amor y entrega hacia nuestras hijas es incuestionable, Carmen María es una profesional de primer nivel. Su brillantez, su capacidad de trabajo y su gran sentido de responsabilidad han sido una fuente de inspiración para mí; su implicación, aportando su perspectiva clara y su impecable criterio en varios apartados de la tesis, así como sus valiosas sugerencias en momentos clave, han demostrado que es una de las mejores profesionales que conozco, por no decir la mejor. Carmen María, muchas gracias de todo corazón; sin ti, esto no habría sido posible. Te quiero y admiro profundamente.

Antes de finalizar, quisiera dedicar unas palabras a mis hijas, Carmen María y Carla Isabel. Si algún día leéis esta tesis doctoral, aunque sea solo el apartado de agradecimientos, espero que encontréis en estas palabras una fuente de inspiración, tal como mis padres lo han sido para mí. A menudo me preguntabais por qué dedicaba tantas horas a este doctorado, y quizás no era fácil entenderlo en ese momento. Hoy, al ver este proyecto terminado, podéis comprobar que todo esfuerzo y sacrificio tiene su recompensa. No importa lo difícil que sea el camino, con esfuerzo, constancia y

Agradecimientos

dedicación, todo es posible. Nunca tengáis miedo al trabajo duro, porque es precisamente esa perseverancia la que os llevará a alcanzar vuestros sueños. Recordad siempre que lo importante no es el destino, sino el aprendizaje y la determinación que demostréis en el trayecto.

Y, para finalizar, no puedo dejar de agradecer a Dios, quien siempre me ha dado la fuerza y la energía necesarias para no rendirme y seguir luchando hasta el final.

Índice

Índice

ÍNDICE DE TABLAS	I
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XXVI
RESUMEN	1
SUMMARY	3
CAPÍTULO 1:INTRODUCCIÓN	5
1.1 FUNDAMENTOS Y CONTEXTO TEÓRICO DEL ESTUDIO.....	5
1.1.1 Antecedentes y justificación.....	6
1.1.2 Planteamiento del problema.....	7
1.1.3 Objetivos y alcance de la investigación	9
1.2 ACEITE LUBRICANTE	11
1.2.1 Funciones del lubricante	11
1.2.2 Tipos de lubricantes.....	12
1.2.2.1 Según su origen o procedencia	13
1.2.2.2 Según su estado	15
1.2.2.3 Clasificación de la Society of Automotive Engineers (SAE)	16
1.2.2.4 Clasificación ISO.....	21
1.2.2.5 Clasificación según la ASTM D-2422.....	21
1.2.2.6 Especificaciones militares	22
1.2.2.7 Tabla de equivalencia de viscosidad.....	24
1.2.3 Propiedades de los lubricantes.....	26
1.2.4 Aditivos y mejoradores de rendimiento	28
1.2.4.1 Detergentes	29
1.2.4.2 Dispersantes.....	31
1.2.4.3 Antidesgaste	32

Índice

1.2.4.4	Extrema presión.....	33
1.2.4.5	Antioxidantes.....	35
1.2.4.6	Aditivos anticorrosivos.....	40
1.2.4.7	Mejoradores de la viscosidad	41
1.2.4.8	Depresores del punto de fluidez	42
1.2.4.9	Inhibidores de espuma	43
1.2.4.10	Compatibilidad y solubilidad de los aditivos	44
1.2.5	<i>Aceite de motor: composición y propiedades.....</i>	45
1.2.6	<i>Aceite de caja de cambios: Especificidades y retos</i>	51
1.3	TRIBOLOGÍA Y LUBRICACIÓN	58
1.3.1	<i>Antecedentes y significado.....</i>	58
1.3.2	<i>Estudio de la fricción, desgaste y lubricación.....</i>	61
1.3.2.1	Fricción: Tipos y causa	61
1.3.2.2	Desgaste: Mecanismos y tipos.....	63
1.3.2.3	Lubricación: Objetivos, modos y regímenes	70
1.4	MANTENIMIENTO PREDICTIVO Y DIAGNÓSTICO DE ACEITES LUBRICANTES	79
1.4.1	<i>Definición y ventajas</i>	79
1.4.2	<i>Cambio del aceite lubricante. Diferentes enfoques.....</i>	82
1.4.3	<i>Herramientas y técnicas</i>	83
1.4.4	<i>Finalidad de los análisis</i>	84
1.4.5	<i>Beneficios de los análisis.....</i>	85
1.4.6	<i>Degradación de los aceites lubricantes.....</i>	86
1.4.6.1	Degradación de los aceites lubricantes. Causas físicas	87
1.4.6.2	Degradación de los aceites lubricantes. Causas químicas	89
1.4.6.2.1	Oxidación	89
1.4.6.2.2	Consecuencias del proceso de oxidación	92

Índice

1.4.6.2.3 Nitración	96
1.4.6.2.4 Sulfuración	98
1.4.6.3 Técnica de espectrometría infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) en el análisis de la degradación de aceites lubricantes	99
1.4.6.3.1 Detección de productos procedentes de la oxidación y combustión	99
1.4.6.3.2 Detección de productos procedentes de la nitración	101
1.4.6.3.3 Detección de productos procedentes de la sulfuración.....	101
1.4.7 Contaminación	102
1.4.7.1 Contaminación por partículas de desgaste.....	103
1.4.7.1.1 Origen de los elementos metálicos	105
1.4.7.1.2 Identificación y medición de los elementos metálicos	107
1.4.7.2 Contaminación por elementos externos líquidos.....	111
1.4.8 Ensayos para determinar la degradación del aceite.....	114
1.4.8.1 Viscosidad.....	115
1.4.8.2 Acidez-Basicidad del aceite.....	117
1.4.8.3 Punto de inflamación.....	118
1.4.8.4 Espectrometría infrarroja por Transformada de Fourier.....	119
1.4.8.5 Contaminación por materia carbonosa	120
1.4.9 Diagnóstico por degradación y contaminación de aceite lubricante.....	121
1.4.10 Relación causa-efecto en la degradación de aceites lubricantes.....	123
1.4.11 Problemas en el motor y caja de cambios derivados de la degradación del aceite lubricante	126
CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS	129
2.1 INTRODUCCIÓN.....	129
2.1.1 Propósito y alcance: Descripción metodológica y aplicación de Inteligencia Artificial.....	130

Índice

2.2	DESCRIPCIÓN DE MATERIALES	131
2.2.1	<i>Tipos de aceites usados analizados</i>	131
2.2.1.1	Aceite lubricante mineral grado 15W40 con código OTAN O-1236.....	133
2.2.1.2	Aceite lubricante sintético grado 5W30 con el código OTAN O-1178..	134
2.2.2	<i>Calibración y mantenimiento de equipos de medición de calidad de aceites lubricantes.</i>	136
2.3	TOMA DE MUESTRA.....	137
2.3.1	<i>Procedimiento de la toma y gestión de las muestras de aceite</i>	143
2.3.2	<i>Volumen de muestra y precauciones</i>	143
2.3.3	<i>Asignación de número de orden de trabajo y numeración de las muestras en el proceso de análisis de aceites</i>	144
2.3.4	<i>Comprobación de la documentación</i>	144
2.4	DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS DE ANÁLISIS DE ACEITES USADOS.....	146
2.4.1	<i>Viscosidad</i>	148
2.4.1.1	Materiales y reactivos utilizados	152
2.4.1.2	Equipo utilizado.....	153
2.4.1.3	Preparación de la muestra.....	155
2.4.1.4	Límites de degradación del aceite basados en la viscosidad	155
2.4.1.5	Análisis físico químico y medición	158
2.4.1.6	Cálculo de la viscosidad	158
2.4.1.7	Limpieza y mantenimiento	159
2.4.2	<i>Punto de inflamación</i>	160
2.4.2.1	Método ASTM D92-18: “Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Tester”.....	161
2.4.2.2	Materiales y reactivos utilizados	162

Índice

2.4.2.3	Equipo utilizado.....	162
2.4.2.4	Preparación de la muestra.....	163
2.4.2.5	Límites de degradación del aceite basados en el punto de inflamación	163
2.4.2.6	Análisis físico químico y medición	164
2.4.2.7	Cálculo del punto de inflamación.....	166
2.4.2.8	Limpieza y Mantenimiento.....	166
2.4.3	<i>Número de acidez total (TAN)</i>	167
2.4.3.1	Materiales y reactivos utilizados	168
2.4.3.2	Equipo utilizado.....	171
2.4.3.3	Preparación de la muestra.....	172
2.4.3.4	Límites de degradación del aceite basados en el TAN	173
2.4.3.5	Análisis físico químico y medición	174
2.4.3.6	Cálculo del número de acidez total (TAN).....	174
2.4.3.7	Limpieza y Mantenimiento.....	174
2.4.4	<i>Número de basicidad total (TBN)</i>	175
2.4.4.1	Materiales y reactivos utilizados	176
2.4.4.2	Equipo utilizado.....	177
2.4.4.3	Preparación de la muestra.....	178
2.4.4.4	Límites de degradación del aceite basados en el TBN	179
2.4.4.5	Análisis físico químico y medición	181
2.4.4.6	Cálculo del número de basicidad total.....	181
2.4.4.7	Limpieza y Mantenimiento.....	182
2.4.5	<i>Análisis de elementos de desgaste</i>	182
2.4.5.1	Materiales y reactivos utilizados	186
2.4.5.2	Equipo utilizado.....	187

Índice

2.4.5.3	Preparación de la muestra.....	187
2.4.5.4	Límites de degradación del aceite basados en los elementos de desgaste	188
2.4.5.5	Análisis físico químico y medición	195
2.4.5.6	Cálculo de los elementos de desgaste.....	196
2.4.5.7	Limpieza y Mantenimiento.....	196
2.4.6	Contenido en agua.....	196
2.4.6.1	Materiales y reactivos utilizados	198
2.4.6.2	Equipo utilizado.....	199
2.4.6.3	Preparación de la muestra.....	199
2.4.6.4	Límites de degradación del aceite basados en el contenido en agua	200
2.4.6.5	Análisis físico químico y medición	201
2.4.6.6	Cálculo del contenido en agua.....	202
2.4.6.7	Limpieza y Mantenimiento.....	202
2.5	EQUIPAMIENTO FOTOGRÁFICO	203
2.5.1	Cámara fotográfica	203
2.5.1.1	Cámara réflex	206
2.5.1.1.1	Especificaciones técnicas de la cámara fotográfica modelo Canon EOS 100D.....	206
2.5.1.1.2	Características del objetivo Canon EF-S 18-55mm f/3.5-5.6 IS STM	208
2.5.1.2	Cámara endoscópica	209
2.5.1.2.1	Especificaciones técnicas	209
2.5.1.3	Comparativa de cámaras fotográficas	210
2.5.2	Equipamiento adicional.....	212
2.5.2.1	Trípode.....	212
2.5.2.2	Iluminación.....	213

Índice

2.5.2.3	Maletín rugerizado.....	214
2.5.2.3.1	Descripción del maletín y sus componentes.....	215
2.5.2.3.2	Disposición interna del maletín	220
2.6	SELECCIÓN DEL RECIPIENTE.....	220
2.7	PROCEDIMIENTOS FOTOGRÁFICOS	226
2.7.1	<i>Protocolo de fotografía a las muestras de aceite</i>	226
2.7.2	<i>Configuración de la cámara fotográfica</i>	231
2.7.2.1	Velocidad de obturación	232
2.7.2.2	Apertura del diafragma.....	232
2.7.2.3	Sensibilidad ISO	233
2.7.3	<i>Tipos de fotografía realizada</i>	234
2.7.3.1	Fotografía en crisol.....	235
2.7.3.1.1	Proceso de colocación del aceite en el recipiente de cerámica.....	236
2.7.3.1.2	Equipo y configuración	237
2.7.3.1.3	Enfoque de la imagen	240
2.7.3.2	Fotografía en cubeta espectroscópica dentro de caja con LED	243
2.7.3.2.1	Proceso de colocación del aceite en cubeta	244
2.7.3.2.2	Equipo y configuración	245
2.7.3.2.3	Enfoque de la imagen	246
2.7.3.3	Fotografía con cámara endoscópica	250
2.7.3.3.1	Equipo y configuración	254
2.7.3.4	Fotografía en maletín rugerizado.....	257
2.7.3.4.1	Procedimiento para la utilización del maletín	258
2.8	INTELIGENCIA ARTIFICIAL	260
2.8.1	<i>Aprendizaje automático (Machine Learning, ML)</i>	262
2.8.2	<i>Aprendizaje profundo (Deep Learning)</i>	264

Índice

2.8.2.1	Redes neuronales artificiales	264
2.8.2.2	Estructura y Evolución de las Redes Neuronales Artificiales	270
2.8.3	<i>Mecanismos de aprendizaje en redes neuronales</i>	274
2.8.3.1	Cómo funciona el aprendizaje profundo: Red neuronal parametrizada por sus pesos	274
2.8.3.2	Aprendizaje de una red neuronal a clasificar imágenes. Cálculo de los valores de pesos y sesgos.	278
2.8.3.2.1	Función de activación SOFTMAX.....	279
2.8.3.2.2	La función de pérdida	280
2.8.3.2.3	Algoritmo del Descenso del gradiente y su implementación	288
2.8.3.2.4	Algoritmo de Retro-propagación.....	291
2.8.3.3	Funciones de activación en redes neuronales	299
2.8.4	<i>Redes neuronales convolucionales (CNN)</i>	303
2.8.4.1	Principios y arquitectura de las CNN	305
2.8.4.1.1	Capa de convolución	308
2.8.4.1.2	Capa de agrupación o pooling	314
2.8.4.1.3	Capa fully-connected.....	318
2.8.4.2	Parámetros entrenables en una red neuronal convolucional (CNN).	320
2.8.4.3	Redes residuales (ResNets)	323
2.8.4.3.1	ResNet34	327
2.8.4.3.2	ResNet50	329
2.8.4.4	Estrategia para la distribución y optimización de las imágenes	331
2.8.5	<i>Cuaderno Jupyter</i>	333
2.8.5.1	Jupyter Notebook.....	333
2.8.5.2	Python.....	334
CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN		336
3.1	INTRODUCCIÓN.....	336

Índice

3.2	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	337
3.2.1	<i>Carro de combate Leopard y tipo de aceite: O-1178</i>	338
3.2.1.1	Medidas de centralización, dispersión y forma	339
3.2.1.2	Análisis de correlación	347
3.2.1.3	Análisis gráfico	350
3.2.1.3.1	Histogramas de frecuencias	350
3.2.1.3.2	Gráficos de caja y bigotes	353
3.2.1.3.3	Gráficos de dispersión	357
3.2.1.3.4	Diagramas QQ (Cuantil-Cuantil)	361
3.2.1.4	Evaluación de la normalidad	363
3.2.1.5	Análisis de componentes principales	365
3.2.1.6	Regresión logística binaria	368
3.2.2	<i>Carro de combate Leopard y tipo de aceite: O-1236</i>	371
3.2.3	<i>Medidas de centralización, dispersión y forma</i>	371
3.2.3.1	Análisis de correlación	377
3.2.3.2	Análisis gráfico	379
3.2.3.2.1	Histogramas de frecuencias para el aceite O-1236	380
3.2.3.2.2	Gráficos de caja y bigotes	383
3.2.3.2.3	Gráficos de dispersión	386
3.2.3.2.4	Diagramas QQ-Plot (Cuantil-Cuantil)	390
3.2.3.3	Evaluación de la normalidad	392
3.2.3.4	Análisis de componentes principales	393
3.2.3.5	Regresión logística binaria	397
3.2.4	<i>Gestión y tratamiento de los datos</i>	400
3.2.4.1	Descripción de la aplicación utilizada para la gestión de las muestras de aceite	400

Índice

3.3	PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL ACEITE	412
3.3.1	<i>Línea de referencia</i>	412
3.3.2	<i>Análisis de los resultados</i>	417
3.3.2.1	Límites de precaución y alarma para la viscosidad a 40 °C de los aceites O-1178 y O-1236.....	419
3.3.2.2	Identificación de los equipos lubricados	422
3.3.2.3	Análisis de la concentración de elementos metálicos en aceites lubricantes.....	428
3.3.2.3.1	Propiedades físicas del cobre y plomo	430
3.3.2.3.2	Mecanismos de desgaste afectando la composición del aceite.....	434
3.3.2.4	Análisis gráfico de los elementos de desgaste en los aceites lubricantes	435
3.3.2.4.1	Análisis de casos para el aceite lubricante O-1178	435
3.3.2.4.2	Análisis de casos para el aceite lubricante O-1236	444
3.4	PRINCIPALES DIFICULTADES ENCONTRADAS PARA FOTOGRAFIAR ACEITES	453
3.4.1	<i>Reflectividad del aceite</i>	454
3.4.2	<i>Viscosidad y movimiento</i>	455
3.4.3	<i>Translucidez y fondo fotográfico</i>	455
3.4.4	<i>Saturación del color</i>	456
3.4.5	<i>Enfoque de la imagen</i>	456
3.5	VENTAJAS DE LA UTILIZACIÓN DEL MALETÍN RUGERIZADO.....	458
3.5.1	<i>Efectos sobre la calidad de las imágenes</i>	458
3.5.2	<i>Portabilidad y eficiencia en el análisis de campo</i>	459
3.5.3	<i>Comparación con otros métodos</i>	460
3.6	APLICACIÓN DE ALGORITMOS INTELIGENTES EN EL CONTROL DE CALIDAD DE LOS ACEITES LUBRICANTES.....	461

Índice

3.6.1	<i>Técnicas inteligentes y su aplicación en la predicción de la calidad del aceite lubricante a partir de imágenes capturadas</i>	461
3.6.2	<i>Metodología</i>	462
3.6.2.1	Descripción del Modelo Utilizado (ResNet-34).....	462
3.6.2.2	Configuración de los Experimentos	463
3.6.2.3	Preparación de Datos	464
3.6.3	<i>Diseño y validación de los modelos Resnet-34</i>	468
3.6.3.1	Análisis del Grupo 1: Fotos en crisol y cámara réflex	469
3.6.3.1.1	Optimización de la última capa para el aceite O-1178	469
3.6.3.1.2	Optimización de todas las capas para el aceite O-1178.....	472
3.6.3.1.3	Optimización de la última capa para el aceite O-1236.....	475
3.6.3.1.4	Optimización de todas las capas para el aceite O-1236.....	479
3.6.3.1.5	Comparación general entre la aplicación del modelo ResNet-34 en el control de calidad de los aceites O-1178 y O-1236 para el Grupo 1	483
3.6.3.2	Análisis de resultados en el Grupo 2: Fotografías en cubeta usando cámara réflex	484
3.6.3.2.1	Optimización de la última capa para el aceite O-1178	485
3.6.3.2.2	Optimización de todas las capas para el aceite O-1178.....	487
3.6.3.2.3	Optimización de la última capa para el aceite O-1236.....	491
3.6.3.2.4	Optimización de todas las capas para el aceite O-1236.....	493
3.6.3.2.5	Comparación general entre la aplicación del modelo ResNet-34 en el control de calidad de los aceites O-1178 y O-1236 para el Grupo 2	496
3.6.3.3	Análisis de resultados en el grupo 3: Fotografías en cubeta usando cámara endoscópica	497
3.6.3.3.1	Optimización de la última capa para el aceite O-1178	498
3.6.3.3.2	Optimización de todas las capas para el aceite O-1178.....	501
3.6.3.3.3	Optimización de la última capa para el aceite O-1236.....	503

Índice

3.6.3.3.4 Optimización de todas las capas para el aceite O-1236.....	507
3.6.3.3.5 Comparación general entre la aplicación del modelo ResNet-34 en el control de calidad de los aceites O-1178 y O-1236 para el Grupo 3.....	511
3.6.3.4 Análisis de resultados en el grupo 4: Fotografías con cubeta en maletín y usando cámara endoscópica	513
3.6.3.4.1 Optimización de la última capa para el aceite O-1178.....	513
3.6.3.4.2 Optimización de todas las capas para el aceite O-1178.....	517
3.6.3.4.3 Optimización de la última capa para el aceite O-1236.....	520
3.6.3.4.4 Optimización de todas las capas para el aceite O-1236.....	524
3.6.3.4.5 Comparación general entre la aplicación del modelo ResNet-34 en el control de calidad de los aceites O-1178 y O-1236 para el Grupo 4.....	528
3.6.4 Análisis comparativo de los resultados	529
3.6.4.1 Impacto de las estrategias de optimización y condiciones de captura en el rendimiento del modelo	530
3.6.4.1.1 Comparación entre la optimización de la última capa y la optimización completa del modelo ResNet-34.....	532
3.6.4.1.2 Comparación entre la Regresión Logística Binaria y ResNet-34 en la clasificación de los aceites lubricantes O-1178 y O-1236.....	533
3.6.4.2 Evaluación del desempeño del Modelo ResNet-34 en la clasificación de imágenes de los aceites O-1178 y O-1236	537
3.6.4.2.1 Evaluación del rendimiento del modelo ResNet-34 en la clasificación de imágenes del Grupo 1	537
3.6.4.2.2 Evaluación del rendimiento del modelo ResNet-34 en la clasificación de imágenes del Grupo 2	539
3.6.4.2.3 Evaluación del rendimiento del modelo ResNet-34 en la clasificación de imágenes del Grupo 3	540
3.6.4.2.4 Evaluación del rendimiento del modelo ResNet-34 en la clasificación de imágenes del Grupo 4	542

Índice

3.6.4.3	Análisis de la influencia de las características visuales en el rendimiento cuantitativo del modelo de IA	543
3.6.4.3.1	Impacto de la tonalidad y homogeneidad del color en la precisión de clasificación	544
3.6.4.3.2	Efecto del brillo y contraste en el desempeño del modelo ResNet-34	544
3.6.4.3.3	Influencia de la textura y complejidad superficial en la exactitud de la clasificación	545
3.6.4.4	Conclusiones generales de los resultados obtenidos del modelo ResNet-34	546
3.6.4.4.1	Ventajas operativas y simplificación del proceso de clasificación con el modelo ResNet-34 frente a la Regresión Logística Binaria	548
CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES.....		550
BIBLIOGRAFÍA		554
APÉNDICES		565

Índice de tablas

Tabla 1-1: Clasificación SAE de los aceites de motor según la SAE J300	17
Tabla 1-2: Clasificación SAE de los aceites lubricantes de caja de cambios según la SAE J306.....	18
Tabla 1-3: Clasificación de la viscosidad ISO según ASTM D2422	22
Tabla 1-4: Productos con su número OTAN.....	23
Tabla 1-5: Tabla de equivalencia de viscosidad	25
Tabla 1-6: Tipo de aditivo y elemento detectable por análisis espectrométrico	44
Tabla 1-7: Componente y función de la caja de cambios	52
Tabla 1-8: Regímenes de lubricación en función del espesor específico de la película (λ)	72
Tabla 1-9: Elemento metálico y su posible fuente.....	106
Tabla 1-10: Elementos comunes en el análisis de aceite lubricante y sus posibles fuentes	122
Tabla 1-11: Tipos de contaminantes en aceites lubricantes (JOAP).....	123
Tabla 1-12: Relación causa-efecto en la degradación de aceites lubricantes: Propiedades fisicoquímicas del aceite lubricante.....	125
Tabla 1-13: Determinación del tipo de problema en motor en función de los resultados: Propiedades fisicoquímicas del aceite lubricante	126
Tabla 1-14: Determinación del tipo de problema en la caja de cambios en función de los resultados: Propiedades fisicoquímicas del aceite lubricante.....	127
Tabla 2-1: Propiedades generales de los aceites O-1236 y O-1178.....	132
Tabla 2-2: Ensayos fisicoquímicos realizados al aceite usado y sus especificaciones	146
Tabla 2-3: Información aportada en cada uno de los ensayos realizados	147
Tabla 2-4: Método estándar para la determinación de la viscosidad cinemática.....	152
Tabla 2-5: Causas que producen cambios de la viscosidad del aceite.....	155

Índice de tablas

Tabla 2-6: Criterio de aceptación de la viscosidad cinemática.....	156
Tabla 2-7: Método estándar para la determinación del punto de inflamación.....	160
Tabla 2-8: Límites del punto de inflamación del O-1236 y O-1178.....	164
Tabla 2-9: Método estándar para la determinación del TAN en aceites lubricantes....	168
Tabla 2-10: Límites del TAN del O-1236 y O-1178.....	173
Tabla 2-11: Métodos estándar para la determinación del TBN en aceites lubricantes	176
Tabla 2-12: Límites del TBN del O-1236 y O-1178.....	180
Tabla 2-13: Factores que afectan al valor del TBN	180
Tabla 2-14: Método estándar para la determinación de elementos de desgaste y contaminantes en aceites lubricantes	185
Tabla 2-15: Elementos de desgaste en motores de combustión interna y cajas de cambios	189
Tabla 2-16: Elementos de desgaste y contaminantes para el O-1236.....	191
Tabla 2-17: Elementos de desgaste y contaminantes para el O-1178.....	192
Tabla 2-18: Elementos comunes en el análisis de lubricantes.....	195
Tabla 2-19: Método estándar para la determinación del agua en aceites lubricantes..	197
Tabla 2-20: Límites del contenido en agua del O-1236 y O-1178	201
Tabla 2-21: Tabla comparativa de las cámaras Sony DSC-RX100M4, Canon EOS 100D (DS126441) y objetivo utilizado	204
Tabla 2-22: Comparación de Cámaras: Réflex vs. Endoscópica.....	210
Tabla 2-23: Número de fotografías realizadas.....	240
Tabla 2-24: Funciones de activación utilizadas en la última capa dependiendo de la tarea	320
Tabla 2-25: Parámetros e hiperparámetros para una CNN	322
Tabla 2-26: Resumen de las estructuras de los cinco tipos de ResNet más comunes .	326
Tabla 3-1: Medidas de centralización, de dispersión y de forma para el aceite O-1178	340

Índice de tablas

Tabla 3-2: Tipo de distribución en función de la Curtosis para el aceite O-1178	342
Tabla 3-3: Evaluación estadística y aplicaciones prácticas de variables clave en el aceite lubricante O-1178	344
Tabla 3-4: Matriz de correlación para el aceite O-1178	347
Tabla 3-5: Tipo de relación lineal entre variables.....	348
Tabla 3-6: Test de Shapiro-Wilk para el aceite O-1178.....	364
Tabla 3-7: Coeficientes resultantes del análisis de componentes principales (Autovectores) para el O-1178	366
Tabla 3-8: Diagrama de sedimentación	367
Tabla 3-9: Resultados de la regresión logística binaria	368
Tabla 3-10: Porcentaje de éxito de la regresión logística binaria.....	369
Tabla 3-11: Matriz de confusión.....	369
Tabla 3-12: Resultados de la regresión logística binaria eliminando variables no significativas.....	370
Tabla 3-13: Porcentaje de éxito de la regresión logística binaria eliminando variables no significativas.....	370
Tabla 3-14: Matriz de confusión eliminando variables no significativas.....	370
Tabla 3-15: Medidas de centralización, de dispersión y de forma para el aceite O-1236	373
Tabla 3-16: Análisis estadístico y aplicación práctica para las variables del O-1236 .	374
Tabla 3-17: Tipo de distribución en función de la Curtosis para el aceite O-1236	376
Tabla 3-18: Matriz de correlación para el aceite O-1236	378
Tabla 3-19: Test de Shapiro-Wilk para el aceite O-1236.....	393
Tabla 3-20: Coeficientes resultantes del análisis de componentes principales (Autovectores) para el O-1236	395
Tabla 3-21: Diagrama de sedimentación	396
Tabla 3-22: Resultados de la regresión logística binaria	397
Tabla 3-23: Porcentaje de éxito de la regresión logística binaria	398

Índice de tablas

Tabla 3-24: Matriz de confusión del O-1236.....	398
Tabla 3-25: Resultados de la regresión logística binaria eliminando variables no significativas	399
Tabla 3-26: Porcentaje de éxito de la regresión logística binaria eliminando variables no significativas	399
Tabla 3-27: Matriz de confusión eliminando variables no significativas	399
Tabla 3-28: Línea base del aceite multigrado O-1178 (lubricante de la caja de cambios) y O-1236 (lubricante del motor diésel).....	412
Tabla 3-29: Media y desviación estándar de la viscosidad a 40°C de los aceites O-1178 y O-1236	421
Tabla 3-30: Límites de precaución y alarma para la viscosidad a 40°C del O-1236 y O-1178	421
Tabla 3-31: Elementos de un motor diésel y transmisiones Posible origen	422
Tabla 3-32: Familias de elementos en motores diésel	427
Tabla 3-33: Muestras con altas concentraciones de cobre y plomo en muestras de O-1178 para los vehículos en estudio	429
Tabla 3-34: Concentraciones de cobre en muestras de O-1178 para otros vehículos que no forman parte del estudio	432
Tabla 3-35: Resultados de los análisis de aceite usado multigrado O-1236 (15W40)	432
Tabla 3-36: Análisis de aceites de otros vehículos a los estudiados	434
Tabla 3-37: Separación de las imágenes del Grupo 1 en crisol y con cámara réflex (Canon EOS 100D)	465
Tabla 3-38: Separación de las imágenes del Grupo 2 en cubeta y con cámara réflex (Canon EOS 100D).....	466
Tabla 3-39: Separación de las imágenes del Grupo 3 en cubeta y con cámara endoscópica	467
Tabla 3-40: Separación de las imágenes del Grupo 4 en maletín y con cámara endoscópica	468

Índice de tablas

Tabla 3-41: Parámetros utilizados para la ResNet-34 con la última capa modificada para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 1	470
Tabla 3-42: Ciclos de entrenamiento-validación interna de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 1	471
Tabla 3-43: Matriz de confusión de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 1	472
Tabla 3-44: Porcentaje de éxito de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 1	472
Tabla 3-45: Parámetros utilizados para la ResNet34 con todas las capas modificadas para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 1	473
Tabla 3-46: Ciclos de entrenamiento-validación interna de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 1	474
Tabla 3-47: Matriz de confusión de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 1	474
Tabla 3-48: Porcentaje de éxito de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 1	475
Tabla 3-49: Parámetros utilizados para la ResNet34 con la última capa modificada para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 1	476
Tabla 3-50: Ciclos de entrenamiento-validación interna de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 1	477
Tabla 3-51: Matriz de confusión de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 1	477
Tabla 3-52: Porcentaje de éxito de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 1	478
Tabla 3-53: Parámetros utilizados para la ResNet34 con todas las capas modificadas para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 1	480

Índice de tablas

Tabla 3-54: Ciclos de entrenamiento-validación interna de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 1	481
Tabla 3-55: Matriz de confusión de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 1	481
Tabla 3-56: Porcentaje de éxito de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 1	482
Tabla 3-57: Parámetros utilizados para la ResNet34 con la última capa modificada para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 2	486
Tabla 3-58: Ciclos de entrenamiento-validación interna de la ResNet34 con la optimización de la última capa para la clasificación de muestras de aceite O-1178 del Grupo 2	486
Tabla 3-59: Matriz de confusión de la ResNet34 con la optimización de la última capa para la clasificación de muestras de aceite O-1178 del Grupo 2	487
Tabla 3-60: Porcentaje de éxito de la ResNet34 con la optimización de la última capa para la clasificación de muestras de aceite O-1178 del Grupo 2	487
Tabla 3-61: Parámetros utilizados para la ResNet34 con todas las capas modificadas para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 2	489
Tabla 3-62: Ciclos de entrenamiento-validación interna de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 2	489
Tabla 3-63: Matriz de confusión de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 2	489
Tabla 3-64: Porcentaje de éxito de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 2	490
Tabla 3-65: Parámetros utilizados para la ResNet34 con la última capa modificada para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 2	491
Tabla 3-66: Ciclos de entrenamiento-validación interna de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 2	492

Índice de tablas

Tabla 3-67: Matriz de confusión de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 2.....	493
Tabla 3-68: Porcentaje de éxito de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 2.....	493
Tabla 3-69: Parámetros utilizados para la ResNet34 con todas las capas modificadas para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 2.....	494
Tabla 3-70: Ciclos de entrenamiento-validación interna de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 2.....	495
Tabla 3-71: Matriz de confusión de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 2.....	495
Tabla 3-72: Porcentaje de éxito de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 2.....	496
Tabla 3-73: Parámetros utilizados para la ResNet34 con la última capa modificada para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 3.....	499
Tabla 3-74: Ciclos de entrenamiento-validación interna de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 3.....	499
Tabla 3-75: Matriz de confusión de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 3.....	500
Tabla 3-76: Porcentaje de éxito de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 3.....	500
Tabla 3-77: Parámetros utilizados para la ResNet34 con todas las capas modificadas para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 3.....	502
Tabla 3-78: Ciclos de entrenamiento-validación interna de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 3.....	502
Tabla 3-79: Matriz de confusión de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 3.....	503

Índice de tablas

Tabla 3-80: Porcentaje de éxito de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 3.....	503
Tabla 3-81: Parámetros utilizados para la ResNet34 con la última capa modificada para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 3.....	504
Tabla 3-82: Ciclos de entrenamiento-validación interna de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 3.....	505
Tabla 3-83: Matriz de confusión de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 3.....	506
Tabla 3-84: Porcentaje de éxito de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 3.....	506
Tabla 3-85: Parámetros utilizados para la ResNet34 con todas las capas modificadas para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 3.....	508
Tabla 3-86: Ciclos de entrenamiento-validación interna de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 3.....	509
Tabla 3-87: Matriz de confusión de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 3.....	509
Tabla 3-88: Porcentaje de éxito de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 3.....	510
Tabla 3-89: Parámetros utilizados para la ResNet34 con la última capa modificada para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 4.....	514
Tabla 3-90: Ciclos de entrenamiento-validación interna de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 4.....	515
Tabla 3-91: Matriz de confusión de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 4.....	515
Tabla 3-92: Porcentaje de éxito de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 4.....	516

Índice de tablas

Tabla 3-93: Parámetros utilizados para la ResNet34 con todas las capas modificadas para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 4.....	518
Tabla 3-94: Ciclos de entrenamiento-validación interna de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 4.....	518
Tabla 3-95: Matriz de confusión de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 4.....	519
Tabla 3-96: Porcentaje de éxito de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 4.....	519
Tabla 3-97: Parámetros utilizados para la ResNet34 con la última capa modificada para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 4.....	521
Tabla 3-98: Ciclos de entrenamiento-validación interna de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 4.....	522
Tabla 3-99: Matriz de confusión de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 4.....	522
Tabla 3-100: Porcentaje de éxito de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 4.....	523
Tabla 3-101: Parámetros utilizados para la ResNet34 con todas las capas modificadas para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 4.....	525
Tabla 3-102: Ciclos de entrenamiento-validación interna de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 4.....	525
Tabla 3-103: Matriz de confusión de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 4.....	526
Tabla 3-104: Porcentaje de éxito de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 4.....	526
Tabla 3-105: Resultados de los diferentes modelos, así como las pérdidas tanto en el entrenamiento como en la validación interna.....	531

Índice de tablas

Tabla 3-106: Resultados de la Regresión Logística Binaria y el modelo ResNet-34 en la clasificación del aceite O-1178.....	534
Tabla 3-107: Resultados de la Regresión Logística Binaria y el modelo ResNet-34 en la clasificación del aceite O-1236.....	536
Tabla 3-108: Datos y resultados de las validaciones a ciegas de los diferentes modelos empleados para cada tipo de ensayo y aceite, así como el número de imágenes mal clasificadas.....	547

Índice de figuras

Figura 1-1: Tipos de bases lubricantes y rango de temperatura de operación	13
Figura 1-2: Comparación de los grados SAE de aceites de motor y transmisión	21
Figura 1-3: Suspensión oleosa de producto de oxidación polar	30
Figura 1-4: Dispersantes usados en aceites de motor para controlar la aglomeración de las partículas de carbonilla	31
Figura 1-5: Cizallamiento de las superficies metálicas debido a aditivos EP.	33
Figura 1-6: Aditivo de extrema presión.....	34
Figura 1-7: Los aditivos AW y EP reducen el desgaste en condiciones límite	35
Figura 1-8: Efectos de la oxidación sobre la viscosidad y la acidez en un aceite mineral	36
Figura 1-9: Mecanismo de funcionamiento de los inhibidores de óxido	40
Figura 1-10: Cambio de tamaño de los mejoradores de viscosidad con la temperatura	41
Figura 1-11: Efecto de los aditivos del punto de fluidez: a) sin aditivo; b) con aditivo	42
Figura 1-12: Motor MTU MB 873 Ka-501 vista general (izquierda) y motor seccionado (derecha) [28]	46
Figura 1-13: Circuito de lubricación	47
Figura 1-14: Esquema de una bomba de engranajes	47
Figura 1-15: Filtros de aceite motor	48
Figura 1-16: Refrigeración de los pistones	50
Figura 1-17: Transmisión, vista delantera derecha	51
Figura 1-18: Esquema de la transmisión	52
Figura 1-19: Egipcios usando un lubricante para mover estatua, El-Bersheh, circa 1880	59

Índice de figuras

Figura 1-20: Perfil de superficie generado por ordenador (tamaño total del barrido $20 \times 20 \mu\text{m}^2$)	60
Figura 1-21: Tribología: Ciencia interdisciplinar.....	60
Figura 1-22: Cuerpo que se desliza y rueda sobre una superficie horizontal, siendo la W la fuerza normal y F la fuerza de rozamiento	61
Figura 1-23: Representación del área de contacto aparente y área de contacto real	62
Figura 1-24: Dos superficies bajo presión: a) en contacto; b) sin contacto	62
Figura 1-25: Tipos de interacciones entre dos superficies deslizantes.....	63
Figura 1-26: Esquema de rotura durante el cizallamiento	65
Figura 1-27: Desgaste por adherencia en un acero inoxidable	65
Figura 1-28: Esquemas de actuación en el desgaste abrasivo.....	66
Figura 1-29: Desgaste por abrasión en un acero inoxidable	66
Figura 1-30: Efecto de la abrasión de dos cuerpos	66
Figura 1-31: Efectos de la abrasión de tres cuerpos	67
Figura 1-32: Eliminación de elementos de material producidos por el desgaste por fatiga	68
Figura 1-33: Flujo de partículas abrasivas que choca con una superficie a gran velocidad	68
Figura 1-34: Desgaste corrosivo de un rodamiento de rodillos mediante micrografía SEM	69
Figura 1-35: Superficies separadas por una capa límite de lubricante	71
Figura 1-36: Espesor de la película lubricante entre dos superficies sólidas	71
Figura 1-37: Lubricación límite	72
Figura 1-38: Lubricación mixta	73
Figura 1-39: Lubricación hidrodinámica o elastohidrodinámica dependiendo del espesor específico de la película	73
Figura 1-40: Gráfica de la curva de Stribeck	74

Índice de figuras

Figura 1-41: Efectos de deformación elástica local en el perfil de la película lubricante	76
Figura 1-42: Curva de Stribeck generalizada (fricción) y separación.....	77
Figura 1-43: Diagrama de Stribeck incluyendo las regiones de funcionamiento de varios componentes del motor.....	78
Figura 1-44: Problemas asociados a la lubricación en un motor de combustión interna	81
Figura 1-45: Producción de los barros (sludge) en la tapa de balancines	97
Figura 1-46: Identificación de la oxidación y la nitración mediante espectroscopía infrarroja (FT-IR)	100
Figura 1-47: Concentración de los elementos metálicos de desgaste con el paso del tiempo	104
Figura 1-48: Efectos derivados de la combustión	113
Figura 2-1: Toma de muestra de aceite	139
Figura 2-2: Kit de extracción de muestras	139
Figura 2-3: Bote porta muestras.....	140
Figura 2-4: Jeringa extractora con adaptador.....	141
Figura 2-5: Bomba de extracción de muestra de aceite	141
Figura 2-6: Medición de la viscosidad cinemática mediante viscosímetro capilar según ASTM D445	149
Figura 2-7: Viscosímetro Cannon CAV-2100 utilizado para determinar la viscosidad a 40°C y 100°C.....	150
Figura 2-8: Equipo electrónico Herzog Automatic Flash Point Cleveland (ASTM D92)	162
Figura 2-9: Tendencia del TAN de un aceite con aditivos	167
Figura 2-10: Equipo utilizado para medir el número de acidez total	171
Figura 2-11: Evolución del TBN y posibles modificaciones en sus valores	175
Figura 2-12: Equipo utilizado en la determinación del TBN	177

Índice de figuras

Figura 2-13: Evolución del TBN por factores externos	181
Figura 2-14: Punto de inflexión en la titulación de la muestra	182
Figura 2-15: Metalurgia de un motor Detroit Diesel Allison 3-53	183
Figura 2-16: Crecimiento de las partículas de desgaste mecánico.....	184
Figura 2-17: Tipo de desgaste en función del número de la concentración de partículas y su tamaño	185
Figura 2-18: Dimensiones del electrodo de disco de grafito	186
Figura 2-19: Espectrómetro de emisión atómica de electrodo de disco giratorio cerrado (izquierda) y abierto (derecha)	187
Figura 2-20: Evolución de elementos de desgaste con el paso del tiempo	192
Figura 2-21: Equipo para determinar la cantidad en agua	199
Figura 2-22: Cámara Sony DSC-RX100M4	203
Figura 2-23: Cámara Canon EOS 100D (DS126441).....	204
Figura 2-24: Trípode utilizado en la realización de las fotografías.....	212
Figura 2-25: Trípode usado para fotografía en plato (izquierda) vs trípode usado en fotografía de cubeta (derecha)	213
Figura 2-26: Iluminación complementaria de la fotografía en crisol.....	214
Figura 2-27: Componentes del modelo fotográfico del maletín	215
Figura 2-28: Maletín rugerizado	216
Figura 2-29: Cubeta (a) y estructura utilizada (b) para el modelo fotográfico del maletín	216
Figura 2-30: Diseño de la estructura porta muestra (a); estructura para colocar la cubeta (b); estructura a través de la cual pasa la cámara endoscópica (c)	217
Figura 2-31: Soporte fotográfico visto desde diferentes ángulos para fotografiar muestras de aceite en el maletín	218
Figura 2-32: Tira LED utilizada para iluminar la muestra dentro del maletín.....	218
Figura 2-33: Iluminación con dos tiras LED y el uso de batería externa.....	219
Figura 2-34: Colocación de la cámara endoscópica en el maletín rugerizado	219

Índice de figuras

Figura 2-35: Maletín sin espuma de sujeción (izquierda) y con espuma de sujeción (derecha)	220
Figura 2-36: Recipientes iniciales	221
Figura 2-37: Prueba del comportamiento de diferentes recipientes con el aceite	221
Figura 2-38: Dispersión del aceite en el plato	222
Figura 2-39: Irregularidades del primer recipiente estudiado	222
Figura 2-40: Símbolos del recipiente que pueden afectar al posterior análisis con IA	223
Figura 2-41: Dispersión del aceite en el tercer recipiente	224
Figura 2-42: Recipientes cerámicos (A: crisol esmaltado y brillante; B: crisol no esmaltado y mate)	225
Figura 2-43: Recipiente seleccionado (Capacidad de 100 mL)	226
Figura 2-44: Modelo del segundo protocolo fotográfico	227
Figura 2-45: Detalle del segundo protocolo fotográfico	228
Figura 2-46: Reflejos en el segundo protocolo fotográfico	229
Figura 2-47: Doble sistema de iluminación	229
Figura 2-48: Toma de fotografía a diversos ángulos (La imagen 1 y 2 se trata de aceite O-1178 y la imagen 3 y 4 O-1236)	230
Figura 2-49: Velocidad de obturación	232
Figura 2-50: Apertura del diafragma	233
Figura 2-51: Apertura de diafragma y profundidad de campo	233
Figura 2-52: Colocación de las muestras previamente a ser analizadas	237
Figura 2-53: Colocación de la cámara fotográfica en el trípode	238
Figura 2-54: Posiciones del cuenco porta muestras para un aceite O-1178	239
Figura 2-55: Identificación fotográfica del número de Orden de Trabajo y número de muestra para una muestra de aceite O-1178	240
Figura 2-56: Problemas de enfoque en los recipientes utilizados	241
Figura 2-57: Imagen de contraste para facilitar el enfoque de forma manual (trama)	241

Índice de figuras

Figura 2-58: Colocación de la trama en el aceite para realizar el enfoque	242
Figura 2-59: Visión de la trama en la cámara.....	242
Figura 2-60: Enfoque de la trama.....	243
Figura 2-61: Disposición del escenario fotográfico 2	244
Figura 2-62: Muestra de aceite contenido en la cubeta transparente Kartell LABWARE para espectrofotometría	244
Figura 2-63: Colocación de las cubetas.....	245
Figura 2-64: Escenario fotográfico 2º para fotografiar una muestra de aceite en cubeta	247
Figura 2-65: Cubetas con muestra de aceite en la que se ven contaminantes.....	247
Figura 2-66: Procedimiento de enfoque en el escenario fotográfico 2º	248
Figura 2-67: Fotografía de cada una de las cuatro caras de la misma cubeta para un aceite O-1178	249
Figura 2-68: Cubeta rellena con aceite de motor(izquierda) y caja de cambios (derecha)	249
Figura 2-69: Cámara endoscópica (modelo Zealtron Industrial Endoscope 3.9mm) .	251
Figura 2-70: Caja de madera que simula el cárter.....	251
Figura 2-71: Sistema para cubrir el recipiente contenedor de la muestra de aceite y la introducción de la cámara endoscópica	252
Figura 2-72: Colocación de la cámara endoscópica.....	252
Figura 2-73: Fotografía del aceite con la cámara endoscópica	253
Figura 2-74: Limitaciones con la cámara endoscópica	253
Figura 2-75: Iluminación de la muestra desde abajo.....	254
Figura 2-76: Fotografía obtenida mediante la cámara endoscópica a un aceite O-1178	255
Figura 2-77: Posiciones de las cuatro caras de la cubeta	256
Figura 2-78: Comparación fotográfica realizada entre las dos cámaras utilizadas: Canon (izquierda) y cámara endoscópica (derecha) para el aceite O-1178 de la OT-10373 ...	256

Índice de figuras

Figura 2-79: OT-10373 muestra 23	257
Figura 2-80: Colocación de cubeta con aceite en el maletín.....	258
Figura 2-81: Distancia de la cubeta a la cámara endoscópica (4cm)	259
Figura 2-82: Fotografía de aceite en el maletín.....	260
Figura 2-83: Inteligencia Artificial, Aprendizaje Automático y Aprendizaje Profundo	261
Figura 2-84: Programación clásica.....	262
Figura 2-85: Esquema del aprendizaje automático	262
Figura 2-86: Neurona biológica	265
Figura 2-87: Neurona biológica y neurona artificial	266
Figura 2-88: Conexión de neuronas: a) Neurona artificial; b) Neurona biológica ; c) Neuronas reales	266
Figura 2-89: Neurona artificial.....	267
Figura 2-90: Ejemplo de cálculo de la salida de una red neuronal	268
Figura 2-91: Red neuronal y neurona	269
Figura 2-92: Representación gráfica de una curva sigmoideal en la que se modifican solamente los pesos(izquierda) y representación gráfica de una curva sigmoideal modificada solamente por el bias (derecha)	270
Figura 2-93: Ejemplo de red neuronal compuesta por tres capas Fully connected	271
Figura 2-94: Perceptrón multicapa.....	272
Figura 2-95: Red neuronal parametrizada por sus pesos.....	275
Figura 2-96: Ejemplo de clasificador lineal	276
Figura 2-97: Ejemplo de clasificador lineal con una imagen de gato	277
Figura 2-98: Ejemplo de clasificador lineal con una imagen de perro.....	277
Figura 2-99: Ejemplo de clasificador lineal con una imagen de un pájaro	278
Figura 2-100: Clasificación de tres imágenes	279
Figura 2-101: Función Softmax	280

Índice de figuras

Figura 2-102: La función de pérdida midiendo la calidad de los resultados.....	281
Figura 2-103: Resultados de la función Softmax	283
Figura 2-104: Representación gráfica de la función de pérdida.....	284
Figura 2-105: Ejemplo de un Forward pass para una imagen determinada	286
Figura 2-106: Cálculo de los scores en el ejemplo de Forward pass	286
Figura 2-107: Cálculo de las probabilidades mediante Softmax en el ejemplo de Forward pass	287
Figura 2-108: Resultado del ejemplo Forward pass a partir de una imagen	288
Figura 2-109: Mínimo local y global	288
Figura 2-110: Descenso por gradiente en una superficie de pérdida 2D	289
Figura 2-111: Descenso por gradiente en una superficie de pérdida 3D.....	290
Figura 2-112: Gradiente de la función de coste	290
Figura 2-113: Elección correcta de la tasa de aprendizaje	291
Figura 2-114: Retro-propagación: Ajuste de pesos	292
Figura 2-115: Función Softmax y Crossentropy como una sola unidad	295
Figura 2-116: Valores de partida para el cálculo de la retro-propagación.....	296
Figura 2-117: Cálculo de los scores a partir de los nuevos valores de w y b.....	298
Figura 2-118: Nuevo proceso forward con los nuevos valores de w y b	298
Figura 2-119: Representación gráfica de la función Sigmoidea	301
Figura 2-120: Función de activación $\tanh(x)$	302
Figura 2-121: Función de activación ReLU	302
Figura 2-122: Estructura típica de una red neuronal convolucional	306
Figura 2-123: Las imágenes pueden dividirse en patrones locales, como bordes, texturas, etc.	306
Figura 2-124: Organización jerárquicamente de diferentes elementos y su combinación para formar partes de objeto	307
Figura 2-125: Ejemplo de convolución con un kernel de 3×3 y con un paso de 1	308

Índice de figuras

Figura 2-126: Ilustración de cómo funciona el filtro o kernel en cada zona de la imagen	309
Figura 2-127: Dimensiones de una matriz	310
Figura 2-128: Ejemplo de convolución 3D y un filtro 3x3	311
Figura 2-129: Ejemplo de convolución 3D con dos filtros 3x3	312
Figura 2-130: Técnica zero-padding	313
Figura 2-131: Aplicación de la técnica zero-padding para evitar la pérdida de información	313
Figura 2-132: Diagrama de red compuesto por la capa de entrada (INPUT), la capa convolucional (CONV), capa de activación (ACT) y la capa Fully connected (FC)...	314
Figura 2-133: Arquitectura de una CNN introduciendo capa de agrupación.....	315
Figura 2-134: Resultado de aplicar un Max pooling de 2x2 con un stride=1 y con stride=2	316
Figura 2-135: Ejemplo de Max pooling a imágenes	316
Figura 2-136: Ejemplo de operación de max-pooling y average-pooling en una matriz R	318
Figura 2-137: Estructura de una CNN incluyendo la capa fully-connected	318
Figura 2-138: CNN en donde las capas fully-connected determinan la categoría a la que pertenece la imagen	319
Figura 2-139: Conexión residual de un bloque de procesamiento	324
Figura 2-140: Bloque residual.....	324
Figura 2-141: Esquema de un bloque residual básico para ResNet-34 (izquierda). Estructura de cuello de botella (bottleneck) para ResNet50/101/150 (derecha)	327
Figura 2-142: Estructura de la ResNet34	328
Figura 2-143: Esquema de la estructura de la ResNet50	330
Figura 2-144: Tratamiento de los datos: entrenamiento, validación y prueba	331
Figura 2-145: Estructura de una CNN y el proceso de propagación hacia adelante y retropropagación	332

Índice de figuras

Figura 3-1: Histogramas más significativos para el aceite O-1178.....	351
Figura 3-2: Gráfico de caja y bigotes del aceite O-1178.....	355
Figura 3-3: Gráfico de dispersión de la viscosidad a 40 y 100°C para el O-1178	357
Figura 3-4: Gráfico de dispersión de la concentración de hierro y aluminio para el O-1178	358
Figura 3-5: Gráfico de dispersión de la concentración de hierro (Fe) y cobre (Cu) para el O-1178	359
Figura 3-6: Gráfico de dispersión de la concentración de aluminio y cobre para el O-1178	359
Figura 3-7: Gráfico de dispersión de la concentración de cobre y plomo para el O-1178	360
Figura 3-8: Diagramas QQ-Plot para el aceite O-1178	363
Figura 3-9: Histograma de frecuencias para propiedades fisicoquímicas y contaminantes del aceite O-1236.....	381
Figura 3-10: Gráfico de caja y bigotes del aceite O-1236.....	383
Figura 3-11: Gráfico de dispersión de la viscosidad a 40 y 100°C para el O-1236	387
Figura 3-12: Gráfico de dispersión de la concentración de hierro y aluminio para el O-1236.....	388
Figura 3-13: Gráfico de dispersión de la concentración de hierro y cobre para el O-1236	388
Figura 3-14: Gráfico de dispersión de la concentración de silicio y molibdeno para el O-1236.....	389
Figura 3-15: Gráfico de dispersión de la concentración de hierro y cromo para el O-1236	389
Figura 3-16: Diagramas QQ-Plot para el aceite O-1236.....	392
Figura 3-17: Variables utilizadas en el base de datos.....	402
Figura 3-18: Formulario inicial	403
Figura 3-19: Búsqueda de órdenes de trabajo	403

Índice de figuras

Figura 3-20: Tipo de aceite asociado a cada orden de trabajo	404
Figura 3-21: Información de la muestra seleccionada	405
Figura 3-22: Informe de las muestras.....	406
Figura 3-23: Fotografías de una muestra en la base de datos.....	407
Figura 3-24: Visualización de las muestras de una orden de trabajo	408
Figura 3-25: Buscador de registros por número de matrícula.....	409
Figura 3-26: Añadir registros en la base de datos	410
Figura 3-27: Eliminar muestra	411
Figura 3-28: Porcentaje de Conforme vs No Conforme para a) aceite de caja de cambios O-1178; b) aceite de motor O-1236.....	417
Figura 3-29: No Conformidades para el aceite multigrado: a) O-1178 (5W30) y b) O-1236 (15W40).....	418
Figura 3-30: Principales elementos metálicos de un motor de combustión.....	424
Figura 3-31: Elementos metálicos de una caja de cambios (Caterpillar 7155).....	425
Figura 3-32: Disminución de las concentraciones de metales en las muestras tras el cambio de aceite (en azul se muestra el cobre y en naranja el plomo).....	436
Figura 3-33: Aumento de la concentración de elementos metálicos tras el cambio de aceite. Posible avería en la caja de cambios (en azul se muestra el cobre y en naranja el plomo).....	436
Figura 3-34: Aumento de la concentración de elementos metálicos tras el cambio de aceite incluyendo la viscosidad a 100 °C (en azul se muestra el cobre, en naranja el plomo y en gris la viscosidad a 100°C)	437
Figura 3-35: Aumento de la concentración de elementos metálicos tras el cambio de aceite incluyendo silicio, aluminio y agua como posible contaminación externa (en azul oscuro se muestra el cobre, en naranja el plomo, en gris el silicio, en amarillo el aluminio y en azul claro el agua).....	438
Figura 3-36: Impacto del cambio de aceite en la concentración de metales (Cu y Pb) en el aceite lubricante O-1178 (en azul se muestra el cobre, en naranja el plomo)	440

Índice de figuras

Figura 3-37: Impacto de no cambiar el aceite en la concentración de metales (Cu y Pb) en el aceite lubricante O-1178 (en azul se muestra el cobre, en naranja el plomo).....	440
Figura 3-38: Aumento en la concentración de elementos metálicos. Desgaste anormal en el aceite O-1178 (en azul se muestra el cobre, en naranja el plomo y en gris el hierro)	441
Figura 3-39: Aumento en la concentración de elementos metálicos. Desgaste anormal en el aceite O-1178. Comprobación de contaminación externa (en azul se muestra el cobre, en naranja el plomo, en gris el silicio y en amarillo, el aluminio).....	441
Figura 3-40: Aumento en la concentración de elementos metálicos. Desgaste anormal en el aceite O-1178. Comprobación de contaminación por agua e influencia de la acidez o basicidad (en azul oscuro se muestra el cobre, en naranja el plomo, en gris el TAN, en amarillo el TBN y en azul claro el agua).....	442
Figura 3-41: Caso 5 (O-1178): Relleno de aceite (en azul se muestra el cobre, en naranja el plomo).....	443
Figura 3-42: Caso 5 (O-1178): Comprobación de relleno de aceite (en azul oscuro se muestra el TAN, en naranja el TBN, en gris el agua, en amarillo la viscosidad a 40° C y en azul claro la viscosidad a 100° C)	443
Figura 3-43: Caso 1 (O-1236): Elementos metálicos (en azul se muestra el cobre, en naranja el plomo, en gris claro el silicio, en amarillo el aluminio y en gris oscuro el hierro)	445
Figura 3-44: Caso 2 (O-1236): Elementos metálicos y posible influencia del polvo atmosférico (en azul se muestra el cobre, en naranja el plomo, en gris claro el silicio, en amarillo el aluminio y en gris oscuro el hierro).....	445
Figura 3-45: Caso 2 (O-1236): Disminución de Molibdeno	447
Figura 3-46: Caso 3 (O-1236): Elementos metálicos por encima del límite de alarma (en azul oscuro se muestra el cobre, en naranja el plomo, en gris el hierro, en amarillo el aluminio, en azul claro el cromo y en verde el silicio).....	449
Figura 3-47: Caso 4 (O-1236): Elementos metálicos por encima del límite de alarma y cambio de aceite (en azul oscuro se muestra el cobre, en naranja el plomo, en gris oscuro el hierro, en amarillo el aluminio y en gris claro el silicio).....	449

Índice de figuras

Figura 3-48: Caso 4 (O-1236): Viscosidad a 40 y 100 °C (en azul se muestra la viscosidad a 40 ° C y en naranja la viscosidad a 100 ° C)	450
Figura 3-49: Caso 4 (O-1236): Acidez total (TAN) y Basicidad total (TBN) (en azul se muestra el TAN y en naranja el TBN)	451
Figura 3-50: Caso 4 (O-1236): Influencia de la carbonilla (en azul se muestra el cobre, en gris el hierro y en negro la carbonilla)	452
Figura 3-51: Fotografía del Grupo 1 en plato y con cámara réflex (Canon EOS 100D) (Fotografía Izq.: O-1178, Fotografía Der.: O-1236) (NC: No conforme; C: Conforme)	464
Figura 3-52: Fotografía del Grupo 2 en cubeta y con cámara réflex (Canon EOS 100D) (Fotografía Izq.: O-1178, Fotografía Der.: O-1236) (NC: No conforme; C: Conforme)	465
Figura 3-53: Fotografía del Grupo 3 en cubeta y con cámara endoscópica (modelo Zealtron Industrial Endoscope 3.9mm) (Fotografía Izq.: O-1178, Fotografía Der.: O-1236) (NC: No conforme; C: Conforme)	466
Figura 3-54: Fotografía del Grupo 4 en maletín y con cámara endoscópica (Fotografía Izq.: O-1178, Fotografía Der.: O-1236) (NC: No conforme; C: Conforme)	467
Figura 3-55: La curva de aprendizaje de la ResNet34 con la última capa modificada para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 1	470
Figura 3-56: Curva de aprendizaje de la ResNet34 con todas las capas modificadas para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 1	473
Figura 3-57: Curva de aprendizaje de la ResNet34 con la última capa modificada para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 1	476
Figura 3-58: Errores de validación de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 1	478
Figura 3-59: Curva de aprendizaje de la ResNet34 con todas las capas modificadas para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 1	480
Figura 3-60: Errores de validación de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 1	482

Índice de figuras

Figura 3-61: Curva de aprendizaje de la ResNet34 con la última capa modificada para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 2	485
Figura 3-62: Curva de aprendizaje de la ResNet34 con todas las capas modificadas para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 2	488
Figura 3-63: Curva de aprendizaje de la ResNet34 con la última capa modificada para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 2	491
Figura 3-64: Curva de aprendizaje de la ResNet34 con todas las capas modificadas para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 2	494
Figura 3-65: Curva de aprendizaje de la ResNet34 con la última capa modificada para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 3	498
Figura 3-66: Curva de aprendizaje de la ResNet34 con todas las capas modificadas para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 3	501
Figura 3-67: Curva de aprendizaje de la ResNet34 con la última capa modificada para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 3	504
Figura 3-68: Errores de validación de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 3	506
Figura 3-69: Curva de aprendizaje de la ResNet34 con todas las capas modificadas para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 3	508
Figura 3-70: Errores de validación de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 3	510
Figura 3-71: Curva de aprendizaje de la ResNet34 con la última capa modificada para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 4	514
Figura 3-72: Errores de validación de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 4	516
Figura 3-73: Curva de aprendizaje de la ResNet34 con todas las capas modificadas para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 4	517
Figura 3-74: Errores de validación de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 4	519
Figura 3-75: Curva de aprendizaje de la ResNet34 con la última capa modificada para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 4	521

Índice de figuras

Figura 3-76: Errores de validación de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 4.....	523
Figura 3-77: Curva de aprendizaje de la ResNet34 con todas las capas modificadas para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 4.....	524
Figura 3-78: Errores de validación de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 4.....	527

Lista de abreviaturas

A_a: Área de contacto aparente

AF: Autoenfoco

AGMA: Asociación Americana de Fabricantes de Engranajes

AER: Rotrode de Emisión Atómica

API: Instituto Americano del Petróleo

A_r: Área de contacto real

ASTM: Sociedad Americana de Ensayos y Materiales

AW: Anti desgaste

BHT: 2,6-di-terc-butil-4-metilfenol

BIPM: Oficina Internacional de Pesas y Medidas

BSI: Instituto Británico de Normas

C: Conforme

CAV: Viscosímetro automático Cannon

CGS: Sistema Cegesimal de Unidades

CNN: Red Neuronal Convolutiva

CONV: Capa convolutiva

CPU: Unidad Central de Procesamiento

cP: Centipoise

cSt: Centistokes

DL: Aprendizaje profundo (Deep Learning)

EDTA: Ácido etilendiaminotetraacético

EP: Extrema presión

FC: Capa completamente conectada (Fully Connected)

Lista de abreviaturas

FIM: Ficha de Identificación de Muestra

FLOPS: Operaciones en punto flotante por segundo

FT-IR: Espectrometría infrarroja por transformada de Fourier

GNC: Gas Natural Comprimido

GPU: Unidad de Procesamiento Gráfico

IA: Inteligencia Artificial

ICP: Plasma de Acoplamiento Inductivo

ILSVRC: Desafío de Reconocimiento Visual a Gran Escala de ImageNet

INPUT: Capa de entrada

IO: Índice de Octano

IPOL: Corriente de Polarización

ISO: Organización Internacional de Normalización

ISO VG: Grados de Viscosidad ISO

IV: Índice de Viscosidad

JP: Jet Petroleum

JOAP: Programa Conjunto de Análisis de Aceite (Joint Oil Analysis Program)

LED: Diodo emisor de luz (Light Emitting Diode)

LCE: Laboratorio Central del Ejército

MCI: Motores de combustión interna alternativos

MEC: Motores de encendido por compresión

MEP: Motores de encendido provocado

MIL-PRF: Especificación de Rendimiento Militar (Military Performance)

ML: Aprendizaje automático (Machine Learning)

MLP: Perceptrón multicapa (Multilayer Perceptron)

MNIST: Base de datos del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología modificado

NC: No conforme

Lista de abreviaturas

NME: Norma Militar Española

O: Aceite (Oil)

OCP: Copolímero de olefina

OEM: Fabricantes de equipos originales

OTAN: Organización del Tratado del Atlántico Norte

PAAET: Programa de Análisis de Aceites del Ejército de Tierra

PANA: N-Fenil-1-naftilamina

PCV: Ventilación Positiva del Cáster (Positive Crankcase Ventilation)

PIB: Poliisobutileno

PI: Punto de Inflamación

PLA: Ácido poliláctico

PMA: Ester de polimetacrilato

POOL: Capa de agrupación

ppm: Partes por millón

RDE-AES: Espectroscopía de Emisión Atómica con Electrodo de Disco Rotante

RELU: Unidad Lineal Rectificada (Rectified Linear Unit)

RD: Real Decreto

RGB: Rojo, Verde, Azul (Red, Green, Blue)

RIC: Rango intercuartílico

SAE: Sociedad de Ingenieros Automotrices (Society of Automotive Engineers)

SEM: Microscopía Electrónica de Barrido

SG: Descenso del gradiente estocástico (Stochastic Gradient Descent)

SI: Sistema Internacional de Unidades

SKF: SKF Group (empresa de rodamientos y servicios)

STLE: Sociedad de Tribólogos e Ingenieros en Lubricación

SUS: Segundos Saybolt Universal

Lista de abreviaturas

TAN: Índice de acidez total

TBN: Número básico total

TCP: Fosfato de tricresilo

TL: Condiciones Técnicas de Suministro (Technische Lieferbedingungen)

TMQ: 2,2,4-trimetil-1,2-dihidroquinolina polimérica

V40: Viscosidad a 40 °C

V100: Viscosidad a 100 °C

VBA: Visual Basic for Applications

W: Invierno (Winter)

ZDDP: Ditiofosfato/ditilofosfato de zinc

Resumen

Este estudio explora la aplicación de técnicas avanzadas de inteligencia artificial en el análisis de aceites lubricantes usados para el mantenimiento predictivo de motores y cajas de cambios en vehículos militares. Dado que los aceites lubricantes son fundamentales para el funcionamiento y la durabilidad de estos sistemas, la investigación se enfoca en los desafíos asociados con su degradación y contaminación, ya que dichos factores pueden evidenciar el estado de los componentes críticos y ayudar a prevenir fallos operativos. Además, reducir los cambios innecesarios de aceite minimiza el impacto ambiental al optimizar la gestión de los aceites usados.

Para el análisis, se utilizaron dos tipos de aceites lubricantes procedentes de vehículos militares: un aceite mineral multigrado 15W40 para motores (denominado O-1236) y un aceite sintético multigrado 5W30 para cajas de cambios (denominado O-1178). Se realizaron ensayos fisicoquímicos estandarizados para evaluar propiedades como la viscosidad, el índice de acidez, el contenido de agua y la presencia de metales desgastados. Estos ensayos permitieron clasificar los aceites en las categorías de "Conformes" y "No conformes", de acuerdo con su capacidad para operar de manera segura en los sistemas mecánicos analizados.

Con los datos obtenidos a partir de los ensayos fisicoquímicos, se realizó un estudio estadístico empleando técnicas como la regresión logística binaria, la cual permitió analizar la relación entre las variables fisicoquímicas y el estado de los aceites. Este modelo proporcionó una base cuantitativa para anticipar posibles fallos mecánicos y establecer pautas de mantenimiento más eficientes.

Para mejorar la precisión en la predicción del estado de los aceites, se exploró el uso de inteligencia artificial mediante el modelo ResNet-34, una red neuronal convolucional profunda. El rendimiento del modelo se evaluó en cuatro escenarios diferentes, utilizando tanto una cámara réflex como una cámara endoscópica para capturar imágenes de los aceites. Los resultados mostraron una mayor precisión en la clasificación del aceite de caja de cambios en comparación con el aceite de motor, debido a las diferencias en sus propiedades visuales. A pesar de que el aceite de motor presentó desafíos adicionales debido a su color más oscuro y opaco, el modelo ResNet-34 logró resultados prometedores, sugiriendo que futuras mejoras podrían optimizar aún más su

Resumen

rendimiento. Este enfoque innovador simplifica el proceso de evaluación, reduciendo la dependencia de pruebas de laboratorio complejas y acortando el tiempo necesario para determinar el estado del aceite, optimizando así el uso de recursos.

Los resultados obtenidos por el modelo de inteligencia artificial se compararon con los del modelo de regresión logística binaria. Los hallazgos revelaron que el modelo de inteligencia artificial superó al modelo estadístico, alcanzando una precisión superior al 90% en la detección del estado de los aceites. Esto subraya el potencial de la inteligencia artificial para mejorar la precisión en el mantenimiento predictivo y reducir los recursos necesarios para su implementación.

Como resultado de estos avances, se desarrolló un sistema portátil de análisis de aceite, encapsulado en un maletín ruggedizado diseñado para su uso en entornos militares, como zonas de operaciones y campos de maniobra. Este sistema permite la detección rápida y precisa del estado del aceite mediante la captura de una imagen y el uso del modelo de inteligencia artificial ResNet-34. Al eliminar la necesidad de equipos de laboratorio y personal especializado, este sistema optimiza la eficiencia operativa y reduce el riesgo de fallos mecánicos.

La integración de la inteligencia artificial en el mantenimiento predictivo de los aceites lubricantes no solo permite anticipar el deterioro del aceite, sino que también mejora la seguridad operativa al reducir el riesgo de averías de forma rápida. Además, fomenta una mejor gestión ambiental al prolongar la vida útil de los aceites y minimizar la generación de aceites usados, lo que disminuye su impacto medioambiental. Este enfoque proactivo mejora significativamente la gestión de recursos, optimizando el uso de lubricantes, reduciendo el tiempo de inactividad de los vehículos y disminuyendo la necesidad de ensayos tradicionales.

En conclusión, este estudio demuestra que la aplicación de técnicas avanzadas de inteligencia artificial y la implementación de sistemas portátiles representan una estrategia eficaz y práctica para el control de la calidad de los aceites lubricantes en motores y cajas de cambios de vehículos militares. La metodología propuesta garantiza eficiencia operativa, promueve la sostenibilidad a través de la reducción de residuos y mejora significativamente la utilización de recursos, optimizando las operaciones de mantenimiento y contribuyendo a la sostenibilidad ambiental.

Summary

This study explores the application of advanced artificial intelligence (AI) techniques in the analysis of used lubricating oils for predictive maintenance of engines and gearboxes in military vehicles. Since lubricating oils are fundamental to the operation and durability of these systems, the research focuses on the challenges associated with their degradation and contamination. These factors can reveal the condition of critical components and help prevent operational failures. Additionally, reducing unnecessary oil changes minimizes environmental impact by optimizing the management of used oils.

For the analysis, two types of lubricating oils from military vehicles were used: a multigrade mineral oil 15W40 for engines (designated as O-1236) and a synthetic multigrade oil 5W30 for gearboxes (designated as O-1178). Standardized physicochemical tests were conducted to evaluate properties such as viscosity, acidity index, water content, and the presence of wear metals. These tests allowed the classification of oils into “Conforming” and “Non-conforming” categories based on their ability to operate safely within the analyzed mechanical systems.

With the data obtained from the physicochemical tests, a statistical study was conducted using techniques like binary logistic regression, which allowed for analysis of the relationship between physicochemical properties and the condition of the oils. This model provided a quantitative foundation for anticipating potential mechanical failures and establishing more efficient maintenance guidelines.

To improve prediction accuracy for oil conditions, the study explored the use of artificial intelligence through the ResNet-34 model, a deep convolutional neural network. The model's performance was evaluated across four different scenarios, utilizing both a DSLR camera and an endoscopic camera to capture images of the oils. The results demonstrated greater accuracy in classifying gearbox oil compared to engine oil due to differences in their visual properties. Although the engine oil presented additional challenges due to its darker and more opaque color, the ResNet-34 model achieved promising results, suggesting that future improvements could further optimize its performance. This innovative approach simplifies the evaluation process, reducing dependence on complex laboratory tests and shortening the time needed to determine oil condition, thereby optimizing resource usage.

Summary

The results obtained from the AI model were compared to those from the binary logistic regression model. The findings revealed that the AI model outperformed the statistical model, achieving over 90% accuracy in detecting oil conditions. This underscores AI's potential to enhance predictive maintenance accuracy and reduce the resources needed for its implementation.

As a result of these advancements, a portable oil analysis system was developed, encapsulated in a ruggedized briefcase designed for use in military environments, such as operational zones and maneuvering fields. This system enables rapid and precise detection of oil condition by capturing an image and using the ResNet-34 AI model. By eliminating the need for laboratory equipment and specialized personnel, this system optimizes operational efficiency and reduces the risk of mechanical failures.

The integration of artificial intelligence into the predictive maintenance of lubricating oils not only allows for the anticipation of oil degradation but also enhances operational safety by quickly reducing the risk of failures. Furthermore, it fosters better environmental management by extending the useful life of oils and minimizing the generation of used oils, thus decreasing their environmental impact. This proactive approach enhances resource management significantly, optimizing lubricant usage, reducing vehicle downtime, and lessening the need for traditional testing.

In conclusion, this study demonstrates that the application of advanced artificial intelligence techniques and the implementation of portable systems represent an effective and practical strategy for controlling the quality of lubricating oils in the engines and gearboxes of military vehicles. The proposed methodology ensures operational efficiency, promotes sustainability through waste reduction, and significantly improves resource utilization, optimizing maintenance operations and contributing to environmental sustainability.

Capítulo 1: Introducción

1.1 Fundamentos y contexto teórico del estudio

Este primer capítulo tiene como objetivo establecer los fundamentos teóricos y el contexto necesario para sustentar el presente estudio. Aquí se exploran los antecedentes y la justificación de la investigación, así como un análisis detallado de los lubricantes y su relevancia en el campo de la tribología y el mantenimiento predictivo.

En primer lugar, se abordan los antecedentes y la justificación del estudio, lo cual es fundamental para situar al lector en el contexto de la investigación y resaltar la importancia del tema abordado. Esta sección justifica la necesidad de la investigación y las razones que motivan su realización. A continuación, se presenta el planteamiento del problema, identificando las brechas de conocimiento y los desafíos específicos. Además, se definen los objetivos y el alcance de la investigación, proporcionando una visión clara de los resultados esperados, así como de las posibles limitaciones a considerar.

El siguiente apartado se dedica al análisis de los lubricantes, donde se profundiza en sus funciones, tipos, propiedades y aditivos. Este análisis es crucial para comprender el papel que desempeñan los lubricantes en el funcionamiento y durabilidad de motores y transmisiones. Se incluyen consideraciones sobre la compatibilidad y solubilidad de los aditivos, junto con los desafíos específicos que enfrentan los aceites de motor y transmisión en diversas condiciones operativas.

La tribología, como disciplina que abarca el estudio de la fricción, el desgaste y la lubricación, también se examina en este capítulo. Se presentan los fundamentos teóricos de la tribología y su importancia en la optimización del rendimiento de los lubricantes bajo diversas condiciones de operación. Este apartado es esencial para entender los mecanismos internos que afectan la eficiencia y eficacia de los lubricantes en entornos industriales y automotrices.

Finalmente, se incluye un apartado sobre el mantenimiento predictivo y el diagnóstico de aceites lubricantes. Se explica el concepto de mantenimiento predictivo, resaltando sus beneficios en la reducción de fallos y la optimización del ciclo de vida de

Capítulo 1: Introducción

los equipos. Se exploran diversas estrategias para la gestión del cambio de aceite lubricante, junto con las herramientas y técnicas de diagnóstico empleadas para monitorizar su estado. Además, se analiza el impacto de las condiciones físicas y químicas, que contribuyen a la degradación del aceite, destacando el uso de tecnologías avanzadas, como la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR), para identificar productos de degradación. Por último, se aborda la contaminación en el aceite lubricante, examinando sus fuentes y los métodos para su análisis, así como las medidas para mitigar su impacto en el rendimiento del sistema.

1.1.1 Antecedentes y justificación

Desde la Revolución Industrial, el mantenimiento de las máquinas ha experimentado una evolución significativa debido a la importancia de garantizar su correcto funcionamiento. En la actualidad, resulta fundamental asegurar que los equipos y la maquinaria de cualquier instalación operen de manera adecuada. Para lograr esto, se han desarrollado diversas técnicas que ofrecen a los usuarios confianza en el estado de los equipos. A su vez, es crucial poder conocer el estado de los equipos en un momento determinado y prever posibles fallos antes de que ocurran. Este enfoque ha dado lugar al concepto de mantenimiento predictivo, que engloba los métodos y técnicas utilizados para evaluar el estado de un equipo y predecir no solo su condición actual, sino también el momento óptimo para realizar su mantenimiento [1].

Es importante distinguir el mantenimiento predictivo del mantenimiento preventivo. El mantenimiento predictivo se basa en la evaluación continua o periódica de la condición del equipo, con el objetivo de detectar indicios de posibles fallos futuros, permitiendo realizar intervenciones justo a tiempo para evitar averías. En contraste, el mantenimiento preventivo se lleva a cabo en intervalos predefinidos, independientemente del estado real del equipo. El mantenimiento predictivo, por su parte, se ajusta a las necesidades específicas del equipo, lo que permite un enfoque proactivo y más eficiente en términos de operaciones de mantenimiento, con el potencial de reducir costes y minimizar tiempos de inactividad [2–4].

Las principales ventajas del mantenimiento predictivo incluyen la reducción de los tiempos de inactividad, ya que se anticipan los fallos antes de que ocurran; el ahorro de costes al evitar mantenimientos innecesarios o prematuros; la extensión de la vida útil del

Capítulo 1: Introducción

equipo al tratar los problemas antes de que se conviertan en fallos graves; y la optimización del inventario de repuestos, al permitir prever las piezas que necesitarán ser reemplazadas, lo que facilita un mejor control del stock [5,6].

Existen diversas técnicas para implementar el mantenimiento predictivo, entre las cuales destacan el análisis de vibraciones [7], la termografía, los ultrasonidos, el monitoreo del estado eléctrico y el análisis de aceites [8], entre otras. Esta tesis doctoral se centrará en el análisis de aceites usados, ya que es una de las herramientas más utilizadas en el mantenimiento predictivo, tanto en motores diésel como en cajas de cambios.

1.1.2 Planteamiento del problema

La implementación de un programa de mantenimiento predictivo supone una inversión inicial considerable, ya que requiere la capacitación del personal en el manejo de herramientas avanzadas y la gestión de grandes volúmenes de datos. No obstante, a largo plazo, los beneficios económicos derivados de este tipo de mantenimiento superan ampliamente los costes iniciales, en comparación con el mantenimiento preventivo tradicional. La capacidad de prevenir fallos y mejorar la eficiencia operativa que ofrece el mantenimiento predictivo genera ahorros significativos, lo que justifica plenamente la inversión inicial [9].

En el contexto del mantenimiento predictivo de unidades de transporte, como los carros de combate analizados en este estudio, el control de los fluidos lubricantes es una de las áreas clave. La lubricación es fundamental para reducir el rozamiento entre superficies en movimiento, lo que minimiza el desgaste y el sobrecalentamiento de las piezas, asegurando un funcionamiento eficiente de los componentes mecánicos. Un fallo en la lubricación puede provocar fricción excesiva, daños en los materiales, generación de calor, y eventualmente un fallo catastrófico en el motor, la caja de cambios o el vehículo en su conjunto. Estas situaciones generan no solo problemas técnicos, sino también importantes inconvenientes logísticos y económicos.

El análisis del aceite lubricante va más allá de su función básica de reducir la fricción; es una herramienta valiosa para diagnosticar el estado de los componentes del sistema. A través del análisis fisicoquímico del aceite, es posible obtener información detallada sobre la condición del lubricante y los elementos internos del equipo, permitiendo la detección

Capítulo 1: Introducción

temprana de posibles fallos. De este modo, se puede comparar el análisis del aceite con una "radiografía" que revela el estado de salud de un sistema mecánico, facilitando la toma de decisiones preventivas [10].

Con el uso continuo, el aceite lubricante se degrada debido a factores como la temperatura, la contaminación y la oxidación. El análisis de parámetros como la viscosidad, acidez o punto de inflamación permite determinar si el aceite sigue siendo apto para su función o si debe ser reemplazado. Específicamente, el tiempo de uso del aceite, más que el tiempo de almacenamiento, es el factor determinante para su degradación. Durante el uso, las altas temperaturas, la presencia de contaminantes y la humedad aceleran el envejecimiento del lubricante, lo que afecta sus propiedades y eficacia [11]. Detectar los primeros signos de envejecimiento del aceite permite aplicar medidas preventivas que no solo prolongan la vida útil del sistema, sino que también proporcionan información valiosa sobre el estado del motor o de la caja de cambios.

El desgaste y el deterioro del aceite lubricante son inevitables con el tiempo. Factores externos, como las temperaturas elevadas y la contaminación, pueden acelerar este proceso. Monitorizar los signos de deterioro permite intervenir oportunamente para garantizar un funcionamiento óptimo del sistema y prolongar su vida útil. La condición del aceite es crucial para una lubricación efectiva y para la durabilidad del equipo.

Implementar un programa de mantenimiento predictivo basado en el análisis de aceites lubricantes, mejora significativamente la fiabilidad de los sistemas lubricados en vehículos militares, en particular de los motores y las cajas de cambio. El estudio de las propiedades fisicoquímicas del aceite ofrece datos útiles que permiten entender cómo se degrada un equipo a lo largo del tiempo y su uso [12]. La tribología, disciplina que estudia la fricción, el desgaste y la lubricación, permite evaluar el estado de los componentes internos de una maquinaria mediante el análisis de partículas metálicas y otros contaminantes presentes en el aceite lubricante. Este tipo de análisis ayuda a identificar desgaste prematuro y prevé posibles averías, lo que permite planificar intervenciones preventivas de manera más eficiente [13].

En el ámbito militar, programas especializados como el Joint Oil Analysis Program (JOAP) [14,15], desarrollado por Estados Unidos en colaboración con países de la OTAN, utilizan el análisis de aceites para evaluar y predecir la condición de motores y cajas de cambios en vehículos y aeronaves. De manera similar, el Ejército de Tierra español ha

Capítulo 1: Introducción

establecido el Programa de Análisis de Aceites del Ejército de Tierra (PAAET), centrado en vehículos con una capacidad de cárter superior a 25 litros [16]. Este programa permite determinar el estado del aceite lubricante, predecir posibles fallos y evitar cambios de aceite innecesarios, lo que resulta en una optimización de los intervalos de cambio y una reducción del tiempo de inactividad imprevisto.

La principal ventaja de este tipo de programas radica en la capacidad de evaluar si el aceite aún cumple con las especificaciones para las que fue diseñado. Mientras el aceite mantenga sus cualidades dentro de los límites aceptables, no será necesario reemplazarlo. Sin embargo, si se detecta una disminución en la calidad del aceite, es imprescindible sustituirlo para evitar daños en el motor o en la caja de cambios. Esto contribuye a prolongar la vida útil de los componentes y reduce los costes asociados al mantenimiento.

Este enfoque de análisis ofrece importantes beneficios económicos, permitiendo extender la vida útil del aceite, reducir los costes laborales asociados al mantenimiento preventivo y detectar problemas antes de que se agraven, lo que evita reparaciones más costosas. En conjunto, estas ventajas representan una mejora significativa en la eficiencia del mantenimiento predictivo en el Ejército de Tierra, optimizando recursos y asegurando una mayor disponibilidad operativa de los vehículos militares.

1.1.3 Objetivos y alcance de la investigación

El objetivo principal de esta tesis doctoral es desarrollar y validar un modelo matemático inteligente basado en redes neuronales convolucionales, que permita evaluar la calidad de los aceites lubricantes utilizados en los motores diésel y la caja de cambios de los carros de combate Leopard del Ejército de Tierra. Este modelo no pretende sustituir los ensayos de laboratorio tradicionales, sino complementarlos. Se propone como una alternativa para aquellos casos en los que se requiera un resultado rápido sobre la calidad del aceite o cuando no sea posible acceder a un laboratorio especializado en análisis de aceites lubricantes. El modelo ofrecerá una evaluación ágil, precisa y económica, determinando si el aceite es APTO o NO APTO para su uso, lo que permitirá optimizar los procesos de mantenimiento de manera más eficiente en situaciones de urgencia o en ubicaciones con recursos limitados.

Capítulo 1: Introducción

Para alcanzar este objetivo, la investigación se estructura en varias áreas clave, todas ellas fundamentales para el desarrollo integral del modelo propuesto. El alcance de esta investigación incluye los siguientes aspectos:

- **Estudio de los aceites lubricantes:** Se llevará a cabo un análisis exhaustivo de los aceites lubricantes empleados en los carros de combate, abordando su clasificación, propiedades fisicoquímicas y los aditivos incorporados. Este estudio permitirá comprender cómo los factores operacionales afectan la degradación y el rendimiento del aceite en condiciones extremas.
- **Lubricación y tribología:** Se explicarán los conceptos fundamentales relacionados con la lubricación y la tribología, así como las funciones críticas del aceite lubricante en la protección de los componentes mecánicos de los motores y las cajas de cambio. Este apartado servirá como base teórica para entender las interacciones entre los lubricantes y los sistemas mecánicos bajo uso prolongado.
- **Programa de Análisis de Aceites del Ejército de Tierra (PAAET):** Se realizará una revisión detallada del Programa de Análisis de Aceites del Ejército de Tierra, centrándose en los métodos de medición y pruebas actuales de parámetros como la viscosidad, el punto de inflamación, la acidez, la basicidad y los elementos de desgaste. Esto permitirá identificar las limitaciones del enfoque actual y el valor agregado que el nuevo modelo puede aportar en escenarios donde la rapidez y accesibilidad son cruciales.
- **Desarrollo del modelo matemático:** Se desarrollará y validará un modelo basado en redes neuronales convolucionales para evaluar la calidad del aceite a partir de imágenes fotográficas. Este modelo será probado para demostrar su eficacia en predecir el estado del aceite sin necesidad de equipos de laboratorio, especialmente en situaciones que requieran respuestas inmediatas. Se evaluará su precisión y eficiencia en comparación con los métodos tradicionales, estableciendo su utilidad como complemento cuando el acceso a laboratorios sea limitado o el tiempo sea un factor crítico.

El objetivo final de esta investigación es mejorar las prácticas de mantenimiento predictivo en la logística del Ejército de Tierra. Con la implementación de este modelo complementario, se busca optimizar la eficiencia operativa y reducir los costes asociados con el mantenimiento y las reparaciones, mejorando la fiabilidad de los carros de combate

Leopard mediante un control más ágil y accesible de la calidad del aceite lubricante. Esto contribuirá a una mayor flexibilidad en las operaciones de mantenimiento y una capacidad mejorada para prevenir fallos en condiciones exigentes.

1.2 Aceite lubricante

Un aceite lubricante es una sustancia generalmente viscosa que se coloca entre dos superficies en movimiento relativo, formando una película intermedia. Esta película actúa como barrera para evitar el contacto directo entre las superficies, reduciendo la fricción y, por ende, la producción de calor resultante del movimiento. La película lubricante suele tener un espesor entre 1 y 100 μm , aunque este espesor puede variar en función de las condiciones de operación y el uso específico del aceite [17].

En el contexto de la presente tesis, tanto el aceite de motor como el aceite de transmisión utilizados en los vehículos estudiados, como son los carros de combate Leopard, están formulados específicamente para lubricar y proteger los componentes internos del motor de combustión interna, tales como las partes móviles de los pistones, cojinetes y el árbol de levas, así como los engranajes y demás elementos móviles de la caja de cambios.

1.2.1 Funciones del lubricante

Además de su función principal como agente de reducción de fricción, los aceites lubricantes desempeñan otras funciones críticas que son esenciales para garantizar el correcto funcionamiento y prolongar la vida útil del motor y de la caja de cambios. Entre las principales funciones de los lubricantes se incluyen:

- **Limpieza:** Los lubricantes actúan como agentes de limpieza dentro del motor y la caja de cambios, eliminando y dispersando partículas metálicas y otros contaminantes que se generan con el uso. Estos contaminantes, de no ser controlados, podrían acumularse y causar desgaste por abrasión o daños en los componentes.
- **Refrigeración:** Los aceites lubricantes contribuyen a disipar el calor generado por la fricción de las piezas móviles y las reacciones de combustión. Esta capacidad de

Capítulo 1: Introducción

refrigeración es fundamental para evitar el sobrecalentamiento, que podría comprometer la integridad y el funcionamiento de los componentes mecánicos.

- **Sellado:** Los lubricantes rellenan los pequeños espacios entre los componentes móviles, como los anillos de los pistones y las paredes de los cilindros, asegurando una correcta compresión en el motor y evitando pérdidas de potencia y presión. En las transmisiones automáticas, el aceite también actúa como fluido hidráulico, permitiendo un cambio eficiente de marchas.
- **Protección frente a la corrosión:** Los lubricantes crean una barrera protectora sobre las superficies metálicas, previniendo la oxidación y la corrosión. Esta función es clave para la durabilidad de los componentes del motor y de la caja de cambios, preservando la integridad del sistema a largo plazo.

1.2.2 Tipos de lubricantes

Los aceites lubricantes pueden clasificarse en diversas categorías en función de varios criterios, como su origen, estado físico, clasificación por organismos especializados y especificaciones militares. Las principales clasificaciones incluyen:

- **Origen:** Los lubricantes pueden ser de origen mineral (derivados del petróleo), sintético (producidos mediante procesos químicos controlados) o semisintético (mezcla de base mineral y sintética). Cada tipo de lubricante ofrece diferentes propiedades en cuanto a estabilidad térmica, capacidad de limpieza y protección contra el desgaste.
- **Estado físico:** Los lubricantes pueden presentarse en forma de líquidos, grasas o semisólidos, dependiendo de las aplicaciones específicas. Los aceites líquidos, como los utilizados en motores y transmisiones, son los más comunes debido a su facilidad para fluir y cubrir las superficies internas.
- **Clasificación por organismos especializados:** Existen organismos internacionales, como la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE) y el Instituto Americano del Petróleo (API), que establecen normas de clasificación de lubricantes basadas en su viscosidad y rendimiento. Estas clasificaciones permiten seleccionar el aceite adecuado en función de las condiciones operativas y los requisitos del equipo.

Capítulo 1: Introducción

- **Especificaciones militares:** En aplicaciones militares, los aceites lubricantes deben cumplir con estrictas especificaciones técnicas establecidas por las fuerzas armadas, garantizando un rendimiento óptimo bajo condiciones extremas, como temperaturas elevadas o ambientes altamente contaminados. Estas especificaciones aseguran que los lubricantes proporcionen una protección fiable y prolonguen la vida útil de los sistemas mecánicos en situaciones operativas críticas.

1.2.2.1 Según su origen o procedencia

El origen de los aceites lubricantes es un factor determinante que influye en sus propiedades y aplicaciones específicas. En función de su procedencia, los aceites lubricantes se clasifican en aceites minerales, aceites sintéticos y aceites semisintéticos. Esta clasificación es fundamental para entender las ventajas y limitaciones de cada tipo de aceite en diversas aplicaciones industriales, automotrices y militares. A continuación, se describen las principales características de cada tipo de aceite:

- **Aceites minerales:** Los aceites minerales son aquellos obtenidos mediante el proceso de refinado del petróleo, que se extrae de diversas fuentes geográficas. Dentro de esta categoría, los aceites parafínicos y nafténicos son los más empleados debido a su buena capacidad lubricante y su rendimiento a temperaturas de operación que oscilan entre $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $93\text{ }^{\circ}\text{C}$ [11], como se observa en la **Figura 1-1**. Los aceites minerales tienen un amplio uso en la industria, destacándose como lubricantes en motores, engranajes, cojinetes, entre otros sistemas mecánicos.

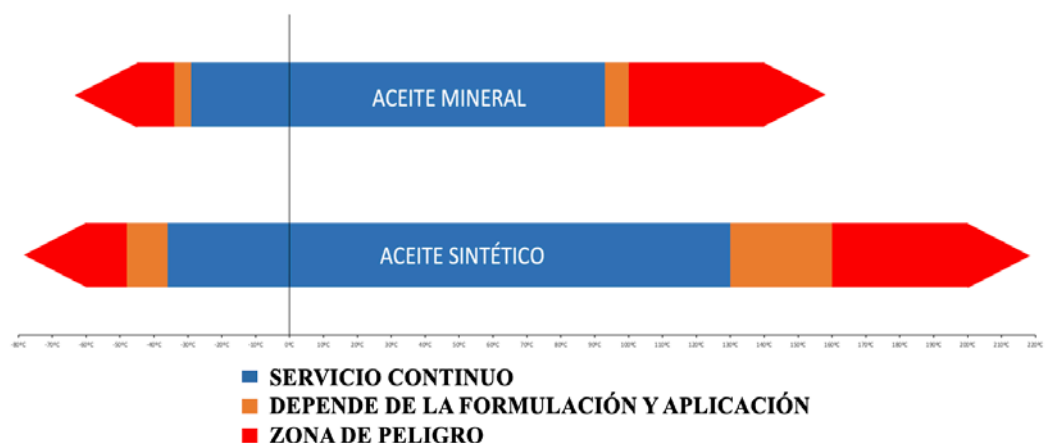


Figura 1-1: Tipos de bases lubricantes y rango de temperatura de operación [11]

A pesar de su popularidad y bajo costo, los aceites minerales presentan ciertas limitaciones, especialmente en condiciones extremas de temperatura y bajo cargas

Capítulo 1: Introducción

mecánicas elevadas. Sin embargo, su disponibilidad y efectividad en aplicaciones estándar los hacen una opción predominante en la lubricación industrial y automotriz.

- **Aceites sintéticos:** Los aceites sintéticos se fabrican mediante procesos de síntesis química, donde se diseñan estructuras moleculares específicas para imitar y mejorar las propiedades de los aceites minerales. Una de las principales ventajas de los aceites sintéticos es su alto índice de viscosidad, lo que significa que su viscosidad se ve mucho menos afectada por los cambios de temperatura. Además, ofrecen una excelente estabilidad térmica y resistencia al envejecimiento, lo que permite que sus propiedades fisicoquímicas permanezcan estables durante periodos más prolongados en comparación con los aceites minerales.

Gracias a estas propiedades mejoradas, los aceites sintéticos se utilizan en maquinaria que opera en condiciones extremas, con rangos de temperatura de uso que varían entre -40 °C y 127 °C [11], como se observa en la **Figura 1-1**. Son especialmente recomendados para sistemas de alta exigencia, como motores de alta tecnología, turbinas y otros equipos que requieren una mayor resistencia a la oxidación y un comportamiento más estable bajo grandes variaciones térmicas.

- **Aceites semisintéticos:** Los aceites semisintéticos son una mezcla de aceites minerales y aceites sintéticos, lo que les permite combinar las ventajas de ambos tipos. Al incorporar una base mineral con aditivos sintéticos, estos aceites logran un equilibrio entre el costo y el rendimiento, ofreciendo mejores propiedades que los aceites minerales puros, pero a un precio más accesible que los aceites sintéticos completos.

Los aceites semisintéticos tienen un rango de viscosidad más estable que los minerales, lo que los hace útiles en aplicaciones que requieren un mejor rendimiento a temperaturas más bajas o altas que las soportadas por los aceites minerales. Aunque no igualan la durabilidad y estabilidad térmica de los aceites sintéticos, proporcionan una opción intermedia que es ideal para muchas aplicaciones automotrices y de maquinaria, donde las condiciones de operación no son tan severas como para justificar el uso de un aceite completamente sintético.

Por tanto, la elección del tipo de aceite lubricante según su origen debe basarse en los requisitos operativos específicos del sistema, considerando factores como la

Capítulo 1: Introducción

temperatura de operación, las cargas mecánicas y las condiciones ambientales. Los aceites minerales son adecuados para aplicaciones estándar, mientras que los sintéticos ofrecen un rendimiento superior en condiciones extremas. Por su parte, los aceites semisintéticos proporcionan una solución intermedia que equilibra el costo y las prestaciones mejoradas.

1.2.2.2 Según su estado

Los aceites lubricantes pueden encontrarse en diferentes estados físicos, lo que influye directamente en sus aplicaciones y en las condiciones en las que pueden ser utilizados. Esta clasificación agrupa los lubricantes en sólidos, semisólidos, líquidos y gaseosos, describiendo las características y usos específicos de cada estado. Los aceites clasificados según su estado pueden ser:

- **Aceites sólidos:** Los aceites sólidos, también conocidos como grasas lubricantes, son lubricantes que permanecen en estado sólido a temperatura ambiente y necesitan calentarse para poder fluir. Se utilizan en situaciones donde los aceites líquidos no son eficaces, como en condiciones de temperaturas extremadamente altas, cargas pesadas o fuertes vibraciones. Estas grasas son ideales para aplicaciones en maquinaria pesada, rodamientos y sistemas cerrados, donde el uso de aceites líquidos no sería práctico. Algunos ejemplos y sus rangos de temperatura incluyen:
 - Grasa de litio: Comúnmente utilizada en rodamientos de ruedas y maquinaria industrial, funciona eficazmente en un rango de temperatura de -20°C a $+130^{\circ}\text{C}$.
 - Grasa de complejo de aluminio: Usada en entornos marinos y aplicaciones húmedas, es efectiva desde -20°C hasta $+160^{\circ}\text{C}$, dependiendo de la formulación específica.
- **Aceites semisólidos:** Este tipo de aceite se presenta en forma de grasa o gel. Estos aceites no fluyen a temperatura ambiente como un aceite ni tampoco se comporta como una sustancia sólida. Cuando se utiliza como lubricante es debido a su alto poder adhesivo lo que le confiere una alta adhesión a las superficies sin que se deslice o gotee. La grasa de litio es un ejemplo de aceite semisólido, que se usa mucho en la industria automotriz y en maquinaria pesada para lubricar rodamientos

Capítulo 1: Introducción

y otras piezas móviles, ofreciendo una lubricación prolongada sin que se desplace fácilmente.

- **Aceites líquidos o fluidos:** aquellos que a temperatura ambiente se presentan en estado líquido. Los más comunes son fundamentalmente los aceites naturales y los sintéticos. Por aceite natural se entiende aquellos aceites que se obtienen directamente de fuentes biológicas, como plantas o animales, sin pasar por procesos químicos de síntesis. Algunos ejemplos de aceites naturales son el aceite de oliva, el aceite de coco y el aceite de linaza.
- **Aceites gaseosos:** aquellos que sometidos a condiciones normales de presión y temperatura se presentan en estado gaseoso. Este tipo de aceites, cuando se les aplica presión o se disminuye la temperatura, se transforman en líquidos aceitosos. Se utilizan fundamentalmente para lubricar telescopios.

1.2.2.3 Clasificación de la Society of Automotive Engineers (SAE)

La Society of Automotive Engineers (SAE) ha desarrollado un sistema de clasificación ampliamente utilizado para identificar la viscosidad de los aceites lubricantes, esencial para garantizar un rendimiento óptimo en motores y transmisiones bajo diferentes condiciones de temperatura. A través de las normas SAE J300 y SAE J306, los aceites se categorizan en monogrado y multigrado, cada uno destinado a aplicaciones específicas.

La viscosidad es una de las propiedades más importantes de los aceites lubricantes, y las normas SAE J300 y SAE J306 clasifican los aceites para motores de combustión y transmisiones de potencia exclusivamente en función de su viscosidad. Por ello, la clasificación SAE se indica con un número que no hace referencia a la calidad, composición química o aditivos del aceite, sino únicamente al rango de temperaturas en el que el aceite mantiene sus propiedades. En el caso de los aceites de motor, la norma SAE J300 establece la clasificación mostrada en la **Tabla 1-1** [18].

Capítulo 1: Introducción

Tabla 1-1: Clasificación SAE de los aceites de motor según la SAE J300⁽¹⁾⁽²⁾[18]

Grado de viscosidad SAE	Viscosidad de arranque ⁽³⁾ a baja temperatura (°C) (mPa·s) Máx	Viscosidad de bombeo ⁽⁴⁾ a baja temperatura (°C) máx sin estrés de fluencia (mPa·s)	Viscosidad cinemática ⁽⁵⁾ a baja velocidad de corte (mm²/s) a 100°C Mín	Viscosidad cinemática ⁽⁵⁾ a baja velocidad de corte (mm²/s) a 100°C Máx	Viscosidad a alta velocidad ⁽⁶⁾ de corte (mPa·s) a 150°C Mín
0W	6200 a -35	60 000 a -40	3,8	---	---
5W	6600 a -30	60 000 a -35	3,8	---	---
10W	7000 a -25	60 000 a -30	4,1	---	---
15W	7000 a -20	60 000 a -25	5,6	---	---
20W	9500 a -15	60 000 a -20	5,6	---	---
25W	13 000 a -10	60 000 a -15	9,3	---	---
8	---	---	1,7	---	---
12	---	---	2,4	---	---
16	---	---	2,6	<8,2	2,6
20	---	---	5,6	<9,3	2,6
30	---	---	9,3	<12,5	2,9
40	---	---	12,5	<16,3	3,5 (0W-40, 5W-40, y 10W-40 grados)
40	---	---	12,5	<16,3	3,7 (15W-40, 20W-40), 25W-40, 40 grados)
50	---	---	16,3	<21,9	3,7
60	---	---	21,9	<26,1	3,7

Notas:

1. 1 mPa·s = 1 cP; 1 mm²/s = 1 cSt
2. todos los valores, excepto la viscosidad de arranque a baja temperatura, son especificaciones críticas según lo definido por ASTM D3244 (ver texto, sección 7).
3. ASTM D5293: viscosidad de arranque – el protocolo de especificación no crítica en ASTM D3244 se aplicará con un valor de P de 0,95.
4. ASTM D4684: tenga en cuenta que la presencia de cualquier estrés de fluencia detectable por este método constituye un fallo independientemente de la viscosidad.
5. ASTM D445
6. ASTM D4683, ASTM D4741, ASTM D5481, o CEC L-36-90.

Por ejemplo, un aceite SAE 40 según la **Tabla 1-1** indica que el aceite debe tener un grado de viscosidad entre 12,5 y 16,3 cSt a 100°C.

En la **Tabla 1-2** se muestra la clasificación de los aceites lubricantes de la caja de cambios (SAE J306). En dicha tabla aparecen los dos tipos principales de viscosidad que se consideran en aceites lubricantes:

Capítulo 1: Introducción

- **Viscosidad dinámica o absoluta:** Es la resistencia al flujo debido a la aplicación de una fuerza externa, por ejemplo, el movimiento de un pistón, indicando la resistencia que ofrece a ser movido. Se determina utilizando un viscosímetro rotacional y se mide en centipoise (cP).
- **Viscosidad cinemática:** Es la resistencia al flujo debido a la gravedad. Para determinar esta viscosidad se utiliza un viscosímetro capilar en el que se permite que el aceite fluya bajo la influencia de la gravedad midiendo el tiempo que tarda el lubricante en hacerlo. Se mide en centistokes (cSt) y esta es la viscosidad utilizada para caracterizar a los diferentes aceites analizados en la tesis.

Tabla 1-2: Clasificación SAE de los aceites lubricantes de caja de cambios según la SAE J306[19]

Grado de viscosidad SAE	Temperatura máxima para viscosidad absoluta 150.000 cP ⁽¹⁾	Viscosidad cinemática a 100 °C, cS ⁽²⁾ (mínimo)	Viscosidad cinemática a 100 °C, cS ⁽²⁾ (máximo)
70W	-55	3,8	—
75W	-40	3,8	—
80W	-25	8,5	—
85W	-12	11,0	—
65	—	3,8	<5,0
70	—	5,0	<6,5
75	—	6,5	<8,5
80	—	8,5	<11,0
85	—	11,0	<13,5
90	—	13,5	<18,5
110	—	18,5	<24,0
140	—	24,0	<32,5
190	—	32,5	<41,0
250	—	41,0	—

Notas: 1 cP = 1 mPa·s; 1 cSt = 1 mm²/s

⁽¹⁾ Usando ASTM D2983

⁽²⁾ Usando ASTM D445

Estas especificaciones se han diseñado con la intención de ayudar tanto a los fabricantes de motores y cajas de cambios como a los consumidores, a que puedan

Capítulo 1: Introducción

seleccionar los lubricantes adecuados en función de la viscosidad a temperaturas ambiente diferentes.

La norma SAE J300 categoriza las viscosidades basándose en su viscosidad dinámica a baja temperatura y la viscosidad cinemática a 100°C y divide a los aceites de motor en diferentes grados de viscosidad pudiéndose identificar tanto aceites monogrado como multigrado. Los aceites monogrado son aquellos diseñados para cumplir con los requisitos de viscosidad para una sola temperatura específica y la SAE J300 los divide en dos categorías principales: aceites de verano y aceites de invierno. Los primero de ellos, tienen tan solo un número (SAE 30, SAE 40) y están diseñados para que funcionen a temperaturas más cálidas ofreciendo protección debido a que el espesor de la película fluida de aceite disminuya. Y los segundos, aceites de invierno, aparecen con la letra W (Winter) indica que son aceites para ser utilizados en invierno ya que destacan por tener una buena capacidad de trabajar a temperaturas frías, especialmente durante el arranque en frío. El número indica cual es la capacidad de fluir cuando las temperaturas son bajas y cuanto menor es el número, el aceite va a ser más fluido en frío. Por lo general, los aceites monogrado no son tan versátiles como lo son los multigrados en temperatura extremas y sólo pueden asumir un rango de temperaturas, es decir, en función de la viscosidad SAE del aceite, éste trabajará mejor a temperaturas bajas o altas. Por ello, desde el punto de vista práctico, implicaría usar un lubricante en invierno por ejemplo un SAE 10W y otro en verano por ejemplo un SAE 40. Para ciertas aplicaciones o climas específicos, los aceites monogrado pueden ser la elección preferida. Por el contrario, en aquellos entornos con variaciones significativas de temperatura se utilizan aceites multigrado debido a su versatilidad.

Los aceites multigrado se diseñan para que tengan un buen rendimiento y para que ofrezcan protección, tanto a bajas como altas temperaturas a diferencia de los monogrado. Los aceites multigrado, según la clasificación que hace la especificación SAE J300, tienen un grado de viscosidad compuesto por dos números. El primero de ellos seguido por la W (significa Winter en inglés) indica el grado de viscosidad a temperaturas bajas. Cuanto menor sea el número, mejor va a ser la fluidez y la capacidad de bombeo a bajas temperaturas significando que puede fluir bien y proteger el motor evitando el desgaste durante el arranque. El segundo número, indica la viscosidad del lubricante a 100°C (temperatura aproximada a la que trabaja el motor). Cuanto mayor sea el número, indica que el aceite va a poder trabajar a altas temperaturas manteniendo la viscosidad y

Capítulo 1: Introducción

manteniendo la protección. Por ejemplo, el aceite lubricante multigrado SAE 15W 40, el número 15W denota la aptitud con la que ese aceite puede ser bombeado a bajas temperaturas. Cuanto menor sea el número que precede a “W”, el motor va a poder arrancar a más bajas temperaturas. Por lo que un aceite multigrado SAE 5W 40 va a tener un mejor rendimiento que el 15W 40 a bajas temperaturas durante el arranque. Es por ello por lo que, en un aceite multigrado, el primer número seguido por la W va a significar la facilidad del arranque cuando las temperaturas son bajas. Es lo que se conoce en inglés con el término “Startability”. El segundo término, 40, hace referencia a la viscosidad real del aceite después de que se haya encendido el motor y haya alcanzado la temperatura de operación, comportándose en ese caso como un SAE 40.

Los aceites lubricantes multigrado, al ser menos sensibles a la temperatura, van a tener un arranque en invierno o en frío más fácil debido a su fluidez por lo que su principal ventaja radica en que tienen la capacidad de proteger al motor tanto en el arranque, ya que tienen una baja viscosidad del aceite permitiéndole acceder rápidamente a las partes del motor protegiéndolo del desgaste, como mantener una viscosidad adecuada cuando el motor alcanza la temperatura en sus condiciones normales de trabajo. La capacidad que tienen los aceites multigrado de operar en un amplio margen de temperaturas se consigue a través de la incorporación de polímeros o agentes mejoradores de la viscosidad espesantes que se expanden cuando están sometidos al calor, evitando que el aceite pierda su viscosidad requerida en esas condiciones de trabajo. Dichos aditivos, son capaces de incrementar el índice de viscosidad de un aceite de viscosidad baja, conocidos como aceite ligero, hasta valores que cumplan con las especificaciones establecidas para aceites más viscosos.

La clasificación de los aceites para transmisiones se realiza de acuerdo con la norma SAE J306, de manera parecida a los aceites de motor. La distinción principal radica en cómo se define el grado para bajas temperaturas: para los aceites de transmisión, se especifica según la temperatura a la cual el aceite alcanza una viscosidad de 150.000 cP (**Tabla 1-2**). Esa viscosidad es la máxima viscosidad que se puede alcanzar sin comprometer la integridad de los engranajes [19]. A pesar de que en la norma SAE J306 aparezca una numeración de escala mayor, no significa que la viscosidad sea más alta, tal y como se puede observar en la **Figura 1-2**. Su propósito es la diferenciación entre los aceites de motor y los de transmisión [17].

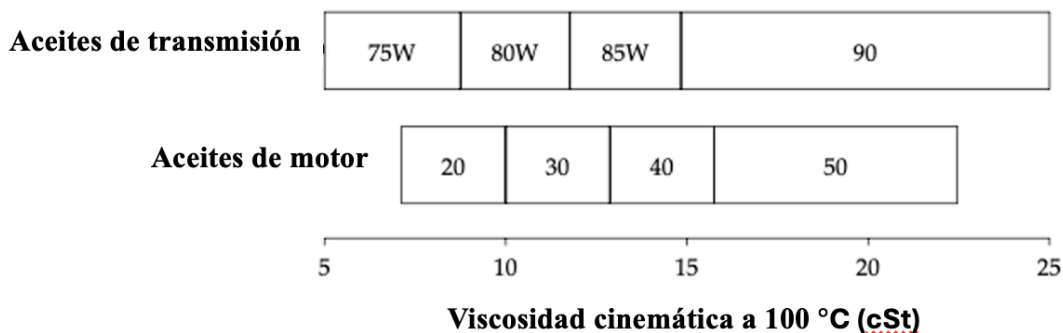


Figura 1-2: Comparación de los grados SAE de aceites de motor y transmisión [17]

1.2.2.4 Clasificación ISO

El sistema de clasificación de viscosidad ISO (International Organization for Standardization) para aceites lubricantes industriales fue desarrollado por la Society of Tribologists and Lubrication Engineers (STLE) de Estados Unidos y la British Standards Institution (BSI) del Reino Unido. Este sistema estandariza la clasificación de aceites lubricantes según su viscosidad medida a 40°C, lo que facilita la selección adecuada en diversas aplicaciones industriales. Es ampliamente utilizado a nivel global para asegurar la eficiencia y durabilidad de los equipos. Según esta clasificación, el número ISO de un aceite corresponde a su grado de viscosidad a 40°C. Por ejemplo, un aceite clasificado como ISO 68 tiene una viscosidad de 68 cSt ($\pm 10\%$) a dicha temperatura.

1.2.2.5 Clasificación según la ASTM D-2422

Por otro lado, ASTM International (American Society for Testing and Materials) es una organización internacional de desarrollo de normas. En el ámbito de los lubricantes, la norma ASTM D-2422 [20] recoge una clasificación que se puede aplicar a todos los lubricantes fluidos, derivados o no del petróleo, que se pueden combinar sin dificultad con el objetivo de crear lubricantes con una viscosidad determinada, es decir lubricantes para engranajes, cojinetes, cilindros compresores, etc. Mediante este sistema de clasificación, **Tabla 1-3**, se eliminan aquellas viscosidades intermedias que no son necesarias consiguiendo de este modo, el número de grados de viscosidad que se utilizan en la lubricación de maquinaria industrial [20].

Capítulo 1: Introducción

Tabla 1-3: Clasificación de la viscosidad ISO según ASTM D2422 [20]

Grado de viscosidad ISO	Viscosidad cinemática a 40°C (mm ² /s)		
	Mínimo	Máximo	Punto intermedio
2	1,98	2,42	2,2
3	2,88	3,52	3,2
5	4,14	5,06	4,6
7	6,12	7,48	6,8
10	9,0	11,0	10,0
15	13,5	16,5	15,0
22	19,8	24,2	22,0
32	28,8	35,2	32,0
46	41,4	50,6	46,0
68	61,2	74,8	68,0
100	90,0	110	100
150	135	165	150
220	198	242	220
320	288	352	320
460	414	506	460
680	612	748	680
1000	900	1100	1000
1500	1350	1650	1500

1.2.2.6 Especificaciones militares

Las especificaciones militares para aceites lubricantes son rigurosas y detalladas, asegurando que estos productos cumplan con los más altos estándares de rendimiento y calidad bajo condiciones extremas. Estas especificaciones no solo garantizan la funcionalidad y protección del equipo militar, sino que también estandarizan los lubricantes para su uso en diferentes fuerzas armadas.

Capítulo 1: Introducción

Los aceites también se pueden clasificar siguiendo especificaciones militares. Las especificaciones militares para los aceites lubricantes son exhaustivas y se actualizan regularmente para asegurar que cumplen con los más altos estándares de rendimiento y calidad. Cada especificación militar para lubricantes comienza con una sección detallada que describe su uso previsto. Esto garantiza que cada producto se aplique de manera adecuada y eficiente, maximizando su rendimiento en las condiciones operativas para las que fue diseñado.

Las propiedades físicas y químicas de los lubricantes son definidas con precisión, estableciendo los niveles de rendimiento esperados. Estos criterios son fundamentales para asegurar la funcionalidad y la protección del equipo militar en diversas condiciones.

Los lubricantes son identificados por símbolos militares, es decir, con designaciones de números de código de la OTAN tal y como se indica en la **Tabla 1-4**. Esta identificación estandarizada es crucial para la logística y la interoperabilidad dentro de las fuerzas armadas y entre los aliados.

Tabla 1-4: Productos con su número OTAN

Producto	Especificación	Grado	Código OTAN
Aceite lubricante mineral	MIL-PRF-2104	10W	O-237
	NME-2992	50	O-239
Aceite lubricante sintético	TL 9150-0080	5W30	O-1178
	DCSEA 215/C	5W40	O-1179
	ACEA E6	10W40	O-1180
Aceite lubricante mineral	MIL-PRF-2104	15W40	O-1236
Grasa sintética de aviación con disulfuro de molibdeno	MIL-G-21164		G-353
Grasa sintética de aviación de extrema presión	MIL-PRF-23827		G-354
Grasa de aviación para rotores de helicópteros	MIL-G-25537		G-66
Grasa de uso general para automoción y artillería	D. STAN 91-27		G-403

Capítulo 1: Introducción

Líquido hidráulico mineral superlimpio de aviación	MIL-PRF-5606		H-515
Líquido de frenos sintético para automoción	NME-3009		H-542
	BS 4475:2000	ISO VG 68	H-572
Líquido hidráulico mineral	MIL-PRF-17672	ISO VG 46	H-573
	D.STAN 91-39	ISO VG 32	H-576
Compuesto anticorrosivo de capa blanda para aplicación en frío	MIL-PRF-1673		C-620
Compuesto anticorrosivo de capa dura para aplicación en caliente	MIL-C-11796		C-633
Aceite lubricante protector	MIL-PRF-21260	10W 30	C-640 C-642
Combustible para turbinas de aviación	NME-3004 MIL-DTL-83133		F-34 (JP-8) F-35 (JET A1)
Gasóleo de automoción (Clase A).	Real Decreto 1088/2010		F-54
Combustible diesel naval (DFM)	MIL-DTL-16884		F-76
Gasóleo para uso agrícola y marítimo (Clase B).	Real Decreto 1088/2010		TF-04
Gasóleo de calefacción (Clase C)	Real Decreto 1088/2010		TF-05
Gasolina sin plomo (IO 95).	Real Decreto 1088/2010		TF-07

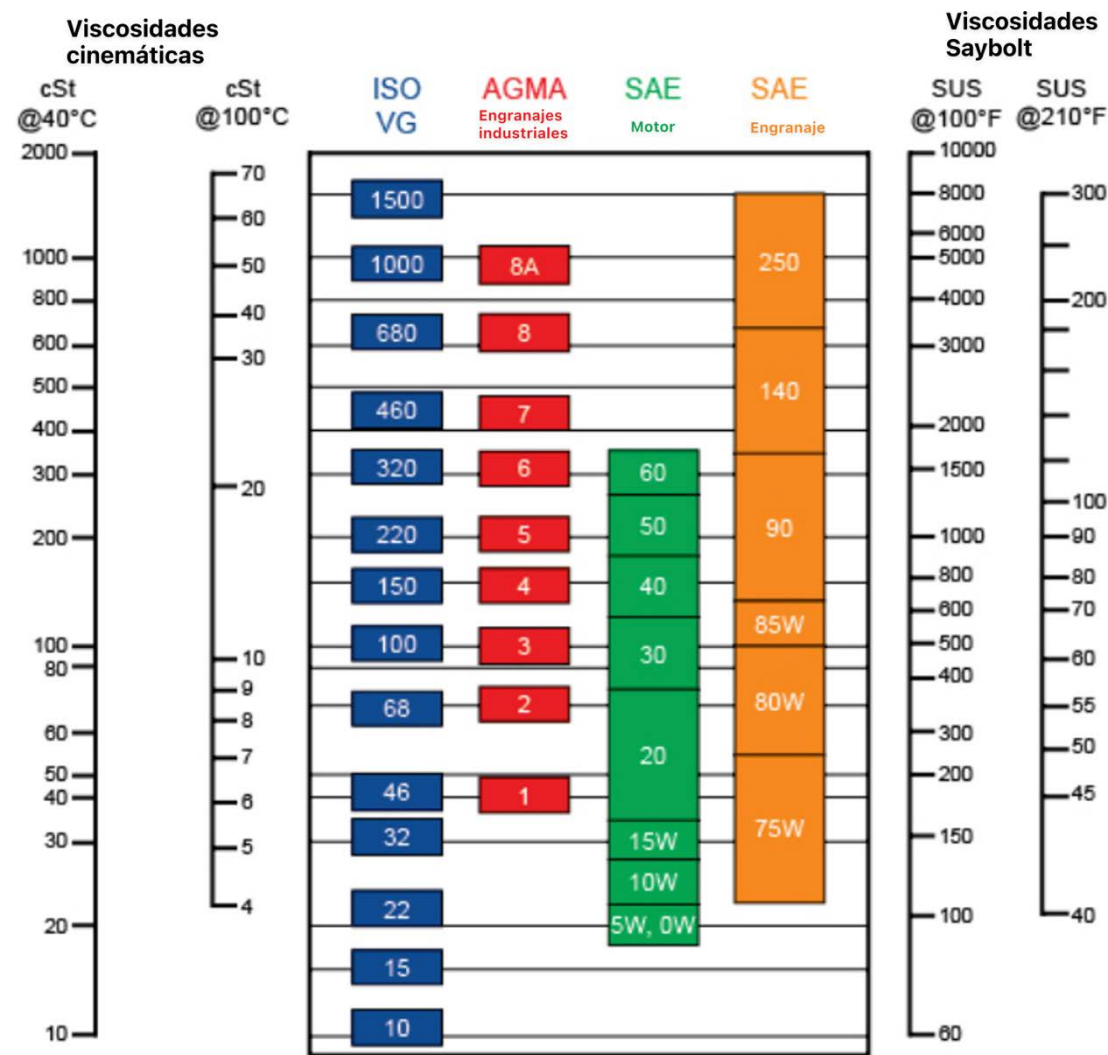
1.2.2.7 Tabla de equivalencia de viscosidad

Debido a la diversidad de sistemas de clasificación de viscosidad usados en el mundo, es importante contar con una herramienta que permita hacer conversiones y

Capítulo 1: Introducción

comparaciones precisas entre estas diferentes clasificaciones. Por esta razón, las tablas de equivalencias de viscosidad son una herramienta imprescindible para realizar la conversión exacta entre diversos sistemas de clasificación de viscosidad, garantizando que se elija el lubricante adecuado para cada aplicación específica. Además, permiten comparar aceites de diferentes fabricantes y estándares, asegurando que se respeten las especificaciones de lubricación para mantener la eficiencia y la vida útil de los equipos. La **Tabla 1-5**, no solo facilita el proceso de selección de lubricantes, sino que también asegura la compatibilidad y la eficiencia operativa en diferentes condiciones de trabajo.

Tabla 1-5: Tabla de equivalencia de viscosidad [21]



La tabla de equivalencias de viscosidad (**Tabla 1-5**) presenta una comparación entre diversos sistemas de clasificación de viscosidad de aceite monogrado, incluyendo:

Capítulo 1: Introducción

- **Viscosidad cinemática** (mm^2/s a 40°C y 100°C): Medida de la resistencia del aceite a fluir bajo condiciones de temperatura específicas. Se mide en centistokes (cSt) y varía según la temperatura. Este tipo de viscosidad permite conocer el comportamiento del aceite en condiciones normales de funcionamiento.
- **ISO VG** (Grados de Viscosidad ISO): Estándar internacional que clasifica aceites industriales según su viscosidad medida a 40°C . Permite evaluar y escoger lubricantes para usos industriales.
- **Grados AGMA**: Clasificación de la American Gear Manufacturers Association para lubricantes de engranajes, especificada a 100°F . Indica la viscosidad requerida para una adecuada lubricación de engranajes en diferentes sectores industriales.
- **Grados SAE para aceites de motor**: Sistema de la Society of Automotive Engineers que clasifica aceites de motor basándose en la viscosidad a 100°C . Facilita la elección del aceite correcto para motores de automóviles en función de las condiciones ambientales y de funcionamiento.
- **Grados SAE para aceites de engranajes**: Clasificación SAE específica para aceites de engranajes o transmisión, destacando aquellos diseñados para bajas temperaturas. Asegura la correcta lubricación de los engranajes, sobre todo en climas fríos.
- **Viscosidades Saybolt** (SUS/ 210°F y SUS/ 100°F): Medición de la viscosidad en segundos Saybolt Universal (SUS) a dos temperaturas diferentes. Este método se usa sobre todo en Estados Unidos, y sirve para conocer de forma rápida y sencilla la viscosidad de los aceites en usos determinados.

1.2.3 Propiedades de los lubricantes

Los lubricantes, independientemente de su clasificación, están compuestos por una amplia gama de combinaciones de hidrocarburos que no solo facilitan la lubricación, sino que también cumplen otras funciones importantes, como la reducción de fricción y desgaste. En la actualidad, debido a las demandas de la tecnología avanzada, la creación de lubricantes se ha vuelto un proceso altamente detallado y complejo. Los aceites minerales contienen ingredientes esenciales para la lubricación, aunque también pueden incluir componentes que interfieren con esta función. Por ello, es fundamental que los

Capítulo 1: Introducción

lubricantes, ya sean de origen natural o sintético, mantengan un equilibrio en sus ingredientes para garantizar su estabilidad frente a la oxidación, la cual variará según el uso específico del lubricante [17].

Para mejorar las propiedades del aceite base, se añaden componentes conocidos como aditivos, los cuales son clave para optimizar características como la resistencia a la corrosión, la oxidación y la formación de espuma, asegurando el rendimiento completo del lubricante.

Los pilares fundamentales que determinan el comportamiento y rendimiento de un lubricante son: el nivel de fricción requerido y su resistencia a la degradación. Durante el diseño y uso de un lubricante, es crucial que ambos aspectos se mantengan estables a lo largo del tiempo, incluso bajo condiciones de trabajo exigentes. Dado que el lubricante es un hidrocarburo, está expuesto a la continua degradación debido a la interacción con el oxígeno atmosférico y el agua. Por ello, uno de los principales objetivos de añadir aditivos al aceite base es mitigar y retrasar dicha degradación. Sin embargo, este proceso de deterioro es inevitable, y su estudio será uno de los objetivos de esta tesis, enfocándose específicamente en lubricantes para aceite de motor y cajas de cambio. Tanto el aceite de motor, que representa casi la mitad del mercado de lubricantes, como el de caja de cambios, tienen la función principal de prolongar la vida útil de las piezas móviles, que operan bajo condiciones variables de velocidad, presión y temperatura.

Cuando la temperatura es baja, es crucial que el lubricante mantenga una fluidez adecuada para asegurar la lubricación de las piezas. En temperaturas altas, debe garantizar la separación entre las piezas móviles, minimizando el desgaste. Por ello, los lubricantes son esenciales para reducir la fricción entre las partes en movimiento, lo que no solo previene el desgaste excesivo, sino que también facilita la disipación del calor generado por el movimiento, evitando el sobrecalentamiento. En otras palabras, los lubricantes permiten un deslizamiento más suave entre las piezas y ayudan a transferir el calor hacia el exterior.

En las transmisiones automáticas, además de las funciones básicas de reducción de fricción y disipación de calor ya mencionadas, los lubricantes también actúan como fluidos hidráulicos y de transferencia de potencia. Esto significa que, además de proteger y lubricar, el lubricante también juega un papel crucial en la transmisión de fuerza y potencia dentro del sistema. Como fluido hidráulico, activa y controla los componentes

de la transmisión, y como medio de transferencia de potencia, permite que la energía del motor se transmita eficientemente a las ruedas del vehículo, garantizando el correcto funcionamiento y la eficiencia del sistema.

1.2.4 Aditivos y mejoradores de rendimiento

Los aditivos lubricantes son sustancias químicas que se añaden en pequeñas cantidades al aceite lubricante base con la finalidad de obtener un determinado comportamiento. La composición típica de un aceite lubricante es entorno al 95% de aceite base, el cual confiere las propiedades físicas del aceite y el resto, entorno a un 5%, lo componen los aditivos que suelen ser sustancias orgánicas u organometálicas. Dependiendo del fabricante, estas proporciones pueden cambiar llegando incluso a unas proporciones de 75 % del aceite base y 25 % de aditivos. Por ello es importante que estos últimos sean compatibles y solubles en el aceite base.

Los aditivos en los aceites lubricantes tienen distintos propósitos. Mientras algunos aditivos se usan para fortalecer y mejorar el aceite, otros se utilizan para corregir o eliminar aspectos negativos, por lo que esta dualidad en la función de los aditivos es esencial para garantizar que el aceite lubricante funcione de manera óptima en diversas condiciones y aplicaciones. Por esta razón, podemos categorizar los aditivos según los impactos específicos que tienen en el aceite:

- **Aditivos retardadores de la degradación del aceite o neutralizadores:** Estos se introducen para contrarrestar o eliminar propiedades perjudiciales del aceite como por ejemplo antioxidantes (evitando la formación de lodos y ácidos), anticorrosivos, antidesgaste, agentes alcalinos, agentes antiemulsificadores, detergentes, dispersantes. A los aditivos detergentes, dispersantes e inhibidores de la oxidación también se les conoce como estabilizadores y agentes de control de depósitos [22].
- **Agentes mejoradores de las características físicas del aceite:** Estos aditivos se añaden para potenciar ciertos comportamientos del aceite base, como el comportamiento dieléctrico, el sellado, el índice de viscosidad, la extrema presión, entre otros. Por ejemplo, los modificadores de viscosidad se usan para asegurar que el aceite mantenga una consistencia adecuada en diferentes temperaturas.

Capítulo 1: Introducción

A pesar de que los aditivos se añaden al aceite base en pequeñas proporciones, son esenciales para mejorar el rendimiento del equipo y la eficacia de los lubricantes, así como prolongar la durabilidad de ambos. Además, contribuyen de manera significativa a proteger y alargar la vida útil de maquinaria como motores y cajas de cambios que los utilicen. Por ello, se emplean diferentes aditivos y diferentes combinaciones de estos con el fin de alcanzar el rendimiento deseado. Ello no implica que si se quiere obtener un aceite con unas características determinadas se mezclen los aditivos anteriores para obtener un determinado aceite ya que hoy en día se puede encontrar en el mercado productos que proporcionan varias características simultáneamente. A continuación, se describen uno por uno los principales tipos de aditivos.

1.2.4.1 Detergentes

Los aditivos detergentes se utilizan para limpiar superficies en donde se depositan los subproductos originados, principalmente, de la combustión y de la propia oxidación del aceite. Estos subproductos suelen depositarse en válvulas, pistones y segmentos afectando a su correcto funcionamiento. En el aceite de motor, los aditivos detergentes se comportan como un jabón ya que evitan la formación de depósitos semejantes al alquitrán en superficies calientes [23]. Estos compuestos poseen también una propiedad alcalina que les permite contrarrestar y neutralizar ácidos específicos, como el ácido nítrico, ácido carboxílico, ácido sulfúrico y ácido fosfórico. Estos ácidos suelen formarse principalmente durante los procesos de combustión y oxidación del aceite. Al neutralizar estos ácidos, la propiedad alcalina actúa como escudo y ayuda a proteger el motor y otros componentes contra la corrosión y el desgaste que estos ácidos podrían causar. Por ello, los detergentes son aditivos utilizados para controlar principalmente la oxidación, la corrosión y también la acumulación de resina en el motor.

Uno de los indicadores de este efecto es el Número Básico Total (TBN, Total Basic Number) refleja la capacidad alcalina de los aceites de motor y caja de cambios y es un indicador clave que se evalúa en los análisis que se hacen en el laboratorio. Esta característica alcalina es esencial porque actúa como una defensa contra los ácidos que pueden formarse en el aceite, los cuales, si no se neutralizan, pueden causar corrosión en las superficies internas del motor. En ausencia de aditivos con propiedades alcalinas, el motor estaría en riesgo de sufrir daños corrosivos. Por lo tanto, el TBN no solo indica la

Capítulo 1: Introducción

calidad y capacidad protectora del aceite, sino que también señala cuánto tiempo puede seguir protegiendo el motor antes de necesitar un cambio.

Los aditivos detergentes son jabones organometálicos que contienen fundamentalmente bario, calcio y magnesio e incluyen: sulfonato de calcio, sulfonato de bario, sulfonato de magnesio y fenato de calcio [24]. La composición de los detergentes permite que tengan una buena solubilidad en el aceite. Esto se consigue con grupos polares tensioactivos tales como el sulfonato, el fenato y el carboxilato [25] y un grupo hidrocarburo con un número adecuado de átomos de carbono.

Un ejemplo visual de cómo estos aditivos detergentes actúan en un entorno oleoso se puede ver en la **Figura 1-3**, que muestra una suspensión oleosa de productos de oxidación polares. Los grupos polares tensioactivos que contienen los aditivos, como el sulfonato, el fenato y el carboxilato, se dirigen hacia los productos de oxidación polares, y contribuyen a mantenerlos suspendidos en el aceite. Esto es esencial para evitar que los productos de oxidación se aglomeren y formen depósitos, lo que mantiene el aceite limpio y el motor funcionando de manera eficiente.

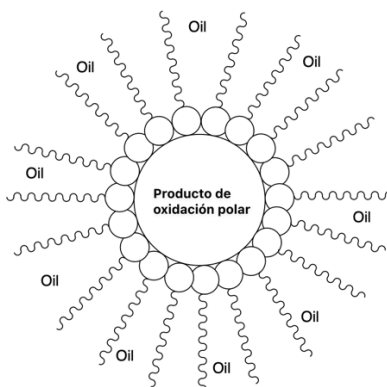


Figura 1-3: Suspensión oleosa de producto de oxidación polar [22]

Los grupos polares tienen la función de capturar y envolver los productos de oxidación polares, formando micelas como se ve en la imagen de la **Figura 1-3**. La parte polar de la molécula se une a los productos de oxidación polares, mientras que las cadenas hidrocarbonadas (no polares) de los aditivos se proyectan hacia el aceite, facilitando su solubilidad y dispersión. Esta dualidad en la estructura molecular de los detergentes es esencial para su eficacia en la limpieza y mantenimiento de la lubricación.

Los aditivos más comunes de los detergentes son jabones de metales orgánicos como el bario, el calcio y el magnesio y contienen: sulfonato de bario, de calcio, de magnesio y fenato de calcio.

1.2.4.2 Dispersantes

Los aditivos dispersantes actúan como agentes limpiadores en los aceites de motor. Están compuestos por moléculas polares diseñadas específicamente para rodear y aislar las partículas que se forman como resultado de la combustión, como es el caso del hollín. Al encapsular estas partículas, los dispersantes evitan que el hollín y otros subproductos se agrupen y formen depósitos más grandes que podrían obstruir o dañar las partes internas del motor. Estos aditivos mantienen el hollín y otros contaminantes suspendidos en el aceite, permitiendo que sean eliminados cuando se cambia el aceite, y así aseguran un funcionamiento más limpio y eficiente del motor. Como muestra la **Figura 1-4**, el dispersante forma micelas al envolver las partículas de hollín. Estas micelas tienen una cabeza polar y una cola oleofílica que ayuda a mantener las partículas de hollín pequeñas y finamente divididas, evitando que se condensen fácilmente en las superficies de los componentes. Con este tipo de dispersantes se evita que las partículas de hollín se depositen en las superficies más frías del motor (tapas de balancines y cárter del motor) al evitar su coagulación ya que lo mantiene en pequeñas partículas [24].

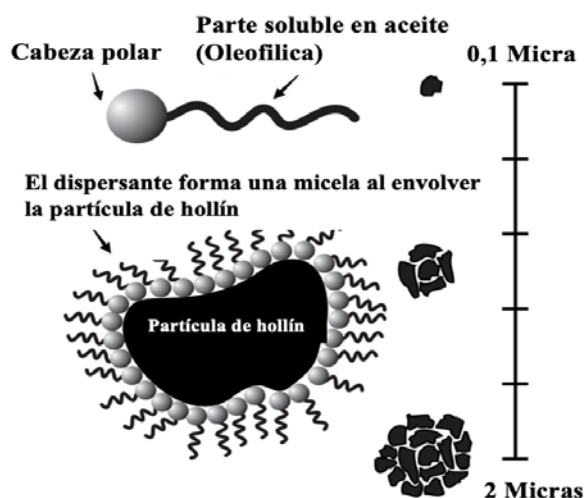


Figura 1-4: Dispersantes usados en aceites de motor para controlar la aglomeración de las partículas de carbonilla [24]

Prevenir la acumulación de hollín en el motor es esencial para su correcto funcionamiento. Si el hollín se aglomera y no se dispersa adecuadamente, puede asentarse en áreas específicas del motor, especialmente bajo los segmentos del pistón. Esta acumulación puede llevar a un desgaste no deseado y acelerado de estas partes. Además, si los segmentos del pistón se ven afectados por el hollín, su flexibilidad y capacidad de movimiento pueden verse comprometidas. Esto no solo reduce la eficiencia del motor,

Capítulo 1: Introducción

sino que también puede provocar daños más graves, como la ruptura de estas áreas por lo que es crucial controlar y dispersar el hollín para mantener la integridad y la vida útil del motor.

Los aditivos detergentes y dispersantes constituyen el mayor porcentaje de los aditivos, representando entre el 45% y el 50% del total. Aunque ambos aditivos son clasificados como estabilizadores y agentes de control de depósitos, ambos se diferencian en [22]:

- **Contenido de metales:** Los detergentes tienen en su composición metales como el calcio, magnesio y, en algunos casos, bario. Por otro lado, los dispersantes no contienen estos metales.
- **Neutralización de ácidos:** Una característica distintiva de los detergentes es su capacidad para neutralizar ácidos, algo que los dispersantes no pueden hacer.
- **Eficacia en limpieza y suspensión:** Gracias a su mayor peso molecular, los dispersantes superan a los detergentes en términos de limpieza y capacidad de suspensión.

A pesar de que ambos aditivos desempeñan roles similares en la protección y mantenimiento del motor, sus propiedades y funciones específicas los hacen únicos en sus respectivas aplicaciones.

1.2.4.3 Antidesgaste

Los aditivos antidesgaste son aditivos que se añaden al aceite base con la finalidad de proteger las superficies lubricadas frente al desgaste prematuro. Esto se logra debido a que, bajo condiciones de alta presión, estos aditivos se activan y reaccionan con las superficies de los componentes lubricados. Esto da lugar a la formación de una suave película protectora parecida al jabón que va a proporcionar una mayor lubricidad en aquellos puntos de contacto en donde hay fricción entre las superficies deslizantes. Esta capa actúa reduciendo y evitando el contacto directo entre las superficies, lo que a su vez disminuye el desgaste de forma constante y controlada.

Algunos aditivos antidesgaste tienen la habilidad de neutralizar los ácidos formados debido a la combustión y oxidación del aceite, lo que evita la corrosión y el desgaste que esta podría causar. Además, estos aditivos amplifican la función lubricante del aceite al potenciar sus características lubricantes, lo que mejora el deslizamiento entre las partes

Capítulo 1: Introducción

que están siendo lubricadas. Como resultado, se reduce la fricción y, por tanto, el calor generado por esta acción. Estos aditivos no solo protegen contra el desgaste corrosivo, sino que también mejoran la eficiencia y la vida útil del aceite y del motor.

Durante más de medio siglo, los dialquilditiofosfatos de zinc (ZDDP, por sus siglas en inglés) han sido muy valorados en la industria de los lubricantes por su versatilidad y bajo costo. Se utilizan en una amplia gama de productos, como aceites de motor, fluidos de transmisión, aceites para engranajes, grasas y otros lubricantes. Lo que hace destacar al ZDDP es su capacidad para cumplir múltiples funciones de manera eficiente: actúa como un excelente agente antidesgaste, un moderado aditivo de extrema presión (EP), y un eficaz inhibidor de la oxidación y la corrosión. Esta combinación de funciones, junto con ser una opción más económica, lo convierte en una opción destacada en términos de costo-beneficio frente a otras alternativas químicas en el mercado [22]. Los aditivos antidesgaste más comunes son: Ditiofosfato/ditilofosfato de zinc (ZDDP) y el fosfato de tricresilo (TCP).

1.2.4.4 Extrema presión

Los aditivos de extrema presión (EP) se añaden al aceite base con la finalidad de que reaccionen rápidamente con una superficie metálica formando películas de sulfuro o fosfato cuando actúen en condiciones exigentes de carga y temperatura, **Figura 1-5**. De este modo se protegen las piezas lubricadas del desgaste extremo que puede dar lugar a fallos más catastróficos como pueden ser el agarrotamiento, el gripado o el rayado. Los aditivos de EP más habituales incluyen compuestos de fósforo, cloro y azufre.

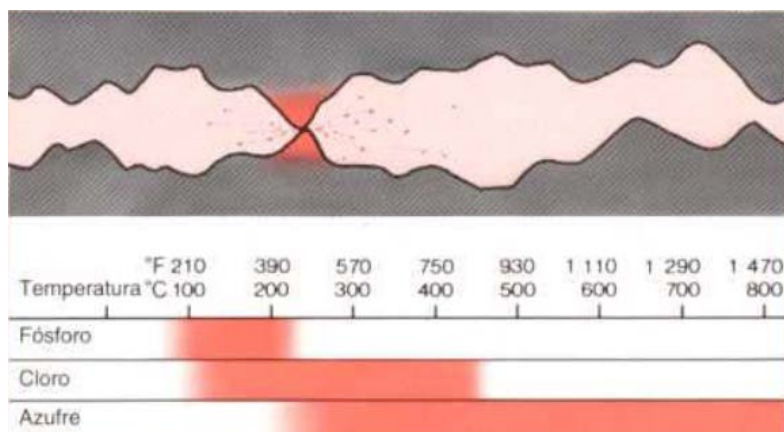


Figura 1-5: Cizallamiento de las superficies metálicas debido a aditivos EP. (Fuente: manual de lubricación SKF [26])

Capítulo 1: Introducción

Aunque actualmente no se conoce completamente el mecanismo de acción de los aditivos de extrema presión, se sabe que interactúan químicamente con el metal de tal manera que generan un compuesto en la superficie más débil que el propio metal. Debido a esta fragilidad, el compuesto se cizalla o desliza con facilidad cuando hay presión o fricción. Esta característica es crucial porque, en lugar de tener dos superficies metálicas que se contacten y posiblemente se suelden entre sí debido a la presión y el calor, el compuesto generado actúa como una capa intermedia que se desliza o cizalla primero. De este modo, los aditivos EP actúan como un escudo, evitando el contacto directo entre las superficies metálicas y previniendo el desgaste o la soldadura que podría ocurrir en su ausencia.

Los aditivos EP, a veces llamados aditivos antifricción, actúan especialmente bien bajo alta presión. Bajo estas circunstancias, crean una capa protectora en las piezas, similar a una película de jabón, que mejora la lubricación y reduce la fricción, **Figura 1-6**.

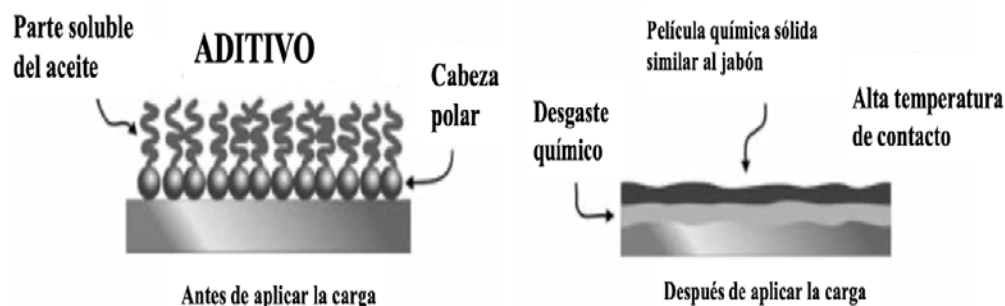


Figura 1-6: Aditivo de extrema presión

Bajo condiciones de alta presión y temperatura, los aditivos EP entran en acción y se genera una reacción química con las superficies metálicas. Esta reacción da lugar a la formación de una película compuesta principalmente de sulfuros y/o fosfatos. Esta capa creada es notablemente resistente al desgaste, sirviendo como una barrera que resguarda las superficies metálicas de un mayor deterioro. Durante este proceso, se utiliza una mínima cantidad de metal para generar dicha película protectora, lo que resulta en una reducción del desgaste global del componente. A pesar de que se produce cierto "desgaste químico" al formar esta capa protectora, el objetivo principal de los aditivos EP es minimizar el desgaste total y salvaguardar los componentes de la maquinaria.

La distinción entre aditivos antidesgaste (AW) y de extrema presión puede ser ambigua, ya que diferentes expertos tienen opiniones variadas sobre si estos aditivos son distintos o si algunos aditivos poseen propiedades tanto antidesgaste como de extrema

Capítulo 1: Introducción

presión. La principal diferencia entre ambos aditivos radica en la condición de carga o presión ejercida sobre los componentes metálicos en contacto a la que actúan. Mientras que los aditivos antidesgaste están diseñados para trabajar en condiciones de carga normal (condiciones operativas habituales donde las fuerzas y presiones sobre las superficies metálicas son moderadas y dentro de los límites esperados del equipo) formando una película protectora entre ambas superficies, los aditivos EP están diseñados para proteger aquellos componentes del equipo que se esté lubricando y que esté sometido a exigentes condiciones de presión y temperatura ejercida durante el funcionamiento.

Los aditivos antidesgaste y extrema presión tienen distintas maneras de interactuar con las superficies de los componentes. Mientras que ambos ofrecen protección, la profundidad y la manera en que reaccionan con las superficies varían. Tal y como se aprecia en la **Figura 1-7**, los aditivos AW suelen tener una reacción más superficial cuando forman la capa protectora. Por otro lado, los aditivos EP tienden a reaccionar de manera más profunda, ofreciendo una protección más robusta, especialmente bajo condiciones de alta presión. Por tanto, aunque ambos aditivos protegen contra el desgaste, difieren en cómo y dónde actúan en las superficies de los componentes.

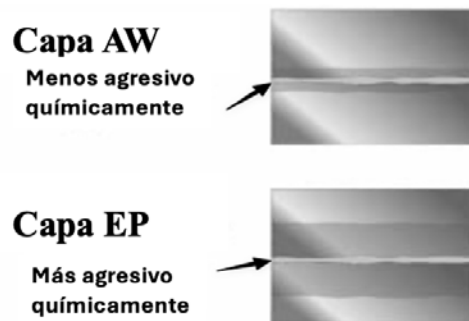


Figura 1-7: Los aditivos AW y EP reducen el desgaste en condiciones límite

Los aditivos extrema presión más comunes son: Azufre-fósforo (S-P) y Disulfuro de molibdeno soluble.

1.2.4.5 Antioxidantes

En la actualidad, la mayoría de los aceites lubricantes incorporan aditivos antioxidantes con el objetivo principal de retrasar la oxidación del aceite. Estos antioxidantes pueden ser de origen natural o ser añadidos de manera artificial. Los antioxidantes actúan como barrera de la oxidación, evitando o ralentizando este proceso.

Capítulo 1: Introducción

La eficacia en la resistencia a la oxidación de un aceite depende en gran medida de la presencia y calidad de estos aditivos.

Los aceites lubricantes con el paso del tiempo y tras ser sometidos a ciertos factores sufren un proceso de oxidación, afectando a su rendimiento y al de los equipos que lubrican. Este fenómeno conlleva a un incremento en la fricción y el desgaste, lo que repercute directamente en la eficiencia de la maquinaria. Uno de los indicadores más claros de la oxidación es el aumento en la viscosidad y acidez del aceite (**Figura 1-8**).

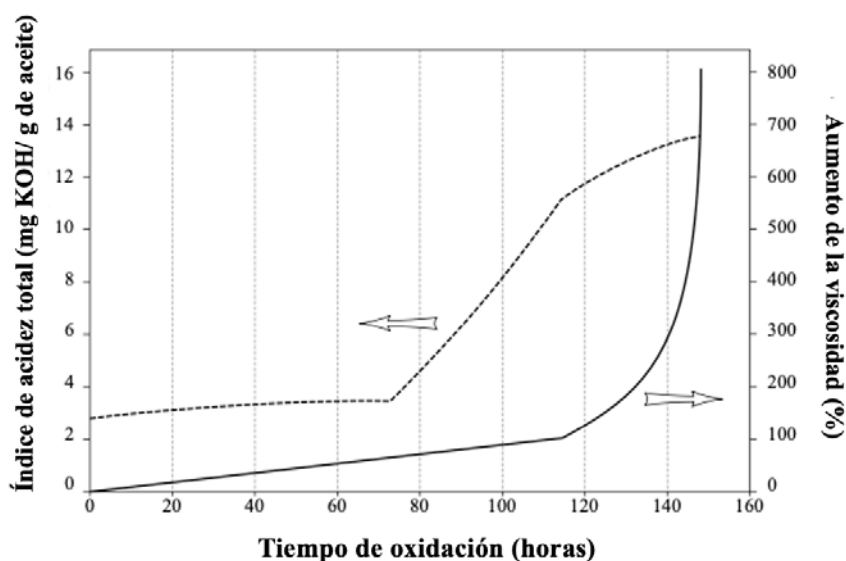


Figura 1-8: Efectos de la oxidación sobre la viscosidad y la acidez en un aceite mineral [17]

Una de las formas de medir el grado de oxidación en un aceite es a través del índice de acidez total (TAN). A medida que el aceite se oxida, su acidez aumenta. Esta tendencia en el incremento de la acidez es un claro indicador de que el aceite está llegando al final de su vida útil y necesita ser reemplazado. Un alto TAN no solo indica una alta concentración de productos de oxidación, sino también un mayor riesgo de corrosión en los componentes del motor.

Cuando un aceite experimenta una oxidación avanzada, su viscosidad aumenta. Esta mayor viscosidad puede causar una resistencia en cómo fluye el aceite, lo que puede resultar en una pérdida de potencia del motor. Además, al tener una viscosidad más alta, el aceite se bombea con más dificultad a través de los conductos de lubricación. Esto puede llevar a una lubricación inadecuada de las piezas del motor. En la **Figura 1-8** se muestra que conforme pasa el tiempo de funcionamiento, se produce un aumento significativo en la viscosidad del aceite, llegando a multiplicarse por 8 cuando se alcanzan las 150 horas.

Capítulo 1: Introducción

Además de la oxidación, hay otros factores que pueden aumentar la viscosidad de los aceites lubricantes. Por ejemplo, el hollín que proviene del combustible diésel, al acumularse en el aceite, puede hacer que este se vuelva más viscoso y disminuya su capacidad para lubricar adecuadamente. Otro problema relacionado con un alto TAN, es la corrosión. La acidez del aceite puede causar que componentes esenciales de la maquinaria, como las juntas y los cojinetes, se corroan. Es relevante mencionar que algunos metales presentes en las aleaciones de los cojinetes, como el plomo, el cobre y el cadmio, son más vulnerables a la corrosión cuando están en contacto con aceites ácidos [17].

Existen compuestos naturales en los aceites minerales, como aquellos que contienen azufre o nitrógeno, que actúan como inhibidores naturales de la oxidación. Estos compuestos neutralizan los radicales libres producidos durante el proceso de oxidación. Además, los aditivos EP y antidesgaste basados en azufre también se destacan por su eficacia antioxidante. Es interesante señalar que, aunque todos los aceites minerales pueden oxidarse, los aceites parafínicos tienden a tener una mayor resistencia a la oxidación en comparación con los nafténicos.

Entre los antioxidantes más utilizados en la industria encontramos al ZDDP, desactivadores de metales y derivados de hidrocarburos como fenoles y aminas. También se utilizan fosfatos orgánicos y elementos como azufre y fósforo, ya sea en su forma elemental o incorporados en compuestos orgánicos. A pesar de su eficacia, es crucial dosificar correctamente estos aditivos, ya que en exceso podrían causar corrosión o precipitarse, perdiendo su eficacia [17]. Los antioxidantes se pueden categorizar en:

- **Desactivadores de metales:** Estos inhiben la oxidación del aceite, que es acelerada por metales como el hierro y el cobre, comúnmente presentes en maquinarias. Funcionan mediante la quelación de iones metálicos, un proceso en el que una molécula se une a los iones metálicos, formando un complejo estable que inactiva al metal. Un ejemplo destacado es el ácido etilendiaminotetraacético (EDTA), considerado un desactivador de metales por su capacidad para quelar iones metálicos. El EDTA forma complejos estables con iones como los de hierro y cobre, los cuales actúan como catalizadores en las reacciones de oxidación que pueden descomponer el aceite y hacer que pierda sus propiedades lubricantes. Al unirse a los iones metálicos, el EDTA los inactiva, evitando que participen en reacciones de oxidación. La oxidación del aceite es un proceso en el que los metales catalizan la

Capítulo 1: Introducción

formación de radicales libres, los cuales son altamente reactivos y pueden degradar el aceite. Al bloquear la acción catalítica de los metales, el EDTA reduce la formación de radicales libres y protege el aceite de la oxidación.

- **Inhibidores radicales:** Actúan neutralizando los radicales libres que aceleran el proceso de oxidación. Los aditivos antioxidantes que se llaman inhibidores de radicales libres funcionan neutralizando los radicales libres. Estas moléculas altamente reactivas tienen un electrón desemparejado y pueden iniciar y acelerar el proceso de oxidación, lo que provoca deterioro y pérdida de calidad del aceite lubricante. Los inhibidores de radicales libres frenan este proceso al donar un electrón para estabilizar los radicales libres, evitando así la reacción en cadena de oxidación. Los aditivos antioxidantes como el 2,6-di-terc-butil-4-metilfenol (BHT), las aminas aromáticas, N-Fenil-1-naftilamina (PANA) y la 2,2,4-trimetil-1,2-dihidroquinolina polimérica (TMQ) son de gran importancia para la industria del aceite lubricante [27]. Estos inhibidores de radicales libres evitan que los aceites se deterioren por la oxidación, alargando su duración y optimizando el funcionamiento de los equipos lubricados. Su principal función es contrarrestar los radicales libres y evitar la oxidación, lo cual es esencial para conservar la eficacia y la durabilidad de los aceites lubricantes.
- **Descomponedores de peróxido:** Estos neutralizan los hidroperóxidos que, de no ser controlados, acelerarían la oxidación del aceite. Un ejemplo de este aditivo es el ZDDP el cual protege el aceite motor de la oxidación prematura. Este aditivo opera descomponiendo ciertos compuestos que se forman durante la oxidación del aceite, específicamente los radicales de peróxido ($R-O-O\cdot$) y los hidroperóxidos ($R-O-O-H$). Al hacerlo, evita que estos compuestos aceleren el proceso de oxidación, garantizando así una mayor vida útil y eficiencia del aceite. Aunque el ZDDP es esencial para el buen funcionamiento del aceite, no se requiere en grandes cantidades. De hecho, se añade a los aceites de motor en proporciones mínimas, generalmente en un rango de aproximadamente 1 a 2% en peso. Esta concentración es suficiente para proporcionar la protección antioxidante necesaria sin comprometer otras propiedades del aceite [17]. La eficacia del ZDDP puede verse comprometida por la descomposición del hidroperóxido. Al descomponerse el hidroperóxido, se produce una reacción que provoca el agotamiento gradual del ZDDP en el aceite. Esto significa que, con el tiempo, la cantidad de ZDDP activo

Capítulo 1: Introducción

en el aceite disminuye, reduciendo su capacidad para proteger el aceite contra la oxidación.

Los antioxidantes son sustancias que se añaden a los aceites para prevenir o retrasar su oxidación. Sin embargo, durante su ciclo de trabajo, la mayoría de estos antioxidantes acaban descomponiéndose debido a la misma oxidación que combaten, es decir, se oxidan para que el aceite no lo haga. Dada la naturaleza de los antioxidantes, proteger el aceite de manera indefinida contra la oxidación, especialmente a altas temperaturas, es una utopía. A medida que los antioxidantes se agotan, el aceite queda desprotegido y vulnerable. Y si consideramos que, en muchas aplicaciones prácticas, el aceite suele contener niveles elevados de metales disueltos procedentes del desgaste, la oxidación puede acelerarse de manera alarmante una vez que los antioxidantes han sido consumidos.

Los metales disueltos en el aceite, provenientes del desgaste natural de las piezas del motor o caja de cambios, actúan como catalizadores de la oxidación. Metales como el hierro y el cobre, aceleran el proceso oxidativo, lo que complica aún más la tarea de los antioxidantes. Es un círculo vicioso: a medida que el aceite se desgasta y acumula más metales, los antioxidantes se consumen más rápidamente, dejando al aceite aún más expuesto.

No todos los aceites son iguales, y su resistencia a la oxidación puede variar ampliamente de unos a otros. En algunos casos, el intervalo entre el agotamiento del antioxidante y el deterioro total del aceite puede ser extenso, permitiendo un margen de maniobra para el mantenimiento o el reemplazo. Sin embargo, en otros casos, este periodo puede ser alarmantemente corto, lo que deja poco tiempo para intervenir antes de que el lubricante deje de funcionar adecuadamente.

El fallo de un lubricante no es un asunto sin importancia ya que cuando se agotan los aditivos antioxidantes y el aceite se oxida y pierde sus propiedades, por lo que deja de proteger eficientemente las partes lubricadas del motor o caja de cambios. Esto generaría un aumento en el desgaste, la fricción y, finalmente generaría un fallo mecánico. El resultado es un riesgo elevado de averías, lo que puede tener costosas implicaciones tanto en términos de reparaciones como de tiempos de inactividad de los vehículos.

1.2.4.6 Aditivos anticorrosivos

La corrosión es uno de los principales factores que aceleran el desgaste de motores y cajas de cambios. Para combatir este problema, se emplean aditivos anticorrosivos, los cuales se dividen en dos categorías principales:

- **Inhibidores de corrosión:** Están diseñados para proteger metales no ferrosos como cobre, aluminio, estaño y cadmio. Su función es crear una barrera que impida el contacto entre la superficie del metal y los agentes corrosivos presentes en el aceite. Son especialmente útiles para proteger componentes como cojinetes y juntas de los efectos dañinos de aditivos reactivos y productos de oxidación. Entre los inhibidores más comunes están el benzotriazol, los azoles sustituidos y el dietilditiofosfato de zinc.
- **Inhibidores de óxido:** Su objetivo es proteger los metales ferrosos de la corrosión causada por el oxígeno y el agua presentes en el aceite. Estos aditivos forman una capa protectora en la superficie del metal, reduciendo el contacto directo con el agua y disminuyendo su movilidad en el aceite. A nivel molecular, los inhibidores de óxido tienen una cabeza polar que se adhiere al metal y una cola hidrofóbica que repele el agua, como se muestra en la **Figura 1-9**. Ejemplos comunes de estos inhibidores son los sulfonatos metálicos, como los de calcio y bario, y los succinatos de amina [17].

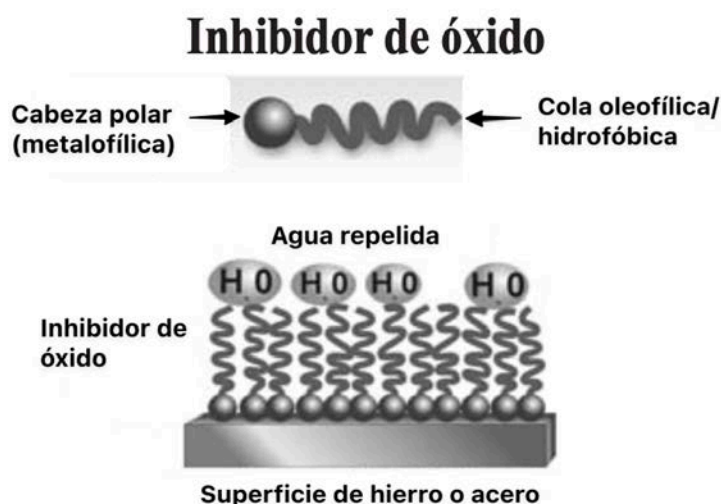


Figura 1-9: Mecanismo de funcionamiento de los inhibidores de óxido [24]

Estos aditivos son esenciales para mantener la integridad de los componentes metálicos, previniendo el desgaste prematuro causado por la corrosión y prolongando la vida útil de las piezas.

1.2.4.7 Mejoradores de la viscosidad

La viscosidad es una característica clave para el correcto funcionamiento de cualquier máquina. Sin embargo, la viscosidad del aceite lubricante puede variar con la temperatura pudiendo afectar su eficacia. Es por ello por lo que se utilizan los aditivos estabilizadores de viscosidad.

Estos aditivos, también conocidos como mejoradores del índice de viscosidad, tienen la función principal de mantener la viscosidad del aceite constante a pesar de los cambios de temperatura. Son esenciales para garantizar que el aceite funcione de manera óptima en diversas condiciones.

La temperatura tiene un impacto directo en la consistencia del aceite. Cuando las temperaturas son bajas, el aceite tiende a volverse más espeso o viscoso. Por otro lado, en temperaturas elevadas, el aceite se torna más fluido. Estas variaciones drásticas en la viscosidad pueden afectar negativamente la capacidad del aceite para lubricar adecuadamente, ya que un aceite demasiado espeso puede no fluir libremente y un aceite demasiado delgado puede no ofrecer la protección necesaria entre las superficies en movimiento. Por lo tanto, es esencial que el aceite mantenga una viscosidad adecuada para garantizar una lubricación eficiente en todas las condiciones de temperatura.

Para contrarrestar estos cambios, los mejoradores de viscosidad, en su mayoría polímeros de alto peso molecular, se incorporan en las fórmulas del aceite lubricante. Estas moléculas especiales tienen la capacidad de cambiar su estructura y se adaptan a los cambios de temperatura: se contraen y se vuelven más compactas cuando el aceite está frío y se expanden cuando el aceite está caliente, **Figura 1-10**. Esta adaptabilidad ayuda a mantener una viscosidad constante a pesar de las fluctuaciones de temperatura.

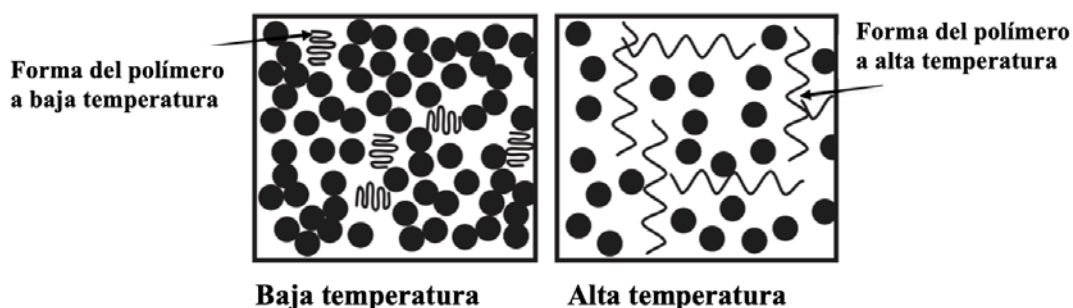


Figura 1-10: Cambio de tamaño de los mejoradores de viscosidad con la temperatura

Capítulo 1: Introducción

Algunos de los principales componentes utilizados como mejoradores de viscosidad incluyen:

- Copolímero de olefina (OCP)
- Poliacrilato
- Ester de polimetacrilato (PMA)
- Poliisobutileno (PIB)

Estos aditivos son comunes en muchos lubricantes, como aceites de motor, fluidos hidráulicos, fluidos de transmisión automática y lubricantes para engranajes, garantizando un rendimiento óptimo en diversas condiciones [24].

1.2.4.8 Depresores del punto de fluidez

Teniendo en cuenta que el punto de fluidez es la temperatura a la que el aceite empieza a solidificarse, los depresores del punto de fluidez son aditivos especializados que se añaden a los lubricantes para mejorar su fluidez a bajas temperaturas. Estos aditivos tienen una función similar a los mejoradores de viscosidad, pero su principal objetivo es prevenir la solidificación del aceite en condiciones frías.

Cuando las temperaturas bajan, los aceites, en particular los de base parafínica, comienzan a generar cristales de cera. Estos cristales pueden espesar el aceite hasta el punto de solidificarlo, obstruyendo su flujo normal e impidiendo su bombeo por todo el circuito de lubricación. Para contrarrestar esto, se utilizan los depresores del punto de fluidez. Estos aditivos intervienen modificando la estructura de la cera, lo que impide que los cristales se unan y creen un bloque sólido, **Figura 1-11**. De esta manera, el aceite mantiene su fluidez incluso en condiciones más frías.

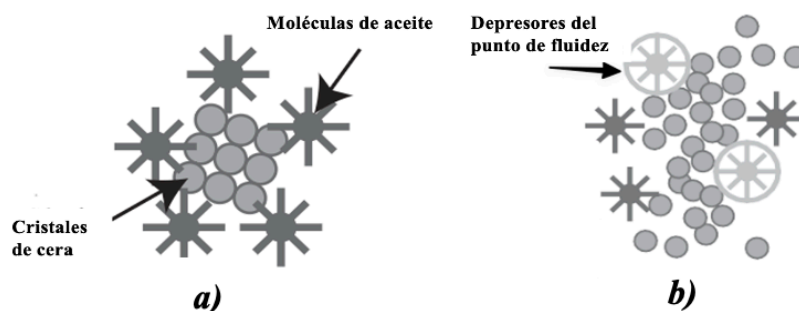


Figura 1-11: Efecto de los aditivos del punto de fluidez: **a)** sin aditivo; **b)** con aditivo [24]

Capítulo 1: Introducción

En la **Figura 1-11-a)** se puede observar cómo en un aceite que no contiene depresores del punto de fluidez, los cristales de cera y el aceite se agrupan, lo que lleva a un incremento en el punto de fluidez de la cera. Esto significa que el aceite comenzará a solidificarse o gelificarse a una temperatura más alta en comparación con un aceite que sí contiene estos aditivos. En la **Figura 1-11-b)** se observa el funcionamiento de los depresores en el aceite y su funcionamiento crucial. Actúan directamente sobre los cristales de cera, previniendo su rápida solidificación cuando las temperaturas disminuyen. Estos aditivos interfieren en cómo la cera se solidifica, permitiendo que el aceite conserve su capacidad de fluir incluso a temperaturas más bajas de las que normalmente podría sin la ayuda de estos aditivos.

Por tanto, los depresores posponen el momento en que el aceite pasa de ser líquido a sólido al enfriarse. Esto significa que, gracias a estos aditivos, el aceite continúa circulando y ofreciendo una lubricación efectiva, incluso en ambientes fríos. La temperatura a la que el aceite empieza a solidificarse se ve reducida con la presencia de estos depresores.

La habilidad del aceite para mantenerse fluido en condiciones de frío es vital. Si el aceite se solidifica, no puede lubricar adecuadamente, lo que podría llevar a un desgaste prematuro o daño en las partes del motor o maquinaria. Por lo tanto, los depresores son esenciales para asegurar que el aceite opere de manera óptima en diversas condiciones ambientales, en especial en lugares con climas fríos.

1.2.4.9 Inhibidores de espuma

Los agentes antiespumantes actúan para prevenir la creación de espuma persistente en la superficie del aceite en tanques, depósitos y drenajes. Estos agentes, que comúnmente son polímeros como la metil silicona o el polimetacrilato, se dispersan en el aceite en forma de pequeños glóbulos, aproximadamente de 10 micras de diámetro y generalmente entre el 0,05% y el 0,5% en peso del aceite lubricante base. A medida que el aire asciende, estos microglóbulos interactúan con las burbujas emergentes, debilitándolas y provocando su ruptura, evitando así la formación de espuma. Es crucial dosificar adecuadamente este aditivo, ya que usarlo en exceso puede disminuir su eficiencia en la prevención de la espuma.

1.2.4.10 Compatibilidad y solubilidad de los aditivos

Cada lubricante se diseña con un propósito específico, adaptándose a ciertas condiciones de operación. La elección de aditivos a utilizar en un lubricante se basa en la calidad del aceite base y en el uso para el que está destinado. Hay una gran variedad de aditivos disponibles en el mercado, cada uno con su propio compuesto químico y elementos que pueden ser identificados mediante análisis espectrométrico.

Es importante destacar que en la fabricación de lubricantes se utilizan aditivos de manera regular. Sin embargo, durante el análisis espectrométrico, estos aditivos pueden ser confundidos con metales provenientes del desgaste. Un ejemplo común es el uso de cobre como antioxidante en la formulación del lubricante. Por ello, es fundamental tener en cuenta la composición inicial del aceite lubricante para evitar interpretaciones erróneas. En la **Tabla 1-6** se presenta la composición elemental típica de los aditivos más utilizados.

Tabla 1-6: Tipo de aditivo y elemento detectable por análisis espectrométrico

Tipo de aditivo	Elementos detectables por análisis espectrométrico
Antioxidante	Zn, Cu
Detergente	B, Ba, Mg, Na
Dispersante	Ninguno
Inhibidores a la corrosión	Zn
Antiespumantes	Si
Anticongelantes	Ninguno
Antifricción	Zn, Mo, P, Pb
Mejorador de Índice de Viscosidad (IV)	Ninguno

Los aditivos en lubricantes desempeñan un papel crucial para garantizar el rendimiento óptimo de los aceites. Sin embargo, es esencial que estos aditivos no solo sean eficientes en su función, sino que también sean compatibles y solubles en el lubricante.

La compatibilidad entre aditivos es fundamental para el buen funcionamiento de un lubricante. Cuando se habla de compatibilidad, se pretende centrar la atención sobre que

Capítulo 1: Introducción

los aditivos no deben reaccionar entre sí de manera adversa. Es decir, sus propiedades individuales deben sumar y no restar al rendimiento del aceite. Una señal de incompatibilidad podría ser un cambio visible, como una alteración en el color o el aroma del lubricante. Más allá de la compatibilidad entre aditivos, es esencial que el lubricante sea compatible con los materiales con los que estará en contacto. Por ejemplo, mientras que los aceites minerales pueden reaccionar negativamente con el caucho natural, el aceite de colza puede ser una alternativa más adecuada en ciertas aplicaciones. La elección cuidadosa del lubricante es esencial, especialmente en industrias donde la contaminación es inaceptable, como la alimentaria o farmacéutica [17].

Un aspecto crucial de cualquier aditivo es su solubilidad en el lubricante. Para que un aditivo sea efectivo, debe permanecer disuelto en todo el rango de temperaturas operativas. Si un aditivo se separa del aceite durante el almacenamiento o en servicio, su eficacia se ve comprometida. Tomemos, por ejemplo, el azufre elemental: aunque podría ser útil en condiciones extremas, su insolubilidad en productos derivados del petróleo lo hace inadecuado como aditivo.

Por tanto, la elección de aditivos en los lubricantes no es una tarea sencilla. Requiere un equilibrio entre eficacia, compatibilidad y solubilidad. Al comprender estas características, se puede garantizar que un lubricante no solo funcione eficientemente, sino que también prolongue la vida útil del equipo y reduzca los costes a largo plazo.

1.2.5 Aceite de motor: composición y propiedades

El sistema de lubricación del carro de combate Leopard 2 E se trata de un sistema de lubricación sofisticado y robusto para mantener todos sus componentes de funcionamiento operativos, en concreto su motor MTU MB 873 Ka-501, **Figura 1-12** y la caja de cambios del tipo Renk HSWL 354, **Figura 1-17**.

Capítulo 1: Introducción

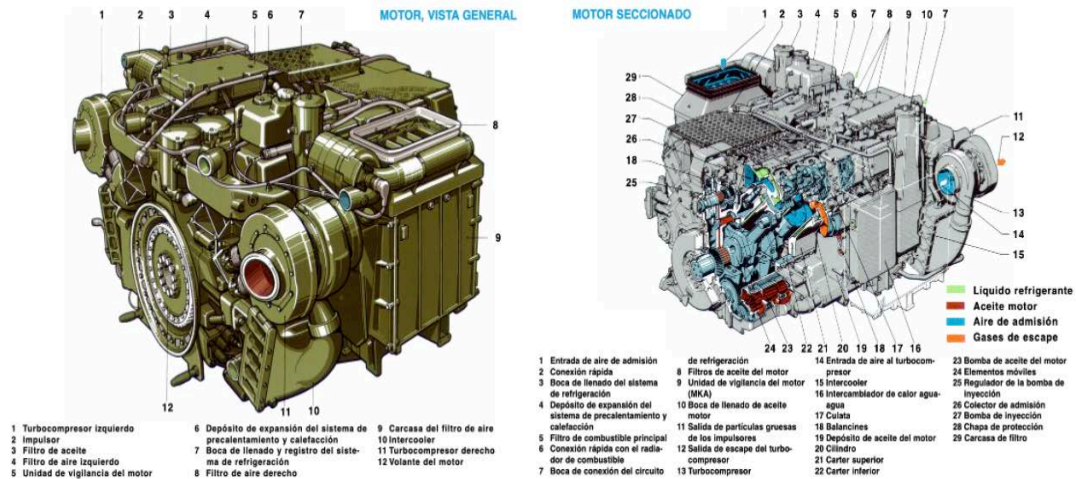


Figura 1-12: Motor MTU MB 873 Ka-501 vista general (izquierda) y motor seccionado (derecha) [28]

El sistema de lubricación del motor es esencial para reducir la fricción entre las partes móviles y disipar el calor generado durante el funcionamiento. Este sistema debe asegurar una distribución adecuada del lubricante a todos los componentes del motor que lo requieran, manteniendo un flujo constante que garantice condiciones hidrodinámicas en los cojinetes, como los de biela, cigüeñal y árbol de levas. Los cojinetes, también llamados bujes o rodamientos, facilitan el movimiento rotacional de piezas como el cigüeñal y el árbol de levas, reduciendo la fricción y ayudando a disipar el calor.

El sistema de lubricación del motor utiliza un circuito presurizado que incluye componentes como el cárter, bombas de aceite, filtros, tuberías e intercambiadores de calor. El aceite es succionado desde el cárter (9) por la bomba de presión (13) y circula por todo el sistema. Es esencial que el cárter tenga la capacidad adecuada para garantizar un flujo continuo y evitar la oxidación prematura del aceite debido a su breve permanencia en el depósito [29]. Además, al estar ubicado en la base del motor, el cárter ayuda a mantener el aceite a una temperatura moderada, gracias a su proximidad a zonas más frías del motor y al flujo de aire circundante circulante (**Figura 1-13 punto 9**).

Capítulo 1: Introducción

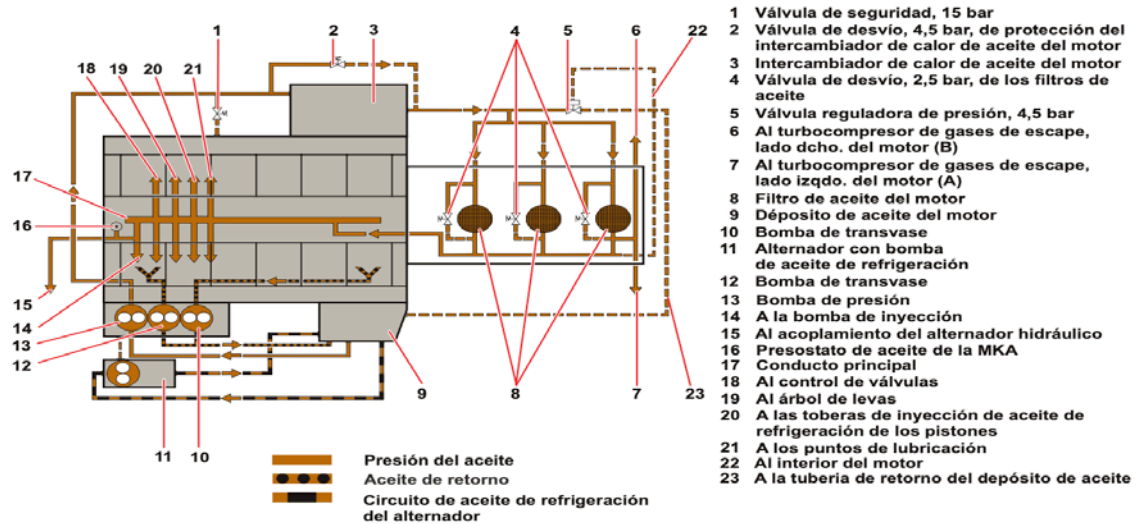


Figura 1-13: Circuito de lubricación

El sistema de lubricación está compuesto por tres bombas de aceite (**Figura 1-13**): una bomba de presión (**13**) y dos bombas de trasvase (**12**). Todas ellas son bombas de engranajes, **Figura 1-14**, las cuales se encuentran en la parte inferior del cárter. La bomba de presión, activada por el cigüeñal o la cadena de distribución, succiona el aceite del cárter y genera la presión necesaria para que el aceite circule por todo el sistema.

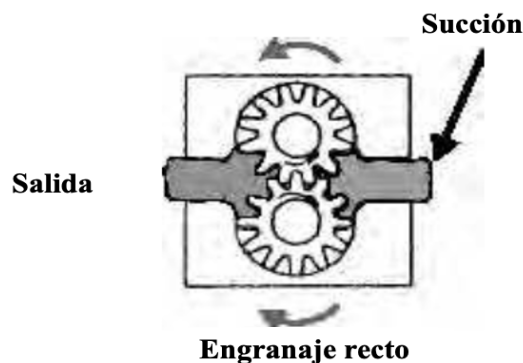


Figura 1-14: Esquema de una bomba de engranajes [23].

Una vez succionado, el aceite es enviado al intercambiador de calor (**3**), donde se enfría utilizando el líquido refrigerante del motor. La presión del aceite se regula a 15 bar mediante una válvula de seguridad (**1**) situada antes del intercambiador. Durante el arranque del motor, el intercambiador también actúa como un precalentador del aceite frío, utilizando el líquido refrigerante que se calienta más rápidamente. Para evitar sobrepresiones, el intercambiador está equipado con una válvula de desvío (**2**) que redirige el exceso de aceite cuando la presión supera los $4,5 \pm 0,5$ bar.

Después de pasar por el intercambiador de calor, el aceite se filtra a través del filtro de aceite (**8**), cuya función es eliminar partículas nocivas como metales desgastados y

Capítulo 1: Introducción

contaminantes del proceso de combustión, **Figura 1-15**. Esto asegura que el aceite limpio llegue a los componentes críticos del motor, garantizando una lubricación efectiva.

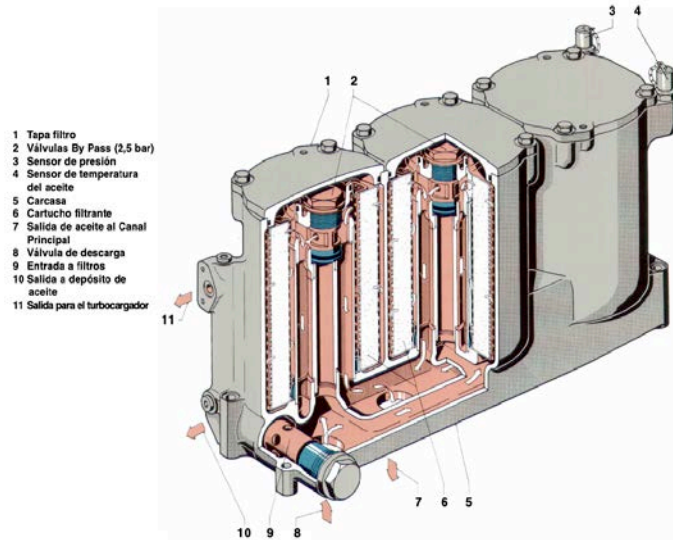


Figura 1-15: Filtros de aceite motor [28]

El filtro de aceite desempeña un papel crucial en el mantenimiento del motor, alargando su ciclo de vida y asegurando el rendimiento óptimo del mismo. Las principales funciones del filtro de aceite son:

- **Filtración de impurezas:** El filtro de aceite retiene la suciedad, las partículas metálicas y otros contaminantes que se van acumulando en el aceite del motor a lo largo del tiempo. Esto impide que estas sustancias recorran el motor y provoquen daños en los componentes esenciales.
- **Protección del motor:** El filtro de aceite evita que las partículas perjudiciales entren en contacto con las partes internas del motor, como los cojinetes, pistones y cilindros, y les causen desgaste y deterioro. Esto contribuye a mantener el rendimiento óptimo del motor y minimiza el peligro de averías mecánicas.
- **Mejora de la lubricación:** El aceite limpio asegura una correcta lubricación de los componentes del motor. Un filtro de aceite eficaz mantiene la limpieza del aceite, asegurando que todas las partes en movimiento estén debidamente lubricadas, lo que reduce la fricción y la producción de calor.
- **Mejora del rendimiento del motor:** El filtro de aceite limpio ayuda a optimizar el funcionamiento del motor, haciéndolo más fluido. Esto puede traducirse en un menor consumo de combustible, emisiones más bajas y una potencia de salida estable.

Capítulo 1: Introducción

El sistema de filtración de aceite es esencial para garantizar que el lubricante que llega a las superficies sometidas a fricción esté lo más limpio posible. A medida que el filtro acumula material, el caudal de aceite tiende a reducirse. Para evitar una interrupción en el flujo, el sistema de filtrado incluye un circuito de derivación que se activa cuando la presión antes del filtro alcanza un valor preestablecido. Este mecanismo asegura la circulación continua del aceite, incluso cuando el filtro está saturado. No obstante, en este caso, algunos contaminantes podrían circular libremente a través del motor, lo que podría afectar a las zonas más sensibles y causar problemas graves.

Una válvula reguladora de presión garantiza que la presión del aceite no exceda un límite seguro. Si la presión es excesivamente alta, esta válvula redirige una porción del aceite de vuelta al cárter. Una vez filtrado, el aceite se distribuye a través de las galerías principales (N.º 17, **Figura 1-13**), que son conductos diseñados para llevar el aceite a los componentes esenciales del motor. Estas galerías aseguran una distribución uniforme y oportuna del aceite a zonas críticas, como los cojinetes de biela y cigüeñal (N.º 18, **Figura 1-13**), el árbol de levas (N.º 19, **Figura 1-13**), los turbocompresores (N.º 6, **Figura 1-13**), la bomba de inyección, los piñones intermedios del accionamiento del alternador y el embrague hidráulico del alternador (N.º 15, **Figura 1-13**). Los cojinetes de las bielas, conectados al cigüeñal y a los pistones, son una de las primeras partes que se lubrican, permitiendo un movimiento suave del pistón dentro del cilindro.

La válvula reguladora de presión del sistema (N.º 5, **Figura 1-13**), situada en el filtro de aceite, se activa a $4,5 \pm 0,5$ bar, controlando la presión en el circuito de lubricación. Al abrirse, reduce el exceso de presión del aceite y, mediante el conducto de retorno (N.º 22, **Figura 1-13**), redirige el aceite al depósito. Las zonas superiores del motor, como el árbol de levas, las válvulas y los actuadores de leva, se lubrican a través de conductos específicos o mediante pulverizadores que garantizan la lubricación adecuada.

El pistón, como uno de los elementos esenciales del motor, requiere un sistema de lubricación de alto rendimiento tal y como se indica en la **Figura 1-16**. Los pistones se refrigeran mediante el aceite motor que procede del conducto principal de aceite (N.º 1, **Figura 1-16**) del cárter del motor. Dicho aceite alcanza los pistones de ambas filas de cilindros a través de las toberas de inyección de aceite (N.º 3, **Figura 1-16**). Antes de estos inyectores, se encuentra una válvula reguladora (N.º 2, **Figura 1-16**) que permite el paso del aceite del conducto principal sólo cuando el aceite del motor alcanza una cierta presión. Esta válvula también llamada válvula de alimentación evita caídas de presión en

Capítulo 1: Introducción

el sistema de lubricación durante operaciones a baja velocidad y facilita un incremento rápido de la presión del aceite al encender el motor.

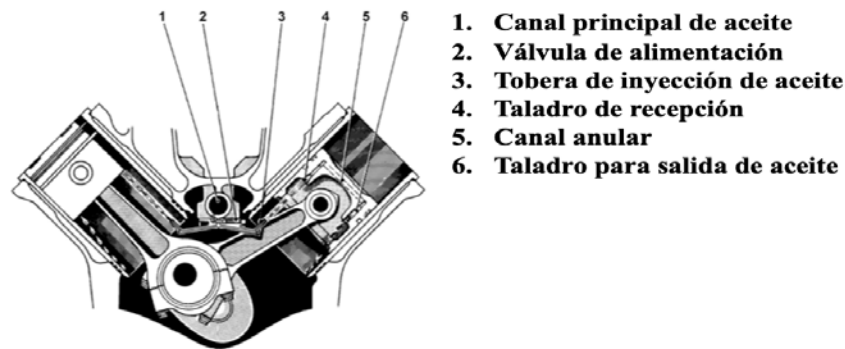


Figura 1-16: Refrigeración de los pistones

Desde las toberas de inyección, situadas en la parte inferior de los pistones, se inyecta aceite en la base de estos mediante orificios en forma de embudo (N.º 4, **Figura 1-16**). A través de este sistema, además de lubricar los pistones, se va a conseguir controlar la temperatura ya que los pistones pueden calentarse mucho debido a la combustión que se produce en la cámara de combustión. El aceite fluye por el anillo circundante o canal anular (N.º 5, **Figura 1-16**) hasta el fondo de los pistones donde absorbe calor y sale por el taladro (N.º 6, **Figura 1-16**). Con el movimiento ascendente y descendente del pistón, el aceite se distribuye por las paredes del cilindro creando una delgada capa que tiene la misión de minimizar la fricción entre el pistón y el cilindro. Después de lubricar y absorber el calor de los componentes del motor, el aceite retorna al cárter pasando por varias galerías que facilitan su enfriamiento antes de llegar al cárter del motor [28]. Una adecuada lubricación del pistón y las paredes del cilindro es vital para mantener el rendimiento, la eficacia y durabilidad del motor. Un sistema de lubricación inadecuado puede dar lugar a un desgaste anticipado, reducción de potencia e incluso puede desencadenar graves averías en el motor.

El aceite que se desprende de todos aquellos puntos de lubricación se va a acumular en la parte interior del cárter del motor arrastrando partículas e impurezas que serán las que posteriormente se analicen en el laboratorio. Dependiendo de la inclinación del vehículo, el aceite va a ser canalizado hacia el depósito de aceite del motor mediante una de las dos bombas de transvase o por ambas en el caso de que el vehículo este en posición horizontal.

1.2.6 Aceite de caja de cambios: Especificidades y retos

El sistema de lubricación de la transmisión del carro de combate es un componente crucial para garantizar tanto la eficacia operativa con un rendimiento adecuado como la durabilidad de aquellos elementos mecánicos internos que componen la transmisión. Ésta es una de las unidades más compleja del carro de combate ya que está compuesta por engranajes, cojinetes, componentes mecánicos interconectados y embragues sometidos a condiciones muy exigentes tanto de temperatura como de cargas extremas y fricción durante su funcionamiento. Esencialmente, a través de la transmisión, se transfiere la potencia desarrollada por el motor a través de un acoplamiento por ruedas dentadas desde el volante del motor hasta el convertidor de par en la entrada de la transmisión, **Figura 1-17**. De este modo se transmite potencia a las cadenas del carro de combate facilitando la modificación de la velocidad y la fuerza de torsión. El sistema de transmisión está sometido a una gran variedad de movimientos y dado el carácter mecánico inherente de la transmisión, la lubricación es fundamental para llevar a cabo y asegurar un rendimiento óptimo.

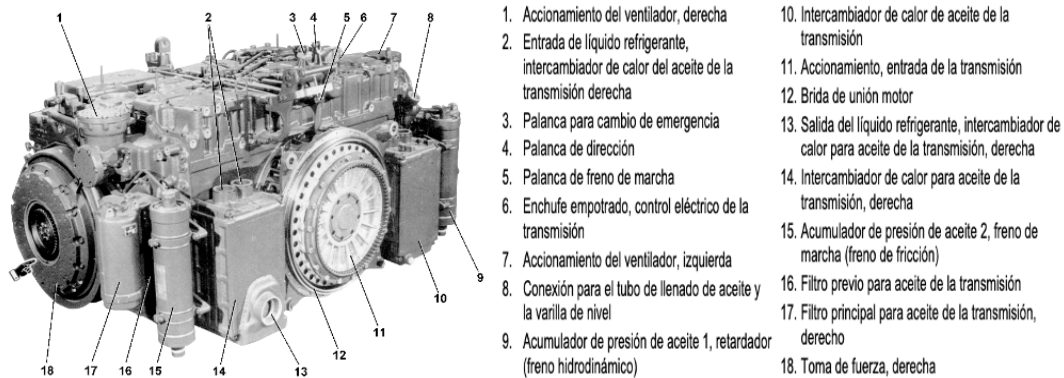


Figura 1-17: Transmisión, vista delantera derecha [28]

A continuación, en la **Figura 1-18**, se muestra un esquema detallado de la transmisión de los vehículos estudiados con sus componentes principales y la fiabilidad del sistema.

Capítulo 1: Introducción

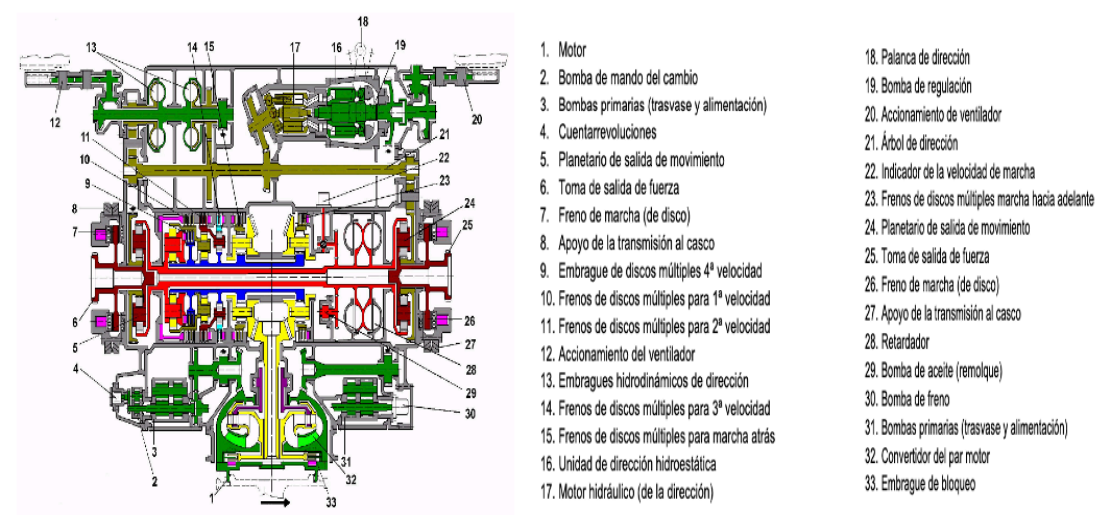


Figura 1-18: Esquema de la transmisión [28]

Este esquema junto con la siguiente **Tabla 1-7** en donde se especifica la función de cada parte de la caja de cambios, permiten entender mejor cómo el aceite de transmisión mejora el rendimiento.

Tabla 1-7: Componente y función de la caja de cambios

N.º	Componente	Función que desarrolla
1	Motor	Genera la potencia inicial.
2	Bomba de mando del cambio	Controla el flujo de aceite.
3	Bombas primarias (trasvase y alimentación)	Proveen aceite para la operación.
4	Cuentarrevoluciones	Mide las revoluciones del motor.
5	Planetario de salida de movimiento	Transfiere potencia.
6	Toma de salida de fuerza	Conexión a accesorios.
7	Freno de marcha (de disco)	Ayuda a detener el vehículo.
8	Apoyo de la transmisión al casco	Mantiene la estabilidad.
9	Embrague de discos múltiples (4ª velocidad)	Facilita el cambio de marchas.
10	Frenos de discos múltiples (1ª velocidad)	Controlan la primera marcha.

Capítulo 1: Introducción

11	Frenos de discos múltiples (2ª velocidad)	Controlan la segunda marcha.
12	Accionamiento del ventilador	Enfría la transmisión.
13	Embragues hidrodinámicos de dirección	Asisten en la dirección.
14	Frenos de discos múltiples (3ª velocidad)	Controlan la tercera marcha.
15	Frenos de discos múltiples (marcha atrás)	Facilitan la reversa.
16	Unidad de dirección hidrostática	Permite una dirección precisa.
17	Motor hidráulico (de la dirección)	Provee asistencia en la dirección.
18	Palanca de dirección	Controla la dirección del vehículo.
19	Bomba de regulación	Mantiene la presión de aceite.
20	Accionamiento de ventilador	Adicional para enfriamiento.
21	Árbol de dirección	Conecta la dirección.
22	Indicador de la velocidad de marcha	Muestra la velocidad.
23	Planetario de salida de movimiento	Facilita la salida de potencia.
24	Toma de salida de fuerza	Provee conexión a implementos.
25	Freno de marcha (de disco)	Proporciona seguridad adicional.
26	Apoyo de la transmisión al casco	Provee soporte estructural.
27	Retardador	Reduce la velocidad del vehículo.
28	Bomba de aceite	Circula el aceite por el sistema.
29	Bombas primarias (trasvase y alimentación)	Manejan el flujo de aceite.
30	Convertidor del par motor	Ajusta la potencia.
31	Embrague de bloqueo	Provee una conexión directa.

Capítulo 1: Introducción

Los aceites utilizados en transmisiones automáticas como la del carro de combate Leopard, son lubricantes altamente especializados y diseñados para funcionar en ese tipo de transmisiones sometidas a condiciones extremas. Están sometidos a altas temperaturas y actúan fundamentalmente como fluidos lubricantes, de transferencia de calor, fluidos hidráulicos y de transferencia de potencia. Para llevar a cabo todo ello, los líquidos de transmisiones requieren un diseño muy complejo que les dota de un conjunto de propiedades físicas determinadas y específicas cualidades de desempeño meticulosamente configuradas [23]. La viscosidad es una de las propiedades físicas fundamentales teniendo el comportamiento deseado tanto a altas como a bajas temperaturas. También debe tener un buen rendimiento a la fricción, a la oxidación, buena respuesta cuando es sometido a altas presiones al mismo tiempo que tener una buena compatibilidad con aleaciones metálicas, con juntas o componentes plásticos como arandelas de empuje y engranajes [23]. Fundamentalmente deberá cumplir con una serie características y propiedades que permitan conjuntamente una lubricación y protección conjuntamente.

Son muchos los requisitos que se le pide a un aceite lubricante de una caja de cambios y para conseguirlos es necesario añadir hasta 20 tipos de aditivos diferentes llegando a ser entre el 10 y el 20 % de la composición del aceite. El resto de la composición lo formará una base de origen sintético o mineral de muy buena calidad.

Como se mencionó anteriormente, la viscosidad es una característica física fundamental de este tipo de lubricantes ya que es esencial para el desempeño del sistema hidráulico de la transmisión. La alta complejidad de las cajas de cambios se debe tanto a su comportamiento dinámico mecánico como a sus propiedades termo-oxidativas. Estas características influyen directamente en las electroválvulas que regulan el flujo de aceite y en los conductos de flujo, que suelen tener un diseño compacto y una sección transversal estrecha. Esta configuración supone el desafío de mantener una viscosidad uniforme del aceite en todo el circuito, aunque el fluido esté diseñado para conservar sus propiedades con el tiempo.

El comportamiento dinámico de las cajas de cambios implica que los componentes internos están en constante movimiento, lo que genera fricción y calor. Este calor debe ser evacuado para evitar el sobrecalentamiento y el desgaste prematuro de las piezas. La viscosidad del aceite, que representa la resistencia del fluido a fluir, es esencial en este

Capítulo 1: Introducción

proceso. Una viscosidad adecuada garantiza la lubricación eficiente de los componentes y la evacuación del calor generado.

Las electroválvulas, controladas electrónicamente, juegan un papel fundamental en la regulación del flujo de aceite dentro de la caja de cambios. Los conductos de flujo, por su parte, son los canales a través de los cuales circula el aceite. Debido a su diseño compacto y estrecho, es importante que el aceite tenga una viscosidad adecuada para que fluya correctamente. Mantener una viscosidad uniforme enfrenta varios desafíos, siendo el principal la variación de temperatura dentro de la caja de cambios. A medida que la temperatura aumenta, la viscosidad del aceite disminuye, lo que puede afectar la lubricación y la refrigeración. Además, la oxidación del aceite con el tiempo puede degradar sus propiedades y reducir su eficacia.

Para enfrentar estos retos, es muy importante utilizar aceites de alta calidad con aditivos específicos que mejoren la estabilidad térmica y la resistencia a la oxidación. Los aditivos antioxidantes y mejoradores de viscosidad son esenciales para mantener el aceite en condiciones óptimas por más tiempo. Estos aceites están diseñados para funcionar eficientemente en un amplio rango de temperaturas, asegurando que la viscosidad se mantenga uniforme incluso bajo condiciones extremas. El uso de estos aceites puede extender la vida útil de la caja de cambios y mejorar su rendimiento general por lo que el aceite de la caja de cambios juega un papel fundamental en el par de arranque del motor, en la presión hidráulica interna, en los tiempos de cambio de embrague e incluso la viscosidad podrá afectar a las fugas internas [30].

Si bien la viscosidad es una propiedad física fundamental en los fluidos de transmisión automática, no son menos importantes: la conductividad térmica, la expansión térmica volumétrica, la capacidad calorífica y el peso específico.

El lubricante utilizado en las transmisiones mecánicas debe garantizar una circulación óptima por todo el sistema, permitiendo cambios de velocidad ágiles cuando el carro de combate se pone en marcha incluso a temperatura ambiente baja. Por ello, el lubricante de los carros de combate presenta una viscosidad adecuada a la temperatura de trabajo, lo que asegura la conservación de las capas lubricantes y el correcto desempeño de los engranajes, al mismo tiempo que se reduce el ruido.

Para cumplir con todas estas funciones de manera óptima, los líquidos de transmisiones requieren de un diseño muy complejo que les doten de un conjunto de

Capítulo 1: Introducción

propiedades físicas determinadas y cualidades específicas de desempeño. Estas características incluyen:

- **Capacidad de carga:** Debe ser capaz de prevenir el contacto directo entre las superficies metálicas cuando es sometido a condiciones de alta carga y presión, para evitar o reducir el desgaste y el rayado de las superficies metálicas. Esta propiedad es fundamental para proteger los componentes de la transmisión especialmente en zonas sometidas a cargas especialmente altas como las correspondientes a los dientes de los engranajes. Un aceite con una adecuada capacidad de carga va a formar una película lubricante resistente entre las piezas en movimiento evitando el desgaste y el contacto de las superficies metálicas y, en consecuencia, evitar un desgaste acelerado al mismo tiempo que se prolonga la vida útil de los componentes de la transmisión.
- **Protección contra el desgaste:** El aceite debe proteger contra el desgaste en aquellas piezas mecánicas presentes en la transmisión, tales como bombas de las paletas, cojinetes, engranajes planetarios, embragues unidireccionales, bujes, arandelas de empuje y cadenas de transmisión de energía [23]. Al reducir la fricción entre los componentes que se mueven, se evita el desgaste prematuro. Esto es esencial dado que las piezas de la caja de cambios están en constante movimiento y contacto unas con otras. Sin una lubricación adecuada, el desgaste sería inevitable, disminuyendo la durabilidad de los componentes y aumentando el riesgo de fallos mecánicos.
- **Comportamiento como fluido hidráulico:** El aceite debe permitir la transmisión de fuerza y movimiento.
- **Disipación de calor:** El aceite también tiene la función de disipar el calor generado por la fricción y el movimiento, manteniendo las temperaturas en niveles seguros. Sin una adecuada refrigeración, el calor excesivo podría dañar las piezas internas, causando deformaciones y pérdida de rendimiento en la transmisión.
- **Limpieza y eliminación de contaminantes:** El aceite también tiene un papel clave en la limpieza interna de la caja de cambios. Se encarga de transportar y retener partículas de desgaste y contaminantes. Al fluir por el sistema, el aceite recolecta estos residuos y evita que se depositen en las piezas críticas, lo que podría afectar su funcionamiento y provocar daños graves a largo plazo.

Capítulo 1: Introducción

- **Protección y prevención de la corrosión:** El aceite no solo lubrica y refrigera, sino que también cubre los componentes internos con una capa protectora que evita la corrosión y el deterioro químico. La humedad y otros contaminantes pueden provocar corrosión, que debilita las piezas y disminuye su rendimiento. El aceite forma una barrera protectora, asegurando que los componentes internos se conserven en buen estado durante más tiempo.

En los sistemas de transmisión automática, uno de los componentes principales relacionados con la fricción es el embrague de disco o banda. Este puede funcionar como elemento de cambio, de deslizamiento continuo o de retención. Los embragues de deslizamiento continuo se encuentran comúnmente en los convertidores de par, con el propósito de mejorar la eficiencia en el consumo de combustible. En estos sistemas, una de las superficies sometidas a fricción está compuesta por un material poroso, mientras que la otra suele ser de acero. El lubricante que se interpone entre ambas superficies no solo disipa el calor generado, sino que también regula el coeficiente de fricción en función de variables como la carga, la velocidad y la temperatura [23].

Si la fricción entre las superficies no es adecuada, se puede generar un desgaste innecesario. Este tipo de fallo es detectable mediante el análisis del aceite de la caja de cambios, ya que el lubricante arrastra las partículas liberadas por el desgaste de las superficies en contacto. Estas partículas pueden proceder tanto del material del embrague como de un lubricante defectuoso. El análisis del lubricante permite estudiar dichas partículas y, en consecuencia, predecir un posible fallo antes de que ocurra, lo cual es uno de los enfoques principales de esta tesis.

Los materiales utilizados en la fabricación de transmisiones automáticas suelen derivar de sustancias fibrosas de origen natural, como la celulosa, o sintéticas, como el Kevlar®. Para ajustar el desgaste y las propiedades de fricción de estos materiales, se emplean aditivos como tierra de diatomeas, grafito o fragmentos metálicos. Estos compuestos se adhieren a una base de acero mediante resinas fenólicas. Existen otras variantes de materiales de fricción, como el bronce sinterizado o elastómeros basados en fluorocarbono. La textura superficial y la resistencia de estos componentes son fundamentales para asegurar una fricción adecuada y garantizar la durabilidad del sistema [23].

Capítulo 1: Introducción

En las cajas de cambios de los carros de combate, los embragues pueden alcanzar temperaturas de hasta 200°C en condiciones extremas. Por esta razón, es crucial que tanto el aceite como los materiales de las superficies del embrague cumplan con especificaciones que les permitan disipar eficientemente el calor y mantener una adecuada refrigeración. Además, el aceite debe tener una elevada estabilidad térmica y resistencia a la oxidación para evitar la acumulación de residuos que puedan obstruir las estructuras porosas del embrague. Esto asegura tanto la lubricación como la protección del sistema bajo las condiciones exigentes de estos vehículos.

1.3 Tribología y lubricación

La tribología es una ciencia multidisciplinar que se enfoca en el estudio de la fricción, el desgaste y la lubricación, aspectos que son esenciales para el funcionamiento eficiente y duradero de cualquier sistema mecánico en el que haya movimiento relativo entre superficies. A lo largo de la historia, desde las civilizaciones antiguas hasta la era moderna, el conocimiento de estos fenómenos ha permitido a la humanidad desarrollar soluciones tecnológicas que optimizan la interacción entre componentes en movimiento.

En este apartado se tratan los antecedentes y el significado de la tribología, así como el estudio de los mecanismos de fricción y desgaste, y los modos de lubricación, elementos que han evolucionado de forma paralela al avance industrial y tecnológico. El análisis abarca desde los tipos y causas de fricción, hasta los mecanismos de desgaste y los objetivos y regímenes de la lubricación, ofreciendo una visión integral de los fundamentos y la importancia de esta disciplina en la ingeniería contemporánea.

1.3.1 Antecedentes y significado

La tribología, se trata de una ciencia fundamental que ha influido de manera silenciosa en el avance tecnológico de la industria. Desde la antigüedad, la humanidad ha buscado diferentes formas y procedimientos para reducir la fricción. De hecho, se han encontrado ejemplos de civilizaciones antiguas, mucho antes de que la tribología fuera reconocida como una disciplina, en las que ya se aplicaban principios tribológicos tales como por ejemplo la creación de cojinetes y superficies de baja fricción [31]. También se

Capítulo 1: Introducción

ha demostrado como los egipcios, haciendo uso de aceites de animales como lubricantes o una especie de trineos lubricados con agua, eran capaces de mover grandes bloques de piedra y estatuas. En la **Figura 1-19** se ilustra como 173 esclavos arrastran una gran estatua mientras un hombre de pie sobre el trineo vierte un líquido en la trayectoria del movimiento[32].

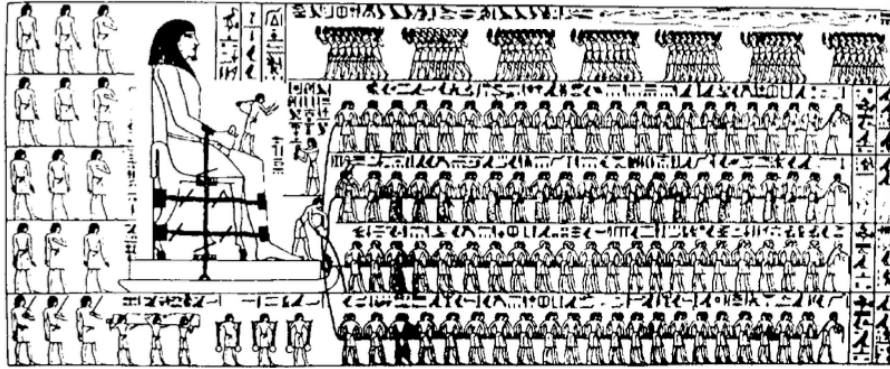


Figura 1-19: Egipcios usando un lubricante para mover estatua, El-Bersheh, circa 1880 [32]

Leonardo da Vinci, considerado como el “padre de la tribología” realizó numerosos ensayos relacionados con la lubricación, la fricción, el desgaste y leyes fundamentales de la fricción. Introdujo el concepto del coeficiente de fricción definiéndolo como la proporción entre la fuerza de fricción y la carga normal [17]. Durante los siglos XVII y XVIII, científicos como Amontons y Coulomb, desarrollaron las leyes fundamentales de la fricción y asentaron los fundamentos teóricos para futuros estudios. Fue Osborne Reynolds en 1886 quien con su artículo sobre la lubricación hidrodinámica dio lugar a que se iniciaran diversas investigaciones que buscaban mejorar la interacción entre dos superficies de contacto. Estudios e investigaciones que siguen llevándose a cabo hoy en día. El campo de la tribología, que engloba el estudio conjunto de fricción, desgaste y lubricación, experimentó un avance significativo a partir de la Segunda Guerra Mundial ya que fue cuando se inició el auge en los avances tecnológicos y el crecimiento industrial. La creciente demanda en la utilización de máquinas más eficientes junto con la evolución en la instrumentación avanzada (por ejemplo, la microscopía electrónica de barrido y la microscopía de fuerza atómica, **Figura 1-20**) se inició un periodo nuevo en la investigación tribológica.

Capítulo 1: Introducción

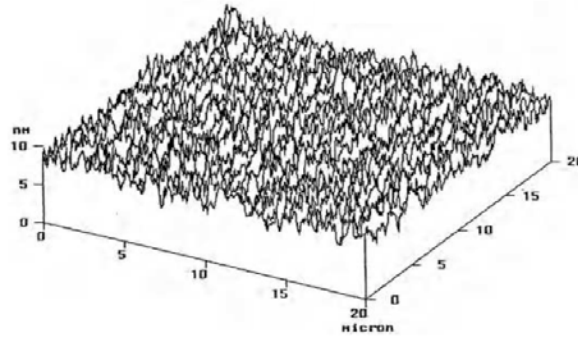


Figura 1-20: Perfil de superficie generado por ordenador (tamaño total del barrido $20 \times 20 \mu\text{m}^2$) [32]

Un comité británico introdujo el término tribología en la década de 1960 debido a la importancia que suponía tratar problemas de fricción, desgaste y lubricación. Y en 1966, el Dr. H. Peter presentó oficialmente el término “tribología” en su “Reporte Jost” [33]. El término “tribología” procede del término griego “tribos” que tiene el significado rozamiento o deslizamiento y “logía” que significa ciencia.

Hoy día la tribología se define como la ciencia multidisciplinar que se dedica al estudio y análisis de las interacciones entre superficies en movimiento relativo y en contacto mutuo. Se trata de una ciencia interdisciplinar, sino que relaciona y entrelaza conocimientos procedentes de la física, química, ingeniería de materiales y la mecánica entre otras áreas, **Figura 1-21**.



Figura 1-21: Tribología: Ciencia interdisciplinar

La aplicación práctica de la tribología cubre un amplio espectro en el campo industrial y tecnológico contribuyendo a lograr notables avances en la durabilidad y eficiencia desde máquinas y vehículos hasta naves espaciales. Como disciplina científica, se dedica al estudio de la fricción y sus efectos asociados, del desgaste y cómo prevenirlo a través de mejores diseños y de la lubricación. Por ello, la tribología abarca el estudio de:

Capítulo 1: Introducción

- Las características de la película situada entre cuerpos en contacto.
- Las consecuencias que puede conllevar el fallo o ausencia de esa película, pudiendo resultar en una fricción y desgaste significativos.

1.3.2 Estudio de la fricción, desgaste y lubricación

La principal causa de reducción en el rendimiento mecánico es el desgaste y no controlarlo puede ocasionar gastos muy elevados. La fricción que tiene lugar como consecuencia del contacto entre dos superficies es una de las principales causas de desgaste y disipación de energía. Se han hecho cálculos que estiman que, de todos los recursos energéticos mundiales, se dedica un tercio a vencer la fricción [17].

1.3.2.1 Fricción: Tipos y causa

La fricción representa la resistencia al movimiento o a rodadura y se percibe cuando un objeto sólido avanza sobre otro con el que comparte superficie de contacto. Esta oposición que actúa en sentido contrario al desplazamiento es conocida como fuerza de fricción o de rozamiento y se relaciona con la carga normal a través del coeficiente de rozamiento, **Figura 1-22**.

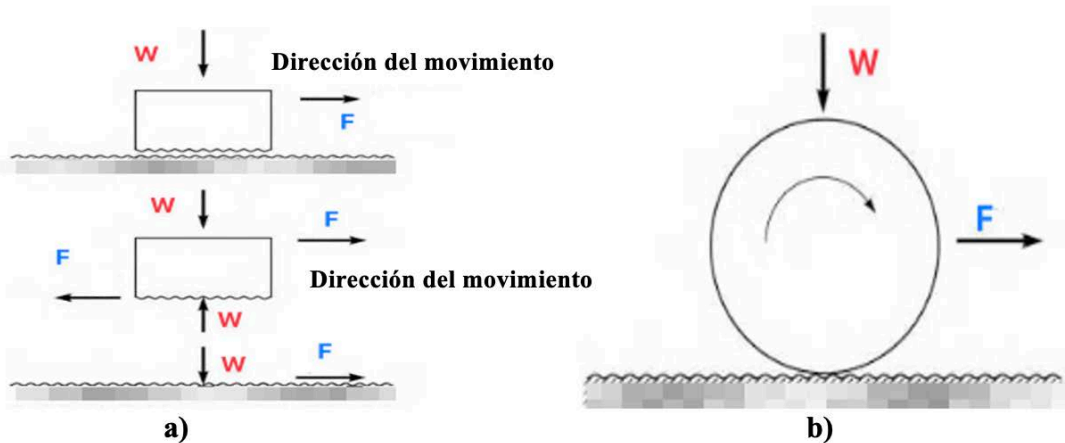


Figura 1-22: Cuerpo que se desliza y rueda sobre una superficie horizontal, siendo la W la fuerza normal y F la fuerza de rozamiento

Cuando dos superficies aparentemente planas se tocan, no se unen completamente debido a que tienen una textura con irregularidades. Lo que realmente se va a tocar son ciertos puntos específicos debido a que las superficies nunca van a ser perfectamente lisas. Es debido a estas imperfecciones por lo que se va a generar la fricción, **Figura 1-23**.

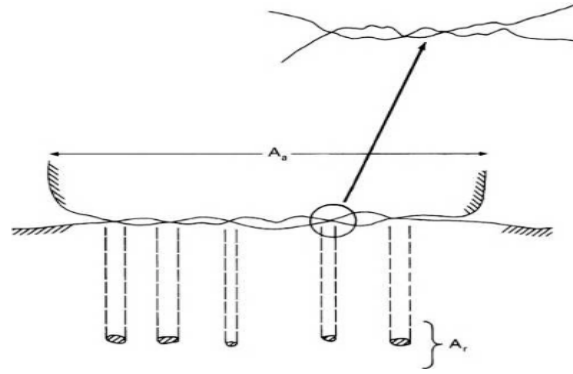


Figura 1-23: Representación del área de contacto aparente y área de contacto real [32]

Tal y como muestra la **Figura 1-23**, el área total donde se tocan realmente las superficies se conoce como área de contacto real (A_r). Esta área suele ser mucho menor que el área de contacto aparente (A_a), área si ambas superficies fueran lisas. El área real va a depender de las propiedades del material, de la textura de la superficie y de la presión que existe entre ambas superficies. Debido a las fuerzas que ocurren a nivel atómico, las irregularidades más cercanas pueden llegar a pegarse entre sí. Precisamente, la fricción entre dos superficies en movimiento surge de estas uniones y otras interacciones en la superficie. Por tanto, cuando dos superficies se tocan bajo presión, las cimas de las irregularidades son las que realmente se conectan, **Figura 1-24**. Estas irregularidades crean puntos de contacto y al soportar la carga, se deforman. Por tanto, las superficies pueden deteriorarse como resultado de esas interacciones que tiene lugar en los puntos de contacto y a las tensiones constantes.

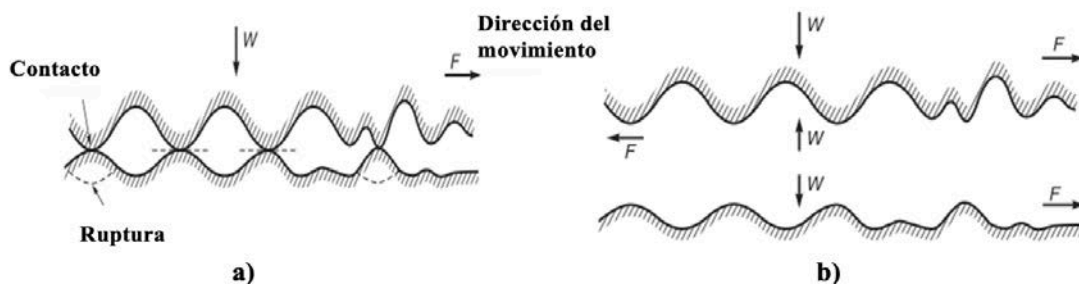


Figura 1-24: Dos superficies bajo presión: **a)** en contacto; **b)** sin contacto [32]

Esas irregularidades de las superficies pueden interactuar física o químicamente y unirse. Cuando se inicie el movimiento y las superficies se muevan una respecto de la otra, es necesario aplicar una fuerza que rompa esas uniones adhesivas que tiene lugar en las áreas de contacto real. La ruptura tendrá lugar en los puntos más frágiles y cuando esas uniones se rompen se generarán otras nuevas. Estas uniones pueden ser tan fuertes que cuando se deslicen puede llegar a desprenderse parte del material. En este caso, la fricción se basa en la resistencia de los materiales al cizallamiento [32] y se produce

Capítulo 1: Introducción

debido a la adhesión y la deformación. Por tanto, por muy lisas que sean las superficies, al moverse una respecto a otra se va a generar fricción y pueden surgir dos tipos de interacciones: una a nivel microscópico donde principalmente se observa deformación plástica y el desplazamiento de las irregularidades superficiales y otro a nivel macroscópico en el que la protuberancias del material más resistente crean marcas en la superficie del material más suave a través de deformación plástica o causan fracturas, desgarró o fragmentaciones tal y como se muestra en la **Figura 1-25**.

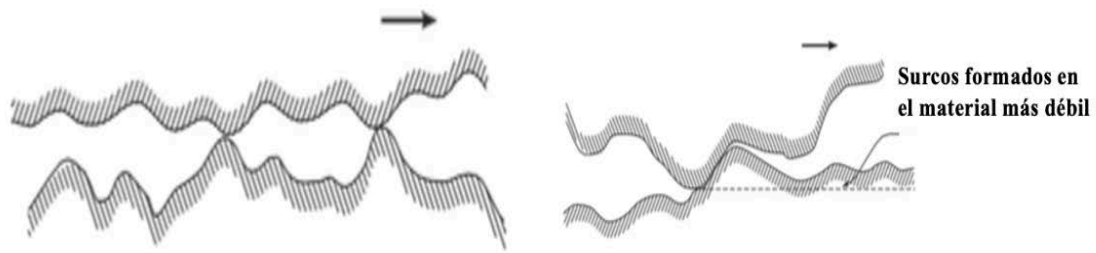


Figura 1-25: Tipos de interacciones entre dos superficies deslizantes [32]

Esos surcos también pueden generarse por partículas de desgaste atrapadas entre ambas superficies y el efecto de esos surcos generados puede ser relevante o no dependiendo de su tamaño. Su impacto va a depender de las irregularidades y dureza relativa que tengan las superficies. También va a afectar el tamaño, la forma y la dureza de los compuestos atrapados entre ellas. Existen fundamentalmente dos tipos de fricción:

- **Fricción en estado seco o fricción de “Coulomb”:** describe la componente tangencial de la fuerza que ocurre cuando dos superficies no húmedas, es decir, superficies que están en contacto directo sin la presencia de un fluido intermedio como agua, aceite u otro lubricante, se mueven o intentan hacerlo una respecto a la otra.
- **Fricción en fluido:** describe la componente tangencial de la fuerza que ocurre entre capas cercanas en un fluido a velocidades diferentes, como, por ejemplo, lo que ocurre entre superficies de cojinetes.

1.3.2.2 Desgaste: Mecanismos y tipos

El desgaste es la degradación superficial o pérdida de material en una o ambas superficies cuando están sometidas a movimientos de deslizamiento, rodadura o colisión. Este fenómeno suele ocurrir debido a las interacciones entre las irregularidades superficiales, lo que puede provocar la eliminación de material. Sin embargo, aunque no

Capítulo 1: Introducción

siempre se produce una pérdida inmediata de material, el movimiento relativo entre las superficies puede alterar las características del sólido a lo largo de su superficie. Como resultado, es posible que posteriormente el material se desprenda y se adhiera a la superficie opuesta. En tales casos, aunque una de las superficies experimente desgaste con pérdida de volumen o masa, la pérdida neta de material puede ser nula.

Otra posibilidad es que el material se libere como partículas debido al desgaste. Es importante destacar que el daño asociado al desgaste puede ocurrir antes de que se pierda material, e incluso estos fenómenos pueden producirse de manera independiente. Por esta razón, tanto la pérdida de material como el desplazamiento de este se consideran formas de desgaste. La observación de este desplazamiento generalmente requiere el uso de microscopía, aunque en casos severos puede ser visible a simple vista.

El desgaste y la fricción no son propiedades intrínsecas de un material, sino reacciones del sistema en su conjunto. Las condiciones operativas influyen significativamente en el comportamiento y el deterioro de las superficies en contacto. El desgaste es un proceso no deseado en componentes como rodamientos y engranajes, donde la pérdida de material puede requerir la sustitución de las piezas afectadas. En los sistemas sujetos a tribología, la pérdida de material es continua y acumulativa. Además, las partículas generadas por el desgaste pueden representar un problema mayor que el propio desgaste, especialmente en máquinas donde las partículas desprendidas son mayores que las holguras o los espacios disponibles.

Aunque existen diferentes mecanismos de desgaste, todos tienen en común que se produce una pérdida de material de las superficies de rozamiento [32] y estos son los siguientes:

- **Adhesivo:** El desgaste adhesivo tiene lugar cuando dos superficies sólidas en contacto se deslizan una contra la otra. En el transcurso de este deslizamiento, las asperezas o irregularidades microscópicas de las superficies entran en contacto directo pudiendo adherirse debido a las fuerzas de adhesión. Con el continuo deslizamiento, estas uniones adhesivas pueden romperse y estos fragmentos pueden unirse a la otra superficie. De este modo se produce una transferencia de material de una superficie a la otra. También puede darse la formación de partículas de desgaste sueltas, **Figura 1-26**.



Figura 1-26: Esquema de rotura durante el cizallamiento [32]

Este tipo de desgaste ocurre principalmente en situaciones en las que no hay suficiente lubricación o ésta es ineficaz. Es un tipo de desgaste no deseado ya que puede generar un desgaste y deterioro acelerado de la superficie de contacto y en consecuencia a una reducción de la vida de los componentes de los sistemas involucrados. En la **Figura 1-27** se observa la superficie de un acero inoxidable 303 a través de micrografía SEM (microscopía electrónica de barrido) que ha sufrido desgaste por adherencia debido a falta de lubricación:

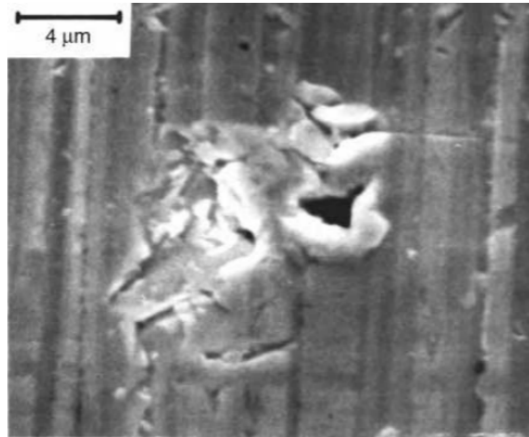


Figura 1-27: Desgaste por adherencia en un acero inoxidable [32]

- **Abrasivo:** El desgaste abrasivo es causado por la presencia de irregularidades en una superficie dura o por partículas resistentes que entran en contacto con un material más blando. Cuando estas irregularidades o partículas se mueven, pueden rayar o desgastar la superficie del material más blando produciendo un daño en la interfaz del material blando que puede manifestarse en forma de deformación, donde el material se estira o comprime, o en forma de ruptura, donde el material se rompe o se desprende, **Figura 1-28**.

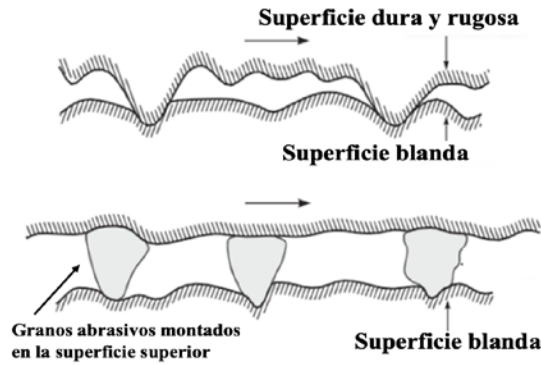


Figura 1-28: Esquemas de actuación en el desgaste abrasivo[32]

En la **Figura 1-29** se muestra el resultado del desgaste abrasivo como consecuencia de una mala lubricación en la superficie de un acero inoxidable 303.

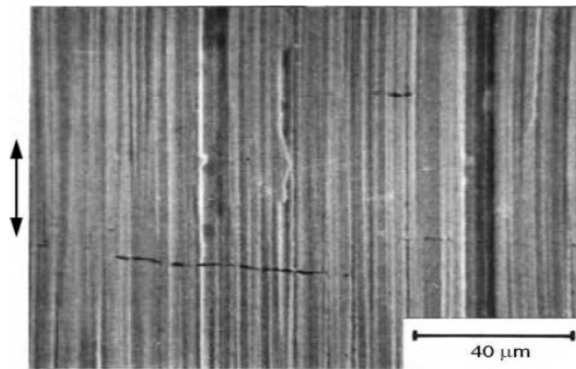


Figura 1-29: Desgaste por abrasión en un acero inoxidable[32]

Existen dos tipos de desgaste abrasivo:

- Desgaste abrasivo de dos cuerpos: Este tipo de desgaste ocurre cuando las irregularidades de una superficie dura se deslizan directamente sobre otra superficie, generando abrasión. El efecto es similar al uso de una lija sobre el material, como se muestra en la **Figura 1-30-a**.

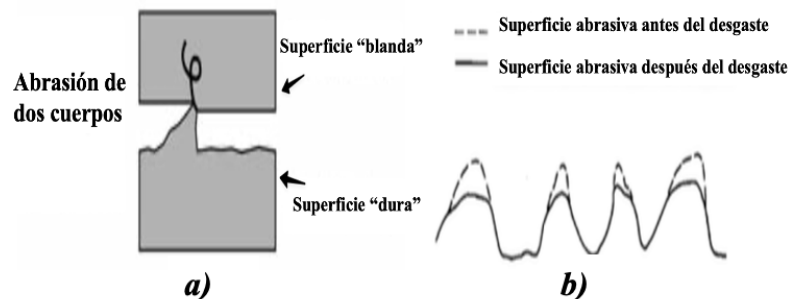


Figura 1-30: Efecto de la abrasión de dos cuerpos [32]

La **Figura 1-30-b** presenta un diagrama comparativo de una superficie abrasiva antes y después del desgaste. En este diagrama se observa una serie de crestas y

Capítulo 1: Introducción

valles que representan la topografía de la superficie. Antes del desgaste, las crestas son más pronunciadas y afiladas, lo que indica una superficie más rugosa y con mayor capacidad abrasiva. Tras el desgaste, estas crestas se han alisado, indicando la pérdida de material y la reducción de la irregularidad de la superficie.

- **Desgaste abrasivo de tres cuerpos:** Este tipo de desgaste se produce cuando partículas duras y sueltas, no adheridas a ninguna de las superficies principales, se interponen entre ellas, actuando como agentes abrasivos. Estas partículas pueden originarse de un desgaste previo o proceder de un medio externo. Al moverse libremente entre las superficies, generan abrasión, como se ilustra en la **Figura 1-31-a**.

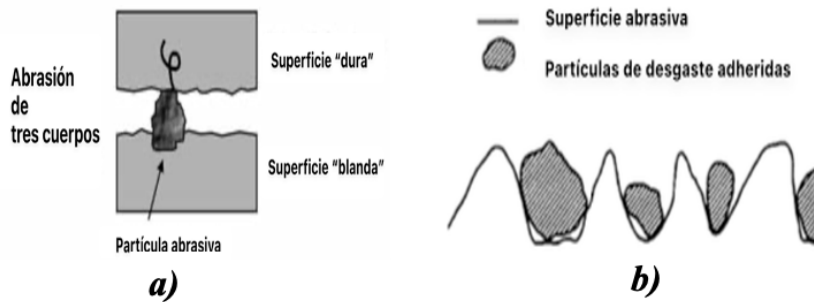


Figura 1-31: Efectos de la abrasión de tres cuerpos [32]

La **Figura 1-31-b** muestra cómo estas partículas abrasivas pueden obstruir los huecos en las superficies afectadas. Este diagrama también revela cómo las partículas de material desgastado se adhieren a las crestas y valles de la superficie abrasiva. Estas partículas, formadas por la fricción y el desgaste, provienen tanto de la superficie abrasiva como del material en contacto. Su presencia altera las propiedades de fricción y desgaste, afectando el rendimiento de los sistemas donde el control del desgaste es esencial. Este fenómeno es común en sistemas mecánicos con fricción continua, y la gestión eficiente de estas partículas es crucial para asegurar el buen funcionamiento y prolongar la vida útil de los componentes.

- **Fatiga:** El desgaste por fatiga es el proceso de deterioro o eliminación de material de una superficie que es sometida a la repetición cíclica de cargas o esfuerzos. Esto provoca la formación y propagación de picadura o microfisuras en el material hasta que finalmente se desprenden pequeñas partículas o fragmentos, **Figura 1-32**.

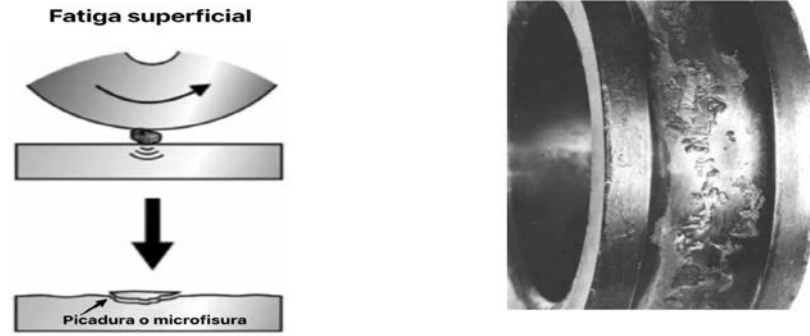


Figura 1-32: Eliminación de elementos de material producidos por el desgaste por fatiga[32]

El proceso del desgaste por fatiga se produce a través de las siguientes tres etapas:

- 1. Iniciación:** Se inicia la formación de pequeñas grietas o fisuras debido a cargas repetitivas
- 2. Propagación:** Las grietas iniciadas crecen y se expanden debido a la actuación continua de las cargas cíclicas.
- 3. Desprendimiento:** Llega un momento que esas grietas crecen tanto que hacen que un fragmento de material se desprenda o se despegue de la superficie dando lugar a una pérdida de material

Este tipo de desgaste suele ocurrir en rodamiento de bolas o rodillos como el de la imagen en el que las cargas repetitivas sobre las pistas terminan en el desprendimiento de fragmentos de material.

- **Impacto por erosión y percusión:** Este tipo de desgaste es el que se produce cuando partículas sólidas, líquidas o gaseosas impactan sobre una superficie produciendo la eliminación de material. Estas partículas, cuando chocan con la superficie a alta velocidad, arrancan fragmentos de material lo que origina un deterioro progresivo, **Figura 1-33**. Este tipo de erosión suele producirse cuando el fluido que fluye sobre una superficie contiene partículas abrasivas.

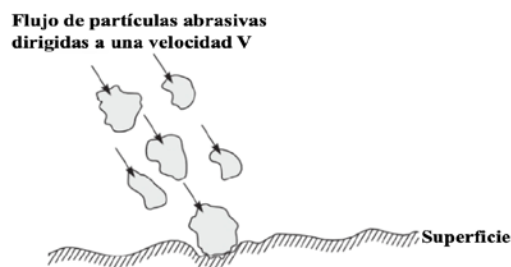


Figura 1-33: Flujo de partículas abrasivas que choca con una superficie a gran velocidad[32]

Capítulo 1: Introducción

Los principales factores que influyen en la generación y desarrollo de este tipo de desgaste son los siguientes:

- Velocidad y ángulo de impacto de las partículas: Cuando el ángulo de impacto es agudo, generalmente, causa más erosión que cuando el ángulo es obtuso
- Tamaño, forma y dureza: Las partículas que crean más erosión son las partículas más duras y grandes
- Propiedades del material de la superficie: Aquellas superficies de materiales más duros y resistentes no están tan afectados por este tipo de erosión
- Condiciones ambientales: La temperatura e incluso la presencia de sustancias químicas, pueden afectar a la resistencia del material.

Este tipo de erosión se puede reducir mediante la aplicación de recubrimientos que protejan la superficie o materiales más resistentes.

- **Químico o corrosivo:** Este tipo de desgaste ocurre cuando hay deslizamiento en un ambiente que favorece la corrosión produciéndose el deterioro de un material como resultado de reacciones químicas en su entorno. En tipo de desgastes, los agentes corrosivos son el oxígeno, el agua, bases o sales. En ausencia de deslizamientos, los productos químicos resultantes de la corrosión crean una película de menos de un micrómetro de espesor sobre las superficies que actúa como ralentizador de la corrosión. Sin embargo, la acción del deslizamiento produce que esa película química se desgaste permitiendo que el ataque químico continúe. Por lo que para que se produzca desgaste químico es necesario que actúen tanto la corrosión producida por la reacción química como la acción de fricción.

En la **Figura 1-34** muestra un ejemplo típico de un rodillo corroído después de rodar en un cojinete. En dicha imagen se puede observar que la corrosión deja una multitud de picaduras de fondo oscuro, cuyos alrededores se pulen por el rodaje. Esta situación crea posteriormente extensas salpicaduras originadas en la superficie a partir de una multitud de puntos iniciados [32].



Figura 1-34: Desgaste corrosivo de un rodamiento de rodillos mediante micrografía SEM [32]

Capítulo 1: Introducción

El desgaste adhesivo, abrasivo y corrosivo son los tipos de desgaste más frecuentes y en todos ellos se va produciendo un desgaste gradual de material. Cualquiera de los mecanismos citados previamente puede afectar a una pieza específica de un equipo, y es posible que un tipo de desgaste evolucione hacia otro, lo que a veces dificulta el diagnóstico del fallo al analizar y estudiar el componente dañado.

1.3.2.3 Lubricación: Objetivos, modos y regímenes

La lubricación es un aspecto fundamental de la tribología, desempeñando un papel crucial en la reducción de la fricción y el desgaste entre superficies en contacto que están en movimiento relativo bajo carga. En este contexto, la lubricación no solo minimiza la resistencia al deslizamiento, sino que también protege y prolonga la vida útil de componentes y máquinas.

Cuando dos superficies sólidas limpias están en contacto, sin lubricación, suelen experimentar altos coeficientes de fricción y un desgaste significativo. Para contrarrestar estos efectos y garantizar un movimiento fluido, se emplean diferentes tipos de lubricantes que pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos (*vide supra*). Los lubricantes sólidos se usan principalmente en condiciones de cargas elevadas y bajas velocidades, como en los cojinetes. En estas situaciones, los lubricantes forman una película fina o una capa de polvo sobre las superficies en contacto para protegerlas y evitar daños por fricción.

En contraste, cuando se emplean lubricantes líquidos o gaseosos, se habla de lubricación por película fluida, donde una capa de fluido se interpone entre las dos superficies en movimiento. El espesor de esta película es un factor determinante en el comportamiento de la fricción y el desgaste, ya que puede variar en grosor y evitar el contacto directo entre las superficies. Esta diferencia en espesor da lugar a distintos regímenes de lubricación, según el grado de separación entre las superficies, lo que permite una clasificación precisa.

Un lubricante no solo reduce la fricción, sino que también actúa como un separador físico entre superficies que, de lo contrario, estarían en contacto directo. En casos donde las superficies están extremadamente cercanas entre sí, las irregularidades superficiales pueden hacer contacto, pero muchas de estas irregularidades son minimizadas por la fina película de lubricante, tal como se muestra en la **Figura 1-35**.

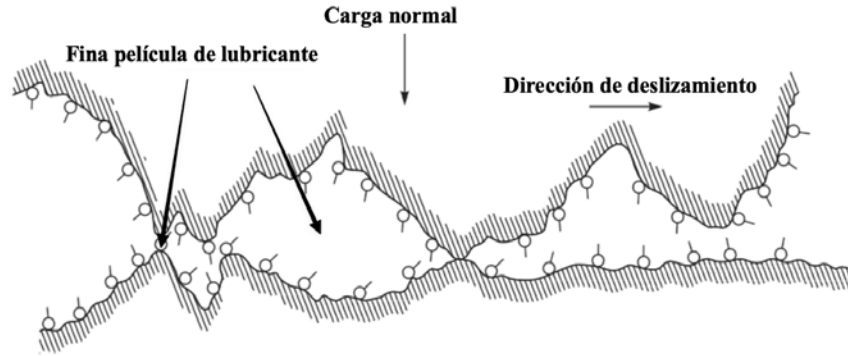


Figura 1-35: Superficies separadas por una capa límite de lubricante[32]

En estas condiciones, más que la viscosidad del lubricante, son las interacciones físicas y químicas entre el lubricante y las superficies las que juegan un papel clave en el control de la fricción y el desgaste [32].

El espesor de la película de lubricante, denominado espesor de película “*h*” (**Figura 1-36**), puede ser tan fino como la rugosidad de las superficies, o lo suficientemente denso como para evitar el contacto directo entre ellas, lo que reduce considerablemente la fricción y el desgaste. Este espesor de la película es uno de los criterios fundamentales utilizados para clasificar los distintos regímenes de lubricación, y su adecuada gestión es esencial para prevenir fallos mecánicos en los materiales.

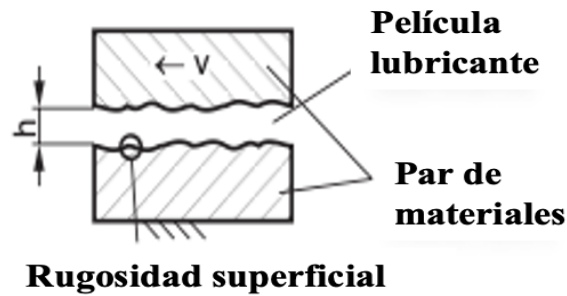


Figura 1-36: Espesor de la película lubricante entre dos superficies sólidas [27]

En función de espesor de la película del lubricante “*h*” y de las rugosidades de las superficies de contacto 1 y 2 (σ_1 y σ_2 , respectivamente)[34], se define el espesor específico (λ) de la película [32] como:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}} \quad \text{Ecuación 1-1}$$

El espesor específico (**Ecuación 1-1**) de la película se utiliza para caracterizar los regímenes de lubricación [35] tal y como se indica en la **Tabla 1-8**:

Tabla 1-8: Regímenes de lubricación en función del espesor específico de la película (λ) [34]

Régimen de lubricación	Espesor específico de la película (λ)
Lubricación límite	$\lambda < 1$
Lubricación mixta	$1 < \lambda < 3$
Lubricación por película fluida o lubricación (elasto) hidrodinámica	$\lambda > 3$

Los valores del espesor específico de la película λ en los que cambian los regímenes de lubricación anteriormente citados, varían según el tipo de contacto.

Estas variaciones se deben a factores como la rugosidad de la superficie, las propiedades de los materiales, las características del lubricante y las condiciones de operación. Cada uno de estos factores puede afectar el espesor de la película necesario para la transición entre los diferentes regímenes de lubricación, tales como la lubricación límite, mixta e hidrodinámica. Comprender estos factores es esencial para determinar con precisión el espesor de película requerido para una lubricación efectiva en diversas aplicaciones.

Los regímenes de lubricación en función del espesor específico de la película son los siguientes:

- **Lubricación límite:** La película del lubricante es notablemente más delgada en comparación con la rugosidad de las dos superficies involucradas. Como consecuencia, se producen numerosos contactos directos entre ambas superficies sólidas, las cuales son las que van a resistir casi la totalidad de la carga normal, **Figura 1-37**. Además, entre estos contactos se pueden formar pequeñas microsoldaduras. Durante esta etapa, debido a la cercanía o el contacto directo de las superficies, el coeficiente de fricción se incrementa y la cantidad de lubricante no es adecuada para lograr una separación total entre las superficies.

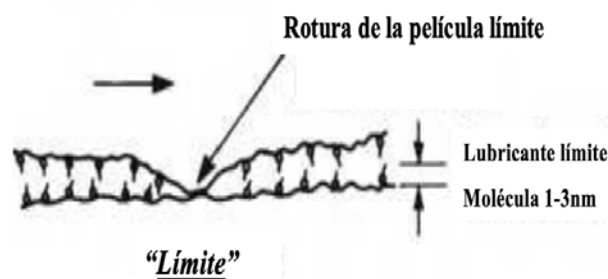
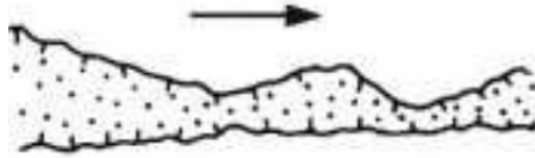


Figura 1-37: Lubricación límite[32]

Capítulo 1: Introducción

- **Lubricación mixta:** Se trata de una situación intermedia en la que se observan contactos entre sólidos de manera esporádica, mientras que, en otras zonas, la película tiene un espesor adecuado. El coeficiente de fricción disminuye conforme aumenta la viscosidad del lubricante o la velocidad, **Figura 1-38**.



“Mixta”

Figura 1-38: Lubricación mixta [32]

- **Lubricación elastohidrodinámica:** En este tipo de lubricación, la película de lubricante cubre completamente las superficies en contacto, evitando que entren en contacto directo. Esto asegura que las superficies en movimiento estén totalmente separadas por el lubricante, lo que reduce el coeficiente de fricción a un valor mínimo y prácticamente constante, como se muestra en la **Figura 1-39**.

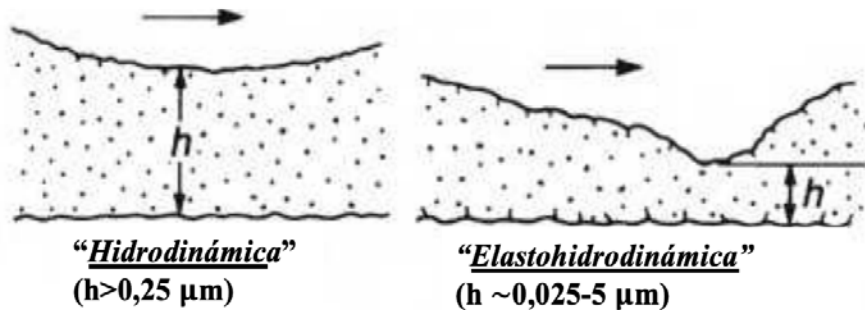


Figura 1-39: Lubricación hidrodinámica o elastohidrodinámica dependiendo del espesor específico de la película [32]

La **Figura 1-39** ilustra las diferencias entre la lubricación hidrodinámica y elastohidrodinámica en función del espesor de la película de lubricante (***h***). En la lubricación hidrodinámica (a la izquierda), el espesor de la película es mayor de 0,25 μm , lo que permite una separación suficiente entre las superficies, minimizando el contacto. En contraste, en la lubricación elastohidrodinámica (a la derecha), el espesor de la película varía entre aproximadamente 0,025 y 5 μm , permitiendo una separación efectiva en condiciones de mayor presión o carga, donde las superficies podrían deformarse elásticamente.

Capítulo 1: Introducción

Este comportamiento se representa a través de la curva de Stribeck (**Figura 1-40**), que muestra cómo varía el coeficiente de fricción en función del espesor de la película de lubricante (h). Esta curva es fundamental para seleccionar la viscosidad y el tipo de lubricante adecuados, así como para diseñar sistemas mecánicos que requieren lubricación. Comprender y aplicar correctamente la curva de Stribeck permite optimizar la eficiencia y prolongar la vida útil de los componentes mecánicos lubricados. Conocer los regímenes de lubricación en los que operan los mecanismos es crucial para prevenir el desgaste y reducir el consumo energético.

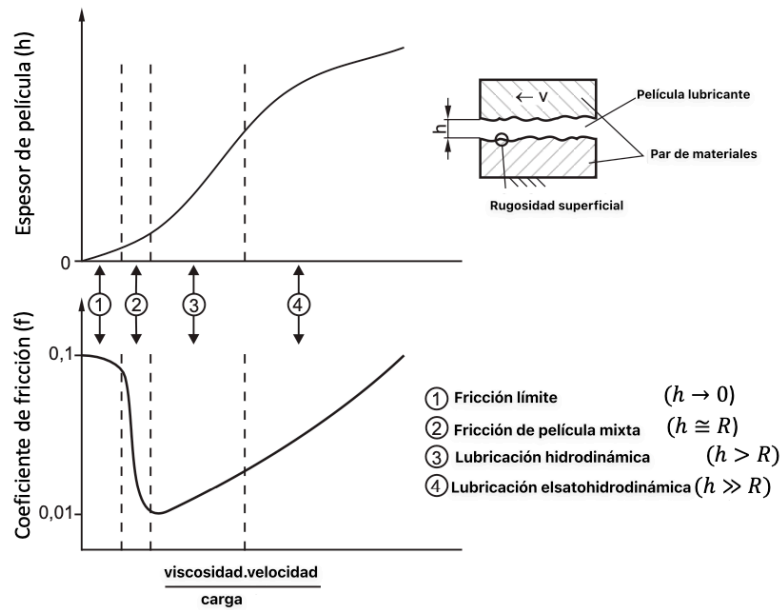


Figura 1-40: Gráfica de la curva de Stribeck [27]

En dicha gráfica, en el eje de abscisas se representa el número adimensional de Stribeck (**Ecuación 1-2**) que depende de las condiciones de funcionamiento:

$$S = \frac{\eta \cdot \Delta u}{W} \quad \text{Ecuación 1-2}$$

Siendo η la viscosidad dinámica del lubricante, Δu la diferencia de velocidad entre las dos superficies y W la carga normal aplicada sobre el contacto.

En el eje de ordenadas se representa el coeficiente de fricción (f) (**Ecuación 1-3**) el cual es la relación entre la fuerza tangencial F que es necesario para poder mantener un movimiento relativo entre dos superficies y la carga normal aplicada (W).

$$f = \frac{F}{W} \quad \text{Ecuación 1-3}$$

Capítulo 1: Introducción

En la **Figura 1-40** se pueden observar los tres regímenes de lubricación en función del espesor específico, descritos anteriormente. Empezando por el régimen de lubricación límite, se puede observar que tiene un coeficiente de fricción (f) muy alto. Esto es debido a que el espesor de la película lubricante es tan fino que es inferior a la rugosidad de las superficies (**Figura 1-37**). En este régimen de lubricación, el lubricante no va a ser capaz de ocupar el espacio que hay entre ambas superficies y van a ser las micro rugosidades las que soporten prácticamente todo el contacto. En este caso, el coeficiente de fricción va a ser prácticamente igual al que existe en caso de no tener lubricante.

Como resultado, no se puede evitar ni el contacto entre las superficies ni el desgaste. Si las condiciones de temperatura, velocidad o carga no permiten trabajar en este régimen, se debe utilizar lubricantes sólidos. Aumentando el número de Stribeck, o lo que es lo mismo, aumentando la viscosidad del lubricante, el aceite lubricante comienza a soportar parte de la carga del contacto y por tanto el coeficiente de fricción va a disminuir hasta que se alcance un valor mínimo. De este modo se puede conseguir la transición al régimen de lubricación mixta. En dicho régimen, aunque la película lubricante es más gruesa que la rugosidad de las superficies, puede haber contactos puntuales (**Figura 1-38**). Tal y como se observa en la **Figura 1-40**, en el régimen de lubricación mixta se experimenta una disminución del coeficiente de fricción, convirtiéndolo en el régimen más adecuado desde el punto de vista de eficiencia energética. En este tipo de régimen, con la utilización de aditivos antidesgaste apropiados, se evita el desgaste.

Tanto la lubricación límite como la lubricación mixta son considerados regímenes inestables debido fundamentalmente a que el aumento de la temperatura va a producir una disminución de la viscosidad y por tanto un aumento de la fricción. De este modo, las consecuencias serían un desplazamiento hacia la izquierda en la curva de Stribeck (disminución del número de Stribeck) en donde se observa un desgaste más pronunciado y una reducción de la vida del elemento mecánico.

Por el contrario, si se aumenta la viscosidad o la velocidad relativa entre las superficies, nos desplazamos hacia la derecha en la curva de Stribeck (aumenta el número Stribeck) y por tanto se entra en las zonas de los regímenes de lubricación elastohidrodinámica e hidrodinámica (**Figura 1-40**). En estos regímenes, el desgaste se minimiza principalmente porque existe una separación constante entre las superficies, y la película de lubricante supera la rugosidad de estas.

Capítulo 1: Introducción

Finalmente, desplazándonos hacia la derecha en la curva de Stribeck se alcanza un valor de S asociado a un valor mínimo del coeficiente de fricción. Ese punto suele coincidir con la transición del régimen mixto al régimen de lubricación elastohidrodinámico (**Figura 1-40**). Este régimen se caracteriza porque al tener una película de lubricante completa, no va a haber contacto entre las micro rugosidades que existen en las superficies. En este último régimen de lubricación, puede existir el caso en el que el coeficiente de fricción disminuya conforme S aumenta, aunque este descenso no sería tan pronunciado al que se produce en la zona mixta. También puede darse la situación de que aumente el coeficiente de fricción al aumentar S . Todo dependerá de cómo reaccione el lubricante con el aumento de la temperatura y la aparición de fenómenos no-Newtonianos. Este régimen, se manifiesta entre superficies curvas que experimentan un contacto Hertziano, es decir, un contacto caracterizado por superficies de contacto extremadamente pequeñas y cargas significativamente altas. Esta situación origina presiones de contacto elevadas que producen un aumento drástico de la viscosidad del lubricante y deformación elástica de ambas superficies, **Figura 1-41** [17].

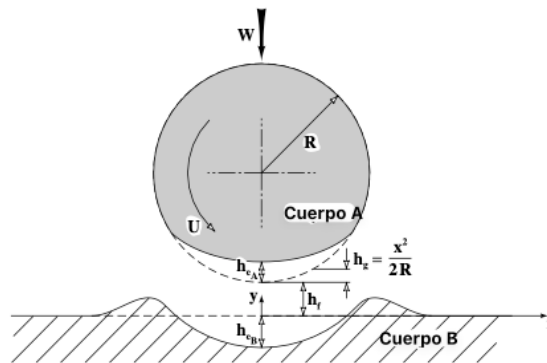


Figura 1-41: Efectos de deformación elástica local en el perfil de la película lubricante [17]

También se produce una disminución de la rugosidad. Este régimen de lubricación es interesante cuando se quiere optimizar la eficiencia energética y minimizar el desgaste y es común en engranajes, rodamientos y levas.

Cuando se está en el régimen de lubricación hidrodinámica, la película lubricante posee un grosor significativamente mayor que la rugosidad que tienen las superficies. Esto es debido fundamentalmente a la velocidad relativa entre ellas y a la viscosidad del lubricante. Esto permite prevenir el contacto entre ambas superficies y eliminar su desgaste.

Como se mencionó anteriormente, la curva de Stribeck ilustra la relación entre el coeficiente de fricción y la velocidad de deslizamiento. En la **Figura 1-42**, se puede

Capítulo 1: Introducción

observar esta curva, así como la relación entre el espesor de la película de lubricante y la rugosidad superficial. Esta gráfica es útil para comprender el comportamiento de los sistemas lubricados bajo distintas condiciones operativas y para optimizar los sistemas de lubricación con el fin de reducir la fricción y el desgaste.

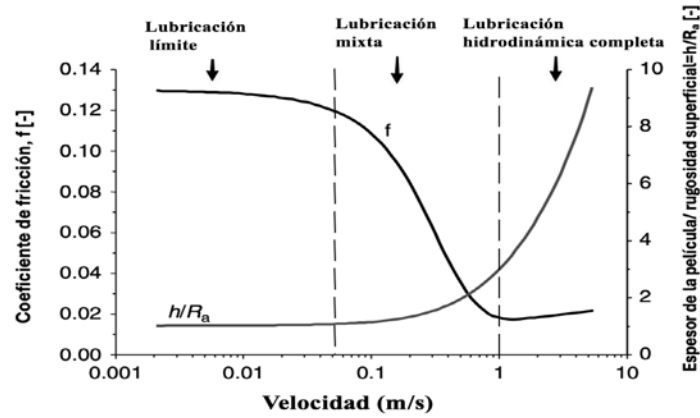


Figura 1-42: Curva de Stribeck generalizada (fricción) y separación [23]

En el régimen de lubricación hidrodinámica, la curva de Stribeck muestra un aumento en el coeficiente de fricción, lo cual está relacionado con la alta viscosidad del lubricante. Este incremento puede resultar desfavorable para el consumo energético, especialmente cuando la velocidad relativa entre las superficies es elevada. En este caso, sería beneficioso reducir la viscosidad del lubricante para acercarse al punto mínimo de la curva, sin comprometer la protección contra el desgaste. Este régimen es típico en sistemas como los cojinetes de un motor térmico.

Ambos regímenes, elastohidrodinámico e hidrodinámico, son considerados estables debido a que los cambios en la temperatura afectan tanto a la viscosidad como al coeficiente de fricción de manera similar, manteniendo un equilibrio.

El coeficiente de fricción puede variar según el régimen de lubricación y la aplicación específica. Por ejemplo, en componentes mecánicos como cojinetes, engranajes o rodamientos, se busca minimizar el coeficiente de fricción para reducir el rozamiento y mejorar el rendimiento del sistema. Sin embargo, en sistemas como el embrague de un automóvil, es necesario mantener una viscosidad más alta para garantizar el acoplamiento eficiente entre el eje motor y la caja de cambios. En este caso, la mayor parte del esfuerzo de fricción es absorbido por el aceite de transmisión, protegiendo las pastillas del embrague y evitando su desgaste prematuro.

Capítulo 1: Introducción

La **Figura 1-43** muestra la curva de Stribeck con el intervalo en el que operan diversos componentes del motor. El punto más bajo de la curva representa la fricción mínima, lo que se traduce en una reducción en el consumo de combustible para un vehículo.

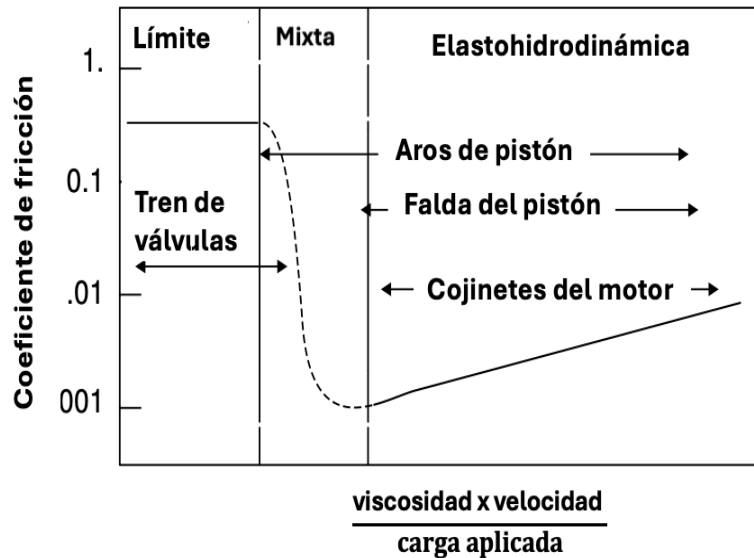


Figura 1-43: Diagrama de Stribeck incluyendo las regiones de funcionamiento de varios componentes del motor [23]

El tren de válvulas opera principalmente en el régimen de lubricación de límite, ya que las cargas elevadas y las bajas velocidades generan contacto directo o casi directo entre las superficies. Los aros de pistón están sujetos a una lubricación mixta, debido a las variaciones en las condiciones de operación durante el ciclo del motor. Cuando las condiciones permiten la formación de una película lubricante adecuada, la falda del pistón opera en régimen elastohidrodinámico, donde las superficies en contacto están completamente aisladas por el lubricante. Los cojinetes del motor también funcionan en este régimen, tal como se muestra en la **Figura 1-43**, creando una película que evita el contacto directo entre las superficies.

Cabe señalar que los motores no operan a una temperatura constante, y las condiciones de funcionamiento pueden variar dependiendo del terreno o del entorno en el que se encuentra el vehículo. Por lo tanto, la **Figura 1-43** proporciona una representación idealizada de los efectos de la fricción, y las condiciones reales pueden diferir en función de múltiples factores.

1.4 Mantenimiento predictivo y diagnóstico de aceites lubricantes

1.4.1 Definición y ventajas

El mantenimiento predictivo es una metodología avanzada que se centra en la monitorización, evaluación y análisis del estado de las máquinas y sistemas, con el objetivo de predecir y prevenir fallos antes de que ocurran. A diferencia del mantenimiento preventivo, que sigue un calendario de intervenciones programadas, o del correctivo, que responde a fallos ya sucedidos, el mantenimiento predictivo se basa en la anticipación de fallos utilizando datos, información y evidencias técnicas.

Este enfoque surgió de la necesidad de reducir los costes asociados a los métodos tradicionales de mantenimiento, como el preventivo y el correctivo, y al mismo tiempo, mejorar el conocimiento sobre el estado operativo de los equipos. El mantenimiento predictivo se fundamenta en el análisis de parámetros funcionales que reflejan la condición real de la maquinaria, complementado con el monitoreo continuo de los sistemas. Gracias a los avances tecnológicos y a las herramientas modernas de monitorización y análisis, es posible cumplir con uno de los principales objetivos de este tipo de mantenimiento: identificar fallos potenciales antes de que ocurran, asegurando así el funcionamiento óptimo de los equipos.

Además, este enfoque ayuda a minimizar las interrupciones no planificadas, ya que permite anticipar los fallos en lugar de reaccionar a ellos, y también facilita la predicción y extensión de la vida útil residual de los componentes.

Sin embargo, uno de los mayores retos al implementar el mantenimiento predictivo es definir e identificar las variables clave a monitorizar, así como establecer los límites de aceptación o rechazo para dichas variables. Estas variables deben proporcionar información relevante sobre el estado de los equipos y, además, ser fácilmente medibles. Una vez determinadas las variables críticas, es esencial recopilar y analizar los datos obtenidos para identificar patrones, tendencias y posibles anomalías. A través de estos análisis, es posible prever cuándo y cómo podría fallar un componente específico, lo que permite planificar acciones correctivas antes de que se produzca el fallo.

Capítulo 1: Introducción

Poner en práctica un mantenimiento predictivo, genera una serie de ventajas que hay que tenerlas en cuenta:

- **Optimización eficiente de recursos:** Al evitarse el desgaste prematuro se consigue prolongar la vida útil del equipo interviniendo solo cuando es necesario. Esto implica un ahorro considerable tanto en repuesto como en mano de obra.
- **Reducción de fallos:** Detectar problema antes de que ocurran permite evitar interrupciones por fallos o averías imprevistas y garantizar la continuidad de la producción o del mantenimiento.
- **Aumento de la operatividad de los equipos o de la producción:** Al reducir las interrupciones por fallos o averías no planificadas, se asegura una mayor operatividad de los equipos estando más disponibles y evitando colapsos o cuellos de botella en los talleres.
- **Fortalecimiento en la seguridad:** al prevenir y evitar fallos y posibles averías no previstas, se disminuye la posibilidad de accidente o situaciones que comprometan la seguridad del usuario.

La metodología proactiva que sustenta el mantenimiento predictivo, respaldada por el análisis de datos y el uso de tecnología avanzada, representa una transformación significativa en las operaciones de mantenimiento. Este enfoque ofrece una perspectiva más precisa, eficiente y segura, permitiendo la detección de fallos antes de que ocurran y optimizando el rendimiento de los equipos.

Existen varias técnicas dentro del mantenimiento predictivo, como el análisis de vibraciones, la termografía y el análisis de aceites. Este trabajo se centra en el análisis de aceites, una herramienta clave para monitorizar el estado de los equipos (motor y cajas de cambios) y garantizar su funcionamiento adecuado. A través de esta técnica, se pueden detectar varios aspectos cruciales:

- **Estado del aceite:** Un análisis exhaustivo de las propiedades físicas y químicas del aceite, como la viscosidad y la acidez, permite detectar cambios que alertan sobre posibles fallos o deterioros en equipos mecánicos, como el motor o la caja de cambios.
- **Contaminación del aceite:** A través de diversos ensayos, es posible identificar si el aceite está contaminado. Esto puede señalar problemas como fugas de

Capítulo 1: Introducción

combustible o agua, un filtro de aire roto, o la adición de un aceite incorrecto. La detección temprana de estas anomalías ayuda a evitar daños mayores.

- **Evaluación del estado de los equipos:** El análisis de los elementos de desgaste en el aceite permite evaluar el estado de los componentes mecánicos. La presencia de concentraciones atípicas de ciertos metales puede indicar un desgaste inusual, lo que sugiere que el equipo está sufriendo un deterioro acelerado, tal como se muestra en la **Figura 1-44**.

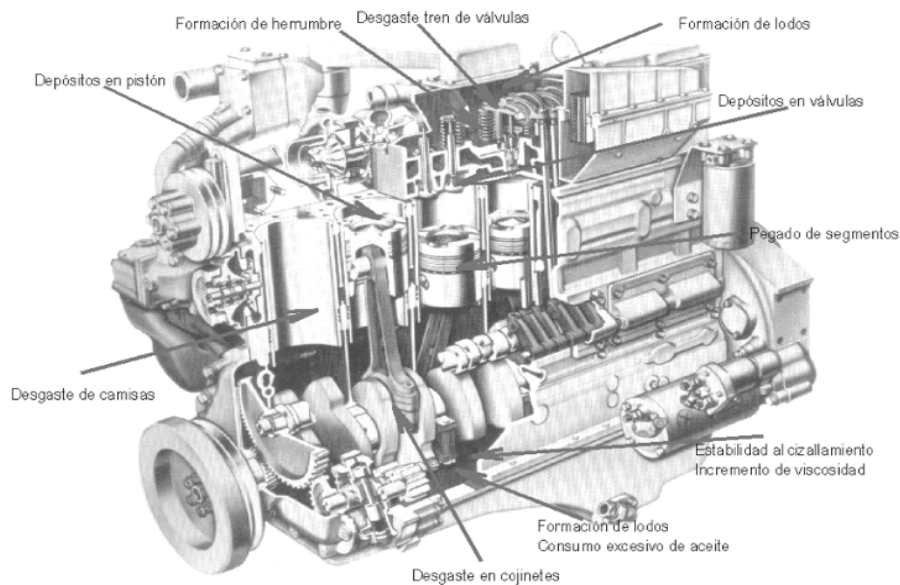


Figura 1-44: Problemas asociados a la lubricación en un motor de combustión interna [36]

La información obtenida al evaluar las propiedades fisicoquímicas del aceite es valiosa para detectar fallos mecánicos incipientes (**Figura 1-44**), además de estimar la calidad y la vida útil del aceite. Esto permite intervenir antes de que el aceite pierda sus propiedades y se produzca un desgaste excesivo en las piezas lubricadas, evitando fallos en los componentes y costosas reparaciones.

Además, el análisis de aceite puede revelar prácticas de mantenimiento inadecuadas, la presencia de componentes defectuosos o ensamblajes insatisfactorios que no cumplen con los estándares deseados. Equipos como motores, cajas de cambios y sistemas hidráulicos son sometidos regularmente a este tipo de análisis para asegurar su óptimo funcionamiento.

1.4.2 Cambio del aceite lubricante. Diferentes enfoques.

El mantenimiento de los equipos (motor y caja de cambios de los carros de combate Leopard en el presente estudio) depende en gran medida de la correcta gestión del lubricante, ya que este es crucial para reducir el desgaste y asegurar un funcionamiento eficiente. Por ello, la decisión de cuándo y cómo sustituir el lubricante debe ser analizada con detenimiento. Existen dos enfoques principales para llevar a cabo el cambio de aceite lubricante: uno basado en intervalos de tiempo o distancia, y otro en el estado real del lubricante. Ambos métodos presentan ventajas y desventajas, y la elección entre ellos depende de factores como el tipo de equipo, las condiciones operativas y los objetivos de mantenimiento. Los dos enfoques principales para el cambio del aceite lubricante son los siguientes:

- **Cambio del aceite lubricante basado en tiempo o distancia:** En este enfoque, el lubricante se reemplaza después de un período específico, como 200 horas de funcionamiento, un año de uso, o tras recorrer 15.000 km, sin tener en cuenta el estado actual del aceite. Aunque este método sigue las recomendaciones del fabricante, que están diseñadas para prevenir el desgaste excesivo, no proporciona información sobre las condiciones reales del lubricante. No requiere muestreo, análisis ni sensores integrados, lo que lo hace parecer un sistema económico. Sin embargo, su principal desventaja es que el aceite puede ser reemplazado cuando todavía tiene una vida útil considerable, lo que conduce a un uso ineficiente de los recursos.
- **Monitoreo del estado del lubricante:** Este enfoque, también conocido como "condition monitoring", evalúa el estado del lubricante mediante el análisis regular de muestras y la monitorización de varios parámetros clave. El intervalo de muestreo no debe exceder la mitad del intervalo de servicio recomendado. A lo largo del tiempo, los datos recopilados proporcionan información valiosa sobre tendencias en parámetros como la concentración de metales de desgaste, viscosidad, acidez, basicidad y niveles de partículas. En un programa de monitoreo integral, el lubricante se reemplaza cuando los análisis muestran que ha alcanzado los límites de ciertos parámetros críticos y ya no es adecuado para cumplir eficazmente su función de lubricación y protección del sistema mecánico. Este enfoque ofrece varias ventajas: prolonga la vida útil del equipo, previene fallos

críticos, permite ajustar los periodos de mantenimiento, reduce costes operativos y mejora el rendimiento del equipo. Además, facilita una planificación más eficiente del mantenimiento y optimiza el uso de recursos, contribuyendo a un funcionamiento más seguro y eficiente del sistema mecánico.

1.4.3 Herramientas y técnicas

El mantenimiento predictivo basado en el análisis de aceite usado es una metodología eficaz para optimizar los intervalos de cambio de lubricante y, al mismo tiempo, identificar las posibles causas de degradación o contaminación del mismo. En este contexto, el PAAET (Programa de Análisis de Aceite de Equipo Terrestre) es una herramienta implementada por el Ejército Español que se enfoca en el mantenimiento predictivo y preventivo de motores y cajas de cambio en vehículos del Ejército de Tierra, como los carros de combate Leopard, los BMR y los camiones. Los principales objetivos de este programa son los siguientes:

- **Determinar el estado del aceite:** A través del análisis exhaustivo del lubricante, se puede evaluar su tasa de degradación durante el uso, lo que permite establecer el momento óptimo para su reemplazo. Esto evita cambios innecesarios de aceite, generando ahorros significativos para el Ejército de Tierra. El análisis de las propiedades físicas del aceite proporciona información clave para evaluar su calidad y estado. En particular, se pueden detectar signos de degradación debido a factores como la combustión, la oxidación causada por el exceso de calor, o la presencia de contaminantes como humedad o fugas de refrigerante y combustible.
- **Evaluar el estado del sistema lubricado:** El análisis del aceite también permite identificar si está contaminado, lo que puede señalar problemas como fugas de combustible o agua, filtros de aire dañados o la adición de un aceite incorrecto. En este proceso, el análisis espectrométrico es una herramienta fundamental, ya que permite identificar el tipo y concentración de elementos metálicos presentes en el aceite. Estos elementos provienen del desgaste y la fricción de las piezas metálicas lubricadas en motores, cajas de cambio y sistemas hidráulicos. Una concentración atípica de algún metal en las muestras puede ser indicativa de un desgaste anormal. En caso de confirmarse este desgaste, se pueden tomar decisiones preventivas, como la reparación de la pieza afectada o la retirada del equipo antes de que ocurra

Capítulo 1: Introducción

un fallo más grave. Este tipo de análisis es esencial en el mantenimiento predictivo, ya que, con un costo relativamente bajo, se puede prever el estado de componentes críticos, como motores y cajas de cambio, especialmente en vehículos como el Leopard 2E.

- **Recopilar y analizar datos:** La acumulación de datos a través de los análisis de aceite permite mejorar la precisión del diagnóstico sobre el estado del lubricante y los equipos que protege. El seguimiento de tendencias a lo largo del tiempo facilita la identificación de fallos potenciales en el sistema lubricado. Los datos recopilados mediante un estudio detallado permiten analizar cada fase del ciclo de vida de sistemas de armas complejos, como los carros de combate, ayudando a planificar el mantenimiento y a extender la vida útil de los equipos.

1.4.4 Finalidad de los análisis

El análisis de aceite usado es crucial para controlar el estado y rendimiento de máquinas y equipos, así como para evaluar la calidad del lubricante a lo largo del tiempo. Este proceso ayuda a prolongar la vida útil de los equipos y mejora su fiabilidad, además de reducir los costes de mantenimiento.

El PAAET (Programa de Análisis de Aceite del Ejército de Tierra), mencionado anteriormente, se centra en dos tipos principales de ensayos: el análisis de las propiedades físicas del lubricante y el análisis espectrométrico del aceite. El análisis de las propiedades físicas evalúa la calidad y el estado del lubricante, identificando la degradación causada por el uso o la contaminación por combustión, oxidación, fugas u otros factores. Esto permite determinar el momento adecuado para cambiar el aceite, optimizando su uso y evitando reemplazos innecesarios.

Por otro lado, el análisis espectrométrico es fundamental en el mantenimiento predictivo, ya que identifica la presencia y concentración de elementos metálicos en el aceite, los cuales provienen del desgaste de las piezas en motores y cajas de cambio. La detección de concentraciones inusuales de metales puede señalar un desgaste anormal, lo que permite tomar medidas preventivas, como realizar reparaciones o retirar el equipo antes de que ocurra un fallo más grave, con un costo mínimo.

1.4.5 Beneficios de los análisis

La información obtenida de los análisis de las propiedades físicas y espectrométricas del aceite permite detectar posibles fallos mecánicos en sus primeras etapas y evaluar la calidad y durabilidad del lubricante. Este proceso ayuda a identificar problemas potenciales como el desgaste excesivo de componentes sometidos a fricción o el deterioro prematuro del aceite, lo que podría afectar su capacidad para cumplir sus funciones. Detectar estas anomalías es crucial, ya que, de no abordarse, podrían provocar averías costosas en el equipo que lubrica ese aceite.

Además, el análisis de aceite también permite identificar procedimientos de mantenimiento inadecuados, como el uso de lubricantes no recomendados por el fabricante o componentes y ensamblajes que no cumplen con los estándares deseados [14]. Esto proporciona al usuario la seguridad de que el equipo ha sido mantenido adecuadamente. En el caso de aviones de combate, por ejemplo, los pilotos revisan los resultados de los análisis de aceite antes de cada vuelo.

Un programa de análisis de aceite bien estructurado también mejora la organización del mantenimiento, al permitir la identificación temprana de necesidades no previstas. Asimismo, ayuda a perfeccionar las estrategias y operaciones de mantenimiento gracias a la retroalimentación obtenida.

La retroalimentación del análisis de aceite proporciona información valiosa sobre varios aspectos, tales como:

- **Estado del aceite:** Determina si el lubricante aún mantiene sus propiedades o si ha comenzado a degradarse. Cambios en la viscosidad, acidez o basicidad, así como la oxidación, son indicadores de que el aceite ha alcanzado su vida útil.
- **Indicadores de desgaste:** La presencia de partículas metálicas en el aceite puede señalar un desgaste anormal de los componentes debido a la fricción.
- **Contaminantes:** La detección de agua, refrigerante o combustible en el aceite puede sugerir problemas de fugas en el equipo.
- **Efectividad de los aditivos:** La disminución de ciertos aditivos esenciales, como detergentes o antioxidantes, puede indicar el agotamiento de estos y la necesidad de reemplazar el lubricante.

Capítulo 1: Introducción

- **Condiciones operativas:** Ayuda a identificar si el equipo está funcionando bajo condiciones óptimas o si factores externos, como el sobrecalentamiento, están afectando su rendimiento.

Gracias a esta retroalimentación, se pueden tomar decisiones informadas sobre cuándo cambiar el aceite o realizar tareas de mantenimiento específicas, garantizando la eficiencia y vida útil del equipo. Este enfoque proactivo permite abordar problemas potenciales antes de que se conviertan en fallos costosos o catastróficos, siendo una herramienta esencial en el mantenimiento predictivo.

1.4.6 Degradación de los aceites lubricantes

El proceso de degradación del aceite lubricante es un fenómeno inevitable que afecta su capacidad para cumplir con sus funciones básicas, como lubricar, proteger, limpiar, refrigerar y sellar. Factores comunes como la evaporación, oxidación y contaminación contribuyen a la degradación del lubricante. No obstante, los lubricantes están formulados para gestionar este deterioro de manera controlada durante un período determinado, que puede depender del tiempo de uso, la distancia recorrida o las operaciones realizadas.

El aceite lubricante proporciona información crítica sobre el estado de la máquina y sus componentes. Por ejemplo, una alta concentración de partículas metálicas en el aceite puede indicar un desgaste excesivo, lo que podría derivar en fallos del sistema o sobrecalentamiento. De manera similar, la presencia de partículas no metálicas, como el silicio, sugiere que el sistema no está adecuadamente sellado y protegido contra contaminantes como polvo o arena, lo que podría deberse a un filtro de partículas roto [37].

Los motores y cajas de cambio de los carros de combate operan bajo condiciones extremas que influyen directamente en el rendimiento del lubricante. Factores como altas temperaturas, gases de combustión, arranques en frío y la presencia de productos ácidos derivados de la descomposición del aceite desempeñan un papel crucial en la degradación del lubricante.

El objetivo principal del aceite lubricante es formar una película continua entre las superficies en movimiento para reducir la fricción, prevenir el desgaste y evitar que las piezas se agarroten. Además, el lubricante cumple funciones adicionales, como refrigerar

Capítulo 1: Introducción

los componentes, proteger las superficies metálicas de la corrosión, eliminar impurezas y evitar la formación de sedimentos en las piezas de unión.

Cuando las propiedades físicas o químicas del lubricante se ven alteradas, su capacidad para cumplir estas funciones se reduce significativamente. Las condiciones adversas a las que está expuesto el aceite en motores y cajas de cambio, como temperaturas extremas, altas velocidades de cizallamiento, entornos corrosivos y contaminación, aceleran su degradación.

1.4.6.1 Degradación de los aceites lubricantes. Causas físicas

Existen diversos factores físicos que provocan la pérdida de propiedades de un aceite lubricante. Por esta razón, es crucial implementar controles adecuados y mantener sistemas de prevención para evitar la contaminación del aceite, ya que puede afectar significativamente la eficiencia y la vida útil del sistema lubricado. Algunas de las principales causas de degradación son las siguientes [23]:

- **Fuentes internas:** Estas fuentes provienen del propio sistema (motor o caja de cambios) o se introducen durante las tareas de mantenimiento o reparación. Entre ellas se incluyen:
 - Residuos metálicos: Durante operaciones como corte, soldadura o amolado, se pueden liberar partículas metálicas que contaminan el sistema.
 - Partículas de oxidación del lubricante o combustible diésel: Durante el funcionamiento del sistema, pueden generarse partículas procedentes de la oxidación del lubricante o el combustible. Las partículas más duras suelen provenir de la oxidación parcial de cadenas de hidrocarburos más largas, como las de C30, presentes en los lubricantes. Por otro lado, las partículas más blandas, derivadas de cadenas de hidrocarburos más cortas (C15), se encuentran comúnmente en combustibles diésel.
 - Sistemas de sellado defectuosos: Los sellos defectuosos pueden permitir la entrada de contaminantes externos, como partículas abrasivas de sílice (arena o polvo), que pueden ser altamente perjudiciales para el sistema.
 - Contaminación por combustible: El combustible puede condensarse en el lubricante, alterando su viscosidad. Si también hay presencia de agua, ya sea por

Capítulo 1: Introducción

condensación o filtraciones, puede formarse una emulsión que disminuye la capacidad lubricante del aceite.

- Contaminación por agua: El agua puede ingresar al sistema de lubricación a través de fugas en el sistema de refrigeración, lluvia o condensación, particularmente por sellos defectuosos. La presencia de agua en el lubricante puede generar problemas como la reducción de la eficiencia lubricante y la corrosión de los componentes.
- Materiales textiles: Paños de limpieza usados durante el mantenimiento pueden dejar fibras o "pelusas", que al acumularse pueden obstruir las vías de lubricación.
- **Fuentes externas:** Estas fuentes de contaminación provienen del entorno y pueden incluir:
 - Infiltraciones: La entrada de contaminantes puede deberse a filtros de aceite desgastados o ineficientes.
 - Procedimientos de llenado inadecuados: Usar conductos o herramientas sucias durante el proceso de rellenado del aceite puede introducir partículas contaminantes.
 - Depósitos de lubricante expuestos: Si los depósitos de aceite no están adecuadamente sellados, pueden estar expuestos a la contaminación del ambiente.
 - Filtros de aire sobrepasados: En entornos polvorientos, como zonas desérticas, los filtros de aire pueden no ser suficientes para proteger el sistema de contaminantes externos.

Otros factores que afectan a la degradación del aceite lubricante son los desechos resultantes del desgaste del sistema (elementos metálicos fundamentalmente), los productos de desgaste procedentes de los procesos de combustión y los materiales de sellado defectuosos también contribuyen al deterioro del lubricante. Además, añadir un lubricante no compatible a un sistema existente puede causar problemas, ya que, aunque los fluidos base puedan mezclarse, sus aditivos podrían no ser compatibles y precipitar. Muchas de las causas físicas del deterioro de los lubricantes se pueden prevenir o mitigar con un mantenimiento adecuado y prácticas de limpieza rigurosas.

1.4.6.2 Degradación de los aceites lubricantes. Causas químicas

1.4.6.2.1 Oxidación

El aceite lubricante es esencial para el funcionamiento óptimo del motor y la caja de cambios de un vehículo. Sin embargo, con el tiempo, este aceite pasa por una serie de procesos químicos que pueden alterar tanto su calidad y como su eficacia. La oxidación es uno de los principales procesos que contribuyen a la degradación del aceite.

Los motores de combustión interna y las cajas de cambio de los carros de combate operan en unas condiciones muy específicas de velocidad, temperatura y presión que favorecen la degradación de los aceites lubricantes. Ambos equipos actúan como un potente reactor químico que cataliza el proceso de oxidación del aceite lubricante. De hecho, piezas metálicas del motor que tengan elementos metálicos como el cobre o el hierro favorecen la oxidación, ya que actúan como catalizadores. Estas condiciones, como las altas temperaturas, la presencia de gases de combustión, metales y productos ácidos derivados de la propia descomposición del aceite lubricante, dan lugar a que los propios aceites lubricantes vayan perdiendo poco a poco las propiedades con las que fueron diseñados y se degraden. Por ello, una de las principales propiedades de los aceites es que presenten una buena resistencia a la oxidación. Esto se va a conseguir con aditivos antioxidantes que prolonguen la vida útil del lubricante.

La oxidación en los aceites lubricantes, en particular en los lubricantes de motores, ocurre cuando estos entran en contacto con un agente oxidante. Esta reacción química es bastante común y provoca cambios en la estructura molecular del aceite. Al exponerse al oxígeno, especialmente a altas temperaturas, las moléculas del aceite reaccionan formando compuestos ácidos (óxidos e hidroperóxidos). Como resultado, tienen lugar reacciones químicas que pueden llegar a atacar componentes metálicos del motor, formar compuestos poliméricos más complejos y pesados que generan depósitos como lacas, lodos y barnices. Todo ello hace que el aceite sea más viscoso, y oscuro. Estos cambios en las propiedades físicas y químicas del aceite pueden afectar negativamente el rendimiento del lubricante y, por ende, la eficiencia y vida útil del motor. Por ello es esencial monitorizar y controlar la oxidación en los aceites lubricantes para garantizar un funcionamiento óptimo del motor.

La degradación de los aceites lubricantes debida a la oxidación se va a dividir en dos tipos de oxidación: oxidación en masa (del inglés: Bulk oxidation) y oxidación en película

Capítulo 1: Introducción

fina (del inglés: Thin film oxidation) [38]. El primer tipo de oxidación, la conocida como “Bulk oxidation”, es un tipo de reacción que se da principalmente en el cárter debido a que es una de las partes del motor más frías y en donde existe una gran cantidad de oxígeno. Este tipo de oxidación también se ve favorecida por los gases de escape y otros subproductos generados durante la combustión. Como resultado de esta oxidación, el aceite tiende a espesarse debido a la polimerización de los hidrocarburos presentes en el aceite base y los aditivos. Además, la formación de especies ácidas puede aumentar el TAN (del inglés Total Acid Number) pudiendo llevar a la corrosión de las partes metálicas del motor.

El segundo tipo de oxidación, la oxidación “Thin film oxidation” se produce en zonas en donde la temperatura es significativamente más alta y en donde el aceite no permanece mucho tiempo. Esta oxidación se produce principalmente en la zona del pistón, incluyendo segmentos, ranuras y casquillos. En estas zonas, se alcanza temperaturas de entre 200 y 300 °C ya que están cerca de la cámara de combustión. Bajo estas condiciones, los compuestos ácidos que se forman tienden a descomponerse, dando como resultados la formación de depósitos en las superficies del motor.

Ambos tipos de oxidación se produce especialmente en aceites lubricantes destinados a motores ya que es donde el aceite se somete a condiciones más severas de temperatura y cantidad de oxígeno y se produce una degradación del aceite. Sin embargo, no solo el oxígeno y la temperatura juegan un papel crucial en la oxidación.

Las partículas metálicas, que a veces se encuentran en el aceite, también contribuyen a este proceso. Estas partículas pueden introducirse en el aceite debido al desgaste natural del motor o a la contaminación externa. Partículas como el cobre y compuestos ferrosos actúan como catalizadores, acelerando las reacciones de oxidación. Estas partículas, al interactuar con el aceite, pueden acelerar su deterioro. La presencia de contaminantes y sustancias ajenas al aceite puede alterar su composición química y afectar su capacidad para resistir la oxidación. A medida que el aceite se oxida, se forman subproductos que pueden ser aún más reactivos y promover una mayor oxidación, creando un ciclo de degradación [39].

Aunque la presencia del oxígeno es uno de los factores más importantes que afectan a la degradación del aceite lubricante, a temperatura ambiente, el oxígeno reacciona de manera casi imperceptible, muy lentamente. Sin embargo, a medida que la temperatura

Capítulo 1: Introducción

del aceite aumenta, su comportamiento cambia drásticamente. El oxígeno, al encontrarse en un ambiente más cálido, acelera su velocidad de reacción, llevando a una oxidación más rápida del aceite. Por tanto, la temperatura es, sin duda, otro factor crucial que influye en este proceso.

El proceso de oxidación se ve afectado por dos variables principales relacionadas con la temperatura: la energía de activación y la velocidad de reacción. Con respecto a la energía de activación, la temperatura proporciona la energía necesaria para que las reacciones químicas ocurran. A mayor temperatura, mayor será la energía de activación, lo que facilita que las reacciones se lleven a cabo. Y con respecto a la velocidad de reacción, la relación entre la temperatura y la velocidad de reacción, en este tipo de reacciones, es proporcional. Esto significa que, a medida que la temperatura aumenta, la velocidad de reacción también lo hace. Sin embargo, esta relación no es tan sencilla como parece. En algunos casos, un incremento de tan solo 10°C puede llevar a duplicar la tasa de oxidación del aceite lubricante [40].

Con respecto al aceite de la caja de cambios, la oxidación del aceite también puede tener consecuencias graves. La oxidación del lubricante puede generar depósitos y lodos que afecten el rendimiento de la caja de cambios, reduciendo por ella la eficiencia e incluso causando potenciales daños. Además, un aceite oxidado puede perder sus propiedades lubricantes, dando lugar a un aumento del desgaste de los componentes internos de la caja de cambios. Por lo tanto, también es esencial controlar regularmente el aceite de la caja de cambios para garantizar su correcto funcionamiento y tiempo de vida tanto del aceite como de la caja de cambios.

La oxidación es, por tanto, un proceso químico que ocurre cuando los aceites lubricantes entran en contacto con el oxígeno, especialmente a altas temperaturas. Durante este proceso, las cadenas de hidrocarburos presentes en el aceite reaccionan con el oxígeno, dando lugar a la formación de diversas sustancias. Entre las sustancias que se forman durante la oxidación, destacan los derivados de ácidos orgánicos. Estos incluyen aldehídos y cetonas en altas concentraciones y ésteres en concentraciones menores. Estos compuestos no solo afectan la calidad del aceite, sino que también pueden comprometer el rendimiento y la vida útil de los mecanismos que lo utilizan. No todos los aceites lubricantes se degradan al mismo ritmo. Diversos factores, como el tipo de combustión, las características del combustible y las estequiometrías de mezcla, pueden influir en la tasa de degradación. Por ejemplo, se ha demostrado experimentalmente que los aceites

Capítulo 1: Introducción

de motor para vehículos GNC (Gas Natural Comprimido) presentan tasas de degradación más altas en comparación con otros tipos de aceites [39].

Cuando el aceite lubricante se oxida, sufre cambios notables. Estas modificaciones del aceite pueden ser evaluadas por espectrometría infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) tal y como se verá más adelante.

1.4.6.2.2 Consecuencias del proceso de oxidación

La oxidación es uno de los principales procesos que contribuyen a la degradación de los aceites lubricantes. Este fenómeno ocurre cuando el lubricante entra en contacto con el oxígeno, especialmente bajo condiciones extremas como altas temperaturas o presencia de contaminantes, lo que provoca una serie de reacciones químicas que alteran las propiedades del aceite. Estas alteraciones pueden afectar significativamente el rendimiento del sistema lubricado, ya que el aceite oxidado pierde su capacidad para cumplir sus funciones principales, como la lubricación y la protección contra el desgaste.

A continuación, se describen las principales consecuencias del proceso de oxidación en los aceites lubricantes. Estos cambios pueden ser monitoreados de manera directa o indirecta y ofrecen una visión del estado del lubricante, así como de su capacidad para seguir protegiendo los componentes del sistema lubricado. Las principales consecuencias del proceso de oxidación son:

- **Viscosidad del lubricante:** La oxidación puede causar un aumento en la viscosidad del aceite, especialmente cuando se expone a altas temperaturas debido a la polimerización. Esta alteración puede ser más evidente en ciertos en los motores Diesel como el de los carros de combate.
- **Acidez:** La oxidación lleva a un aumento en la acidez del aceite debido a la formación de productos ácidos en el proceso de óxido- reducción del aceite. Estos productos pueden afectar la capacidad del aceite para lubricar adecuadamente, lo que puede resultar en un desgaste acelerado del motor. La acidez se mide comúnmente a través del parámetro TAN, siguiendo el estándar ASTM D 664 [41]. También se mide la basicidad mediante el método ASTM D 2896 [42]. Cuando se produce un aumento de la acidez, se presenta una caída de la alcalinidad valorada mediante este ensayo, el cual se utiliza como una medida indirecta de esta alteración.

Capítulo 1: Introducción

- **Corrosión y metales de desgaste:** Los productos ácidos formados durante la oxidación pueden corroer las partes internas del motor como los cojinetes que están hechos de metales blandos como el cobre, y son particularmente susceptibles a la corrosión por productos ácidos. Un ejemplo claro es el fenómeno conocido como "pitting". Para cuantificar los metales presentes en el aceite, ya sean de desgaste o parte de los aditivos se utiliza el análisis espectrofotométrico. Es interesante destacar que ciertas partículas metálicas, como las de cobre, hierro y plomo, no solo indican desgaste. También actúan como catalizadores, acelerando el proceso de oxidación del aceite. Es decir, su presencia puede intensificar la velocidad con la que el aceite se degrada.
- **Aditivos:** Cuando el aceite empieza su proceso de oxidación, estos aditivos son los primeros en enfrentar la degradación. Por ejemplo, el paquete de aditivos antioxidantes, pueden ver mermada su presencia a menos del 10% cuando se aproxima el momento de reemplazar el aceite. Estos aditivos, elaborados en su mayoría a partir de elementos amínicos y fenólicos, desempeñan un papel vital en la contención del proceso oxidativo. Por otro lado, el ZDDP, o dialquíl ditiofosfato de zinc, es considerado como un antioxidante esencial. Esta combinación de zinc, azufre y fósforo forma una barrera en las componentes del motor, previniendo el roce metal contra metal. Los aditivos detergentes / dispersantes también se ven afectados por este proceso de oxidación. Estos aditivos, compuestos principalmente de calcio y magnesio, se encargan de contrarrestar los ácidos y de mantener en suspensión a los contaminantes. No obstante, su eficacia puede verse mermada por aspectos como la calidad inferior del combustible o altas temperaturas en el motor. Es esencial vigilar constantemente estos aditivos, sobre todo en motores que utilizan gasolina, para prevenir la acumulación de residuos dañinos para el aceite lubricante [39].
- **La carbonilla o depósitos carbonosos:** A medida que avanza la oxidación del aceite lubricante, tiende a formarse lo que se conoce como carbonilla o depósitos carbonosos. Los motores de combustión interna, como los de los vehículos militares, operan a temperaturas extremadamente altas, especialmente en la parte superior de los cilindros. Estas condiciones, agravadas por impurezas ocasionales, provocan la formación de depósitos carbonosos duros y viscosos, con inclusiones más suaves, comúnmente llamados "carbonilla". Aunque los lubricantes tienen

Capítulo 1: Introducción

altos puntos de inflamación, siempre hay una pequeña fracción que escapa del espacio entre el pistón y el cilindro hacia la cámara de combustión, quemándose parcialmente junto con el combustible. Por esta razón, es fundamental que el aceite deje la menor cantidad posible de residuos tras la combustión. La carbonilla se acumula en varias áreas del motor, como la cámara de combustión, las culatas, los pistones, los segmentos y las válvulas, y también es arrastrada hacia el aceite lubricante, afectando tanto el rendimiento del motor como las propiedades del lubricante, lo que compromete su eficacia y vida útil.

Los aceites destinados a motores de combustión interna deben tener una baja tendencia a la formación de carbonilla. Históricamente, para reducir la carbonización, se añadía una pequeña cantidad de aceite graso (5-10%) al aceite mineral, con la idea de que los aceites grasos producían una combustión más limpia, generando menos depósitos. Sin embargo, en la actualidad, los aceites minerales puros también ofrecen buenos resultados. Además de la carbonilla generada por el aceite, también está la que proviene de la combustión incompleta del combustible.

Para evaluar el estado del aceite en uso, se realizan pruebas que determinan la cantidad de materia carbonosa que transporta, conocida como "hollín". Este parámetro es esencial para monitorizar la limpieza del motor y sus condiciones operativas, especialmente en motores diésel.

Las principales causas de una elevada presencia de carbonilla en el aceite son:

- Mal asiento de las válvulas: Un mal cierre de las válvulas permite que los gases de combustión escapen, contaminando el aceite con hollín.
- Relación de compresión baja: Una compresión insuficiente provoca una combustión incompleta del combustible, generando más hollín y residuos.
- Relación aire/combustible alta: Una mezcla de combustible demasiado rica produce una combustión incompleta, aumentando la carbonilla.
- Filtros de aire sucios: Filtros obstruidos reducen la entrada de aire al motor, afectando la combustión y generando más residuos.
- Temperatura de admisión de aire baja: El aire frío y denso puede condensar el combustible antes de la combustión completa, resultando en más depósitos de carbonilla.

Capítulo 1: Introducción

- Uso irregular del motor: Alternar largos periodos de inactividad con uso intensivo puede aumentar la acumulación de humedad y otros contaminantes, incrementando la carbonilla.
- Uso prolongado del aceite: Si no se cambia el aceite regularmente, pierde sus propiedades detergentes y dispersantes, facilitando la acumulación de carbonilla.

La presencia excesiva de carbonilla en el aceite puede tener varios efectos negativos:

- Disminución de la capacidad dispersante: El aceite pierde eficacia para mantener las partículas en suspensión, lo que permite que se acumulen en las superficies internas del motor.
- Formación de lodos: La acumulación de carbonilla y contaminantes puede formar lodos densos que obstruyen los conductos de lubricación, reduciendo la eficacia del aceite.
- Pérdida de propiedades antidesgaste: La carbonilla reduce la efectividad de los aditivos antidesgaste del aceite, lo que aumenta el riesgo de desgaste en las superficies metálicas del motor.
- Aumento de la viscosidad: La acumulación de carbonilla aumenta la viscosidad del aceite, dificultando su circulación y reduciendo su capacidad de lubricación.
- Disminución de la capacidad dispersante: El aceite pierde eficacia para mantener las partículas en suspensión, lo que permite que se acumulen en las superficies internas del motor.
- Formación de lodos: La acumulación de carbonilla y contaminantes puede formar lodos densos que obstruyen los conductos de lubricación, reduciendo la eficacia del aceite.
- Pérdida de propiedades antidesgaste: La carbonilla reduce la efectividad de los aditivos antidesgaste del aceite, lo que aumenta el riesgo de desgaste en las superficies metálicas del motor.
- Aumento de la viscosidad: La acumulación de carbonilla aumenta la viscosidad del aceite, dificultando su circulación y reduciendo su capacidad de lubricación.

Capítulo 1: Introducción

Además de las consecuencias directas en el aceite, la carbonilla afecta el rendimiento del motor de varias formas:

- Acumulación de depósitos y obstrucción de conductos: La carbonilla puede depositarse en los conductos de lubricación, reduciendo el flujo de aceite y aumentando el riesgo de fallos en los componentes críticos.
- Bloqueo de filtros: La carbonilla puede saturar los filtros de aceite, reduciendo la capacidad del sistema para filtrar impurezas.
- Reducción de la capacidad volumétrica del motor: La acumulación de carbonilla en los cilindros y anillos del pistón reduce el espacio disponible para la combustión, afectando el rendimiento.
- Explosiones irregulares: La presencia de carbonilla altera las condiciones de combustión, provocando explosiones más intensas e irregulares, lo que puede dañar los componentes del motor.
- Pegado de segmentos del pistón: La carbonilla puede causar que los segmentos del pistón se adhieran a sus ranuras, impidiendo un sellado adecuado y aumentando el desgaste de los cilindros.

Para asegurar un funcionamiento óptimo del motor, es fundamental controlar el nivel de carbonilla en el aceite. Realizar un seguimiento continuo de su acumulación y cambiar el aceite regularmente son medidas imprescindibles para garantizar la durabilidad y eficiencia del motor.

- **El color del aceite:** A medida que el aceite se oxida, su color cambia, volviéndose notablemente más oscuro. Este oscurecimiento es más pronunciado en los motores diésel debido a la presencia de hollín. Sin embargo, en la caja de cambios, el aceite no sufre un cambio de color tan drástico, manteniendo un aspecto más translúcido.

1.4.6.2.3 Nitración

La nitración es un proceso que ocurre en el aceite lubricante debido a la interacción con los subproductos de los gases de combustión, especialmente los óxidos de nitrógeno (NO_x). Aunque tanto la nitración como la oxidación están relacionadas con la presencia de oxígeno y las elevadas temperaturas dentro del sistema de lubricación, la nitración se diferencia por estar estrechamente vinculada con los gases de combustión, particularmente en motores de alta temperatura. A pesar de su importancia, la nitración

Capítulo 1: Introducción

ha sido menos estudiada que la oxidación en los motores de combustión interna alternativos (MCIA).

El "blow-by", o "gas de soplado", es el escape de gases de combustión desde la cámara de combustión hacia el cárter del motor. Durante el proceso de combustión, se generan altas presiones, y aunque los anillos del pistón están diseñados para sellar la cámara y evitar fugas, con el tiempo y el desgaste pueden permitir que una pequeña cantidad de estos gases se filtre hacia el cárter. El "blow-by" contiene contaminantes como agua, combustible no quemado, óxidos de nitrógeno y partículas de carbono.

La interacción entre el "blow-by" y el aceite lubricante es crucial para comprender la nitración. Los gases de "blow-by", que contienen óxidos de nitrógeno (NO y NO_2), reaccionan con el aceite lubricante, lo que resulta en la formación de compuestos inestables de nitrógeno y órgano-nitratos. En términos químicos, la nitración implica la unión del grupo nitro ($-\text{NO}_2$) a un átomo de carbono en lugar de un átomo de hidrógeno en la molécula del lubricante. Esta reacción acelera la degradación del aceite y favorece la formación de barros (sludge) y barnices en el motor, particularmente en áreas más frías del sistema, como la tapa de balancines, donde estos compuestos se condensan, como se ilustra en la **Figura 1-45**.

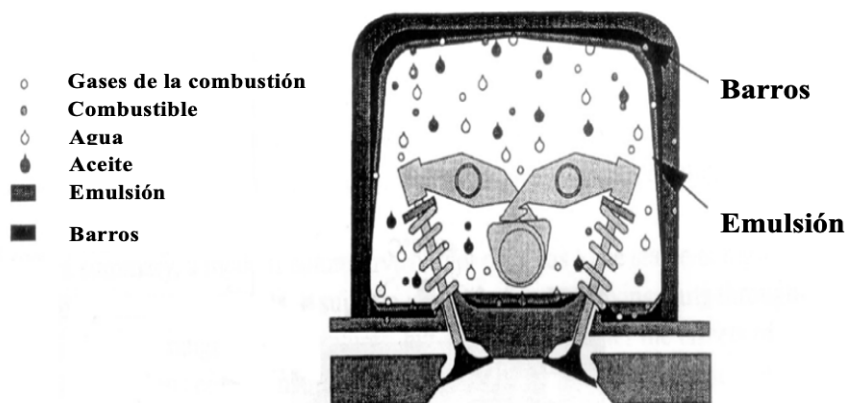


Figura 1-45: Producción de los barros (sludge) en la tapa de balancines [36]

Las consecuencias de la nitración son significativas. Este proceso puede aumentar la viscosidad del aceite, reduciendo su capacidad para lubricar eficazmente las piezas del motor. Además, los compuestos nitrados que se forman pueden corroer las partes metálicas, lo que conduce a un desgaste prematuro de los componentes del motor.

Por tanto, el "blow-by" es una fuente directa de óxidos de nitrógeno que ingresan al aceite lubricante y desencadenan el proceso de nitración. El control de la nitración es

Capítulo 1: Introducción

esencial para mantener la eficiencia del motor y prolongar la vida útil del aceite. Si no se controla adecuadamente, la nitración puede comprometer tanto el rendimiento del lubricante como la integridad del motor.

1.4.6.2.4 Sulfuración

Los combustibles derivados del petróleo, como la gasolina y el diésel, son fundamentales para el funcionamiento de equipos y vehículos. No obstante, la presencia de impurezas en estos combustibles puede generar problemas significativos, especialmente en lo que respecta a la formación de ácidos durante la combustión.

A pesar de los procesos de refinación a los que son sometidos, los combustibles fósiles no logran eliminar completamente todas las impurezas. El azufre, aunque reducido considerablemente en dichos procesos, sigue presente en pequeñas proporciones en el combustible. Este residuo es particularmente relevante en motores diésel, ya que, durante la combustión, el azufre se convierte en ácidos sulfuroso (SO_2) y sulfúrico (SO_3), que son altamente corrosivos y pueden afectar la durabilidad y el rendimiento óptimo del motor [29].

Los productos sulfatados, como el SO_2 y el SO_3 , se forman a partir de la oxidación de los compuestos de azufre. Una vez generados, estos compuestos no permanecen aislados en la cámara de combustión, sino que migran hacia el sistema de lubricación a través de los anillos del pistón y los sellos. Con el tiempo, su acumulación puede ser considerable, lo que potencialmente degrada la calidad y la eficiencia del aceite lubricante.

Para prevenir que los niveles de estos compuestos alcancen valores perjudiciales, es esencial monitorizar su presencia en el sistema de lubricación. Una de las técnicas más efectivas para este propósito es la Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FT-IR), que permite detectar la presencia de estos productos sulfatados con precisión.

La acumulación de ácidos derivados de la sulfuración no solo tiene el potencial de corroer los componentes internos del motor, sino que también puede comprometer la eficacia del aceite lubricante, disminuyendo su capacidad para proteger contra el desgaste. Además, la acumulación de estos ácidos puede generar sedimentos y residuos que afectan negativamente el rendimiento y la eficiencia del motor.

1.4.6.3 Técnica de espectrometría infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) en el análisis de la degradación de aceites lubricantes

La espectrometría infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) es una técnica fundamental en la detección de contaminantes y subproductos en aceites lubricantes. Esta herramienta es ampliamente utilizada debido a su capacidad para analizar simultáneamente múltiples parámetros de manera rápida y eficiente, sin requerir una preparación previa de las muestras.

La FT-IR es conocida por su precisión en la identificación de diversas sustancias. Su capacidad para detectar y cuantificar compuestos como agua, combustible, glicol, productos de oxidación, hollín y ciertos aditivos, la convierte en una técnica esencial para el monitoreo del estado de los lubricantes.

1.4.6.3.1 Detección de productos procedentes de la oxidación y combustión

Los sistemas de lubricación están expuestos a altas temperaturas y presiones, lo que favorece la oxidación de los compuestos orgánicos presentes en el aceite. Este proceso genera diversos subproductos, como cetonas, ésteres, aldehídos, carbonatos y ácidos carboxílicos. Mediante la técnica FT-IR, es posible detectar estos compuestos a través de la identificación del enlace carbonilo ($C=O$) en la región de 1.820 y 1.650 cm^{-1} , que corresponde a los productos de oxidación. En concreto, los ácidos carboxílicos, que son uno de los principales responsables de la corrosión, se detectan con precisión en esta región del espectro.

Los diferentes componentes del aceite, como aditivos antidesgaste, detergentes sulfonados, antioxidantes y compuestos carbonílicos, absorben radiación infrarroja en longitudes de onda específicas. Esto permite identificar las variaciones en sus concentraciones a lo largo del tiempo, lo que es clave para evaluar el estado del aceite. Además, la oxidación está influenciada por factores como el contenido aromático y de azufre del aceite, así como por el consumo de oxígeno. Las variaciones en la absorción de la región carbonílica ($C=O$) entre 1.820 y 1.650 cm^{-1} revelan la presencia de compuestos como cetonas ($1.725\text{-}1.705\text{ cm}^{-1}$), ésteres ($1.750\text{-}1.725\text{ cm}^{-1}$) y ácidos carboxílicos ($1.725\text{-}1.700\text{ cm}^{-1}$), tal y como muestra la **Figura 1-46**.

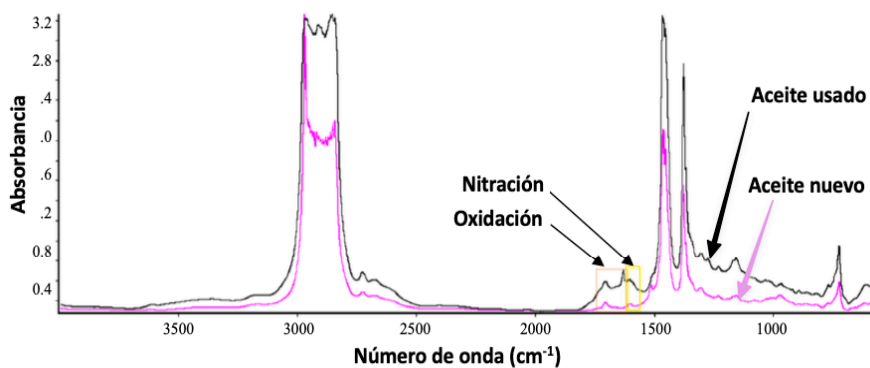


Figura 1-46: Identificación de la oxidación y la nitración mediante espectroscopía infrarroja (FT-IR) [43]

Los ácidos carboxílicos son los principales responsables de aumentar la acidez del aceite. Además, frecuencias cercanas a 860 cm^{-1} y 970 cm^{-1} son indicativas de un avanzado proceso de oxidación, donde la absorción es mayor y esto se relaciona con los tiempos de oxidación [43].

Es importante considerar que algunos elementos pueden interferir en el monitoreo de la oxidación. Por ejemplo, el biodiésel contiene ésteres que afectan las pruebas, ya que este combustible presenta frecuencias de vibración características en torno a 1.745 cm^{-1} . La presencia de estos ésteres puede complicar la medición de la oxidación en motores diésel que utilizan biodiésel.

Durante años, se han implementado diversas técnicas para estudiar la concentración de los compuestos generados en el proceso de oxidación del aceite, evaluar el tiempo de ignición del combustible y analizar la absorción de luz o el flujo del líquido en sistemas lubricantes. Los combustibles fósiles utilizados en la automoción, como gasolina y diésel, contienen compuestos alifáticos y aromáticos. Los compuestos aromáticos, que se caracterizan por sus estructuras en anillo, presentan frecuencias de vibración específicas entre 815 cm^{-1} y 745 cm^{-1} y son fundamentales para detectar problemas de adulteración con combustibles como la gasolina y el gasóleo [44]. Estos compuestos pueden ser identificados con la técnica FT-IR.

Medir la dilución de combustible en aceites lubricantes es crucial para mantener el rendimiento de los motores. Sin embargo, si el combustible contiene pocos compuestos aromáticos, la detección de esta dilución se vuelve más compleja. Los compuestos aromáticos tienen frecuencias de vibración específicas que actúan como indicadores en los análisis FT-IR, y su ausencia puede dificultar la precisión de la medición.

Capítulo 1: Introducción

El biodiésel, una alternativa más ecológica a los combustibles fósiles, contiene ésteres que vibran a frecuencias diferentes a las de los compuestos aromáticos. En Europa, se permite la inclusión de hasta un 7% de biodiésel en el diésel sin que sea necesario especificarlo. Los ésteres del biodiésel vibran alrededor de 1.745 cm^{-1} [45], lo que puede influir en las mediciones del nivel de oxidación en motores diésel que utilizan biodiésel. Esto debe tenerse en cuenta para evitar interpretaciones erróneas en las pruebas de FT-IR.

La legislación europea, que permite hasta un 7% de biodiésel en el diésel, tiene implicaciones importantes en las mediciones de oxidación y en la detección de la dilución del combustible. La presencia de ésteres cambia las frecuencias de vibración detectadas en las mediciones FT-IR, lo que puede causar errores en los resultados si no se ajustan adecuadamente.

1.4.6.3.2 Detección de productos procedentes de la nitración

La nitración del aceite es otro proceso de degradación que se puede detectar mediante espectroscopía infrarroja (FT-IR). Este fenómeno ocurre cuando los compuestos orgánicos presentes en el aceite se exponen a condiciones extremas en presencia de nitrógeno y oxígeno, lo que genera compuestos como NO, NO₂ y N₂O₄. Estos productos de nitración tienen características de absorción específicas en la región de 1.650 a 1.600 cm^{-1} justo por debajo de los productos de oxidación, como se muestra en la **Figura 1-46**.

Los productos de nitración, al igual que los de oxidación, afectan negativamente al rendimiento del aceite, aumentando su viscosidad y comprometiendo su capacidad lubricante. La detección de estos compuestos mediante FT-IR es crucial para el monitoreo del estado del aceite y la prevención de fallos mecánicos en los motores.

1.4.6.3.3 Detección de productos procedentes de la sulfuración

El azufre, presente tanto en el petróleo crudo como en ciertos aditivos utilizados en aceites lubricantes, puede oxidarse durante el funcionamiento del motor, generando productos sulfatados como dióxido de azufre (SO₂) y trióxido de azufre (SO₃). Estos compuestos sulfatados, cuando se acumulan en el sistema de lubricación, pueden causar problemas de corrosión y degradación del lubricante, afectando negativamente su capacidad para proteger los componentes del motor.

La técnica de espectrometría infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) es esencial para identificar estos productos de sulfuración. Los compuestos sulfatados pueden ser detectados en la región espectral comprendida entre 1.180 cm^{-1} y

Capítulo 1: Introducción

1.120 cm^{-1} donde estos productos presentan una absorción característica. La detección de dióxido y trióxido de azufre en esta región es clave para evaluar el estado del aceite y prevenir el deterioro de los sistemas lubricados por sulfuración.

El control de estos productos es fundamental, ya que la acumulación de compuestos sulfatados en el aceite puede afectar tanto la calidad del lubricante como su vida útil. Esto no solo compromete la protección contra el desgaste, sino que también aumenta el riesgo de formación de ácidos, que pueden dañar las superficies metálicas y otros componentes del motor.

1.4.7 Contaminación

El aceite lubricante es esencial para el buen funcionamiento de diversas maquinarias, pero puede verse afectado por la presencia de contaminantes, lo que compromete su eficacia y, en última instancia, el rendimiento del equipo que lubrica.

Los contaminantes se definen como sustancias ajenas al aceite que pueden originarse en el propio sistema o ser introducidas desde el entorno. Según su origen, se clasifican en:

- **Contaminantes internos:** generados por el propio sistema, como partículas metálicas desprendidas por el desgaste de los componentes.
- **Contaminantes externos:** procedentes del ambiente, como el polvo o la humedad que se infiltran en el sistema.

Además, según su estado de agregación, los contaminantes pueden ser líquidos, gaseosos, sólidos o semisólidos.

La presencia de contaminantes en el aceite puede tener múltiples consecuencias negativas:

- **Degradación del aceite:** los contaminantes aceleran el proceso de degradación, reduciendo la vida útil del aceite.
- **Agotamiento de aditivos:** los aditivos beneficiosos del aceite se consumen más rápidamente en presencia de contaminantes.

Capítulo 1: Introducción

- **Ataque químico:** algunos contaminantes pueden reaccionar químicamente con los componentes del equipo o del sistema de lubricación, causando corrosión u otros daños.
- **Formación de lodos y barnices:** los contaminantes pueden generar lodos o barnices que obstruyen el flujo del aceite, afectando el movimiento de los componentes esenciales.

La contaminación del aceite no solo afecta al propio lubricante, sino también al equipo que protege. Un aceite contaminado puede provocar una reducción en el rendimiento, un mayor desgaste y, en casos extremos, fallos graves del equipo lubricado. Mantener la calidad del aceite es clave para garantizar la eficiencia y la durabilidad de los componentes mecánicos. Para mantener los equipos es esencial comprender la naturaleza de estos contaminantes y cómo afectan la integridad de los sistemas lubricados.

1.4.7.1 Contaminación por partículas de desgaste

Las partículas de desgaste metálicas son generadas por la fricción entre componentes en sistemas mecánicos. Aunque el sistema esté lubricado, siempre se produce una cierta cantidad de desgaste. El aceite actúa como un colector de estas partículas metálicas. El análisis del aceite permite obtener una visión detallada del estado de las partes internas del equipo debido a dos razones principales:

- **Composición química:** las partículas metálicas que se desprenden de las superficies tienen la misma composición que el metal del que provienen. Analizar el aceite a lo largo del tiempo permite establecer un nivel "normal" de producción de partículas en cada equipo.
- **Detección de desgaste anómalo:** Si se detecta una cantidad inusual de partículas metálicas en el aceite, su composición química puede ayudar a identificar qué componente está experimentando un desgaste anómalo. Algunos metales permiten identificar directamente el problema, mientras que otros solo indican la existencia de desgaste en alguna parte del sistema. Por ejemplo, un aumento en la concentración de hierro puede ser indicativo de desgaste en diversas áreas, ya que es un metal presente en múltiples componentes. En cambio, un incremento en un metal menos común, como la plata, suele señalar un problema específico en componentes de alta precisión [14]. La plata, aunque no es frecuente en

Capítulo 1: Introducción

componentes mecánicos generales, tiene un uso clave en sistemas de alta tecnología y rendimiento debido a su conductividad y resistencia a la corrosión, especialmente en motores y cajas de cambios. Los rodamientos de alta precisión, por ejemplo, pueden estar recubiertos con plata para reducir la fricción y mejorar su durabilidad, lo que es crucial en aplicaciones que requieren un alto rendimiento y una larga vida útil. Además, en cojinetes de aleación cobre-plomo, la plata actúa como una capa protectora contra la corrosión, que es causada por los componentes activos del aceite. En estos casos, la plata, junto con otros materiales resistentes como el metal blanco o el indio, proporciona una barrera efectiva, asegurando la integridad y el rendimiento de los cojinetes bajo condiciones operativas severas [36].

En sistemas mecánicos que operan bajo condiciones normales, la generación de metales de desgaste ocurre a un ritmo constante. Estas condiciones normales incluyen operar dentro del rango de temperatura previsto por el fabricante para el motor y la caja de cambios, mantener las cargas y esfuerzos dentro de los límites de diseño, funcionar a las velocidades recomendadas, seguir un programa de mantenimiento regular, utilizar lubricantes de alta calidad, y operar en entornos sin niveles excesivos de polvo, humedad, o corrosión. Aunque en ciertas situaciones este ritmo puede ser mínimo o casi imperceptible, es una constante que se mantiene para equipos del mismo modelo que operan bajo las mismas condiciones.

En sistemas completamente cerrados, donde no se añade ni se pierde lubricante, la concentración de partículas metálicas en el aceite aumenta de manera uniforme con el tiempo (ver **Figura 1-47**). Esta acumulación de partículas es una consecuencia natural de la fricción, aunque el sistema esté correctamente lubricado [14].

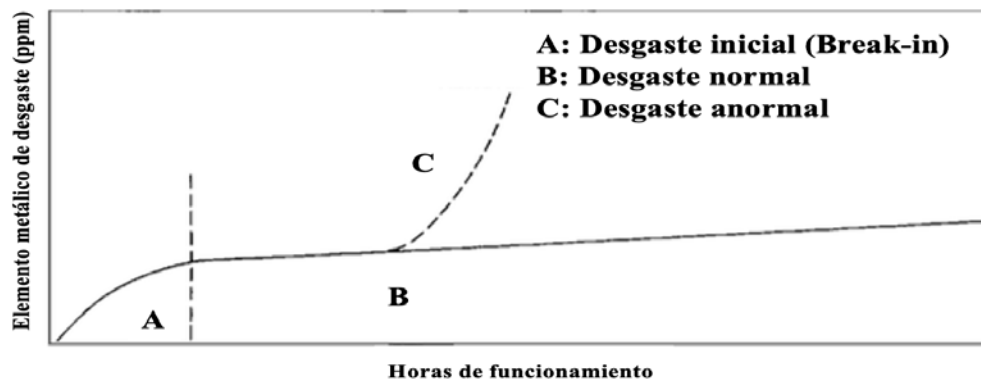


Figura 1-47: Concentración de los elementos metálicos de desgaste con el paso del tiempo [14]

Capítulo 1: Introducción

La **Figura 1-47** es un modelo útil para visualizar y entender la relación entre el tiempo de operación y el desgaste del equipo, y puede ser esencial para programas de mantenimiento predictivo. Cualquier situación anómala que incremente la fricción entre componentes o altere las condiciones normales de operación acelerará la generación de metales de desgaste. Por ejemplo, una condición fuera de lo común podría causar un aumento drástico tanto en la concentración como en la tasa de acumulación de estos metales en el fluido lubricante (Curva C, **Figura 1-47**). Si esta condición anómala no se identifica y rectifica a tiempo, el desgaste se intensificará, pudiendo causar daños adicionales en otras partes del equipo. Este proceso puede continuar acelerándose hasta que, eventualmente, el equipo o sistema falle por completo. Es esencial, por lo tanto, monitorizar y mantener adecuadamente los sistemas para prevenir tales fallos y garantizar una operación eficiente y duradera.

El término "break-in wear" que aparece en la curva A de la **Figura 1-47** se refiere al desgaste inicial que ocurre en un motor nuevo o recién reconstruido durante las primeras horas de funcionamiento. Es un proceso natural y necesario para que las superficies metálicas en movimiento dentro del motor se ajusten y se adhieran adecuadamente entre sí. Durante este período, es común que se produzca un desgaste más alto que el que se observa durante el funcionamiento normal del motor después del período de rodaje o "break-in".

Por tanto, el análisis de aceite y la detección de metales de desgaste es una herramienta valiosa para el mantenimiento predictivo, permitiendo identificar problemas potenciales antes de que se conviertan en fallos graves. Por lo tanto, la detección precoz de los problemas es esencial para garantizar la longevidad y el correcto funcionamiento de los equipos mecánicos.

1.4.7.1.1 Origen de los elementos metálicos

Los motores de combustión interna están expuestos a la contaminación tanto de fuentes externas, como arena y polvo, como de fuentes internas, incluyendo contaminantes de combustión generados por el soplado de gases y metales de desgaste provenientes de las partes móviles lubricadas. Estos contaminantes se acumulan en el sistema de lubricación en diferentes grados, dependiendo del estado del equipo y las condiciones operativas.

Capítulo 1: Introducción

Las transmisiones, que desempeñan un papel crucial en la mecánica de cualquier vehículo, también pueden verse afectadas por problemas de contaminación. A pesar de su diseño robusto y su construcción pensada para resistir condiciones exigentes, las transmisiones pueden contaminarse fácilmente con tierra, arena y agua, lo que resulta en la presencia de altos niveles de residuos metálicos y no metálicos en el sistema de lubricación sin necesariamente dañar los componentes lubricados. Por esta razón, es fundamental que el analista encargado de evaluar el estado del aceite de transmisión tenga un profundo conocimiento de la transmisión bajo análisis y de cualquier factor que pueda causar un aumento repentino o significativo de la contaminación en el aceite de transmisión [14].

En el caso de los motores diésel y las transmisiones utilizadas en equipos militares no aeronáuticos, estos sistemas están diseñados para ser especialmente duraderos y resistentes, capaces de operar en condiciones extremas propias de entornos de combate. Sin embargo, como cualquier maquinaria, están sujetos al desgaste y a la degradación a lo largo del tiempo. Una forma efectiva de monitorizar y comprender este desgaste es a través del análisis de los elementos metálicos presentes en los aceites lubricantes. Estos metales, liberados por el desgaste de los componentes, proporcionan valiosa información sobre el estado interno de los sistemas.

En la **Tabla 1-9**, se describen algunos de los metales característicos que pueden encontrarse en los aceites lubricantes y su relación con los componentes que experimentan desgaste en los motores y transmisiones.

Tabla 1-9: Elemento metálico y su posible fuente

ELEMENTO	POSIBLE FUENTE
Aluminio	Pistones, cojinetes, bombas de aceite, arandelas de presión, virutas de mecanizado
Antimonio	Cojinetes, grasas
Bario	Aditivo inhibidor de herrumbre y oxidación en grasas; Aditivo anticorrosivo en refrigerantes; Aditivo antidesgaste y EP
Boro	Aditivos detergentes/dispersantes, grasas, cemento
Calcio	Anillos de pistones, rodamientos

Capítulo 1: Introducción

Cromo	Cojinetes, aleaciones de bronce/latón, bujes, arandelas de presión, tubos enfriadores de aceite
Cobre	Ejes, rodamientos, cilindros, engranajes, pistones y anillos
Hierro	Cilindros, ejes y cojinetes. Además, puede ser un residuo de fabricación o incluso un indicativo de oxidación en ciertos equipos.
Plomo	Bielas, cojinetes principales, casquillos, arandelas y cojinetes del pasador del pistón
Litio	Aditivos detergentes/dispersantes, engranajes automotrices, agua salada
Magnesio	Anillos del piston, aditivos EP
Molibdeno	Cojinetes, tren de valvulas, alabes de turbinas
Níquel	Aditivos antioxidantes/antidesgaste
Fósforo	EP
Potasio	Aditivo del refrigerante
Plata	Cojinetes, pasador del pistón
Silicio	Polvo/tierra, aditivo antiespumante
Sodio	Aditivos del refrigerante, agua salada
Estaño	Cojinetes, jaula de rodamientos, soldaduras
Titanio	Aditivo antidesgaste, alabes de turbinas
Cinc	Aditivo antidesgaste/antioxidante, sellos de neopreno

Conocer la presencia y función de los elementos metálicos en motores diésel y transmisiones de equipos militares ayuda a entender la complejidad y la ingeniería que hay detrás de estos equipos esenciales para las operaciones militares, ayudando a predecir sus posibles averías.

1.4.7.1.2 Identificación y medición de los elementos metálicos

El aceite lubricante es esencial para el funcionamiento óptimo de cualquier maquinaria, ya que actúa como el principal protector contra el desgaste y la fricción, entre otras funciones. No obstante, con el tiempo, este aceite acumula partículas microscópicas

Capítulo 1: Introducción

producto del desgaste natural de la máquina. La identificación y análisis de estas partículas se convierten en herramientas clave para predecir y prevenir fallos prematuros en los equipos.

Debido a su contacto constante con las superficies mecánicas, el aceite recoge partículas generadas por la fricción. Estas partículas pueden ser de tamaño tan reducido que logran pasar a través de los filtros y permanecer en el aceite. Bajo condiciones normales, la concentración de estas partículas se mantiene estable; sin embargo, factores como la carga de trabajo, el entorno o problemas internos de la maquinaria pueden alterar esta concentración.

El control y análisis regular de las partículas presentes en el aceite permiten identificar patrones de desgaste anormal en la maquinaria. Al determinar la composición y cantidad de las partículas, es posible identificar la fuente del desgaste y enfocar los esfuerzos de mantenimiento en los componentes específicos que requieren atención.

El programa de análisis de aceites del Ejército de Tierra proporciona un enfoque sistemático para interpretar los resultados de los análisis de aceites usados. Este método incluye:

- **Evaluación del equipo y del estado del aceite:** Con base en los resultados del análisis, se evalúan tanto el estado del equipo como del aceite.
- **Diagnóstico de fuentes de desgaste:** Se identifican las fuentes potenciales de los metales y contaminantes que indican desgaste.
- **Uso de tablas y diagramas:** Para una interpretación precisa, se emplean tablas y diagramas específicos disponibles en el documento técnico del Ejército de los Estados Unidos: JOAP Volumen IV [15]. Estas herramientas ofrecen rangos de evaluación y valores de tendencia que relacionan la concentración de metales con la condición esperada del equipo.
- **Aplicación de juicio experto:** Aunque las tablas proporcionan una guía, el evaluador debe aplicar su conocimiento y experiencia para interpretar adecuadamente los resultados de acuerdo con el componente en cuestión.

A través del análisis espectrométrico, es posible detectar y cuantificar con precisión los metales de desgaste presentes en el aceite. Esta información es crucial para monitorizar el estado de la maquinaria y garantizar su funcionamiento óptimo. Los aceites

Capítulo 1: Introducción

lubricantes, al estar en contacto directo con las piezas mecánicas, recogen partículas metálicas producto del desgaste natural de los componentes. Aunque estas partículas están presentes en concentraciones mínimas, pueden ser detectadas y analizadas mediante técnicas espectrométricas avanzadas, tales como:

- **Espectrómetro de emisión atómica:** Es un instrumento óptico utilizado para identificar y cuantificar los metales presentes en el fluido lubricante. Su principio de funcionamiento se basa en:
 - **Excitación atómica:** La muestra de aceite se expone a una chispa o a un plasma de alto voltaje, lo que provoca la excitación de los átomos de los metales presentes.
 - **Emisión de luz:** Los átomos excitados emiten luz cuando regresan a su estado fundamental.
 - **Análisis de la luz emitida:** La luz emitida se separa según su longitud de onda y se mide como una señal eléctrica. La intensidad de la luz emitida por cada elemento es proporcional a su concentración en el aceite.

Existen dos variantes principales de esta técnica: el Rotrode de Emisión Atómica (AER) y el Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP). En esta tesis, se ha utilizado el AER para obtener la concentración de elementos metálicos en el aceite. El ICP, una técnica más moderna, utiliza plasma para excitar los átomos.

- **Espectrómetro de absorción atómica:** Este instrumento óptico se emplea para determinar la concentración de metales de desgaste en el fluido lubricante.

El análisis espectrométrico proporciona una visión detallada de los metales presentes en el aceite, permitiendo intervenciones tempranas que prolongan la vida útil de los equipos y garantizan un funcionamiento óptimo. Sin embargo, estas técnicas espectrométricas tienen limitaciones. Son eficaces para identificar fallos que resultan en un aumento gradual de partículas metálicas en el lubricante, pero no pueden detectar todos los tipos de fallos. A continuación, se detallan los fallos detectables y no detectables:

- **Fallos detectables:** Son indicativos de un problema inminente en el motor o sus componentes:
 - Incremento lento y constante de partículas metálicas por encima de los niveles estándar.

Capítulo 1: Introducción

- Incremento rápido de partículas metálicas, aunque dentro de los niveles aceptables.

Las principales causas de estos fallos en motores de combustión interna incluyen el desgaste de cojinetes, cigüeñales, cilindros, engranajes de bombas de aceite, bujes de pistones, anillos de pistón, varillas de empuje, balancines, guías y resortes de válvulas.

- **Fallos no detectables:** Representan dos tipos de problemas que los análisis espectrométricos tradicionales tienen dificultades para detectar de manera anticipada:

- Fallos catastróficos: Aquellos que ocurren de manera súbita, sin mostrar señales de advertencia previas en forma de partículas metálicas en el aceite lubricante. Este tipo de fallos puede ser causado por fenómenos como la fatiga de materiales o fracturas repentinas en componentes críticos. A diferencia del desgaste progresivo, que genera partículas detectables, estos eventos catastróficos no liberan partículas en una cantidad o tiempo suficiente para ser identificados mediante las técnicas de análisis de aceite convencionales. Como resultado, este tipo de fallos puede ocasionar daños severos sin previo aviso, lo que los convierte en uno de los mayores desafíos para el mantenimiento predictivo.
- Fallos sin indicadores metálicos: Ocurren cuando las partículas generadas durante el desgaste son demasiado grandes para ser detectadas por las técnicas espectrométricas habituales, que están diseñadas para identificar partículas de tamaño microscópico. En estos casos, aunque el desgaste pueda estar ocurriendo, las partículas generadas no siguen el patrón típico de producción que las herramientas de análisis de aceite pueden rastrear. Esto puede suceder en componentes que se desgastan de manera no convencional o que liberan partículas que quedan atrapadas en el sistema sin llegar al aceite.

Ambos tipos de fallos, al no ser detectados mediante los métodos de análisis tradicionales, subrayan la importancia de complementar el análisis de aceite con otras técnicas de diagnóstico y monitoreo de condiciones para proporcionar una cobertura más integral en la prevención de fallos en los equipos.

1.4.7.2 Contaminación por elementos externos líquidos

La contaminación por elementos externos líquidos representa una amenaza significativa para la eficacia de los aceites lubricantes y, por lo tanto, para el rendimiento de los equipos que dependen de ellos. Entre los contaminantes líquidos más comunes se encuentran aquellos que se mezclan con el aceite en estado líquido, como el agua, combustibles y aceites incorrectos. La presencia de estos contaminantes puede alterar las propiedades físicas y químicas del lubricante, comprometiendo su capacidad de proteger y lubricar los componentes mecánicos. Estos pueden incluir:

- **Relleno con aceite incorrecto:** La introducción de un aceite lubricante incorrecto puede afectar negativamente la composición del aceite original, modificando propiedades esenciales como la viscosidad. Además, cuando se mezclan aceites con bases o aditivos incompatibles, pueden formarse precipitados que indicarán contaminación. Esta situación puede comprometer la lubricación adecuada de los componentes, provocando un desgaste acelerado y posibles fallos mecánicos.
- **Presencia de agua:** El agua es uno de los contaminantes líquidos más perjudiciales para los aceites lubricantes. Puede ingresar al sistema de diversas maneras, como a través de fugas, condensación o como subproducto de la combustión de hidrocarburos. Una vez en el sistema, el agua puede estar presente en tres formas: disuelta, emulsionada o libre. El agua disuelta es difícil de detectar y requiere ensayos químicos específicos. En forma de emulsión, el agua se manifiesta como pequeñas gotas suspendidas en el aceite, mientras que en estado libre tiende a separarse y depositarse en el fondo del sistema. Los efectos negativos de la presencia de agua en el aceite lubricante son variados y graves:
 - Desplazamiento del aceite: El agua puede reemplazar al aceite en áreas críticas, eliminando la lubricación hidrodinámica y exponiendo las piezas al desgaste abrasivo, adhesivo y por fatiga.
 - Formación de ácidos y óxidos: En presencia de ciertos metales, como hierro, cobre y plomo, el agua puede actuar como catalizador en la formación de ácidos y óxidos, acelerando la corrosión y el deterioro del sistema.
 - Corrosión y herrumbre: El agua promueve la oxidación de las superficies metálicas, lo que genera corrosión y la formación de residuos que pueden obstruir los componentes mecánicos.

Capítulo 1: Introducción

- Vaporización en condiciones extremas: En sistemas de alta velocidad, como los cojinetes, el agua puede vaporizarse, dejando áreas sin lubricación, lo que resulta en un desgaste severo de los componentes.
- Reacciones con aceites sintéticos y aditivos: El agua puede reaccionar con aceites sintéticos y ciertos aditivos, generando ácidos que degradan tanto el aceite como el sistema lubricado.
- Formación de lodos: En condiciones de alta humedad, el agua puede eliminar aditivos esenciales, lo que lleva a la formación de lodos que obstruyen el sistema y reducen la eficiencia del lubricante.
- Crecimiento de microorganismos: En el cárter, el agua puede favorecer la proliferación de microorganismos que generan ácidos y aceleran la degradación del aceite.
- **Presencia de combustible:** La presencia de combustibles, como gasolina o gasóleo, en el aceite lubricante puede alterar significativamente sus propiedades, afectando su rendimiento. Los efectos más importantes incluyen:
 - Reducción del punto de inflamación: La presencia de combustibles volátiles disminuye el punto de inflamación del aceite, aumentando el riesgo de ignición a temperaturas más bajas.
 - Pérdida de viscosidad: El combustible, al tener una viscosidad menor que el aceite, puede reducir la viscosidad del lubricante, lo que provoca la pérdida de la película lubricante. Esto incrementa el desgaste de los componentes y, en casos extremos, puede causar el gripado del motor.

La tolerancia del aceite lubricante a la contaminación por combustible varía según el tipo de combustible. Por ejemplo, una dilución de gasóleo superior al 4-5% puede ser perjudicial, mientras que, en el caso de la gasolina, este límite es del 3%. En motores que aún utilizan gasolina con plomo, la contaminación por plomo puede detectarse en análisis de aceite y sigue siendo una preocupación en equipos más antiguos o que no han sido adaptados a combustibles sin plomo. Esta contaminación por plomo puede provocar la formación de depósitos y aumentar el desgaste de las piezas del motor.

Capítulo 1: Introducción

El exceso de combustible en el aceite suele indicar problemas en el motor o un uso inadecuado. En motores que emplean gasolina con plomo, esta dilución es especialmente dañina, ya que eleva los niveles de plomo en el aceite. Aunque hoy en día los combustibles sin plomo son predominantes, los motores que aún dependen de combustibles con plomo corren el riesgo de sufrir daños debido a esta contaminación.

La calidad del combustible influye directamente en su combustión y también afecta el lubricante del motor. Aunque la mayoría de los subproductos de la combustión son expulsados a través del sistema de escape, algunos gases pueden filtrarse entre los anillos del pistón y la pared del cilindro, contaminando el aceite y provocando efectos adversos en el rendimiento del motor. Este escape puede provocar la contaminación del aceite del motor, lo que a su vez puede tener consecuencias negativas. Los efectos específicos se indican en la **Figura 1-48**.

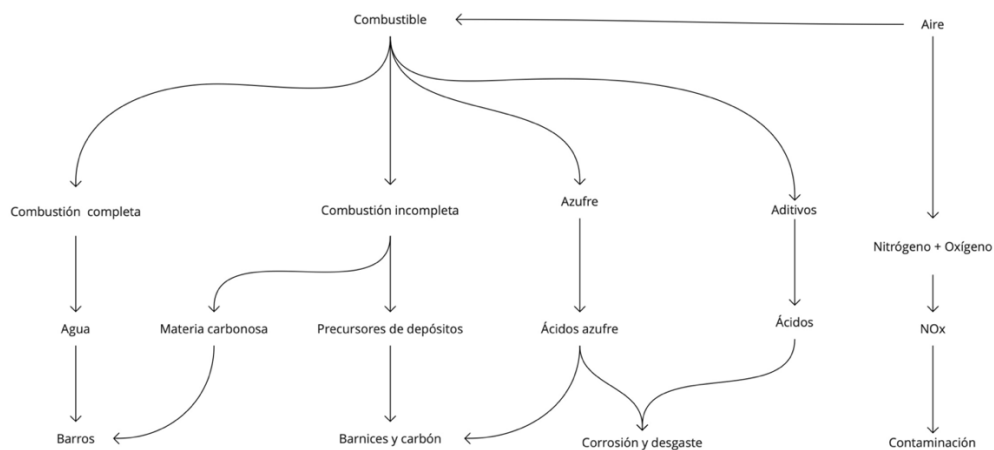


Figura 1-48: Efectos derivados de la combustión

Este fenómeno conocido como "blow-by" (*vide supra*), se refiere al escape de gases de combustión hacia el cárter a través de los espacios entre los anillos del pistón y las paredes del cilindro. Estos gases, que incluyen aire, combustible no quemado, vapor de agua, hidrocarburos parcialmente quemados, CO₂, óxidos de nitrógeno y otros contaminantes, pueden contaminar el aceite lubricante. Aunque una parte de estos gases se expulsa a través del sistema de escape, una fracción significativa puede introducirse en el cárter, donde se mezcla con el aceite. El dióxido de carbono y el agua provienen de la combustión de los combustibles.

El vapor de agua presente en los gases de blow-by puede condensarse en las partes más frías del motor, como la tapa de balancines, formando lodos o "sludge".

Capítulo 1: Introducción

Esta sustancia densa y viscosa puede reducir la eficiencia del motor y causar daños significativos a largo plazo.

El blow-by es un indicador de desgaste en el motor, ya que, en condiciones ideales, los anillos del pistón deberían formar un sello hermético contra las paredes del cilindro. Con el tiempo, el desgaste de los componentes o un mantenimiento inadecuado puede aumentar la cantidad de blow-by, afectando el rendimiento del motor y contaminando el aceite.

Para mitigar los efectos del blow-by, los motores modernos están equipados con sistemas de “ventilación positiva del cárter”, conocido por sus siglas en inglés como PCV (Positive Crankcase Ventilation). Este sistema recircula los gases del cárter al sistema de admisión del motor, donde pueden ser quemados de manera controlada, reduciendo la contaminación interna del motor y asegurando un rendimiento eficiente. Además, evita la formación de depósitos dañinos y ayuda a mantener las proporciones adecuadas de la mezcla de aire y combustible para una combustión óptima.

1.4.8 Ensayos para determinar la degradación del aceite

La degradación del aceite ocurre cuando este pierde su capacidad para desempeñar adecuadamente sus funciones designadas. Este proceso se debe a la modificación de las propiedades físicas y químicas del lubricante, causadas por diversas condiciones a las que se expone dentro del motor, tales como altas temperaturas, fuerzas de cizallamiento, ambientes corrosivos, contaminación y envejecimiento. El grado de degradación refleja el deterioro de las propiedades originales del aceite y depende de factores como el estado y mantenimiento del motor, la calidad del aceite, las condiciones de uso, el tiempo o distancia de operación, y la adición de aceite nuevo al cárter [29].

A medida que el lubricante se degrada, llega un punto crítico en el que ya no puede proteger eficazmente el sistema contra el desgaste excesivo. En esta etapa, el aceite se torna físicamente inapropiado para su función debido a varias causas. Identificar y comprender estas causas es crucial para garantizar la eficiencia y durabilidad del sistema que el aceite protege. Entre las principales causas de la degradación del lubricante (individuales o combinadas), se incluyen:

Capítulo 1: Introducción

- **Contaminación por partículas:** La acumulación de partículas de suciedad en el aceite reduce su eficacia, aumentando el riesgo de abrasión en las piezas del motor.
- **Cambios en la viscosidad:** Si la viscosidad del lubricante se modifica fuera de los límites especificados, ya sea por aumento o disminución, el aceite no podrá proporcionar la lubricación adecuada, lo que incrementa el desgaste de los componentes.
- **Agotamiento de aditivos:** Los aditivos presentes en el lubricante se deterioran con el tiempo y el uso, reduciendo su capacidad para proteger el motor.
- **Presencia de materiales abrasivos y corrosivos:** Estos contaminantes pueden dañar componentes críticos como los cojinetes, y también afectar la superficie interna del cilindro del motor. Si esta superficie se vuelve demasiado lisa debido al desgaste de las rugosidades, se puede comprometer la lubricación. En casos extremos, esto puede derivar en el gripado del pistón y causar un fallo catastrófico.

Estos factores de deterioro están frecuentemente interrelacionados y pueden desencadenar otros efectos adversos de forma directa o a través de procesos catalíticos. Debido a la complejidad de las formulaciones de los lubricantes, es esencial aplicar un enfoque sistemático y estructurado para analizar y abordar los problemas relacionados con la degradación del aceite.

1.4.8.1 Viscosidad

La viscosidad de un aceite lubricante es un parámetro fundamental que mide su resistencia al flujo y juega un papel crucial en la lubricación de sistemas mecánicos. Un aceite con la viscosidad adecuada garantiza un movimiento suave de las piezas, reduce la fricción entre las superficies, minimiza el desgaste y optimiza la eficiencia operativa, permitiendo también soportar cargas pesadas sin comprometer su capacidad lubricante.

La viscosidad influye directamente en el comportamiento del aceite bajo distintas condiciones de presión y temperatura, asegurando una lubricación efectiva. Sin embargo, una viscosidad inadecuada puede tener consecuencias negativas: si es demasiado alta, aumenta las pérdidas mecánicas por fricción, mientras que una viscosidad demasiado baja no logra formar una capa lubricante adecuada, lo que acelera el desgaste de las piezas.

La selección correcta de la viscosidad es esencial para proteger los componentes y mantener su eficiencia. Como la viscosidad del aceite varía con la temperatura,

Capítulo 1: Introducción

disminuyendo al aumentar la temperatura y aumentando al enfriarse, los aceites se clasifican según su viscosidad en condiciones específicas. Este parámetro es fundamental para definir el rango de temperaturas en el que un aceite puede operar eficientemente, ya que influye tanto en su capacidad de distribuirse adecuadamente como en la resistencia de la capa lubricante en componentes como el motor y la caja de cambios.

Un aceite usado puede mantener su viscosidad estable, sin variaciones notables. No obstante, esto no implica necesariamente que el aceite no haya sufrido cambios, ya que puede haber un equilibrio entre la dilución por combustible y el espesamiento por residuos. Por lo tanto, al evaluar la viscosidad de un aceite usado, es esencial considerar otros factores y propiedades para obtener una visión completa de su estado y calidad.

Existen diversos factores que pueden influir en la viscosidad de un aceite:

- **Disminución de la viscosidad:** La disminución de la viscosidad puede ocurrir por diversas razones que afectan negativamente el comportamiento lubricante del aceite. Entre los principales factores que contribuyen a la reducción de la viscosidad se encuentran:
 - Dilución por combustible: La mezcla de combustible con el aceite, debido a fugas o a una mala segmentación del motor, diluye el aceite y reduce su viscosidad.
 - Reposiciones con aceite de menor viscosidad: Añadir aceite de menor viscosidad al sistema reduce la viscosidad total del aceite.
 - Degradación de aditivos: Los aditivos que mejoran la viscosidad pueden degradarse con el uso prolongado, lo que también reduce la viscosidad.
- **Aumento de la viscosidad:** El aumento de la viscosidad, en cambio, suele estar asociado con procesos de degradación del aceite o con la presencia de contaminantes en el sistema. Estos factores no solo incrementan la viscosidad del aceite, sino que pueden afectar negativamente la eficiencia del sistema de lubricación. Entre los factores más comunes que provocan este aumento se encuentran:
 - Reposiciones con aceite de mayor viscosidad: La adición de aceite con una viscosidad superior al del aceite original incrementa la viscosidad total en el sistema.

Capítulo 1: Introducción

- Alta concentración de productos insolubles: La acumulación de contaminantes como polvo o partículas metálicas, ya sea por desgaste interno o por contaminación externa, aumenta la viscosidad.
- Oxidación del aceite: La exposición prolongada a altas temperaturas puede provocar la oxidación del aceite, lo que lleva a la polimerización y un aumento de la viscosidad [46].
- Falta de aceite: Una cantidad insuficiente de aceite puede concentrar los contaminantes, lo que incrementa la viscosidad.
- Bajas temperaturas: Las temperaturas extremadamente bajas pueden hacer que el aceite se vuelva más viscoso, afectando su capacidad de lubricación.
- Mala ventilación del cárter: Una ventilación deficiente puede provocar la acumulación de contaminantes, lo que aumenta la viscosidad del aceite.

La comprensión de estos factores es esencial para evaluar correctamente la viscosidad del aceite y su capacidad para proporcionar una lubricación eficiente en distintas condiciones operativas.

1.4.8.2 Acidez-Basicidad del aceite

El número de neutralización es un indicador clave para evaluar la calidad, contaminación y degradación de los aceites lubricantes. Este parámetro se define como la cantidad de base o ácido, expresada en miligramos de KOH, necesaria para neutralizar el contenido ácido o básico de un gramo de aceite bajo condiciones estandarizadas. Esta medida es fundamental para comprender el equilibrio químico del aceite y su capacidad para resistir fenómenos como la corrosión y la oxidación.

La acidez o alcalinidad de un aceite nuevo puede proporcionar información sobre su grado de refinación y los aditivos presentes en su formulación. En el caso de un aceite usado, los valores de acidez o basicidad reflejan la presencia de contaminantes y, especialmente, el nivel de degradación del lubricante. El monitoreo regular de la acidez es esencial para evaluar los cambios químicos que el aceite experimenta debido a la oxidación. En motores de combustión interna, esta medición también permite detectar la presencia de ácidos derivados de la combustión, que pueden degradar el aceite y afectar su capacidad de protección.

Capítulo 1: Introducción

Existen protocolos estandarizados, como los métodos ASTM D-943 y ASTM D-974, diseñados para medir tanto la acidez como la basicidad del aceite. Estos métodos garantizan resultados precisos y consistentes, permitiendo una evaluación adecuada del estado del lubricante y su capacidad para proteger los sistemas mecánicos.

Diversos factores pueden influir en la alcalinidad residual de un aceite, entre los cuales destacan:

- **Contaminación por productos de combustión:** Los residuos generados durante la combustión pueden alterar el equilibrio químico del aceite, afectando su capacidad de neutralizar ácidos.
- **Contenido de azufre en el combustible:** El azufre, al reaccionar en el sistema, puede formar compuestos ácidos que disminuyen la alcalinidad del aceite.
- **Oxidación del aceite:** Con el tiempo, y bajo ciertas condiciones de operación, el aceite tiende a oxidarse, lo que reduce su alcalinidad y, en consecuencia, su capacidad protectora.

El número de neutralización es un indicador esencial en el análisis de aceites, ya que permite identificar la presencia de contaminantes, evaluar el estado de degradación del lubricante y tomar decisiones informadas sobre su posible reemplazo o tratamiento para mantener la eficiencia y protección del sistema.

1.4.8.3 Punto de inflamación

La determinación del punto de inflamación es una de las pruebas más importantes en el mantenimiento y análisis de aceites lubricantes, ya que proporciona información valiosa sobre la calidad del aceite y posibles contaminaciones. El punto de inflamación se define como la temperatura mínima a la que un aceite genera vapores suficientes para que, al entrar en contacto con una fuente de ignición, se produzca una inflamación momentánea. Esta medida se expresa en grados centígrados (°C).

Existe una relación directa entre el punto de inflamación y la viscosidad del aceite. Generalmente, cuando el punto de inflamación disminuye, la viscosidad del aceite también tiende a hacerlo, y viceversa. Este vínculo es clave para comprender cómo la contaminación, especialmente por hidrocarburos volátiles, puede modificar las propiedades físicas del aceite.

Capítulo 1: Introducción

El análisis del punto de inflamación resulta fundamental para identificar contaminantes en el aceite, como la presencia de combustible en aceites de motor. Una disminución significativa en el punto de inflamación respecto al valor original es un indicativo claro de contaminación por combustible. Se considera inaceptable una reducción mayor a 30 °C en comparación con el valor inicial del aceite, ya que esto sugiere una dilución considerable.

Para evaluar el punto de inflamación y, por lo tanto, la posible contaminación del aceite, se emplean técnicas específicas, siguiendo las normas técnicas ASTM D92 y ASTM D93. Estos métodos permiten identificar la presencia de contaminantes como diésel o gasolina (dependiendo del tipo de motor) en aceites usados, garantizando que el aceite aún conserve sus propiedades adecuadas para proteger y lubricar de manera eficiente los componentes mecánicos.

1.4.8.4 Espectrometría infrarroja por Transformada de Fourier

La espectrometría infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) es una técnica analítica crucial para estudiar la degradación de los aceites lubricantes. Permite detectar y cuantificar diversos compuestos químicos presentes en el aceite, proporcionando información esencial sobre su estado y calidad. A continuación, se describen las principales aplicaciones del FT-IR en la evaluación de la oxidación, nitración y sulfuración de los aceites lubricantes:

- **Detección de productos de oxidación y combustión:** El FT-IR permite identificar compuestos oxigenados, como ácidos carboxílicos, aldehídos y cetonas, que se forman durante la oxidación del aceite. Estos compuestos exhiben bandas características en el espectro infrarrojo, lo que facilita su identificación y cuantificación. Además, esta técnica permite monitorizar el progreso de la oxidación y la eficacia de los antioxidantes presentes en el aceite.
- **Detección de productos de nitración:** La nitración del aceite lubricante puede generar compuestos nitrogenados, como nitrocompuestos y nitratos. El FT-IR detecta estas sustancias a través de sus bandas espectrales específicas, proporcionando una evaluación precisa del nivel de nitración y su impacto en las propiedades del aceite.

- **Detección de productos de sulfuración:** La sulfuración del aceite puede generar compuestos con azufre, como sulfuros y disulfuros. El FT-IR permite identificar y medir estos compuestos, que presentan bandas de absorción características en el espectro infrarrojo. Esto resulta fundamental para evaluar el grado de sulfuración del aceite y cómo influye en su capacidad de lubricación y estabilidad.

La espectrometría infrarroja por transformada de Fourier es altamente precisa y rápida, lo que la convierte en una herramienta indispensable para el análisis de aceites y lubricantes. Su capacidad para detectar diversos contaminantes y subproductos contribuye a mantener la calidad y eficiencia de los sistemas de lubricación, asegurando una mayor durabilidad y rendimiento de los equipos, motores y cajas de cambio en el contexto del presente estudio.

1.4.8.5 Contaminación por materia carbonosa

La contaminación por materia carbonosa en motores diésel es resultado principalmente de una combustión ineficiente del combustible. Factores como fugas en los inyectores, una atomización deficiente del diésel o ajustes inadecuados en el tiempo de inyección pueden agravar este problema. Además, la calidad del diésel y el modo de operación del motor juegan un papel importante en este fenómeno; por ejemplo, un funcionamiento prolongado en ralentí puede generar una combustión menos eficiente, aumentando la acumulación de residuos carbonosos.

Para contrarrestar este efecto, es fundamental que los aceites utilizados en los cárteres de motores diésel cuenten con propiedades detergentes y dispersantes robustas. Estas características permiten prevenir la acumulación de carbón y otros residuos en los componentes internos del motor, evitando la formación de depósitos que puedan aglutinarse en partículas suficientemente grandes como para alterar la viscosidad del aceite.

No obstante, no solo las partículas de carbón son motivo de preocupación, sino también la materia insoluble que puede ingresar al aceite a través de contaminación externa o como consecuencia de la degradación natural del lubricante. Por ello, es crucial seleccionar aceites con un alto rendimiento en términos de propiedades detergentes y dispersantes, así como realizar mantenimientos periódicos que incluyan la verificación y ajuste del sistema de inyección y los inyectores para asegurar una combustión más eficiente y reducir la contaminación del aceite.

1.4.9 Diagnóstico por degradación y contaminación de aceite lubricante

El diagnóstico del estado del motor y la caja de cambios se basa en una evaluación exhaustiva de las propiedades del aceite lubricante, mediante ensayos que permiten detectar tanto su degradación como su contaminación. Los resultados obtenidos son fundamentales para evaluar el desgaste de los componentes y la funcionalidad de los sistemas. En el Programa de Análisis de Aceites del Ejército de Tierra se llevan a cabo tres tipos principales de ensayos:

- Ensayos para determinar la degradación del aceite.
- Ensayos para cuantificar la contaminación en el aceite.
- Ensayos para identificar y cuantificar las partículas de desgaste en el aceite usado.

Estos ensayos permiten detectar cambios en la concentración de elementos clave, lo que facilita la identificación de desgaste normal, contaminación o la eficacia de los aditivos. La información obtenida se clasifica en tres categorías principales:

- 1. Indicadores de desgaste:** Las partículas metálicas presentes en el aceite lubricante son un reflejo del desgaste de las superficies internas del motor y la caja de cambios. El análisis cuantitativo de estas partículas ofrece una visión precisa del estado de los componentes mecánicos. Un incremento en la concentración de estas partículas puede indicar un desgaste anormal, permitiendo la adopción de medidas preventivas antes de que se produzcan fallos importantes. Estos indicadores proporcionan una evaluación detallada del estado del motor y la caja de cambios.
- 2. Señales de contaminación:** Los contaminantes pueden ingresar al sistema de lubricación a través de diversas vías, como sellos deteriorados, fugas o durante el mantenimiento. Estos contaminantes afectan la integridad del aceite, lo que puede comprometer el rendimiento de la maquinaria. La detección y cuantificación precisa de estos contaminantes es esencial para garantizar la operatividad del sistema. Estas señales de contaminación ayudan a evaluar si el sistema de lubricación está protegiendo adecuadamente los componentes críticos del motor.
- 3. Niveles de aditivos:** Los aditivos en los aceites lubricantes son esenciales para mejorar sus propiedades y proteger las superficies metálicas. Con el uso, estos aditivos se desgastan, lo que reduce su capacidad para cumplir su función. La espectrometría es

Capítulo 1: Introducción

una técnica efectiva para monitorizar los niveles de aditivos y asegurar que el aceite mantenga sus propiedades protectoras. Evaluar los niveles de aditivos proporciona información clave sobre la eficacia del lubricante para garantizar un desempeño óptimo del motor.

La **Tabla 1-10** presenta la información obtenida de los análisis espectrométricos, que proporciona una visión detallada del estado de la maquinaria lubricada (motor y caja de cambios). Estos datos permiten una gestión proactiva del mantenimiento, facilitando la detección temprana de problemas y contribuyendo a prolongar la vida útil de los equipos.

Tabla 1-10: Elementos comunes en el análisis de aceite lubricante y sus posibles fuentes [24]

Elemento	Desgaste	Contaminación	Aditivo
Hierro	X	X	
Cobre	X	X	X
Cromo	X		
Estaño	X		
Aluminio	X	X	
Plomo	X		
Silicio		X	X
Sodio		X	X
Boro		X	X
Calcio		X	X
Magnesio		X	X
Zinc	X		X
Fósforo		X	X
Molibdeno			X
Potasio		X	

La espectrometría de aceites es una herramienta clave en la gestión del mantenimiento predictivo, con un papel esencial en el diagnóstico de la condición interna de la maquinaria, motores y cajas de cambio en el contexto del presente estudio. Esta técnica se caracteriza por su alta precisión y su capacidad para anticipar problemas potenciales, lo que es fundamental para optimizar la eficiencia operativa y minimizar los tiempos de inactividad no planificados. El análisis detallado, en combinación con una interpretación experta de los resultados, permite al Ejército de Tierra a mantener un funcionamiento continuo y proteger la integridad de sus vehículos.

Capítulo 1: Introducción

La **Tabla 1-11** muestra los diferentes tipos de contaminantes que pueden encontrarse en los lubricantes, explica el significado de la contaminación, y detalla los métodos analíticos adecuados para su identificación.

Tabla 1-11: *Tipos de contaminantes en aceites lubricantes (JOAP) [15]*

Tipo de contaminante	Significado	Método analítico
Metales de desgaste	Desgaste del sistema	Espectrómetro
Refrigerante	Emulsiona el aceite, perjudica la lubricación, destruye los aditivos dispersantes	Prueba de crepitación; mancha de papel secante; espectro para Na, B
Agua libre	Corrosión, emulsiona el aceite, perjudica la lubricación	Prueba de crepitación; punto de secante; espectro para sodio con equipo marino, inspección visual
Combustible	Disminuye la viscosidad del aceite	Viscosidad; prueba de alcalinidad
Suciedad, arena	Provoca desgaste abrasivo	Espectro para Si, Al; inspección visual
Productos de soplado, hollín	Aumenta la viscosidad, forma lodos	Viscosidad; punto de secante
Compuestos reactivos	Corrosión, aumento de la viscosidad	Viscosidad, prueba de alcalinidad
Óxido	Corrosión interna	Espectro para Fe

1.4.10 Relación causa-efecto en la degradación de aceites lubricantes

La degradación de los aceites lubricantes de motor se debe principalmente a tres factores críticos:

- 1. Tiempo de servicio:** El uso prolongado del aceite puede causar la pérdida de sus propiedades debido a la exposición constante a las condiciones de operación del motor.

Capítulo 1: Introducción

- 2. Temperatura de funcionamiento:** Las altas temperaturas a las que se somete el aceite durante el funcionamiento del motor pueden alterar su composición química, reduciendo su capacidad de lubricación.
- 3. Contaminación interna/externa:** La introducción de contaminantes, tanto partículas derivadas del desgaste del motor como sustancias externas, compromete la pureza y eficacia del aceite.

Los efectos de la degradación del aceite no siempre están directamente relacionados con una causa específica. En otras palabras, no existe una correspondencia única entre una causa particular y un efecto específico en el aceite; la degradación suele manifestarse como una alteración significativa de las propiedades originales del lubricante.

En la **Tabla 1-12** se enumeran las posibles causas de degradación del aceite y los efectos observados en las pruebas de análisis que determinan su estado final. Sin embargo, es importante destacar que esta tabla solo sirve como una guía general. Para un análisis causa-efecto más preciso, deben considerarse varios factores adicionales, como:

- Los valores originales del aceite, que actúan como referencia para cualquier desviación en sus propiedades.
- La historia de uso del mecanismo lubricado, que puede influir en el estado del aceite con el tiempo.
- Las adiciones de aceite nuevo al lubricante en uso, que pueden alterar sus características.
- El ambiente de trabajo del mecanismo, que incluye la exposición a contaminantes y las condiciones operativas.
- El gradiente de variaciones en las características del aceite, que muestra cómo sus propiedades han cambiado a lo largo del tiempo.

Estos factores son esenciales para comprender completamente el estado de un aceite usado y determinar las acciones correctivas necesarias, ya sea mediante mantenimiento o sustitución del aceite lubricante en el motor.

Capítulo 1: Introducción

Tabla 1-12: Relación causa-efecto en la degradación de aceites lubricantes: Propiedades fisicoquímicas del aceite lubricante

CAUSAS	EFFECTOS
- Exceso de productos de combustión; - Deterioro del aceite base; - Exceso de temperatura de funcionamiento; - Exceso de tiempo de servicio; - Agotamiento de aditivos antioxidantes; - Exceso de compuestos reactivos; - TBN bajo; - Agotamiento de aditivos detergentes y dispersantes; - Reposiciones con aceite de mayor viscosidad; - Falta de aceite en el motor; - Funcionamiento a temperaturas muy bajas.	Aumento de la viscosidad
- Contaminación de combustible; - Reposiciones con aceite de menor viscosidad; - Degradación de los aditivos de viscosidad.	Disminución de la viscosidad
- Agotamiento de aditivos mejoradores del Índice de Viscosidad.	Disminución de viscosidad a 100 °C
- Contaminación de combustible; - Tipo de servicio y puesta punto del motor; - Funcionamiento prolongado starter en motores a gasolina.	Disminución del punto de inflamación
- Exceso de productos de combustión; - Agotamiento o insuficiencia de aditivos detergentes o dispersantes; - Exceso de compuestos reactivos; - Contaminación por combustible.	Aumento del TAN / Disminución del TBN

- Agotamiento de aditivos antiespumantes; - Exceso de temperatura de funcionamiento; - Exceso de tiempo de servicio; - Exceso de productos de combustión; - Presencia de agua contaminante.	Carencia de propiedades antiespumantes
- Contaminación desde el circuito de refrigeración; - Condensación del vapor de agua por funcionamiento del motor a bajas temperaturas.	Aumento del contenido en agua

1.4.11 Problemas en el motor y caja de cambios derivados de la degradación del aceite lubricante

La **Tabla 1-13** ofrece una visión de los problemas potenciales que pueden surgir en el funcionamiento de un motor debido a la degradación de las propiedades del aceite lubricante. Sin embargo, es crucial entender que esta tabla sirve únicamente como una guía preliminar, ya que los problemas reales pueden variar dependiendo de las condiciones operativas.

Tabla 1-13: Determinación del tipo de problema en motor en función de los resultados: Propiedades fisicoquímicas del aceite lubricante

DEGRADACIONES	PROBLEMAS
Aumento de viscosidades	Reducción en la capacidad de bombeo del aceite, menor flujo de aceite lubricante, disminución del poder de lubricación, escaso intercambio de calor (subida de temperatura), falta de transporte de contaminantes (subida de temperatura), mayores depósitos (más fricción), problemas de arranque en frío.
Disminución de viscosidades.	Exceso de juego segmentos de pistones/paredes de cilindros, falta de compresión en cilindros, aumento del consumo motor, falta de lubricación a temperatura de régimen del motor.
Disminución de la viscosidad a 100 °C.	Falta de lubricación a temperatura de régimen del motor.

Disminución del Punto de Inflamación.	Exceso de juego segmentos de pistones/paredes de cilindros, falta de compresión en cilindros, aumento del consumo motor, falta de lubricación a temperatura de régimen del motor.
Aumento TAN/Disminución del TBN.	Combustión deficiente en cilindros motor, exceso de juego de pistones/paredes de cilindros, presencia de óxidos y productos de corrosión.
Carencia de propiedades antiespumantes.	Exceso de temperatura del circuito del aceite, aumento de oxidaciones, disminución poder de lubricación, falta poder transporte de contaminantes, contaminación ambiental de agua o desde el circuito de refrigeración.
Aumento del contenido en agua.	Corrosiones en el motor, falta de lubricación por emulsificación del aceite (aumento de temperatura), grietas en el bloque (circuito de refrigeración).

La siguiente **Tabla 1-14** ofrece una visión de los posibles problemas que pueden aparecer en el funcionamiento de una caja de cambios debido a la degradación de las propiedades del aceite lubricante. Es importante tener en cuenta que esta tabla debe considerarse solo como una guía preliminar, y que la gravedad de los problemas puede depender de factores específicos como el tipo de caja de cambios y las condiciones operativas.

Tabla 1-14: Determinación del tipo de problema en la caja de cambios en función de los resultados: Propiedades fisicoquímicas del aceite lubricante

DEGRADACIONES	PROBLEMAS
Aumento de viscosidad	Dificultad para la correcta circulación del aceite, incremento de la fricción entre los engranajes, sobrecalentamiento del sistema, desgaste prematuro de componentes
Disminución de viscosidad	Pérdida de la capacidad de separación entre los engranajes, aumento de la fricción, riesgo de daño a componentes sensibles, mayor desgaste en superficies de contacto.

Capítulo 1: Introducción

Disminución del Punto de Inflamación	Incremento del riesgo de formación de depósitos y lodos, mayor tendencia a la oxidación, disminución de la eficiencia de lubricación en condiciones extremas de temperatura.
Aumento del TAN/Disminución del TBN	Formación de ácidos que pueden causar corrosión en los componentes internos, pérdida de propiedades protectoras del aceite, deterioro de los engranajes.
Carencia de propiedades antiespumantes	Aparición de espuma en el aceite que reduce la capacidad de lubricación, mayor riesgo de cavitación en componentes de alta presión, sobrecalentamiento del sistema.
Aumento del contenido en agua	Formación de emulsiones que reducen la capacidad de lubricación, aumento del riesgo de corrosión en los engranajes y cojinetes, posibilidad de fallos mecánicos graves.

Capítulo 2: Materiales y métodos

2.1 Introducción

El Capítulo 1 del presente estudio estableció los fundamentos teóricos y conceptuales necesarios para entender la investigación sobre lubricantes y su relación con la ciencia de la tribología. En esa primera parte, se exploraron en profundidad las funciones y propiedades de los aceites lubricantes, así como los diferentes tipos de aditivos que influyen en su rendimiento. Se abordó la importancia de la compatibilidad y solubilidad de dichos aditivos, y se diferenció entre los aceites utilizados en motores y los empleados en cajas de cambios de los carros de combate Leopard del Ejército de Tierra. Además, se presentó una revisión detallada de los principios tribológicos, como la fricción, el desgaste y los modos de lubricación, proporcionando un contexto esencial para el análisis posterior.

Otro aspecto clave tratado en el Capítulo 1 fue el mantenimiento predictivo y el diagnóstico de aceites. Se revisaron las principales herramientas y técnicas empleadas para prevenir y diagnosticar problemas derivados de la degradación y contaminación de los lubricantes. Estos conceptos son fundamentales para comprender la relevancia del análisis del estado de los aceites y su impacto en la eficiencia y durabilidad de los sistemas mecánicos. Así, se sentaron las bases teóricas necesarias para abordar los aspectos metodológicos que se describirán en el siguiente capítulo.

Con esta base teórica en mente, el Capítulo 2 titulado "Materiales y Métodos", introduce los aspectos experimentales y metodológicos que sostienen esta investigación. Esta sección es fundamental para garantizar el rigor científico del estudio llevado a cabo, al detallar los procedimientos y herramientas utilizados en el análisis de los aceites lubricantes extraídos de motores y cajas de cambios de vehículos militares estudiados. En este capítulo, se presentan las técnicas experimentales y analíticas que constituyen la base de la investigación, esenciales para garantizar la reproducibilidad y fiabilidad de los resultados obtenidos.

En primer lugar, se detallan los materiales utilizados en el estudio, que incluyen dos tipos de aceites lubricantes: un aceite mineral de motor y un aceite sintético de caja de

Capítulo 2: Materiales y métodos

cambios. Estos aceites fueron extraídos de diferentes vehículos pertenecientes a diversas unidades del Ejército de Tierra, asegurando una muestra representativa para el análisis.

El proceso de recolección de muestras, su preparación y las técnicas analíticas empleadas son descritos con precisión, haciendo especial énfasis en la evaluación de las propiedades fisicoquímicas de los aceites, tales como la viscosidad, el punto de inflamación y el número de acidez total. Estos parámetros son esenciales para determinar el estado de los aceites y su capacidad para seguir cumpliendo sus funciones de lubricación.

Además, un elemento innovador de este estudio es la integración de la inteligencia artificial (IA) en el proceso de análisis. La implementación de modelos de redes neuronales convolucionales ha permitido mejorar la precisión del diagnóstico y predecir el estado de los aceites de forma más efectiva. Este enfoque multidisciplinario refuerza el valor del análisis y abre nuevas posibilidades para el desarrollo de estrategias avanzadas de mantenimiento preventivo.

2.1.1 Propósito y alcance: Descripción metodológica y aplicación de Inteligencia Artificial

El objetivo del Capítulo 2 es proporcionar una comprensión detallada de la metodología empleada en la evaluación de los aceites lubricantes. Los ensayos fisicoquímicos realizados permiten detectar y prever fallos potenciales en los componentes mecánicos, mejorando así la eficiencia operativa de los vehículos a través de un mantenimiento predictivo.

Además de describir los equipos y procedimientos experimentales, este capítulo destaca la aplicación de modelos de inteligencia artificial en el análisis de los datos obtenidos. Este enfoque no solo mejora la precisión de los diagnósticos, sino que también representa una innovación significativa en la gestión y monitoreo del estado de los lubricantes. Las redes neuronales convolucionales empleadas permiten analizar grandes cantidades de datos y generar predicciones precisas sobre la condición del aceite, contribuyendo al desarrollo de estrategias más eficientes de mantenimiento basado en datos.

Por tanto, el Capítulo 2 detalla el proceso de análisis de los aceites lubricantes utilizados en motores y cajas de cambios de los vehículos seleccionados, describiendo

minuciosamente los métodos empleados y la implementación de IA para optimizar los resultados. La combinación de estas técnicas ofrece una base robusta para la interpretación de los datos obtenidos y para la formulación de estrategias avanzadas de mantenimiento predictivo basadas en datos concretos, las imágenes.

2.2 Descripción de materiales

En este apartado se detallan los equipos y materiales utilizados para la realización de los ensayos fisicoquímicos a los aceites lubricantes analizados. La elección de los equipos fue realizada en función de su capacidad para proporcionar mediciones precisas y reproducibles, fundamentales para el análisis de la condición de los aceites en uso. Cada equipo fue calibrado y mantenido en condiciones óptimas para asegurar la validez de los resultados obtenidos. Los equipos utilizados permiten evaluar parámetros clave como la viscosidad, el punto de inflamación, la acidez y la presencia de contaminantes, proporcionando una visión integral sobre el estado de los aceites lubricantes.

2.2.1 Tipos de aceites usados analizados

En este estudio se analizaron dos tipos principales de aceites lubricantes, utilizados en motores y cajas de cambios de vehículos militares. Estos aceites fueron seleccionados debido a su importancia en las aplicaciones específicas de los carros de combate y su uso generalizado en los sistemas mecánicos de dichos vehículos. A continuación, se describen los aceites seleccionados:

- Aceite lubricante mineral grado 15W40 con el código OTAN O-1236 (Organización del Tratado del Atlántico Norte). Este lubricante es utilizado como aceite lubricante de motor. A lo largo de esta memoria, se utilizará el código OTAN. Este tipo de lubricante, comúnmente utilizado en motores de combustión interna, fue elegido por su capacidad para operar en una amplia gama de temperaturas. El análisis de este aceite permitió evaluar su comportamiento bajo condiciones de uso prolongado, así como su resistencia a la oxidación y la acumulación de residuos.
- Aceite lubricante sintético grado 5W30 con el código OTAN O-1178 (código que se empleará en adelante). Este lubricante es utilizado como aceite lubricante de la

Capítulo 2: Materiales y métodos

caja de cambios. Este lubricante sintético fue seleccionado por su empleo en sistemas de transmisión, donde se requiere una alta estabilidad térmica y resistencia a la degradación. Su análisis estuvo orientado a evaluar su comportamiento bajo condiciones de alta carga y temperatura, así como su capacidad para mantener la lubricación en sistemas altamente exigentes.

Ambos aceites fueron sometidos a pruebas exhaustivas utilizando los equipos que se describirán más adelante, con el objetivo de obtener una evaluación precisa de su estado y determinar su capacidad para continuar operando en los sistemas mecánicos de los vehículos estudiados. Las propiedades fisicoquímicas generales de ambos tipos de lubricantes se presentan en la **Tabla 2-1**.

Tabla 2-1: *Propiedades generales de los aceites O-1236 y O-1178*

Propiedad	Ensayo normalizado	Límites nominales de los aceites utilizados	
		O-1236	O-1178
Aspecto	Visual	Homogéneo sin evidencia de separación, libres de agua e impurezas extrañas	Homogéneo sin evidencia de separación, libres de agua e impurezas extrañas
Punto de inflamación, mínimo (°C)	ASTM D92	215	200
Punto de congelación, máximo (°C)	ASTM D97	-25	-48
Viscosidad cinemática a 40°C (mm ² /s)	ASTM D445	Informar	Informar
Viscosidad cinemática a 100°C (mm ² /s)	ASTM D445	12,5-16,3	9,3-12,5
Número de acidez total (TAN), máximo (mg KOH/g)	ASTM D 664	9	Informar
Número de basicidad total (TBN), mínimo (mg KOH/g)	ASTM D2896	4	Informar

2.2.1.1 Aceite lubricante mineral grado 15W40 con código OTAN O-1236

El aceite lubricante mineral grado 15W40 con el código OTAN O-1236 es un tipo de aceite motor diseñado para ofrecer un rendimiento óptimo en un amplio rango de temperaturas y condiciones operativas. Dicho aceite es utilizado para la lubricación de motores de encendido por compresión (MEC) y como fluido hidráulico para equipos de servicio táctico y de combate. Las especificaciones exactas y los estándares requeridos por la OTAN para sus aplicaciones militares y posiblemente civiles del aceite lubricante multigrado con código OTAN O-1236 vienen definidos en la especificación militar americana: MIL-PRF-2104N [47]“Lubricating oil, internal combustion engine, combat/tactical service” [47]. Sin embargo, a continuación, se describen propiedades y comportamientos generales de un aceite de este tipo:

- **Viscosidad:** Se trata de un aceite multigrado 15W40, lo que significa que tiene un rendimiento adecuado tanto en bajas como en altas temperaturas. Idóneo para el clima español. El número "15W" refiere a la viscosidad del aceite a bajas temperaturas (W por Winter), mostrando que fluye bien en el frío. El "40" indica la viscosidad del aceite a 100°C (**Tabla 2-1**), sugiriendo que mantiene una buena película lubricante a altas temperaturas como ya se explicó en la primera parte del presente trabajo.
- **Base mineral:** Al ser un aceite mineral, procede directamente de la refinación del petróleo. Esto le confiere una buena estabilidad, lubricación y protección bajo una variedad de condiciones operativas, aunque con limitaciones en comparación con los sintéticos en términos de rendimiento a muy altas o muy bajas temperaturas y en la duración del servicio.
- **Aditivos:** Los aceites 15W40 están formulados con diversos aditivos para mejorar sus propiedades, incluyendo antioxidantes, detergente-dispersantes, mejoradores del índice de viscosidad, y agentes antidesgaste. Esto les permite proteger mejor el motor contra la corrosión, el desgaste, la formación de depósitos y la oxidación.
- **Compatibilidad:** Estos aceites están diseñados para ser compatibles con una amplia gama de vehículos y maquinaria, incluidos aquellos que operan en condiciones severas, lo que los hace adecuados para una variedad de aplicaciones militares y civiles.

- **Protección en arranque en frío:** El grado "15W" asegura que el aceite fluye rápidamente durante el arranque en frío, reduciendo el desgaste al iniciar el motor a bajas temperaturas.
- **Estabilidad térmica:** A altas temperaturas, mantiene una viscosidad que protege las partes móviles del motor, reduciendo el desgaste y extendiendo la vida útil del motor.
- **Limpieza del motor:** Los aditivos detergentes y dispersantes mantienen limpias las superficies internas del motor, previniendo la acumulación de depósitos y lodos que pueden afectar el rendimiento y la eficiencia.
- **Reducción de la oxidación:** La formulación antioxidante ayuda a reducir la oxidación y el espesamiento del aceite a altas temperaturas, lo que contribuye a una mejor protección del motor a largo plazo.
- **Control del desgaste:** Los aditivos antidesgaste forman una capa protectora sobre las piezas del motor, reduciendo el contacto metal-metal, especialmente en condiciones de alta carga y temperatura.

Es importante destacar que las capacidades y aplicaciones del aceite 15W40, codificado con el código OTAN O-1236, están sujetas a variaciones dependiendo de las especificaciones del fabricante y las necesidades de uso. La especificación de referencia de la OTAN, la norma americana MIL-PRF-2104N, establece unos requisitos estándares que debe cumplir este aceite. No obstante, como ocurre con cualquier producto especializado, para obtener información detallada sobre el aceite en cuestión es imprescindible revisar su ficha técnica específica. Esto garantiza un entendimiento profundo de su rendimiento, aplicabilidad y las directrices sugeridas por el fabricante.

2.2.1.2 Aceite lubricante sintético grado 5W30 con el código OTAN O-1178

El aceite lubricante sintético grado 5W30 con el código OTAN O-1178 es un tipo de lubricante diseñado para proporcionar una protección superior de motores de encendido provocado (MEP), de encendido por compresión (MEC) o la lubricación de cajas de cambio y engranajes no hipoides que no requieran aceite con características de extrema presión. Las especificaciones exactas y los estándares requeridos por la OTAN para sus aplicaciones militares y posiblemente civiles del aceite lubricante multigrado 5W30 con código OTAN O-1178 vienen definidos en la especificación militar alemana:

Capítulo 2: Materiales y métodos

TL-9150-0080 Ausg. 4 “Schmieröl, Verbrennungsmotor NATO-Kode: O-1178” [48]. Los aceites sintéticos, como el mencionado, ofrecen ventajas significativas sobre los aceites minerales en términos de estabilidad térmica, viscosidad y protección. A continuación, se detallan las propiedades y comportamientos de este aceite:

- **Viscosidad:** El 5W30 es un aceite multigrado que se adapta bien a las variaciones de temperatura, lo que lo hace ideal para el clima español. El "5W" indica que el aceite mantiene una baja viscosidad a temperaturas frías, proporcionando un arranque fácil y una circulación rápida del lubricante en el motor durante los meses más fríos. Esto asegura una adecuada protección del motor desde el momento del encendido. Por otro lado, el "30" se refiere a la viscosidad del aceite a 100°C, lo que significa que mantiene una película lubricante estable y efectiva cuando el motor está operando a altas temperaturas, evitando que el aceite se vuelva demasiado delgado y pierda sus propiedades protectoras bajo condiciones de funcionamiento intenso (ver **Tabla 2-1**).
- **Base sintética:** A diferencia de los aceites minerales, los sintéticos se fabrican a través de un proceso químico que altera las moléculas del petróleo para crear un producto con propiedades más uniformes. Esto resulta en una mejor estabilidad térmica, resistencia a la oxidación y un rendimiento superior a temperaturas extremas.
- **Aditivos:** Al igual que los aceites minerales, contiene aditivos diseñados para mejorar la protección del motor o de la caja de cambios, incluyendo antioxidantes, detergentes, dispersantes, y agentes antidesgaste. Estos aditivos son optimizados para sacar provecho de la base sintética, ofreciendo una protección avanzada contra la corrosión, la formación de lodos, y el desgaste.
- **Compatibilidad:** Estos aceites están diseñados para cumplir o superar las especificaciones de una amplia gama de fabricantes de vehículos y motores, ofreciendo un rendimiento excepcional tanto en aplicaciones de baja como de alta temperatura, y son particularmente adecuados para vehículos modernos con intervalos de cambio de aceite extendidos.
- **Arranque en frío:** La baja viscosidad a bajas temperaturas facilita el flujo rápido del aceite a todas las partes críticas del motor o de la caja de cambios, ofreciendo una protección inmediata contra el desgaste durante el arranque en condiciones frías.

- **Protección a alta temperatura:** Mantiene su viscosidad y propiedades lubricantes incluso bajo altas temperaturas operativas, asegurando una protección constante de las piezas del motor durante condiciones de conducción intensas.
- **Eficiencia del combustible:** La reducción en la fricción y la mejora en la fluidez del aceite sintético 5W30 pueden contribuir a una mejor economía de combustible comparado con aceites de mayor viscosidad o base mineral.
- **Limpieza del motor:** Los aditivos detergentes y dispersantes mantienen el motor limpio al solubilizar los residuos y evitar la formación de depósitos y lodos, lo que es crucial para mantener el rendimiento del motor a largo plazo.
- **Duración extendida:** Los aceites sintéticos como el 5W30 con el código OTAN O-1178 tienden a degradarse más lentamente que los aceites minerales, lo que permite intervalos más largos entre cambios de aceite, reduciendo así los residuos y los costes de mantenimiento.

La especificación guía OTAN de este aceite, la norma alemana TL-9150-0080, establece unos requisitos comunes que debe cumplir dicho aceite. Al igual que con cualquier producto específico, es necesario consultar la ficha técnica del producto y las recomendaciones del fabricante para obtener detalles precisos sobre el rendimiento y la aplicabilidad del aceite lubricante sintético 5W30 (O-1178). Estas especificaciones proporcionarán información detallada sobre las pruebas de rendimiento, las aprobaciones de los fabricantes de equipos originales (OEM) y las instrucciones de uso adecuadas.

2.2.2 Calibración y mantenimiento de equipos de medición de calidad de aceites lubricantes.

La calibración y el mantenimiento de los equipos utilizados para determinar las propiedades fisicoquímicas de los aceites se realiza anualmente por las empresas especializadas de los mismos. La calibración y mantenimiento regulares de los equipos utilizados tanto para la realización de este estudio, como para llevar a cabo un programa de análisis de aceites es fundamental por varias razones esenciales:

- **Precisión y exactitud:** La calibración asegura que los equipos proporcionen mediciones precisas y exactas, cruciales para evaluar la calidad del aceite y su idoneidad para el uso continuado. Sin calibración, los resultados podrían llevar a interpretaciones erróneas sobre el estado y el rendimiento del aceite.

- **Confiabilidad de los resultados:** El mantenimiento preventivo reduce el riesgo de fallos y errores en los equipos, asegurando que los resultados del análisis sean confiables y consistentes a lo largo del tiempo.
- **Cumplimiento de normativas:** Los análisis de aceites realizados deben cumplir con normativas y estándares específicos, los cuales requieren que los equipos operen dentro de ciertos márgenes de error. La calibración regular es necesaria para cumplir con estas especificaciones y resultados no válidos. De hecho, todos los ensayos realizados siguen normas en las que se indica la reproducibilidad y repetitividad de los ensayos.
- **Optimización del rendimiento del equipo:** El mantenimiento regular ayuda a identificar y corregir problemas operativos antes de que se conviertan en fallos mayores, extendiendo la vida útil del equipo y optimizando su rendimiento. Esto no solo asegura la calidad del análisis, sino que también resulta en ahorros significativos al evitar reemplazos costosos y tiempos de inactividad no planificados.
- **Seguridad:** El mantenimiento regular también garantiza que los equipos operen de manera segura, reduciendo el riesgo de accidentes en el laboratorio.

El Laboratorio Central del Ejército, acreditado en la Red de Laboratorios del Ministerio de Defensa, asegura la confiabilidad de sus resultados para la toma de decisiones informadas mediante el mantenimiento de equipos por empresas especializadas.

2.3 Toma de muestra

La obtención de muestras de aceite usado, tanto de motores como de cajas de cambios, representa un paso fundamental en la evaluación del desgaste y la eficiencia de estos sistemas mecánicos. Este apartado se enfoca en describir el procedimiento empleado para recolectar dichas muestras, asegurando que reflejen de manera fidedigna las condiciones operativas y el estado de los componentes internos. Este proceso no solo es crucial para el diagnóstico de posibles fallos y la prevención de averías, sino también para el desarrollo de estrategias de mantenimiento más efectivas.

Capítulo 2: Materiales y métodos

El muestreo adecuado constituye una fase fundamental para llevar con éxito el estudio de análisis de aceites. A la hora de obtener una muestra de la extracción de aceite del motor o de la caja de cambios para su análisis, hay que ser consenciente de la importancia de obtener una muestra representativa del sistema en estudio, dado que cualquier decisión posterior basada en una muestra no representativa podría resultar en conclusiones erróneas, afectando negativamente la eficacia del mantenimiento y la operatividad de la maquinaria. Por ello, destacan dos metas fundamentales al momento de realizar el muestreo de aceite de los vehículos, cuya optimización es vital para garantizar la fiabilidad y precisión de los análisis subsiguientes.

La primera de ellas busca obtener la mayor cantidad posible de información durante el proceso de muestreo. Es crucial recolectar las muestras de manera que ofrezcan una visión completa sobre el estado actual tanto del lubricante como de las partes mecánicas de la máquina. A partir de la muestra de aceite se va a obtener información sobre la pureza del lubricante, su nivel de contaminantes, el estado de sus aditivos y la detección de partículas de desgaste, que podrían señalar la aparición de problemas mecánicos. Obtener una muestra que represente fielmente estos aspectos es vital para la toma de decisiones informadas relacionadas con el mantenimiento preventivo y correctivo de la maquinaria tal y como ya se trató anteriormente.

El segundo objetivo se centra en reducir las discrepancias y variaciones en los datos obtenidos durante un proceso de muestreo. Para lograrlo, es crucial extraer la muestra de tal manera que su composición sea uniforme, coherente y refleje fielmente el estado actual del sistema. Es fundamental preservar la integridad de la muestra evitando cualquier tipo de contaminación durante el proceso de extracción. De no ser así, se dificultaría la distinción entre las condiciones internas originales del sistema y los contaminantes externos añadidos durante la recolección de la muestra. La fiabilidad de los resultados analíticos depende íntegramente de la consistencia y la pureza de la muestra recolectada.

Obtener una muestra de lubricante que represente con precisión el estado real de la maquinaria es esencial para garantizar la eficacia del análisis de lubricantes. Este proceso asegura un diagnóstico fiable y la correcta planificación del mantenimiento, contribuyendo al funcionamiento óptimo y a la vida útil del equipo. La muestra debe reflejar no solo el estado actual del lubricante, sino también las diversas condiciones que pueden influir tanto en el lubricante como en los componentes mecánicos.

Capítulo 2: Materiales y métodos

Para que la muestra sea representativa, es fundamental evitar la contaminación con sustancias externas o restos de muestras anteriores. Esto asegura que la información recabada sobre la limpieza, el nivel de contaminación y el rendimiento de los aditivos del lubricante sea precisa y fiable. La estandarización del proceso de muestreo es clave para mantener la consistencia y calidad de los datos, independientemente de quién realice la extracción o de las condiciones del entorno, **Figura 2-1**.

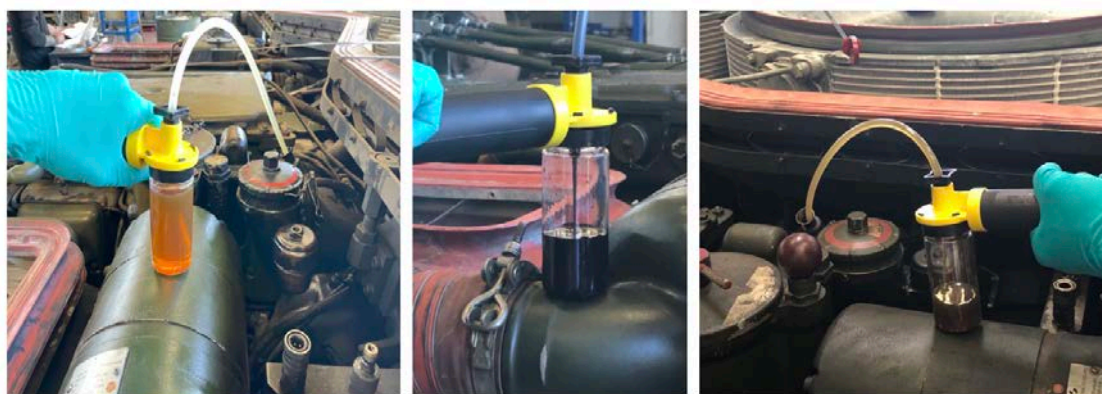


Figura 2-1: Toma de muestra de aceite

Dado que la extracción de las muestras de aceite se ha llevado a cabo por diverso personal y en diversas Unidades distribuidas por toda España, fue necesario la creación de un procedimiento detallado de extracción de muestras para mantener la uniformidad en la calidad de las muestras. Este procedimiento, cubre todos los aspectos del proceso de muestreo, desde la selección del sitio para la extracción hasta el manejo y la preparación de las muestras para su análisis. La estandarización asegura que, sin importar la variabilidad entre los técnicos que realizan la extracción, los resultados obtenidos sean confiables y comparables.

A todas las Unidades que van a extraer muestras de aceite motor y caja de cambios se les asigna un kit de extracción de muestras por cada muestra que se vaya a extraer tal y como se indica en la **Figura 2-2**.



Figura 2-2: Kit de extracción de muestras

Capítulo 2: Materiales y métodos

El equipo necesario, mostrado en la **Figura 2-2**, para la toma de muestras se detalla a continuación con el objetivo de facilitar un proceso de muestreo eficiente y preciso:

- **Bote porta muestras:** El primer elemento esencial en el kit de muestreo son los botes porta muestras, que se muestran en la **Figura 2-3**. Están hechos de polietileno de baja densidad y tienen una capacidad de 250 mL. Su sistema de cierre de rosca asegura la hermeticidad y la conservación de la muestra. Para hacer un análisis completo con todos los ensayos que se explican a continuación, se necesita un mínimo de 250 mL de aceite lubricante. Al tomar la muestra, es imprescindible usar solo los recipientes que proporciona el LCE y comprobar que estén limpios y sin agua, arena, polvo, combustible u otro contaminante que pueda alterar los resultados del análisis. Los recipientes deben llenarse hasta la gola de la botella y cerrarse herméticamente para prevenir derrames, asegurándose de que los botes con las muestras queden bien cerrados para evitar fugas.



Figura 2-3: Bote porta muestras

La identificación de cada bote es crucial para la trazabilidad y el análisis posterior. En esta etiqueta de identificación (**Figura 2-3**) se debe incluir:

- Código OTAN: Referencia al tipo de aceite: O-1236 o O-1178
 - Número de muestra: Identificación única para cada muestra recogida.
 - Fecha de toma de muestra: Registro del momento exacto de la toma.
- **Jeringa extractora:** La jeringa extractora, **Figura 2-4**, es utilizada para la extracción eficaz del aceite o del fluido hidráulico, minimizando el riesgo de contaminación y asegurando la representatividad de la muestra.

Adaptador para introducirlo en el macarrón

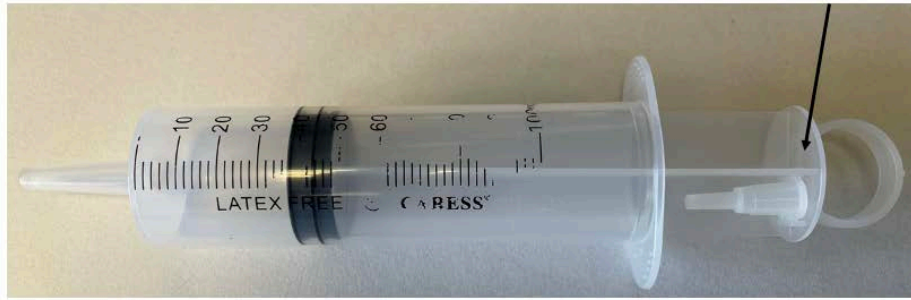


Figura 2-4: Jeringa extractora con adaptador

La jeringa fue posteriormente reemplazada por una bomba de extracción de aceite, **Figura 2-5**, un dispositivo que utiliza el principio de vacío para facilitar la extracción del aceite del motor y la caja de cambios. Esta bomba funciona creando un vacío en su interior, lo que permite succionar el aceite de manera eficiente desde el interior del motor o del compartimiento de la caja de cambios, eliminando la necesidad de procedimientos manuales y mejorando la rapidez y precisión del proceso de vaciado.



Figura 2-5: Bomba de extracción de muestra de aceite

- **Tubo de extracción:** El tubo de extracción, comúnmente conocido como “macarrón”, es indispensable para acceder a los aceites y que están en espacios confinados o de difícil alcance dentro de la maquinaria. El tubo de extracción se introduce en el cárter para la toma de muestra. Véase **Figura 2-1**.
- **Bolsas de embarque:** Para el transporte seguro de las muestras, se utilizan bolsas de embarque de material plástico con cierre de presión. Cada bote porta muestra, es cuidadosamente introducido en su respectiva bolsa, protegiéndolo durante el proceso de envío al laboratorio para su análisis. Véase **Figura 2-2**.

Capítulo 2: Materiales y métodos

- **Caja de extracción de muestras:** En la caja de extracción de muestras se incluye una Ficha de Identificación de Muestra (FIM) para cumplimentar con datos que se utilizarán a la hora de estudiar el estado del aceite:
 - Tipo de aceite.
 - Kilómetros realizados por el vehículo desde el último cambio de aceite.
 - Fecha de toma de muestra.
 - Modo de extracción de muestra.
 - Mecanismo lubricado.
 - Número de serie del motor o caja de cambios.
 - Tipo de vehículo.

La correcta toma de muestras de aceite lubricante es un proceso fundamental dentro de las estrategias de mantenimiento predictivo y para el análisis y evaluación del estado de los equipos. Para garantizar que las muestras reflejen fielmente el estado del aceite en el sistema, es esencial seguir una metodología rigurosa que asegure la homogeneidad del lubricante y minimice la posibilidad de contaminación por agentes externos. Cualquier contaminación podría comprometer los resultados del análisis y conducir a interpretaciones erróneas sobre la condición del equipo.

Antes de la toma de muestra de lubricante, se deben considerar varios factores clave:

- **Homogeneización del lubricante:** Es fundamental que el aceite lubricante haya circulado completamente por el sistema antes de la extracción de la muestra. Esto permite que las partículas de desgaste y otros contaminantes se distribuyan de manera uniforme, lo que proporciona una representación precisa de las condiciones internas del sistema y del desgaste en los componentes. Este proceso de circulación asegura que la muestra obtenida refleje el estado real del lubricante.
- **Condiciones de muestreo: frío y calor:** Las muestras de aceite lubricante pueden tomarse tanto en condiciones frías como calientes, dependiendo de la actividad reciente del sistema.
 - Muestras en frío: Es posible tomar una muestra sin necesidad de arrancar el equipo, siempre y cuando este haya estado operando regularmente durante los 10 días anteriores a la recolección. Esto garantiza que el aceite aún contenga partículas y elementos que reflejan el estado del sistema.
 - Muestras en caliente: En condiciones climáticas frías, o si el sistema ha estado inactivo durante los últimos 10 días, es recomendable llevar el equipo a su

temperatura normal de operación antes de proceder con la toma de muestra. Esto asegura que el aceite esté lo suficientemente fluido y en condiciones óptimas para reflejar su estado real.

Por todo ello, un muestreo adecuado del aceite lubricante, basado en estas recomendaciones, es esencial para la evaluación precisa del estado del equipo y la implementación de un mantenimiento predictivo efectivo.

2.3.1 Procedimiento de la toma y gestión de las muestras de aceite

La gestión adecuada de las muestras de aceite es esencial para asegurar la validez y precisión de los análisis realizados en el laboratorio. Este procedimiento engloba desde la recepción inicial de las muestras hasta la organización sistemática de su análisis, asegurando que cada muestra esté correctamente identificada y documentada. A través de un proceso de asignación de números de orden de trabajo y verificación de documentación, se asegura que cada muestra se garantiza la trazabilidad y el examen exhaustivo de cada muestra. Este sistema no solo facilita la identificación y el seguimiento de las muestras, sino que también establece una base sólida para la interpretación de los resultados y la toma de decisiones sobre el estado de los lubricantes.

La extracción de muestras se realizará haciendo uso del kit de muestreo (**Figura 2-2**) provisto por el Laboratorio Central del Ejército (LCE), siguiendo las directrices especificadas en su manual de instrucciones.

2.3.2 Volumen de muestra y precauciones

Para realizar un análisis completo que incluya todos los ensayos descritos en el siguiente apartado, se requiere un volumen mínimo de 250 mL de aceite lubricante. Es fundamental llenar los recipientes hasta la gola (cuello de la botella) y cerrarlos herméticamente para prevenir derrames durante el transporte o almacenamiento.

Los recipientes utilizados para la toma de muestras deben ser los suministrados exclusivamente por el Laboratorio de Control de Ensayos (LCE) y deben estar completamente limpios, sin presencia de contaminantes como agua, arena, polvo, combustibles u otros agentes que puedan alterar los resultados del análisis. La integridad

del cierre es crucial para evitar la contaminación cruzada y garantizar que el volumen de la muestra permanezca intacto. Además, es necesario asegurarse de que el recipiente esté correctamente sellado tras la toma de muestra, para evitar cualquier pérdida de contenido que pueda comprometer el análisis.

2.3.3 Asignación de número de orden de trabajo y numeración de las muestras en el proceso de análisis de aceites

La asignación de un número de orden de trabajo es el primer paso del procedimiento de análisis de aceites al recibir las muestras en el laboratorio. Este número actúa como un identificador único para cada lote de muestras remitido por una Unidad específica, lo que permite un seguimiento preciso durante todo el proceso analítico.

Posteriormente, se procede a la numeración sistemática de las muestras. El análisis de cada tipo de aceite se realiza de forma metódica, comenzando por el aceite multigrado O-1178, seguido por el O-1236, y así sucesivamente. Este enfoque ordenado garantiza que cada muestra se procese de manera adecuada y en el orden correcto, facilitando la gestión del flujo de trabajo en el laboratorio y minimizando el riesgo de errores en la identificación o procesamiento de las muestras.

2.3.4 Comprobación de la documentación

Para asegurar la precisión de los diagnósticos de las muestras de aceite lubricante, es fundamental recopilar y verificar una serie de datos clave que proporcionen un contexto adecuado sobre el equipo que está siendo analizado, así como su entorno operativo. Estos datos son esenciales tanto para evitar errores en los diagnósticos, como malinterpretaciones del estado del equipo o la omisión de problemas críticos que requieren atención inmediata.

Antes de realizar los ensayos fisicoquímicos sobre el lubricante, es necesario reunir información detallada sobre el equipo (como el motor o la caja de cambios) y su historia operativa reciente. Esto incluye la identificación precisa del equipo, su historial de mantenimiento y uso, así como cualquier cambio relevante en sus condiciones de funcionamiento. Verificar esta información garantiza que los resultados del análisis se interpreten correctamente, en función del contexto operativo del equipo, y que el

Capítulo 2: Materiales y métodos

diagnóstico sea lo más preciso posible. Los datos que es necesario repasar son los siguientes:

- Tipo de aceite.
- Número de serie del equipo lubricado.
- Matrícula del vehículo.
- Kilómetros a los que se realizó el cambio de aceite.
- Kilómetros a los que se realizó la toma de muestra.

Conocer el número de kilómetros durante los que el aceite ha sido utilizado en el vehículo, ayuda en la toma de decisiones y en la diagnosis del aceite en cuestión. También es importante controlar las horas de funcionamiento del motor, porque a veces los vehículos se arrancan y se mantienen encendidos sin recorrer kilómetros. Hay que destacar que no se hace un control de horas para la caja de cambios, ya que, si el vehículo está parado, la caja de cambios no interviene en el proceso, aunque el motor esté encendido.

La precisión en el diagnóstico se sostiene sobre cinco pilares fundamentales, cada uno de ellos aportando una pieza clave del rompecabezas que compone el estado de salud de la maquinaria [49] :

- 1. Identificación detallada del equipo:** Conocer el equipo y sus componentes específicos, así como el entorno en el que operan, es el primer paso. Este conocimiento abarca desde las condiciones ambientales hasta las particularidades técnicas que pueden influir en su funcionamiento.
- 2. Caracterización del lubricante en uso:** El tipo de lubricante, sus propiedades y su compatibilidad con el equipo son aspectos que pueden determinar la eficacia con la que este cumple su función de reducir el desgaste y proteger las piezas móviles.
- 3. Historial de operación y mantenimiento:** Entender las intervenciones previas, tanto correctivas como preventivas, nos permite identificar patrones y predecir potenciales fallos, optimizando así las prácticas de mantenimiento.
- 4. Análisis histórico de lubricantes:** El seguimiento a lo largo del tiempo a través de análisis periódicos de lubricantes y otras tecnologías de monitorización ofrece una visión detallada de la evolución del estado del equipo.

5. **Datos específicos de la muestra actual:** Finalmente, la información obtenida de la muestra de lubricante más reciente es vital para detectar cambios o anomalías que puedan sugerir problemas emergentes.

2.4 Descripción de los métodos de análisis de aceites usados

El estudio detallado de los aceites usados juega un papel fundamental en la comprensión del estado tanto del aceite como del equipo que este lubrica. Este apartado expone los equipos y procedimientos empleados para el análisis de muestras de aceite, buscando proporcionar un conocimiento profundo y exhaustivo acerca de sus propiedades fisicoquímicas y la metodología utilizada para determinarlas.

Cada prueba realizada para evaluar la condición del aceite usado sigue especificaciones particulares enfocadas en evaluar diversos aspectos del rendimiento y la condición del aceite (**Tabla 2-2**).

Tabla 2-2: Ensayos fisicoquímicos realizados al aceite usado y sus especificaciones

Propiedad	Método ASTM
Viscosidad a 100°C (cSt)	D445
Viscosidad a 40°C (cSt)	D445
Índice de viscosidad	D2270
Número ácido total (TAN)	D664
Número básico total (TBN)	D2896
Punto de inflamación	D92/D93
Presencia de agua	D6304
Carbonilla	D7686
Análisis de elementos por RDE-AES	D6595

Estas pruebas están diseñadas para recolectar datos críticos sobre el aceite, incluyendo su estado actual, la presencia y nivel de contaminantes, y signos de desgaste que podrían afectar el rendimiento o la longevidad del motor. Los propósitos de estas pruebas varían, desde determinar la viscosidad del aceite, que puede indicar su capacidad

Capítulo 2: Materiales y métodos

para lubricar bajo diferentes temperaturas, hasta medir la concentración de partículas metálicas, que puede señalar desgaste interno del motor o un posible daño, tal y como se indica en la **Tabla 2-3**.

Los propósitos de estas pruebas son variados y fundamentales para el mantenimiento del motor y la caja de cambios. Determinar la viscosidad del aceite, por ejemplo, puede indicar su capacidad del aceite para lubricar bajo diferentes temperaturas, mientras que medir la concentración de partículas metálicas puede señalar desgaste interno del motor o un posible daño. A continuación, se detalla la información aportada por cada ensayo y su propósito específico (**Tabla 2-3**).

Tabla 2-3: Información aportada en cada uno de los ensayos realizados [49]

Ensayo	Información aportada
Viscosidad a 100°C	Estado del aceite. Determina la capacidad del aceite para lubricar a altas temperaturas, crucial para la protección del motor bajo condiciones de operación intensas.
Viscosidad a 40°C	Estado del aceite. Indica la capacidad del aceite para lubricar a temperaturas moderadas, afectando el rendimiento del motor en arranques en frío y durante la operación normal.
Índice de viscosidad	Estado del aceite. Mide la estabilidad de la viscosidad del aceite con cambios de temperatura, reflejando su calidad y capacidad de rendimiento bajo diversas condiciones térmicas.
Número ácido total (TAN)	Estado del aceite. Indica la oxidación y acidez del aceite, que puede causar corrosión interna; se necesita para decidir el reemplazo del aceite.
Número básico total (TBN)	Estado del aceite. Evalúa la capacidad del aceite para neutralizar ácidos, importante para prevenir corrosión y desgaste.

Análisis de elementos por RDE-AES: Zn, P, Mg, Mo, B, Ti	Estado del aceite. Proporciona información sobre los aditivos del aceite, indicando su estado y capacidad de protección.
Punto de inflamación	Estado del aceite y contaminación. Determina la resistencia del aceite a altas temperaturas y su contaminación con sustancias inflamables.
Presencia de agua	Contaminación. Detecta la contaminación del aceite con agua, lo cual puede causar oxidación y fallos en el lubricante.
Carbonilla	Contaminación. Indica la contaminación por residuos de combustión, afectando la eficiencia del motor.
Análisis de elementos por RDE-AES: Si, Al, B, Na	Contaminación. Detecta la presencia de contaminantes externos como polvo y suciedad.
Análisis de elementos por RDE-AES: Fe, Cu, Pb, Sn, Al, Ni, Cr	Desgaste. Señala el desgaste de componentes internos del motor y caja de cambios, indicando posibles problemas mecánicos.

La recopilación de toda esta información es crucial para tomar decisiones de mantenimiento, ayudando a determinar si el aceite necesita ser reemplazado o si se requieren inspecciones adicionales del motor o caja de cambios para abordar posibles problemas.

2.4.1 Viscosidad

La viscosidad es una propiedad fundamental en los lubricantes, ya que juega un papel crucial en la protección de los componentes de la maquinaria incluyendo elementos críticos como el motor y la caja de cambios abordados en esta Tesis. Además, esta propiedad influye significativamente en la eficiencia del consumo de energía, mitigando las pérdidas causadas por la fricción, y es determinante en la formación del espesor de la película de aceite en las áreas de contacto.

El control de la viscosidad es vital en todo programa de análisis de lubricantes, así como controlar las tendencias que sufre conforme pasa el tiempo. Una ligera reducción

Capítulo 2: Materiales y métodos

en la viscosidad puede comprometer seriamente el rendimiento del lubricante, llevando potencialmente a un contacto directo entre metales y, por consiguiente, a un mayor desgaste (*vide supra*). Además, los cambios en la viscosidad del aceite suelen ser un indicador de otros problemas en el sistema.

Es importante distinguir entre dos tipos de viscosidad: la viscosidad absoluta o dinámica, que mide la resistencia interna de un fluido al flujo, y la viscosidad cinemática, que relaciona la viscosidad absoluta con la densidad del fluido. En este estudio, se ha evaluado la viscosidad cinemática, que indica la resistencia del aceite al fluir bajo la acción de la gravedad. Esta propiedad es crucial para predecir el comportamiento del aceite en diversas condiciones operativas y para asegurar la formación de una capa lubricante efectiva, reduciendo la fricción y el desgaste de los componentes mecánicos.

La viscosidad cinemática se calcula a partir de la siguiente **Ecuación 2-1**:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{Ecuación 2-1}$$

donde:

- ν es la viscosidad cinemática (m^2/s).
- μ es la viscosidad dinámica o absoluta ($\text{Pa}\cdot\text{s}$). También puede ser en cP ($1\text{Pa}\cdot\text{s}=1000\text{ cP}$).
- ρ es la densidad del fluido (kg/m^3).

La medición de la viscosidad cinemática se realiza cronometrando el tiempo que un volumen específico de fluido tarda en fluir a través de un viscosímetro capilar bajo la acción de la gravedad, según lo descrito en la ASTM D445. Un ejemplo de este procedimiento se ilustra en la **Figura 2-6**.

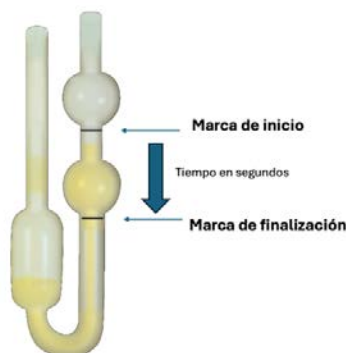


Figura 2-6: Medición de la viscosidad cinemática mediante viscosímetro capilar según ASTM D445

Capítulo 2: Materiales y métodos

Este proceso se lleva a cabo en viscosímetro automático calibrado, donde tanto la presión como la temperatura son controladas rigurosamente, como se muestra en **Figura 2-7**.



Figura 2-7: Viscosímetro Cannon CAV-2100 utilizado para determinar la viscosidad a 40°C y 100°C

En lo que respecta a las unidades de medida, la viscosidad cinemática se representa en el Sistema Internacional de Unidades (SI) en metros cuadrados por segundo [m^2/s]. No obstante, a pesar de las recomendaciones de la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM) de evitar el uso del sistema Cegesimal de Unidades (CGS), la unidad más habitual para medir la viscosidad cinemática es el centiStoke [cSt]. Este valor corresponde a 10^{-2} St [mm^2/s] y se asocia con el mencionado sistema CGS.

La viscosidad de un fluido está estrechamente relacionada con la temperatura. Esta relación es fundamental para entender cómo los lubricantes funcionan en diferentes condiciones y aplicaciones. Por lo tanto, al informar sobre la viscosidad, es esencial asociar siempre el valor obtenido con la temperatura a la que se realizó la prueba. Al aumentar la temperatura, los lubricantes tienden a volverse menos viscosos, es decir, más fluidos. Esta transformación afecta directamente su capacidad para proteger y lubricar adecuadamente las partes mecánicas. En el caso de los lubricantes industriales, la norma ISO 3448:1992 [50] establece que la viscosidad se mide y se informa a una temperatura estándar de 40°C. Esta referencia permite una comparación estandarizada y fiable entre diferentes productos.

Por otro lado, para los lubricantes utilizados en aplicaciones automotrices, la viscosidad se reporta a una temperatura más elevada, específicamente a 100°C [18]. Esto

Capítulo 2: Materiales y métodos

es debido a que los motores de los vehículos operan a temperaturas más altas, y es esencial conocer cómo se comporta el lubricante bajo esas condiciones. Una viscosidad adecuada a 100°C asegura que el lubricante mantenga su capacidad de formar una película protectora, evitando el desgaste del motor y mejorando su rendimiento y durabilidad.

En este estudio, se midió la viscosidad de los aceites a dos temperaturas diferentes, 40°C y 100°C, con el objetivo de conocer el comportamiento del aceite a ambas temperaturas y también para calcular su Índice de Viscosidad. El Índice de Viscosidad es una herramienta crucial para analizar cómo la viscosidad de un aceite varía con los cambios de temperatura. Este índice es un indicador que mide la variabilidad de la viscosidad del aceite en respuesta a los cambios de temperatura. El cálculo del índice de viscosidad es fundamental para entender cómo se comportará el aceite en diferentes condiciones térmicas, proporcionando una perspectiva valiosa sobre su estabilidad y eficacia como lubricante en diversos entornos operativos.

Para calcular el índice de viscosidad de un aceite, es esencial medir su viscosidad a dos temperaturas específicas: 40°C y 100°C [51]. Un valor alto de este índice sugiere que el aceite mantiene mejor su viscosidad a pesar de los cambios de temperatura, lo que implica una mayor estabilidad. Se usó un software especializado para el cálculo del índice de viscosidad (IV) a partir de las viscosidades cinemáticas medidas a 40°C y 100°C. Este software se basa en las fórmulas y tablas estándar establecidas por la Sociedad Americana de Ingenieros Automotrices (SAE) para hallar los valores de L y H . En este contexto, L es la viscosidad cinemática a 40°C de un aceite de referencia que tiene la misma viscosidad a 100°C que el aceite en cuestión y un índice de viscosidad de 0, mientras que H es la viscosidad cinemática a 40°C de un aceite de referencia que tiene la misma viscosidad a 100°C y un índice de viscosidad de 100. El software determina automáticamente el índice de viscosidad al introducir los valores de viscosidad a las temperaturas especificadas, asegurando precisión y consistencia en los resultados.

Para evaluar con precisión cualquier cambio en la viscosidad de un lubricante y detectar posibles anomalías en su funcionamiento, es necesario comparar dichos cambios con la viscosidad del aceite nuevo, que se establece como línea de base y referencia para el estudio. Sin embargo, en este caso no fue posible enviar al Laboratorio Central del Ejército el aceite nuevo de cada vehículo, por lo que solo se enviaron muestras de aceite usado. Por lo tanto, se llevó a cabo el estudio estableciendo límites tanto superiores como inferiores para evaluar la viscosidad. Generalmente, una reducción en la viscosidad se

Capítulo 2: Materiales y métodos

considera más peligrosa que un aumento de esta, ya que sugiere una disminución en la eficacia de la película lubricante, comprometiendo así la protección de la maquinaria. Por otro lado, un aumento en la viscosidad también es significativo y no debe subestimarse, pues puede indicar serios problemas como contaminación o degradación del lubricante.

La determinación de la viscosidad cinemática de los aceites lubricantes analizados se ha hecho siguiendo la especificación: ASTM D 445:2021 “Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity)” [52]. A continuación, en la **Tabla 2-4** se presenta un resumen de esta información:

Tabla 2-4: Método estándar para la determinación de la viscosidad cinemática

Método de medición	Descripción
ASTM D445	Método estándar para medir la viscosidad cinemática de líquidos transparentes y opacos, y para calcular la viscosidad dinámica

Mediante esta especificación se asegura que la determinación de la viscosidad cinemática se realice de manera precisa y confiable, proporcionando información crucial para la caracterización de líquidos en diversos campos como la investigación, control de calidad y desarrollo de productos. La especificación ASTM D445 define los métodos para medir la viscosidad de los líquidos mediante viscosímetros capilares. En el estudio se empleó un viscosímetro automático, conforme a lo descrito en el apartado 6.1.2 de la especificación ASTM D445. Esta especificación admite el uso de viscosímetros automáticos capaces de operar con tiempos de flujo menores a 200 segundos siempre que se cumplan los requisitos de corrección de la energía cinética y de precisión que establece la norma. El tiempo de flujo se refiere al período que tarda un volumen específico de fluido en recorrer una distancia determinada bajo la acción de la gravedad en un viscosímetro. Esta corrección la hace el propio software del equipo. El uso de viscosímetros automáticos presenta múltiples beneficios en comparación con los métodos manuales. Estos instrumentos automatizan la medición, minimizando los errores humanos y aumentando la eficiencia del flujo de trabajo.

2.4.1.1 Materiales y reactivos utilizados

Para la medición de la viscosidad, se emplearon los siguientes materiales:

Capítulo 2: Materiales y métodos

- Dos viscosímetros automáticos Cannon CAV-2100, **Figura 2-7**.
- Dos tubos capilares Cannon-Fenske por cada viscosímetro.
- Heptano al 95% de pureza, suministrado por la marca New Química, utilizado como disolvente para la limpieza de los tubos capilares.

Las unidades de baño de los viscosímetros CAV están equipadas con dos tubos capilares, cada uno con la capacidad de medir un rango de viscosidad cinemática que puede abarcar 100 veces su valor mínimo, es decir, de 1 a 100 cSt, de 6 a 600 cSt, entre otros. No se requieren reactivos para la medición de la viscosidad, excepto el heptano, utilizado únicamente para limpiar los tubos viscosimétricos.

2.4.1.2 Equipo utilizado

El equipo utilizado para la determinación de la viscosidad cinemática de los aceites lubricantes ha sido el Cannon CAV-2100 (**Figura 2-7**). Se han utilizado dos equipos CAV-2100 para la determinación de la viscosidad a 40°C y a 100°C. Cada unidad de viscosimetría CAV, diseñada para operar de manera completamente automática, facilita la realización de pruebas de viscosidad cinemática de forma totalmente automatizada, alineadas con los parámetros establecidos por la norma ASTM D 445.

Cada uno de los dos viscosímetros automáticos CAV-2100 utilizados para determinar las viscosidades de los aceites, está equipado con dos tubos capilares de borosilicato pudiendo medir en una amplia gama de viscosidades. El viscosímetro utilizado para medir la viscosidad a 40° C utiliza un tubo con un rango de 2-200 cSt y otro de 6-600 cSt. Para medir la viscosidad a 100° C, el rango de un tubo es de 1-100 cSt y otro de 3-300 cSt.

Cada tubo, con tres bulbos calibrados, incorpora cuatro termistores de perlas de vidrio para controlar el nivel de la muestra. El termistor de perlas de vidrio es un sensor de precisión integrado en el tubo del viscosímetro que se calienta con la electricidad, experimentando cambios de temperatura al interactuar con una muestra. Inicialmente, el termistor se enfría cuando la muestra lo cubre, impidiendo que el calor se disipe. Esto se produce porque cuando un líquido (la muestra de aceite analizada) entra en contacto con el termistor, lo enfría, ya que el líquido absorbe parte del calor. Este líquido tiene una superficie curva, conocida como menisco. A medida que el tubo se llena o vacía, el menisco se mueve hacia arriba o hacia abajo. Cuando el menisco pasa por el termistor (es decir, el termistor ya no está en contacto con el líquido), el termistor deja de enfriarse y

Capítulo 2: Materiales y métodos

regresa a su temperatura inicial. Este cambio de temperatura es detectado y registrado por la placa del sensor con gran precisión, lo que permite calcular el tiempo que el líquido tarda en pasar por el termistor. La placa del sensor registra el tiempo preciso en que ocurre este cambio de temperatura, con una exactitud de 0,01 segundos.

Las especificaciones técnicas de cada unidad son las siguientes [53]:

- **Rango de viscosidad:** 0,5 a 5000 cSt dependiendo de los tubos utilizados para viscosímetro.
- **Temperatura del baño:** Se mantiene un control de la temperatura del baño con una exactitud superior a $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$ en el rango de 20°C a 100°C , y de hasta $\pm 0,03^{\circ}\text{C}$ entre 100°C y 150°C , siempre que se seleccione la opción de alta temperatura por encima de los 100°C .
- **Resolución del tiempo de caída:** Los dispositivos utilizados tienen la capacidad de cuantificar los flujos de 0,01 segundo y con una precisión de $\pm 0,001$ segundos, gracias al cronometraje electrónico del menisco del líquido durante su transición entre sensores termistores.
- **Condiciones de funcionamiento:** 10%-90% HR sin condensación
- **Seguridad y Confiabilidad:** Los viscosímetros CAV 2000 incorporan características de seguridad como circuitos de fallo por temperatura y flotadores de nivel de líquido para prevenir el funcionamiento de los elementos calefactores al descubierto.
- **Tecnología de los sensores térmico:** El equipo dispone de unos sensores térmicos con una tecnología que garantiza que líquidos oscuros u opacos puedan medirse con la misma precisión que los líquidos transparentes, superando las necesidades de precisión de la norma ASTM D 445.

Los equipos y servicios auxiliares necesarios para que el equipo Cannon CAV-2100 pueda ser utilizado adecuadamente son los siguientes:

- Ordenador donde está instalado el software VISCPRO compatible con Windows 10 que automatiza las pruebas de múltiples muestras (hasta 13 por equipo) y permite la configuración de informes personalizables y la gestión de datos de la base de datos.
- Este equipo requiere una fuente de alimentación de 115 V CA con un circuito de 20 amperios o de 230 V CA con un circuito de 10 amperios.
- Extractor externo para vapores de disolvente.

Capítulo 2: Materiales y métodos

- Suministro externo de aire comprimido (414 kPa).
- Recipiente sin presión para el disolvente empleado, compatible con la unidad dispensadora de disolvente.
- Unidad de servicio que regula el vacío, la presión y el flujo del disolvente, junto con una unidad dispensadora de disolvente, diseñada para trabajar con el recipiente de disolvente heptano al 95% de pureza.

2.4.1.3 Preparación de la muestra

La muestra de aceite debe estar libre de burbujas de aire. Se agita el bote que contiene la muestra de aceite para homogenizar la muestra y a continuación se rellena el porta muestras del equipo automático para determinar la viscosidad con el viscosímetro Cannon CAV-2100 a 40° C a 100° C.

2.4.1.4 Límites de degradación del aceite basados en la viscosidad

Los cambios en la viscosidad de los lubricantes pueden ser causados fundamentalmente por alteraciones en su estructura molecular o por contaminación tal y como se indica en la **Tabla 2-5**.

Tabla 2-5: Causas que producen cambios de la viscosidad del aceite [11]

	Disminuye la viscosidad	Aumenta la viscosidad
Cambios al aceite básico (cambios moleculares)	● Ruptura térmica de las moléculas de aceite básico ● Adelgazamiento por corte del mejorador de IV ● Hidrólisis	● Oxidación ● Polimerización ● Formación de carbón e insoluble de oxidación ● Pérdidas por evaporación
Adiciones al aceite básico (contaminación)	■ Combustible ■ Refrigerante ■ Solventes ● Aceite incorrecto (baja viscosidad)	■ Emulsiones con agua ■ Aire atrapado ● Hollín ● Anticongelante (glicol) ● Aceite incorrecto (alta viscosidad)
● Cambios irreversibles ■ Reversible removiendo los contaminantes si es viable		

Estas alteraciones no solo afectan la calidad del lubricante, sino que también pueden tener efectos adversos en la maquinaria que el lubricante está destinado a proteger, disminuyendo su eficiencia y acortando su vida útil. Para mitigar estos efectos, se establecen límites de viscosidad, que definen la variación máxima aceptable, evitando así daños mayores en la maquinaria.

Capítulo 2: Materiales y métodos

En el caso del presente estudio, se examinan dos tipos de aceites que tienen propiedades fundamentales para determinar su uso específico en los equipos que lubrican (motor y caja de cambios), dentro de los límites que establecen sus respectivas especificaciones militares. El aceite O-1236 para motores cumple la norma MIL-PRF-2104 N [47], mientras que el aceite O-1178 para cajas de cambios sigue la especificación TL 9150-0080 [48]. De acuerdo con las especificaciones, el aceite O-1236 tiene una viscosidad cinemática entre 12,5 y 16,3 mm²/s a 100 °C. Esta viscosidad relativamente alta es esencial para garantizar una lubricación adecuada bajo las condiciones extremas de temperatura y presión que se dan en los motores de combustión interna. Por otro lado, el aceite O-1178, usado en cajas de cambios, tiene una viscosidad cinemática más baja, de 9,3 a 12,5 mm²/s a la misma temperatura. Esta menor viscosidad permite un cambio de marchas más fluido y eficaz, adaptándose a las exigencias específicas de las transmisiones mecánicas donde se necesita menos resistencia al flujo del lubricante.

El criterio seguido para establecer los límites de precaución y alarma para las viscosidades de los aceites estudiados, se establecen en la **Tabla 2-6**.

Tabla 2-6: Criterio de aceptación de la viscosidad cinemática

Límite	O-1236	O-1178	
	(aceite de motor)	(aceite caja de cambios)	
Alarma (superior)	+20%	+10%	Límite establecido por la especificación 
Precaución (superior)	+10%	+5%	
Precaución (inferior)	-5%	-5%	
Alarma (inferior)	-10%	-10%	

En los lubricantes utilizados en motores de combustión interna y cajas de cambios, dadas las condiciones operativas exigentes y el riesgo de contaminación, se han establecido límites críticos y de precaución que garantizan la correcta funcionalidad del sistema. Estos límites están definidos en la **Tabla 2-6**, que muestra los márgenes de variación permitidos en la viscosidad de los aceites O-1236 (aceite de motor) y O-1178 (aceite para caja de cambios).

Los valores de la tabla reflejan límites de alarma y precaución tanto superiores como inferiores. Estos límites son cruciales para asegurar que la viscosidad del lubricante se

Capítulo 2: Materiales y métodos

mantenga dentro de un rango que permita el correcto funcionamiento y protección de los componentes del motor y la caja de cambios. Una variación notable en la viscosidad puede influir directamente en el rendimiento, seguridad y vida útil de los equipos.

En la **Tabla 2-6** se observa que, para el aceite de motor O-1236, el límite de alarma superior es un aumento del 20% en la viscosidad con respecto a lo especificado, mientras que para el aceite de caja de cambios O-1178, este límite es del 10%. En ambos casos, los límites inferiores son más estrictos, con un umbral de precaución del 5% por debajo del valor establecido, y un límite de alarma inferior del 10%.

El control de estos límites es fundamental, ya que tanto una viscosidad muy alta como una viscosidad muy baja pueden tener efectos adversos en el rendimiento del motor y de la caja de cambios.

Una viscosidad muy baja puede ocasionar:

- Pérdida de la película lubricante, generando contacto metal-metal y provocando desgaste excesivo.
- Aumento de la fricción mecánica, pérdidas de energía y generación de calor.
- Posibles fugas internas y externas, comprometiendo la integridad del sistema.
- Mayor susceptibilidad del sistema a la contaminación por partículas.

Por otro lado, una viscosidad muy alta puede causar:

- Generación de calor adicional, formación de oxidación, barniz y lodos.
- Cavitación por arrastre viscoso en las líneas de succión.
- Flujo insuficiente hacia rodamientos y cojinetes, incrementando el desgaste.
- Aumento en el consumo de energía y menor capacidad de bombeo durante el arranque a bajas temperaturas.

Dado que una reducción en la viscosidad puede comprometer de manera más grave la capacidad del lubricante para formar una película protectora, los límites inferiores de precaución y alarma son particularmente importantes. Un descenso del 5% en la viscosidad ya activa el límite de precaución, asegurando que el lubricante mantenga su capacidad protectora, especialmente en condiciones operativas de alta carga y temperatura.

El control riguroso de la viscosidad dentro de estos márgenes es crucial para mantener la integridad de los motores y cajas de cambio de los vehículos estudiados,

reducir el riesgo de fallos catastróficos, y optimizar tanto su rendimiento como su vida útil.

2.4.1.5 Análisis físico químico y medición

La preparación de las muestras para el análisis de viscosidad comienza con el llenado de un vial con 20 mL del aceite a estudiar. Este vial se coloca en el carrusel del equipo preparado para albergar múltiples muestras, permitiendo así la determinación de la viscosidad de diferentes aceites de manera eficiente y sin contaminación cruzada. Una vez que las muestras están dispuestas en el carrusel, se procede a iniciar el ensayo. El equipo aspira automáticamente el aceite de cada vial. A continuación, el aceite se inyecta cuidadosamente en el tubo de medición Cannon-Fenske de cada viscosímetro, el cual se mantiene en condiciones térmicas controladas, específicamente a 40 o 100 °C, en un baño de silicona. Esta regulación de temperatura es vital, ya que la viscosidad del aceite puede variar significativamente con cambios de temperatura. Para una medición adaptada a necesidades analíticas del estudio, se utilizan dos equipos de viscosimetría independientes. Cada uno de estos está calibrado para operar a una de las dos temperaturas estandarizadas, ya sea a 40 °C o a 100 °C, lo que permite realizar análisis conforme a los estándares internacionales y a las exigencias específicas de cada tipo de aceite. La finalidad del ensayo es el registro del tiempo que tarda la muestra en desplazarse a través de un tubo capilar bajo condiciones controladas de 40 °C y 100 °C. Este tiempo, medido con gran exactitud en segundos, comienza a contabilizarse desde que el fluido pasa de la marca inicial hasta llegar a la marca final tal y como se indica en la **Figura 2-6**.

2.4.1.6 Cálculo de la viscosidad

El equipo utilizado, el viscosímetro Cannon CAV 2100, calcula la viscosidad cinemática basándose en el tiempo de flujo del fluido a través de un tubo capilar y las constantes de calibración de dicho tubo. Las mediciones de viscosidad se realizan a dos temperaturas específicas: 40°C y 100°C, según las especificaciones de los aceites, con el objetivo de calcular el Índice de Viscosidad (IV) de cada uno de ellos.

La metodología empleada por el viscosímetro está en conformidad con el método estandarizado ASTM D445, el cual define el procedimiento para medir la viscosidad cinemática de líquidos transparentes y opacos. Este estándar es ampliamente utilizado a nivel mundial, garantizando la precisión y comparabilidad de los resultados.

Capítulo 2: Materiales y métodos

El cálculo de la viscosidad cinemática se basa en la siguiente **Ecuación 2-2**:

$$\nu = C \cdot t - \frac{E}{t^2} \quad \text{Ecuación 2-2}$$

donde:

- ν = viscosidad cinemática (cSt).
- C = constante de calibración (cSt/s).
- E = corrección de la energía cinética.
- t = tiempo de flujo (segundos).

Durante el proceso de medición, el viscosímetro Cannon CAV 2100 automatiza la determinación del tiempo de flujo, registrando dos veces el tiempo de caída de cada muestra. Posteriormente, el software VISCPRO®, vinculado al equipo, analiza estos tiempos y utiliza las constantes de calibración C y E para calcular con precisión la viscosidad cinemática en centiStokes (cSt).

2.4.1.7 Limpieza y mantenimiento

El viscosímetro Cannon CAV 2100 está diseñado para facilitar un proceso de limpieza eficiente y automático, asegurando la eliminación de residuos de aceite que podrían afectar las siguientes mediciones. Esta automatización es clave para mantener la integridad y la precisión del equipo. Una vez finalizado el ensayo de viscosidad, el equipo comienza el ciclo de limpieza. Se utiliza como disolvente de limpieza al 95% de pureza ya que es un disolvente compatible con el aceite analizado para asegurar que todos los residuos sean disueltos y eliminados completamente. El solvente es introducido en el sistema utilizando el mismo mecanismo de inyección que se emplea para las muestras de aceite. El solvente fluye a través del tubo capilar y otras partes en contacto con la muestra, disolviendo los residuos de aceite. Posteriormente, se extrae el solvente del sistema, llevándose consigo los residuos disueltos. Después de la extracción del solvente, se realiza un enjuague con un heptano limpio para eliminar cualquier rastro restante. Finalmente, se procede a secar el sistema para evitar la contaminación de las muestras siguientes. Este secado se realiza mediante la circulación de aire de tal manera que no deje residuos. Tras esta etapa de limpieza, el equipo queda preparado para realizar mediciones en nuevas muestras.

2.4.2 Punto de inflamación

La determinación del punto de inflamación es crucial para evaluar cómo se comportan los lubricantes bajo condiciones específicas de temperatura. Un descenso en el punto de inflamación puede indicar una mayor volatilidad del lubricante, afectando su capacidad para proteger y lubricar motores o sistemas mecánicos. Este parámetro, medido en grados centígrados (°C), señala la temperatura mínima a la que un aceite emite vapores suficientes para inflamarse al exponerse a una fuente de ignición. Además, está relacionado con la viscosidad del aceite; una disminución en el punto de inflamación suele acompañarse de una reducción en la viscosidad.

El análisis del punto de inflamación también permite detectar la contaminación en aceites usados. Por ejemplo, si un aceite de motor muestra una disminución en el punto de inflamación tras su uso, esto puede indicar la presencia de contaminantes volátiles, como combustibles. Conocer el punto de inflamación original, proporcionado por el fabricante, facilita la identificación de dichas contaminaciones.

Existen dos métodos ASTM para determinar el punto de inflamación en los aceites lubricantes que se han estudiado e identificar la presencia de compuestos volátiles para evaluar la seguridad y calidad de los productos analizados. Los métodos son:

- ASTM D92-18: “Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Tester” [54].
- ASTM D93-20 “Standard Test Methods for Flash Point by Pensky-Martens Closed Cup Tester” [55].

A continuación, en la **Tabla 2-7** se presenta un resumen de esta información.

Tabla 2-7: Método estándar para la determinación del punto de inflamación

Método de medición	Descripción
ASTM D 92	Método estándar para determinar los puntos de inflamación mediante vaso abierto de Cleveland.
ASTM D 93	Método estándar para determinar los puntos de inflamación mediante vaso cerrado Pensky-Martens.

El fundamento del método consiste en determinar la temperatura mínima a la cual el aceite de motor o caja de cambios analizado desprende la cantidad suficiente de vapores

para inflamarse momentáneamente al serle aplicada una pequeña llama sobre el vaso. El aparato detecta la ionización del aire del entorno del electrodo de alta tensión cuando se produce la inflamación. Una vez alcanzado el punto de inflamación, si se continúa calentando el producto, éste desprenderá cantidad suficiente de vapores para arder un tiempo mínimo de 5 segundos con lo que se habrá alcanzado el punto de combustión [54].

2.4.2.1 Método ASTM D92-18: “Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Tester”.

El método ASTM D92-18, conocido como el método de la “copa abierta Cleveland”, es un procedimiento estándar para determinar el punto de inflamación en productos derivados del petróleo. Este método consiste en determinar la temperatura más baja en la que un producto líquido funcional libera suficientes vapores para encenderse momentáneamente al exponerse a una pequeña llama cerca del contenedor. El dispositivo utilizado para esta prueba detecta la ionización del aire alrededor del electrodo de alta tensión en el momento de la ignición. Una vez que se alcanza el punto de inflamación, si se sigue calentando el producto, emitirá suficientes vapores para mantener una combustión durante al menos 5 segundos, lo cual indica que se ha llegado al punto de combustión [54].

Este método implica el uso de un recipiente o copa abierta en la que se coloca y calienta gradualmente la muestra de aceite. En este método, una vez que la muestra se encuentra en el recipiente o copa abierta, se le aplica calor de manera controlada. La temperatura aumenta gradualmente y, a intervalos regulares, se acerca una fuente de ignición a la superficie del líquido. El punto en el que los vapores del aceite se encienden indica que se ha alcanzado el punto de inflamación. Este método es especialmente útil para evaluar aceites de alta viscosidad y combustibles pesados y se utiliza en productos petrolíferos que tengan una temperatura de inflamación superior a 79 °C e inferior a 400 °C [54].

La principal ventaja del método de “Copa abierta Cleveland” es su simplicidad y la capacidad de simular condiciones ambientales abiertas. Sin embargo, su principal limitación es que puede no ser tan preciso como los métodos de copa cerrada para detectar vapores volátiles, especialmente en entornos controlados o cuando se requiere mayor precisión.

2.4.2.2 Materiales y reactivos utilizados

El material utilizado para la medición del punto de inflamación es:

- Equipo Herzog Automatic Flash Point Cleveland Electronic SC355 (**Figura 2-8**)
- Bombona de gas.
- Heptano como producto de limpieza.

No se utiliza ningún reactivo para la medición del punto de inflamación. Tan solo se utiliza heptano, el mismo que se utiliza en el ensayo de la viscosidad como disolvente para la limpieza de las copas en donde se introduce el aceite lubricante.

2.4.2.3 Equipo utilizado

El equipo utilizado para la determinación del punto de inflamación de las muestras de aceite analizadas en la presente tesis se trata del: Equipo Electrónico Herzog Automatic Flash Point Cleveland, **Figura 2-8**. Dicho equipo destaca por su precisión, automatización, seguridad y fiabilidad para determinar el punto de inflamación en vaso abierto según ASTM D92.



Figura 2-8: Equipo electrónico Herzog Automatic Flash Point Cleveland (ASTM D92)

El equipo Herzog Automatic Flash Point Cleveland Electronic SC355 es un dispositivo especializado que se ha utilizado para determinar el punto de inflamación de los aceites analizados según la norma ASTM D92-18. Este método es ampliamente reconocido y aplicado en la industria para evaluar la volatilidad y el riesgo de inflamabilidad de productos petrolíferos.

El equipo opera bajo el principio de la copa abierta Cleveland, donde la muestra se expone al aire y se calienta hasta que los vapores generados se inflaman con una fuente

Capítulo 2: Materiales y métodos

de ignición aplicada según la especificación ASTM D92. La principal ventaja de este equipo y uno de los motivos por los que fue elegido, es su capacidad para automatizar completamente el procedimiento de la prueba, desde el calentamiento de la muestra hasta la detección del punto de inflamación, lo que mejora la precisión y la seguridad en comparación con los métodos manuales. El equipo dispone de una unidad principal, el comprobador Herzog SC 355, donde va alojada la placa calefactora, el brazo con la llama testigo y la cabeza de pruebas equipada con dos sondas Pt-100 y un anillo de ionización para detectar el punto de inflamación. Además, dispone de un carrusel en el que se pueden colocar hasta 6 muestras diferentes. El control de la temperatura se lleva a cabo mediante una tecnología que asegura un calentamiento uniforme y controlado de la muestra, cumpliendo con las especificaciones de velocidad de calentamiento dictadas por ASTM D92-18. El equipo utiliza un sistema de detección de llama avanzado para identificar el momento exacto en que ocurre el punto de inflamación, garantizando resultados fiables y reproducibles e incluye una interfaz de usuario intuitiva que facilita la operación y visualización de los resultados. Además, permite el registro y almacenamiento de datos para su posterior análisis y reporte. Dispone de una placa calefactora de precalentamiento, con potenciómetro para el ajuste de la temperatura independiente del resto del aparato y hace uso de gas para alimentación de la llama testigo.

2.4.2.4 Preparación de la muestra

No se requiere ningún proceso especial de preparación de la muestra, tan solo se necesita un proceso de homogeneización de la muestra mediante agitación. Para ello es importante agitar el recipiente que contiene la muestra de aceite para lograr una composición uniforme del aceite en toda la muestra. Luego, se coloca en el contenedor de prueba del equipo, asegurándose de que se llene hasta el nivel especificado marcado en cada contenedor de muestra del equipo. Aunque la preparación de la muestra es sencilla, la homogeneización es clave para asegurar la fiabilidad de la prueba.

2.4.2.5 Límites de degradación del aceite basados en el punto de inflamación

La evaluación de los límites de alerta del punto de inflamación es crucial para detectar problemas potenciales, como la contaminación del lubricante o la pérdida de sus

propiedades esenciales. Esto es fundamental para asegurar la protección efectiva y la durabilidad tanto de los motores como de las cajas de cambios. Idealmente, la comparación del valor del punto de inflamación del aceite nuevo con el aceite usado permitiría identificar cualquier deterioro significativo en las propiedades del lubricante. Una disminución de aproximadamente 20°C en el punto de inflamación del aceite sometido a prueba es una señal de alerta que indica una pérdida considerable en las capacidades protectoras del lubricante [49].

Dado que no se dispone del aceite nuevo correspondiente a cada vehículo para el que se evaluó el punto de inflamación, se ha tomado como referencia el valor mínimo del punto de inflamación especificado por las normas MIL-PRF-2104M (para aceite de motor con código OTAN O-1236) y TL 9150-0080 (para aceite de caja de cambios con código OTAN O-1178). Con base en estas normas, se establecieron los siguientes límites para la evaluación del aceite, como se muestra en la **Tabla 2-8**.

Tabla 2-8: Límites del punto de inflamación del O-1236 y O-1178

Límite del punto de inflamación (°C)				
Tipo de aceite	Especificación	Normal	Precaución	Alarma
O-1236	Min 215	>205	195-204	<194
O-1178	Mín. 200	>190	180-189	<179

2.4.2.6 Análisis físico químico y medición

Para garantizar la precisión y reproducibilidad de los resultados de la temperatura de punto de inflamación al llenar las copas o recipientes con muestras de aceite, se siguió los pasos detallados a continuación:

- 1. Homogeneización de la muestra:** Se comienza agitando el contenedor que contiene la muestra de aceite. Esto es crucial para homogeneizar la muestra y asegurar que la composición del aceite sea uniforme en toda la muestra.
- 2. Limpieza y preparación de la superficie de la muestra:** Hay que asegurarse de que el exterior de cada copa esté limpio y que la superficie de la muestra de aceite dentro de la copa esté libre de espuma. La presencia de espuma puede afectar la precisión de la medición de la temperatura de inflamación.
- 3. Llenado y colocación de los recipientes porta muestras o copas:** Se procede a llenar las copas con la muestra de aceite. Es importante llenar cada copa hasta alcanzar la marca de llenado indicada en la misma. Este paso es esencial para

Capítulo 2: Materiales y métodos

mantener la consistencia en el volumen de aceite en todas las muestras. Una vez llenas las copas, se colocan en sus respectivos lugares en el carrusel.

- 4. Evitar la contaminación de la pared de la copa:** Es fundamental evitar que la pared de la copa se impregne de aceite por encima de la marca de llenado. Si esto ocurre, puede haber una variación en los resultados de la temperatura de punto de inflamación, afectando negativamente la reproducibilidad y la precisión de las mediciones.

Una vez depositada la muestra de aceite en su correspondiente vaso del carrusel, el equipo Herzog Automatic Flash Point Cleveland Electronic SC355, inicia automáticamente el proceso de medición. La automatización del proceso comienza con el posicionamiento del recipiente de muestra en la placa calefactora. Este paso inicial es seguido por el desplazamiento del módulo detector, que se sumerge en la muestra para iniciar el calentamiento controlado. La automatización aporta consistencia al proceso y elimina variaciones que podrían ser introducidas por el manejo manual, garantizando así la integridad de los datos. El aceite analizado se calienta a una tasa constante especificada por la norma. Durante este proceso, se agita ocasionalmente para promover una evaporación uniforme.

El control de la temperatura se lleva a cabo en tiempo real. La pantalla del equipo muestra tanto la temperatura actual de la muestra como la temperatura de inflamación esperada. Esta capacidad de seguimiento radica en la posibilidad para predecir y ajustar el proceso en función de las condiciones observadas, optimizando así la secuencia de prueba.

A medida que la muestra se aproxima a la temperatura de inflamación programada previamente, el equipo introduce automáticamente y a intervalos de 2° C una fuente de ignición (una llama) en el espacio de vapor, para verificar la presencia de vapores inflamables. Esta introducción automatizada de la fuente de ignición es un aspecto crítico de la prueba. Este procedimiento incrementa la seguridad, al limitar la exposición directa a la fuente de ignición, y mejora la precisión en la determinación del punto exacto de inflamación. Se incluye un mecanismo de agitación para mantener una temperatura uniforme en toda la muestra. El punto en el cual la mezcla de vapores y aire sobre la superficie del líquido se inflama es registrado como el punto de inflamación. La aparición de una llama o una reacción detectable indica que se ha alcanzado el punto de inflamación. El equipo detecta automáticamente el momento en que los vapores se

Capítulo 2: Materiales y métodos

inflaman, indicando el punto de inflamación. Esta detección automática es clave para la precisión de la prueba. La temperatura a la que ocurre esta ignición se registra como el punto de inflamación de la muestra y la precisión en el registro de esta temperatura es lo que hace confiable al equipo Herzog. Inmediatamente después de la detección de la inflamación, que se indica con un zumbido audible, la llama se extingue, el bloque detector se retira y el recipiente se cierra temporalmente para permitir su enfriamiento. Dado que el proceso implica vapores inflamables y fuentes de ignición, el equipo se encontrará en una vitrina de seguridad con de extracción de gases.

Después de determinar el punto de inflamación, el equipo se enfría a una temperatura segura y una vez que la muestra alcanza un estado de enfriamiento adecuado, se procede con la siguiente muestra, reiniciando el proceso. Este flujo de trabajo continuo que permitía el uso del equipo Herzog Automatic Flash Point Cleveland Electronic fue fundamental para determinar su utilización en lugar del equipo que seguía el método Pensky-Martens ya que, ante un alto volumen de muestras, maximiza la eficiencia y minimiza el tiempo de inactividad entre pruebas. El sistema está programado para abortar la prueba automáticamente si la temperatura supera en 40 °C la temperatura de inflamación prevista sin que se haya detectado inflamación. Este protocolo de seguridad previene situaciones de riesgo y protege tanto al analista como al equipo de posibles incidentes.

2.4.2.7 Cálculo del punto de inflamación

El equipo utilizado calcula el punto de inflamación dando el resultado en °C. Es necesario corregir el punto de inflamación teniendo en cuenta la presión atmosférica en el laboratorio en el momento de la medida.

2.4.2.8 Limpieza y Mantenimiento

Después de cada medición del punto de inflamación, es esencial limpiar el equipo para evitar la contaminación de futuras muestras. El disolvente utilizado para realizar la limpieza de las cubetas ha sido heptano al 95% de pureza. El mantenimiento regular del equipo es crucial para garantizar la precisión y fiabilidad de las mediciones según las recomendaciones del fabricante.

2.4.3 Número de acidez total (TAN)

El envejecimiento de los aceites lubricantes genera ácidos que causan corrosión, incremento de la fricción, desgaste en superficies metálicas y acumulación de residuos, reduciendo significativamente la eficacia del lubricante. Determinar el Número de Acidez Total (TAN) es crucial, ya que mide la concentración de estos ácidos y el grado de deterioro del lubricante, sirviendo como un indicador temprano de posibles problemas como contaminación o agotamiento de aditivos. La evaluación del TAN permite controlar el estado del lubricante y optimizar los intervalos de cambio de aceite, comparando el número ácido del aceite en uso con el de uno nuevo para detectar oxidación o envejecimiento, tal como se muestra en la **Figura 2-9**.

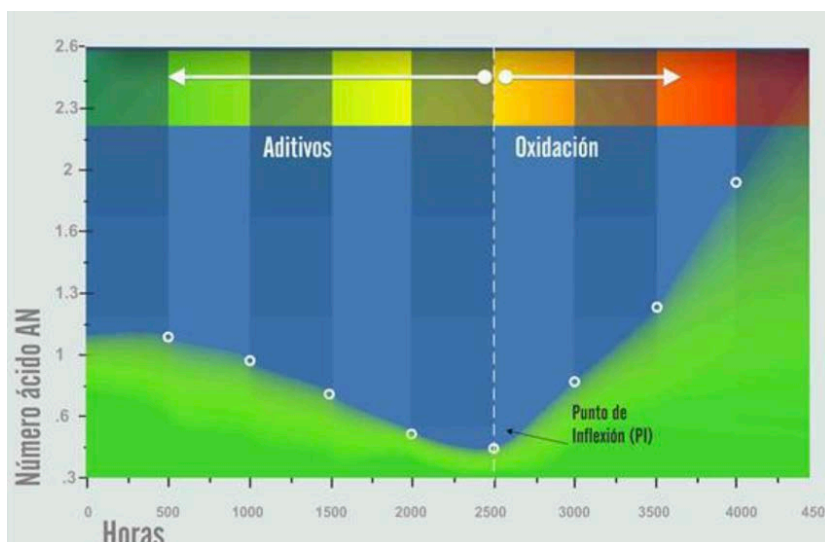


Figura 2-9: Tendencia del TAN de un aceite con aditivos [49]

Mantener un seguimiento constante de estos cambios es crucial para identificar de manera oportuna cualquier irregularidad que pueda afectar el funcionamiento y vida útil de los sistemas lubricados, motor y caja de cambios.

La determinación del número ácido es una práctica indispensable en la gestión de la integridad de los lubricantes. Una correcta interpretación de los resultados de número de la acidez total permite implementar acciones preventivas y correctivas, garantizando así la protección de los equipos y la prolongación de su vida útil.

En este estudio se consideran tanto el TAN como el TBN, dado que las normativas aplicables a los aceites analizados establecen valores para ambos parámetros, los cuales se identifican como buenos indicadores del envejecimiento del aceite, teniendo en cuenta el comportamiento descrito en la **Figura 2-9**.

Capítulo 2: Materiales y métodos

Las técnicas para evaluar el pH y el número de acidez total proporcionan perspectivas distintas sobre la naturaleza ácida o básica de un aceite. El ensayo de pH se refiere al pH aparente, señalando el riesgo corrosivo del aceite sin especificar las cantidades de agentes ácidos o alcalinos. Este análisis es vital para evitar daños por corrosión y resulta particularmente útil en ambientes con alto riesgo de contaminación o formación de ácidos agresivos. Por otra parte, las pruebas de TAN y Número Básico total (TBN), estudiado más adelante, miden las concentraciones de ácidos y bases, respectivamente. La evaluación del TAN y TBN es crucial en determinados aceites para analizar interacciones químicas, aunque estos índices no evalúan la fuerza de los componentes ácidos o alcalinos, limitando su indicación sobre la corrosividad del aceite. No obstante, TAN es más efectivo que el pH para la detección de ácidos débiles, que no se disocian completamente en agua, proporcionando una medida más precisa de los cambios en la concentración de ácidos débiles en el lubricante [56].

La especificación utilizada para la determinación del número de acidez total (TAN) en aceites lubricantes es la norma ASTM D 664-18: “Standard test method for Acid Number of Petroleum Products by Potentiometric Titration” [41]. Se trata de un método estándar para determinar el número de acidez de productos de petróleo mediante titulación potenciométrica. A continuación, en la **Tabla 2-9**, se presenta un resumen de esta información.

Tabla 2-9: Método estándar para la determinación del TAN en aceites lubricantes

Método de medición del	Descripción
TAN	
ASTM D 664-18	Método de laboratorio utilizado para medir el TAN en los aceites lubricantes.

Es importante destacar que, aunque existen otros métodos para la determinación del TAN, los resultados obtenidos con diferentes métodos no son comparables.

2.4.3.1 Materiales y reactivos utilizados

Para la determinación del número de acidez total (TAN), se emplearon los siguientes materiales y equipos:

- Valorador potenciométrico: Valorador 904 Titrande de Metrohm.
- Procesador automático de muestras: 814 USB Sample Processor de Metrohm.

Capítulo 2: Materiales y métodos

- Unidades de bombeo: 772 Pump Unit de Metrohm, conectadas a los procesadores de muestras.
- Ordenador: Intel® Core (TM) i5-8400 CPU @ con sistema operativo Windows 10 Pro, versión 1909, y software Office 2003 y Tiamo 3.0.
- Balanza granatario: Sartorius BP 150.
- Balanza analítica: Sartorius, con un rango de medida de 0-220 g, división de escala de 0,0001 g y una incertidumbre de 0,0003 g.
- Estufa de desecación.
- Estufa perspirométrica.
- Placa agitadora con agitadores magnéticos.
- Electrodo combinado: Solvotrodo 6.0229.100 para muestras no acuosas, relleno con bromuro de tetrametilamonio siguiendo las indicaciones del fabricante (en lugar de cloruro de litio, como indica la norma).
- Agitador de hélice.
- Unidad intercambiable de 10 mL.
- Vasos de precipitado de 150 mL.
- Bidones de polietileno para la adición y recogida del disolvente.
- Equipo de seguridad: guantes y gafas de protección.
- Los reactivos utilizados para la determinación del TAN fueron los siguientes:
- Hidróxido potásico en alcohol isopropílico 0,1 N.
- Disolvente TAN: mezcla de Tolueno/2-Propanol/Agua (100:9:1 v/v/v) según ASTM D 664 para análisis.
- Hidrogenoftalato de potasio.
- 2-propanol, anhidro.
- N-heptano.
- Electrolito TEABr, 0,4 mol/l.
- Tampones de pH 4, 7, 9 y 10.
- Patrones de TAN de 0,1 - 1,0 - 2,0 - 3,0 mg KOH/g.

Los materiales utilizados para la determinación del TAN han sido los siguientes:

- Valorador potenciométrico para la valoración potenciométrica de las muestras: Valorador 904 Titrand de Metrohm.

Capítulo 2: Materiales y métodos

- para el tratamiento automático de las muestras: 814 USB Sample Processor de Metrohm.
- para conectar directamente a los procesadores de muestras: dos 772 Pump Unit de Metrohm.
- Ordenador Intel® Core (TM) i 5-8400 CPU @.
- Software: Windows 10 Pro version 1909, OFFICE 2003 y Tiamo 3.0.
- Granatario “Sartorius, BP 150”.
- Balanza analítica Sartorius con un rango de medida: 0-220 g, una división de escala de 0,0001 g y una incertidumbre de uso de 0,0003 g.
- Estufa de desecación.
- Estufa perspirometro.
- Placa agitadora y agitadores magnéticos.
- Electrodo Combinado Solvotrodo 6.0229.100, para muestras no acuosas (siguiendo indicaciones del fabricante se rellenarán con bromuro de tetrametilamonio, en lugar de cloruro de litio como se indica en la norma).
- Agitador de hélice.
- Unidad intercambiable de 10 mL.
- Vasos de precipitado de 150 mL.
- 2 bidones de polietileno para adición y recogida del disolvente.
- Guantes y gafas de protección.

Y los reactivos utilizados para la determinación de los TAN:

- Hidróxido potásico en alcohol isopropílico 0,1 N.
- Disolvente TAN: Tolueno/2-Propanol/Agua 100:9:1 v/v/v según ASTM D 664 para análisis.
- Hidrogenoftalato de potasio.
- 2-propanol, anhidro.
- N-heptano.
- Electrolito TEABr 0,4 mol/l.
- Tampones de pH 4, 7, 9 y 10.
- Patrones de TAN de 0,1 - 1,0 - 2,0 y 3,0 mg KOH/g.

2.4.3.2 Equipo utilizado

El equipo utilizado para la determinación del número de acidez total ha sido el valorador potenciométrico “904 Titrando” de Metrohm, **Figura 2-10**, el cual tiene unas características técnicas que permiten una alta sensibilidad y precisión del dispositivo para mediciones potenciométricas, especialmente en aplicaciones donde se requiere una medición precisa del pH o de iones específicos.



Figura 2-10: *Equipo utilizado para medir el número de acidez total*

La alta resistencia de entrada asegura que el dispositivo puede manejar electrodos con altas impedancias, mientras que la baja corriente de desplazamiento minimiza los errores en la medición. El dispositivo está diseñado para manejar diversas aplicaciones de medición gracias a su alta resistencia de entrada y baja corriente de desplazamiento, lo que asegura mediciones precisas y consistentes, incluso con electrodos de altas impedancias [57].

En el modo de potenciometría, el dispositivo cuenta con una entrada de medida de alta impedancia para electrodos pH, de metal o ion-selectivos, y una entrada de medida (Ref.) para electrodos de referencia separados. Esto permite medir el pH con una resolución de 0,001 pH y una exactitud de $\pm 0,003$ pH en un rango de -13 a +20. También es capaz de medir voltajes en un rango de -1.200 a +1.200 mV, con una resolución de 0,1 mV y una exactitud de $\pm 0,2$ mV.

Para las mediciones de temperatura, el dispositivo incluye una entrada de medida de alta impedancia similar a la utilizada en la potenciometría. Con un rango de medida para

Capítulo 2: Materiales y métodos

sensores Pt1000 de -150 a +250 °C, una resolución de 0,1 °C y una exactitud de $\pm 0,2$ °C, garantiza lecturas precisas y fiables.

El dispositivo también está equipado con un polarizador para medir la corriente y el voltaje de polarización. En el modo de medida Ipol (Corriente de Polarización), ofrece un rango de medición de -122,5 a +122,5 μA , con incrementos de 0,5 μA y una resolución de 0,1 mV, manteniendo una exactitud de $\pm 0,2$ mV. En el modo Upol (Voltaje de Polarización), permite un voltaje de polarización de -1225 a +1225 mV, con incrementos de 25 mV, y mide corrientes en el rango de -120 a +120 μA , con una resolución de 0,1 μA .

Adicionalmente, el dispositivo incorpora un dosificador interno con cilindros intercambiables que pueden manejar volúmenes de 1 mL, 5 mL, 10 mL, 20 mL o 50 mL, con una resolución de 20.000 pasos por volumen del cilindro.

En cuanto a las condiciones operativas, el dispositivo funciona óptimamente en un rango de temperatura ambiente de +5 a +45 °C, con las mismas especificaciones para almacenamiento. Las condiciones de referencia para medición se mantienen a una temperatura ambiente de +25 °C (± 3 °C) y una humedad relativa del aire de hasta el 60 %.

2.4.3.3 Preparación de la muestra

La preparación de la muestra es tan importante como el análisis mismo. Antes de proceder con cualquier forma de análisis químico y para asegurar la máxima precisión en la determinación del TAN, la homogeneización de la muestra es un paso crítico. Es necesario agitar vigorosamente la muestra para suspender cualquier sedimento presente, ya que estos sedimentos pueden alterar los resultados del análisis si no se distribuyen homogéneamente, dado que pueden ser ácidos o básicos, o contener compuestos que afecten la medición del TAN.

En situaciones donde la viscosidad del lubricante impide una mezcla adecuada a temperatura ambiente, se debe aplicar calor con cautela y control para no alterar las propiedades químicas de la muestra. Esta técnica facilita la disolución de sedimentos más tenaces y promueve una mezcla homogénea que refleje con exactitud la composición del lubricante.

Para llevar a cabo el ensayo y determinar el TAN de las muestras se siguió el procedimiento operativo del LCE: PROCOPER 4.108 Ed 11^a [58]. La duración del ciclo

de medida es de 100 ms, ofreciendo resultados rápidos y fiables en todos los modos de medida.

2.4.3.4 Límites de degradación del aceite basados en el TAN

La estabilidad y eficacia de los lubricantes son determinadas en gran medida por su composición química y la presencia de aditivos. El TAN es un indicador crítico para definir la degradación del aceite.

Los lubricantes formulados con aditivos que contienen compuestos ácidos experimentan un comportamiento característico que consiste en que su número de acidez total disminuye gradualmente desde el inicio de su vida útil. Sin embargo, llega un momento en el que se alcanza un punto de inflexión donde la tendencia se revierte y el TAN comienza a subir (**Figura 2-9**). Este comportamiento no solo refleja la pérdida de eficacia de los aditivos contra la oxidación, sino que también marca el inicio de un proceso de degradación mucho más rápido y potencialmente dañino para el aceite.

Para garantizar una gestión efectiva de la salud del aceite se define un número de acidez total de referencia. Este valor de referencia sirve como punto de comparación a lo largo del tiempo (**Tabla 2-10**). La determinación del número de acidez total a lo largo de la vida útil del aceite proporciona información sobre la estabilidad oxidativa del aceite y la presencia de contaminantes. Por tanto, un aumento por encima del valor de número de acidez total de referencia establecido, indica que el aceite está experimentando una oxidación a un ritmo acelerado o está contaminado con productos ácidos. Tales cambios son advertencias tempranas de que el aceite, y potencialmente los motores y cajas de cambio, están en riesgo. Los límites establecidos en el presente estudio son los que aparecen en la siguiente **Tabla 2-10**.

Tabla 2-10: Límites del TAN del O-1236 y O-1178

Tipo de aceite	Especificación del aceite	TAN (mg KOH/g)		
		Normal	Precaución	Alarma
O-1236	Máximo 9	<3	3,1-3,5	>3.6
O-1178	Informar	<3	3.1-3.5	>3.6

2.4.3.5 Análisis físico químico y medición

La prueba de TAN es fundamentalmente una prueba de neutralización. Se lleva a cabo añadiendo compuestos alcalinos al lubricante hasta alcanzar un punto neutro, lo que revela la cantidad de ácidos presentes. El resultado se expresa en miligramos de hidróxido de potasio (KOH) requeridos para neutralizar los ácidos en un gramo de aceite, ofreciendo una unidad de medida estándar [mg KOH/g de aceite].

2.4.3.6 Cálculo del número de acidez total (TAN)

Para determinar el número de acidez total de un aceite usado, se añade una solución titulante alcalina de conocida concentración (generalmente hidróxido de potasio, KOH) a la muestra disuelta hasta que se alcanza el punto final de la titulación. Un potenciómetro que mide el cambio de pH se utiliza para identificar este punto. Un cambio repentino en el potencial eléctrico (voltaje) de la solución a menudo indica que todos los ácidos han reaccionado con la base, lo que indica el punto final.

El número total de ácido se calcula utilizando la cantidad de titulante consumido para neutralizar los ácidos presentes en la muestra. La fórmula general es la indicada en la **Ecuación 2-3**:

$$TAN = \frac{V \cdot N \cdot 56,1}{W} \quad \text{Ecuación 2-3}$$

Donde:

- V es el volumen de KOH utilizado en la titulación (en mililitros).
- N es la normalidad del KOH.
- 56,1 es el peso equivalente del KOH (en mg por equivalente de ácido).
- W es el peso de la muestra de aceite (en gramos).

2.4.3.7 Limpieza y Mantenimiento

Después de cada medición del número de acidez total, es esencial limpiar el equipo para evitar la contaminación de futuras muestras. El mantenimiento regular del equipo es crucial para garantizar la precisión y fiabilidad de las mediciones según las recomendaciones del fabricante.

2.4.4 Número de basicidad total (TBN)

El número de basicidad total (TBN del inglés), mide la concentración de aditivos alcalinos en el aceite [49], esenciales para contrarrestar los ácidos generados durante la combustión y prevenir la corrosión en los componentes internos del motor, prolongando su vida útil. Un TBN elevado indica una mayor reserva alcalina, capaz de neutralizar una cantidad significativa de ácidos, lo que es crucial en motores que operan bajo condiciones severas. Los aceites lubricantes nuevos poseen un TBN alto debido a los aditivos alcalinos como detergentes y dispersantes, pero este valor disminuye con el uso, ya que neutraliza los ácidos producidos por la combustión y reacciones de oxidación.

Excepcionalmente, el TBN puede incrementarse al añadir lubricante nuevo con alto TBN a un sistema con aceite parcialmente degradado, como se muestra en la **Figura 2-11**. Identificar y entender estas excepciones es esencial para la correcta interpretación de los resultados de TBN y para decisiones de mantenimiento de maquinaria. El control regular del TBN es fundamental para evaluar la eficacia de la reserva alcalina del aceite y su capacidad para proteger el motor o la caja de cambios contra la corrosión.

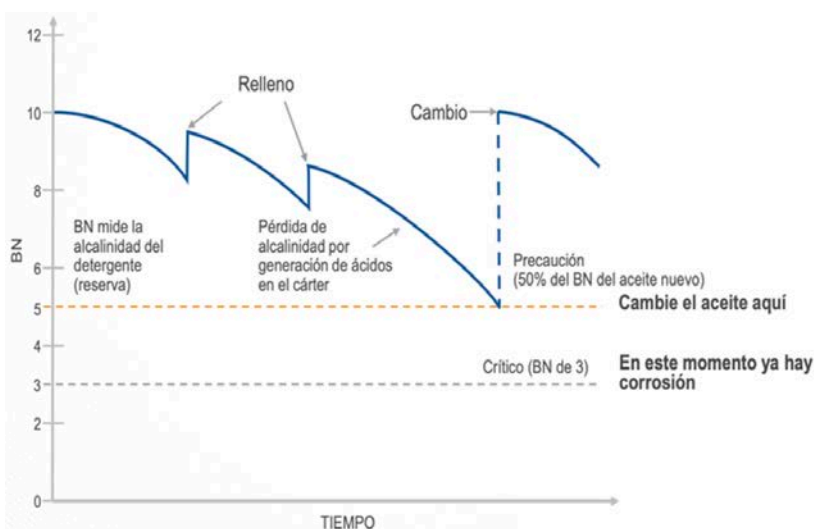


Figura 2-11: Evolución del TBN y posibles modificaciones en sus valores [11]

El TBN y TAN son indicadores complementarios en el análisis de aceites. Mientras que el TBN mide la capacidad alcalina del aceite, el TAN evalúa su nivel de acidez. Ambos se expresan en las mismas unidades (mg KOH/g de aceite) y son esenciales para determinar la condición general del lubricante.

Para medir el TBN en aceites lubricantes, es esencial escoger y mantener la consistencia en el método de laboratorio empleado. A continuación, **Tabla 2-11**, se muestra una comparación de los métodos de medición más habituales, destacando la

Capítulo 2: Materiales y métodos

especificación empleada en este estudio y la relevancia de mantener la consistencia en los procedimientos para garantizar la confianza y comparabilidad de los resultados.

Tabla 2-11: *Métodos estándar para la determinación del TBN en aceites lubricantes*

Método de medición	Descripción
ASTM D2896	Método de laboratorio utilizado para medir el TBN en los aceites lubricantes.
ASTM D4739	Otro método de determinación del TBN. Aunque también se utiliza para medir el TBN, los resultados obtenidos no son comparables con los del ASTM D2896.

El método de laboratorio utilizado para medir el TBN en los aceites lubricantes ha sido: ASTM D2896-21 [59].

2.4.4.1 Materiales y reactivos utilizados

Los materiales utilizados para la determinación del TBN incluyen varios equipos y reactivos específicos. Para la valoración potenciométrica de las muestras se utilizó un valorador 904 Titrande de Metrohm, mientras que el tratamiento automático de las muestras se llevó a cabo con un 814 USB Sample Processor, también de Metrohm. Este procesador de muestras se conectó directamente mediante dos unidades de bomba 772 Pump Unit de Metrohm. Además, se empleó un ordenador con procesador Intel® Core (TM) i 5-8400 CPU y software Windows 10 Pro, OFFICE 2003, y Tiamo 3.0 para el manejo de datos y control de los equipos.

En cuanto a los instrumentos de medición, se utilizó una granatario Sartorius, modelo BP 150, y una balanza analítica también de Sartorius para las mediciones precisas de masa. Las muestras fueron tratadas en una estufa de desecación a 120 °C para quitar la humedad y una estufa para mantener los patrones de pH a 25 °C. Para agitar las soluciones, se emplearon una placa agitadora y agitadores magnéticos, además de un agitador de hélice para casos específicos. El electrodo combinado Solvotrodo 6.0229.100 fue utilizado para muestras no acuosas, siguiendo las indicaciones del fabricante para rellenarlo con bromuro de tetrametilamonio en lugar de cloruro de litio, como se sugiere en la norma.

Adicionalmente, se utilizaron una unidad intercambiable de 20 mL y vasos de precipitado de 150 mL. Para el manejo de disolventes, se dispusieron dos bidones de

Capítulo 2: Materiales y métodos

polietileno para la adición y recogida del disolvente. La seguridad del personal se aseguró mediante el uso de guantes y gafas de protección.

Los reactivos utilizados para la determinación de los TBN fueron diversos. Entre ellos se incluyó ácido perclórico (HClO_4) en acético glacial 0,1 N, disolvente TBN (Clorobenceno/ Ácido Acético 2:1 según ASTM D2896 para análisis), hidrogenoftalato de potasio, y n-heptano. Además, se utilizó electrolito cloruro de litio a una concentración de 2 mol/l, así como tampones de pH 4 y 7 para la calibración del equipo. Para la verificación del procedimiento, se emplearon patrones de TBN de 10 mg KOH/g.

2.4.4.2 Equipo utilizado

La determinación del TBN se realizó con el valorador potenciométrico 904 Titrande de Metrohm (**Figura 2-12**). Este equipo se caracteriza por su alta sensibilidad y precisión, siendo perfecto para mediciones potenciométricas precisas, especialmente en aplicaciones que requieren la medición exacta de pH o de iones específicos.



Figura 2-12: Equipo utilizado en la determinación del TBN

La alta resistencia de entrada asegura que el dispositivo puede manejar electrodos con altas impedancias, mientras que la baja corriente de desplazamiento minimiza los errores en la medición. El dispositivo está equipado con las siguientes interfaces de medidas [57].

Comenzando con la potenciometría, este modo, cuenta con una entrada de medida de alta impedancia para electrodos pH, de metal o ion-selectivos, y una entrada de medida separada para electrodos de referencia. La resistencia de entrada supera los $1.10^{12} \Omega$ y la corriente offset es menor a 1.10^{-12} A , lo que garantiza mediciones exactas y

Capítulo 2: Materiales y métodos

consistentes. En el modo de medida de pH, el rango de medida va de -13 a +20 con una resolución de 0,001 pH y una exactitud de $\pm 0,003$ pH. En el modo de medida de voltaje, el rango de medida es de -1200 a +1200 mV, con una resolución de 0,1 mV y una exactitud de $\pm 0,2$ mV.

En cuanto a la medición de temperatura, el dispositivo posee una entrada de medida de alta impedancia para electrodos pH, de metal o ion-selectivos, y una entrada de medida para electrodos de referencia. El rango de medida para Pt1000 es de -150 a +250°C, con una resolución de 0,1 °C y una exactitud de $\pm 0,2$ °C.

El equipo también incluye un polarizador, con una entrada de medición para electrodos polarizables. En el modo de medida I_{pol} (Corriente de Polarización), el rango de medición es de -122,5 a +122,5 μ A, con incrementos de 0,5 μ A, una resolución de 0,1 mV y una exactitud de $\pm 0,2$ mV. En el modo de medida U_{pol} (Voltaje de Polarización), el voltaje de polarización varía de -1225 a +1225 mV en incrementos de 25 mV, con un rango de medida de -120 a +120 μ A y una resolución de 0,1 μ A.

Adicionalmente, el dispositivo cuenta con un dosificador interno, con volúmenes de cilindro intercambiables de 1 mL, 5 mL, 10 mL, 20 mL o 50 mL, y una resolución de 20.000 pasos por volumen de cilindro. La temperatura ambiente para el funcionamiento del equipo varía entre +5 y +45 °C, y las condiciones de almacenamiento también se sitúan en ese rango. Las condiciones de referencia incluyen una temperatura ambiente de +25°C (± 3 °C) y una humedad relativa del aire de hasta un 60%.

2.4.4.3 Preparación de la muestra

La preparación de la muestra es tan esencial como el propio análisis, especialmente al determinar valores tan importantes como el número de basicidad total (TBN). Antes de comenzar cualquier análisis químico, es crucial que la muestra sea representativa de la sustancia que se va a estudiar. Por esta razón, la homogeneización asegura que todas las partes de la muestra se mezclen hasta lograr una composición uniforme. Este proceso es vital, ya que cualquier variación en la distribución de los componentes dentro de la muestra puede conducir a resultados incorrectos o inconsistentes. Los sedimentos pueden contener compuestos que reaccionen durante el análisis y alteren el valor real del TBN. Por lo tanto, una dispersión homogénea es indispensable para que los resultados reflejen con precisión la composición química de la muestra.

La técnica de homogeneización empleada ha sido la agitación vigorosa, una acción crucial para suspender los sedimentos presentes en la muestra. Estos sedimentos, si no se distribuyen de manera uniforme, pueden alterar significativamente los resultados del análisis y enmascarar su impacto en la medición del TBN.

2.4.4.4 Límites de degradación del aceite basados en el TBN

El ensayo para la determinación del número de basicidad total (TBN) en los lubricantes es una tarea que debe llevarse a cabo con precisión y cuidado, considerando siempre las especificaciones técnicas proporcionadas por los fabricantes de motores. Establecer límites claros para el TBN es fundamental para garantizar la salud del motor y la eficiencia del lubricante a lo largo del tiempo. En esta memoria, los límites se han establecido a partir de las especificaciones militares de los dos tipos de aceites estudiados (O-1236 y O-1178).

Los fabricantes de motores establecen, a través de estudios detallados y ensayos, límites de alerta y mínimos para el TBN de los aceites lubricantes. Dichos límites son esenciales, ya que marcan el punto en el que el aceite ya no cuenta con la capacidad necesaria para neutralizar los ácidos producidos en la combustión o en otro tipo de reacciones, situación que podría desencadenar corrosión y un desgaste prematuro del motor y de la caja de cambios.

Para establecer los límites mínimos de precaución y alarma específicos para la gestión del TBN se han utilizado los valores mínimos que determina las normas militares de los aceites analizados: la norma americana MIL-PRF-2104M (para aceite de motor con código OTAN O-1236) y la norma alemana TL 9150-0080 (para el aceite de la caja de cambios con código OTAN O-1178) establecidos en la **Tabla 2-12**. En dicha tabla, se puede observar que en la especificación TL 9150-0080 para el aceite O-1178 no se define un valor límite concreto, sino que se limita a solicitar la notificación de los resultados. Esto sugiere la necesidad de usar el valor del aceite nuevo como punto de partida y analizar su progresión. Como eso no se ha podido hacer para cada uno de los aceites analizados, se han establecido los mismos límites establecidos para el O-1236.

Capítulo 2: Materiales y métodos

Tabla 2-12: Límites del TBN del O-1236 y O-1178

Tipo de aceite	Especificación	TBN (mg KOH/g)		
		Normal	Precaución	Alarma
O-1236	Mín. 4	>6	5-5,9	<4,9
O-1178	Informar	>6	5-5,9	<4,9

A medida que el lubricante es utilizado, es normal que el TBN disminuya debido al agotamiento de los aditivos alcalinos. Una vez que el TBN alcanza el límite de precaución establecido, es una señal clara de que es necesario realizar un mantenimiento o incluso cambiar el aceite para prevenir daños al motor y caja de cambios.

En el caso de establecer una línea base a partir de un aceite nuevo y estudiar su evolución, una disminución del 50% en el valor inicial del TBN, debe interpretarse como una señal de alarma que advierte sobre un posible deterioro significativo en la composición y efectividad del paquete de aditivos del lubricante [49].

El estudio de la evolución del número básico total aporta información a la hora de hacer un análisis predictivo tal y como se indica en la **Tabla 2-13**.

Tabla 2-13: Factores que afectan al valor del TBN[11]

Incremento del TBN	Disminución del TBN
Relleno con aceite nuevo.	Dilución por agua/combustible.
Relleno con un aceite que tenga un alto TBN.	Reacción con productos ácidos de la combustión.
Pérdida de los volátiles del aceite base.	Adición de aceite de relleno no alcalino.
Contaminación con ciertas formulaciones de anticongelantes.	Ingreso de contaminantes del ambiente (ácidos).
Adición de aditivos suplementarios alcalinos.	Degradación térmica/oxidación del aceite.

Esto mismo se puede ver representado en la siguiente gráfica que aparece en la **Figura 2-13** en la que se aprecia cómo varía el valor del TBN en función de diversos factores.

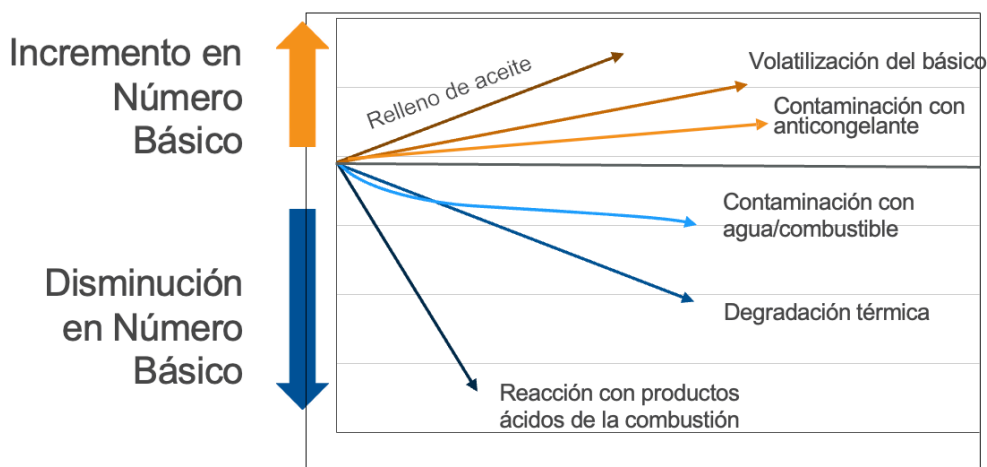


Figura 2-13: Evolución del TBN por factores externos [11]

2.4.4.5 Análisis físico químico y medición

La evaluación del TBN se realiza mediante pruebas de neutralización. Durante estas pruebas, se añaden compuestos ácidos al aceite hasta alcanzar un equilibrio neutral. La cantidad de ácido necesaria para lograr este equilibrio indica el TBN del lubricante. Las técnicas más comunes para esta medición incluyen la titulación colorimétrica y la potenciométrica, siendo esta última la utilizada en el estudio por la opacidad del aceite de motor. La titulación potenciométrica, implica la adición de un compuesto ácido, generalmente ácido clorhídrico o ácido perclórico, hasta alcanzar un punto de neutralización. Los resultados se expresan en miligramos de KOH por gramo de aceite (mg KOH/g de aceite), una medida que indica el volumen de KOH necesario para neutralizar los ácidos presentes en el lubricante.

La medición y seguimiento del número de basicidad total son fundamentales para controlar la salud y eficiencia del lubricante. Un TBN adecuado asegura una protección efectiva contra la corrosión y el desgaste tanto del motor como de la caja de cambios. Los lubricantes para motores de combustión interna requieren una atención particular en este sentido, ya que están más expuestos a la generación de ácidos durante su funcionamiento. La precisión en la medición es vital para evitar resultados erróneos y tomar correctas decisiones sobre el mantenimiento del motor y de la caja de cambios.

2.4.4.6 Cálculo del número de basicidad total

Para determinar el número de basicidad total, se añade una solución titulante ácida de conocida concentración (HClO_4) a la muestra disuelta hasta alcanzar el punto final de

Capítulo 2: Materiales y métodos

la titulación. Este punto final se detecta mediante un potenciómetro que mide el cambio de pH o mediante un indicador de color. El punto de cambio abrupto en el potencial eléctrico indica que todos los componentes básicos han reaccionado con el ácido.

Se ha utilizado el método B de la especificación ASTM D2896 para del cálculo del número básico y para ello se utiliza la siguiente **Ecuación 2-4**:

$$TBN = \frac{[V - B] \cdot N \cdot 56,1}{W} \quad \text{Ecuación 2-4}$$

Donde:

- V es el volumen de HClO_4 utilizado para titular la muestra hasta punto de inflexión, mL.

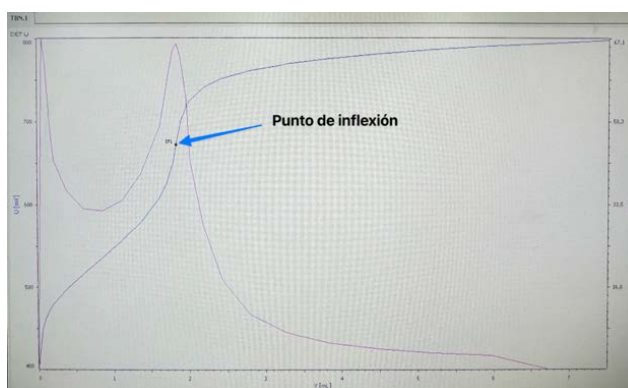


Figura 2-14: Punto de inflexión en la titulación de la muestra

- B es el volumen de HClO_4 utilizado para la valoración en blanco, mL.
- N es la normalidad del HClO_4 .
- W es el peso de la muestra de aceite, g

2.4.4.7 Limpieza y Mantenimiento

Después de cada medición del número de basicidad total, es esencial limpiar el equipo para evitar la contaminación de futuras muestras. El mantenimiento regular del equipo es crucial para garantizar la precisión y fiabilidad de las mediciones según las recomendaciones del fabricante.

2.4.5 Análisis de elementos de desgaste

La espectroscopía de emisión atómica con electrodo de disco rotatorio (RDE-AES del inglés: Rotating Disc Electrode-Atomic Emission Spectroscopy) es un método

Capítulo 2: Materiales y métodos

avanzado de ensayo que permite identificar y cuantificar la presencia de elementos metálicos disueltos y no disueltos en el aceite. Este método es particularmente sofisticado porque no solo detecta la presencia de estos metales, sino que también determina sus niveles de concentración. De este modo ofrece una radiografía precisa del estado de los aceites lubricantes ayudando al especialista que analiza los resultados a tomar decisiones con mayor precisión ya que hace una determinación cuantitativa tanto de metales de desgaste como de posibles contaminantes.

Este tipo de análisis permite controlar el desgaste de los componentes metálicos que lubrica, ya que la presencia de elementos metálicos específicos en el aceite puede indicar erosión o degradación de ciertas partes. Este método también es valioso para asegurar la calidad del propio aceite, lo cual es esencial para el funcionamiento óptimo del motor y la caja de cambios.

El seguimiento de los elementos metálicos mediante la espectrometría es fundamental para mantener la eficiencia y alargar la vida útil de los motores y cajas de cambio de los vehículos. Esta técnica permite identificar no solo los metales de desgaste procedentes del equipo al que lubrica, sino también aquellos contaminantes que pueden afectar significativamente el rendimiento del lubricante. Conocer la metalurgia de la máquina ayuda a entender la metalurgia de las partículas de desgaste (**Figura 2-15**) aunque esto no siempre es posible ya que las empresas, bien por intereses comerciales o por otros motivos, no informan de la composición metalúrgica de los motores y cajas de cambios.

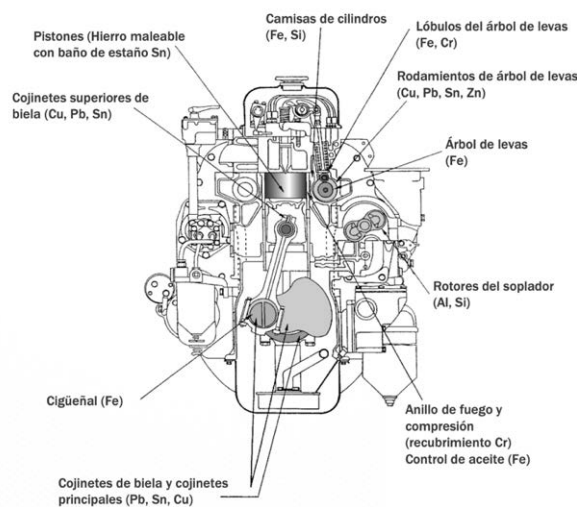


Figura 2-15: Metalurgia de un motor Detroit Diesel Allison 3-53 [11]

Capítulo 2: Materiales y métodos

El método de análisis RDE-AES tiene la capacidad de ofrecer resultados de forma rápida por lo que actúa como un indicador precoz de desgaste anormal y de la contaminación en lubricantes, tanto nuevos como usados. Esta rapidez en la detección es esencial para evitar el deterioro de los sistemas mecánicos estudiados: motores y cajas de cambios. Esta técnica es eficaz para analizar desde materiales disueltos hasta partículas de tamaño considerable, aproximadamente de 10 μm [60], lo cual amplía su rango de aplicación en diferentes contextos.

El análisis de aceites lubricantes usados a través de la espectroscopía de emisión atómica con electrodo de disco rotatorio (RDE-AES) proporciona una visión integral del estado de desgaste de las máquinas y ofrece una advertencia temprana sobre anomalías y contaminaciones potencialmente perjudiciales.

Este método destaca por su capacidad para detectar rápidamente y con precisión el desgaste anormal y la presencia de contaminantes en los lubricantes usados, lo cual es esencial para tomar medidas correctivas antes de que se produzcan daños mayores. Esta evaluación es crucial para prevenir fallos inesperados en equipos y para planificar mantenimientos preventivos, resultando en un ahorro significativo de tiempo y recursos, y garantizando un funcionamiento más eficiente y seguro de los equipos [49,60].

El mecanismo de desgaste en cualquier componente mecánico es un fenómeno complejo que varía significativamente dependiendo de múltiples factores, tales como el tipo de material, las condiciones de trabajo y la presencia de contaminantes. A medida que este desgaste se intensifica, es común observar un incremento en el tamaño de las partículas generadas tal y como se indica en la **Figura 2-16**. Esta correlación es un indicativo valioso que puede ayudar en la detección temprana de fallos potenciales, permitiendo la implementación de acciones correctivas antes de que el daño sea irreparable.

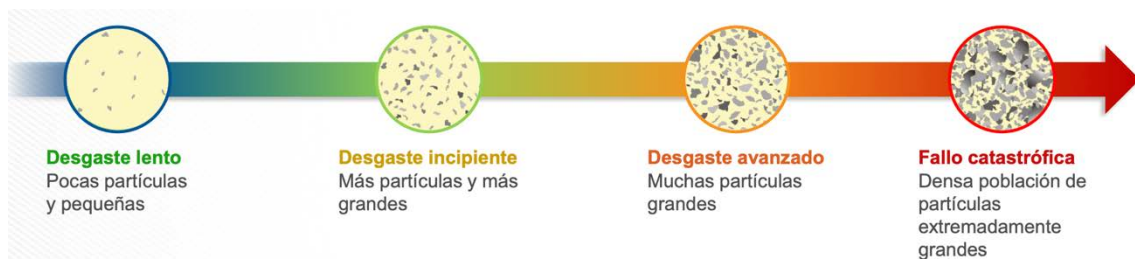


Figura 2-16: Crecimiento de las partículas de desgaste mecánico [11]

Aunque la espectrometría RDE-AES es una herramienta muy útil en el análisis de elementos de desgaste ya que presenta la capacidad de identificar diferentes elementos

Capítulo 2: Materiales y métodos

químicos en las muestras de aceite usado, tiene una limitación notable: su eficacia disminuye significativamente en la detección de partículas de mayor tamaño ya que no es capaz de detectar partículas de tamaño mayor de 10 μm . Por tanto, no podría detectar, por ejemplo, el fallo por fatiga de un componente metálico. Esta limitación se debe a la naturaleza del método de análisis, que está optimizado para identificar y cuantificar partículas finas y microscópicas, pero no aquellas que superan cierto umbral de tamaño.

Tal y como se indica en la **Figura 2-17**, aunque la detección de partículas de mayor tamaño es crucial en la evaluación del estado de desgaste de la maquinaria ya que pueden ser indicativas de problemas serios que requieren atención inmediata, su identificación temprana también es esencial para prevenir daños mayores en los componentes mecánicos y para planificar adecuadamente las tareas de mantenimiento y reparación.

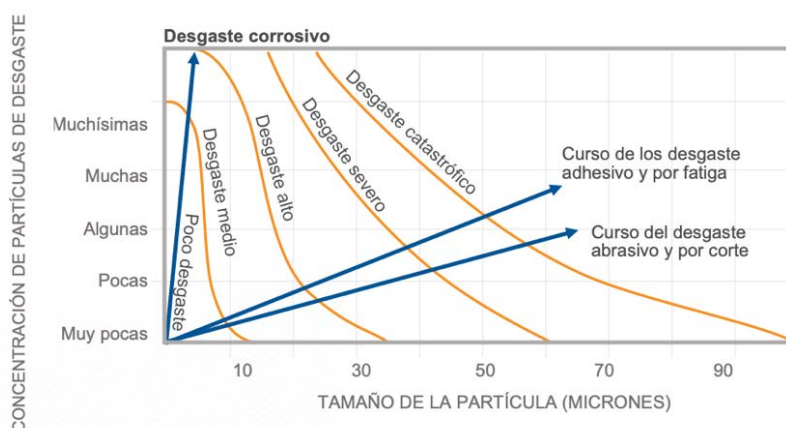


Figura 2-17: Tipo de desgaste en función del número de la concentración de partículas y su tamaño [11]

El método de laboratorio utilizado para medir y cuantificar los elementos de desgaste es la especificación americana: ASTM D 6595:22: “Standard test method for determination of wear metals and contaminants in used lubricating oils or used hydraulic fluids by rotating disc electrode atomic emission spectrometry” [60]. Se muestra un resumen de esta información en la **Tabla 2-14** que sigue:

Tabla 2-14: Método estándar para la determinación de elementos de desgaste y contaminantes en aceites lubricantes

Método de medición	Descripción
ASTM D 6595	Método estándar para la determinación de metales de desgaste y contaminantes en aceites lubricantes usados o fluidos hidráulicos usados mediante espectrometría de emisión atómica con electrodo de disco rotatorio.

2.4.5.1 Materiales y reactivos utilizados

Para la realización de este ensayo, es necesario la utilización de una serie de reactivos y materiales específicos, cuyas características y aplicaciones son cruciales para la precisión y validez de los ensayos realizados [60]:

- **Aceite base:** Este es un aceite con viscosidad de 75 cSt sin analitos, utilizado como blanco de calibración o para preparar estándares de calibración. Es esencial para asegurar que el proceso de calibración sea preciso y confiable.
- **Muestras de comprobación:** Son muestras o estándares de aceite con una concentración conocida, analizadas periódicamente para verificar si se requiere normalización, basado en un límite de precisión del $\pm 10\%$. Este paso es crucial para mantener la integridad de los resultados del experimento.
- **Solución limpiadora:** Un solvente seguro medioambientalmente, no clorado y de evaporación rápida que no deja residuos, diseñado para limpiar derrames o salpicaduras de aceite del soporte de muestras. Esto asegura que el montaje experimental permanezca sin contaminación.
- **Electrodo de disco de grafito:** Un electrodo de disco de grafito de grado espectroscópico, cuyas dimensiones deben coincidir con las especificadas en la **Figura 2-18**. El uso de materiales de alta pureza es vital para obtener lecturas espectroscópicas precisas.

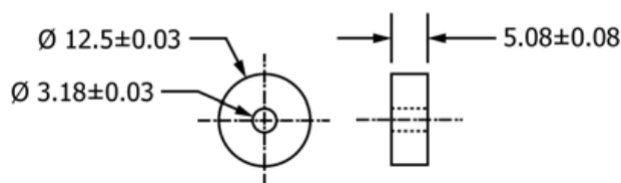


Figura 2-18: Dimensiones del electrodo de disco de grafito [60]

- **Solución limpiacristales:** Específicamente formulada para limpiar y remover muestras de aceite de la ventana de cuarzo que protege la lente de entrada y la fibra óptica. Los limpiadores a base de alcohol isopropílico o amoníaco son efectivos para este propósito, asegurando que los componentes ópticos permanezcan claros para mediciones precisas.

2.4.5.2 Equipo utilizado

El equipo utilizado para detectar y cuantificar los elementos de desgaste en lubricantes es un espectrómetro de emisión atómica de electrodo de disco giratorio. Este equipo, un Spectroil M/N, consta de varios componentes esenciales para su operación: una fuente de excitación, una óptica policromadora y un sistema de lectura, como se muestra en la **Figura 2-19**. Estos elementos trabajan en conjunto para realizar un análisis detallado de los aceites, permitiendo detectar partículas metálicas y otros elementos de desgaste presentes en el fluido.

El equipo requiere consumibles específicos para su funcionamiento, incluyendo cápsulas porta muestras y electrodos. Estos consumibles son fundamentales para la operación continua del espectrómetro, ya que el electrodo de disco giratorio permite que el aceite se coloque entre los contraelectrodos, facilitando la emisión de líneas espectrales de los elementos presentes en la muestra.



Figura 2-19: Espectrómetro de emisión atómica de electrodo de disco giratorio cerrado (izquierda) y abierto (derecha)

2.4.5.3 Preparación de la muestra

La preparación adecuada de las muestras de aceite usado es fundamental para obtener resultados fiables y representativos. Esta etapa preparatoria incluye varios procedimientos que garantizan la correcta homogeneización de la muestra y su disposición para el análisis. La homogeneización de las muestras de aceite usado es un paso previo indispensable para asegurar su representatividad. Dado que las muestras pueden contener partículas y sedimentos, es necesario agitarlas vigorosamente antes de tomar una porción para el análisis. Este procedimiento garantiza que las partículas se distribuyan uniformemente en toda la muestra, eliminando posibles sesgos en los resultados del análisis [60].

Para las muestras que han estado en tránsito durante varios días, almacenadas por períodos prolongados, o que presentan una alta viscosidad, la homogeneización ultrasónica es una solución eficaz. Este método utiliza un baño ultrasónico calentado, que facilita la disgregación de cúmulos de partículas y las reincorpora en suspensión. La temperatura del baño debe alcanzar al menos 60 °C y la agitación debe durar un mínimo de 2 minutos. Este procedimiento asegura una homogeneización profunda y efectiva, preparando la muestra para un análisis detallado y fiable [60]. Antes del análisis, las muestras de aceite usado y los patrones de aceite deben verterse en porta muestras con una capacidad mínima de 1 mililitro. Para garantizar una repetibilidad adecuada del análisis, es importante verter la muestra al mismo nivel en los porta muestras. Además, la mesa de la probeta debe ajustarse de manera que, cuando esté completamente elevada, al menos un tercio del electrodo de disco esté sumergido en la muestra de aceite para el análisis [60].

2.4.5.4 Límites de degradación del aceite basados en lo elementos de desgaste

Mediante la técnica espectrométrica utilizada, se identifican trazas metálicas que son indicativas del estado de desgaste de las superficies en contacto. Los metales comúnmente detectados incluyen hierro, plata, aluminio, cromo, cobre, silicio, estaño, níquel y plomo. La presencia y concentración de estos elementos metálicos en el lubricante pueden ser un claro indicador de desgaste anormal.

La detección y cuantificación de estos metales busca comprender la dinámica de desgaste dentro de la maquinaria: motor y caja de cambios de los carros de combate, que está siendo lubricada por el correspondiente aceite. La presencia de concentraciones inusuales de cualquier metal puede ser la señal de alerta que precede a fallos mecánicos tal y como se indicaba en la **Figura 2-16** y en la **Figura 2-17**. Por ejemplo, niveles elevados de hierro pueden sugerir un desgaste acelerado en piezas como camisas de los pistones de los motores o engranajes en cajas de cambio.

Conocer la composición de las superficies metálicas que están en contacto permite a los técnicos diagnosticar con mayor precisión qué componente específico podría estar fallando. Esto es posible porque cada metal detectado en el análisis espectrométrico está asociado a distintas partes de la maquinaria como se muestra en la **Figura 2-15**. Por tanto,

Capítulo 2: Materiales y métodos

un perfil metálico anómalo en el análisis puede ser la indicación o la pista que dirija a los técnicos hacia la fuente exacta del problema [14].

El análisis espectrométrico utilizado en el presente estudio no solo se utiliza como método para la detección y cuantificación, sino que es una herramienta muy destacable del mantenimiento predictivo. Tal y como ya se dijo en la primera parte de este trabajo, esta práctica es fundamental para planificar intervenciones de mantenimiento antes de que ocurran fallos más graves o catastróficos, asegurando de este modo, una operatividad continua y eficiente.

La presencia de componentes comunes como el hierro en el aceite lubricante de un motor de combustión interna, transmisión o caja de cambios suele indicar un desgaste anormal. Esto se debe a que muchas de las partes metálicas que componen estos sistemas, como ejes, engranajes y rodamientos, están hechas de hierro. Por lo tanto, un aumento en la concentración de hierro puede indicar que estas partes se están desgastando rápidamente. Conocer la procedencia de los elementos es muy útil a la hora de hacer un diagnóstico. Los elementos de desgaste típicos en motores de combustión interna, transmisiones y cajas de cambios se incluyen en la **Tabla 2-15** [61].

Tabla 2-15: Elementos de desgaste en motores de combustión interna y cajas de cambios

Elemento	Descripción
Hierro	Indica desgaste de ejes, cojinetes, rodamientos, engranajes, paredes de cilindros, y numerosas otras piezas.
Plata	Su presencia puede indicar problemas en cojinetes específicos o recubrimientos de juntas de sellado.
Aluminio	Proviene de pistones, arandelas, y bombas de engrase.
Cromo	Asociado a recubrimientos y piezas con aleaciones de acero inoxidable.
Cobre	Indica desgaste en bielas, cojinetes, y elementos de bronce sinterizado comunes en embragues y frenos.

Silicio	Aunque no metálico, su presencia sugiere contaminación por polvo o arena y pueden ingresar al motor a través del aire de admisión o durante operaciones de mantenimiento. Estas partículas, aunque pequeñas, pueden tener un impacto significativo en la calidad del aceite lubricante y, por tanto, en el rendimiento del motor. Ejercen un efecto abrasivo y su presencia suele ir acompañada de otros elementos metálicos como hierro o cobre.
Estaño	Procedente de pistones, rodamientos y cojinetes.
Níquel	Procedente de recubrimientos o de piezas que lo contengan como elemento aleante (aceros inoxidable y algunas fundiciones de hierro).
Plomo	Proveniente de capas protectoras, rodamientos y elementos mecánicos de embragues, cajas de cambio y frenos. En caso de motores a explosión que usen combustibles con aditivos plúmbicos, puede ocurrir contaminación del aceite lubricante por el combustible.
Molibdeno	Proviene de piezas que lo contengan como elemento aleante.
Magnesio	Procedente de piezas que lo contengan como elemento aleante.

La interpretación de los resultados obtenidos a través del análisis espectrométrico de los aceites lubricantes es un proceso metódico que implica la comparación de los niveles de metales detectados con los límites establecidos. Esta metodología permite predecir el estado de las zonas internas del sistema mecánico lubricado y desarrollar un plan de acción proactivo para mantener la maquinaria en condiciones óptimas de funcionamiento. El establecimiento de límites de precaución y de alarma, tal como se muestra en las **Tabla 2-16** y **Tabla 2-17** para los aceites O-1236 y O-1178 respectivamente, es fundamental para interpretar los datos obtenidos del análisis de los aceites lubricantes.

Estos umbrales están diseñados para ofrecer una señalización temprana y precisa de posibles anomalías en la concentración de metales, lo que permite la toma de decisiones informadas antes de que se produzcan daños significativos en los componentes internos. Los límites de precaución están definidos para identificar tendencias anormales en las

Capítulo 2: Materiales y métodos

concentraciones de metales y servir como un indicador temprano para realizar inspecciones más detalladas. Al alcanzar estos límites, se recomienda realizar una evaluación exhaustiva para identificar la causa raíz y tomar medidas correctivas antes de que se degrade el estado de los componentes.

Por otro lado, los límites de alarma representan un nivel crítico en el que la concentración de metales indica una condición severa que requiere atención inmediata. Superar estos límites sugiere que el desgaste o la contaminación ha alcanzado un punto en el que la integridad del sistema podría estar comprometida, lo que podría resultar en fallos operativos o daños irreparables. En este escenario, es fundamental detener la operación y proceder con las reparaciones necesarias para prevenir un fallo catastrófico.

Un caso particular es la detección de componentes minoritarios, como la plata, que puede señalar un fallo específico en un componente. La plata se utiliza en algunos cojinetes y recubrimientos, por lo que la detección de cantidades significativas de este metal puede ser un indicador de problemas en los componentes que lo contienen.

Los límites de referencia para los aceites estudiados son los que aparecen en la **Tabla 2-16** para el aceite O-1236 y en la **Tabla 2-17** para el O-1178. Estos valores proporcionan una guía precisa para evaluar la condición de los aceites lubricantes y asegurar el funcionamiento adecuado de los sistemas.

Tabla 2-16: Elementos de desgaste y contaminantes para el O-1236

Aceite: O-1236	Elementos de desgaste y contaminantes (ppm)		
Elemento	Normal	Precaución	Alarma
Fe	0-120	121-200	>201
Ag	0-6	7-11	>12
Al	0-30	31-72	>73
Cr	0-15	16-24	>25
Cu	0-50	51-85	>86
Si	0-60	61-110	>111
Sn	0-3	4-6	>7
Ni	0-10	11-14	>15
Pb	0-30	31-55	>56

Capítulo 2: Materiales y métodos

Tabla 2-17: Elementos de desgaste y contaminantes para el O-1178

Aceite: O-1178	Elementos de desgaste y contaminantes (ppm)		
Elemento	Normal	Precaución	Alarma
Fe	0-120	121-200	>201
Ag	0-6	7-11	>12
Al	0-30	31-72	>73
Cr	0-15	16-24	>25
Cu	0-50	51-85	>86
Si	0-40	41-60	>61
Sn	0-3	4-6	>7
Ni	0-10	11-14	>15
Pb	0-50	51-75	>76

La **Figura 2-20** ilustra cómo la concentración de metales varía con el tiempo y la carga de trabajo, ofreciendo una perspectiva e información valiosa sobre el estado de desgaste de las partes móviles de la maquinaria de los vehículos.

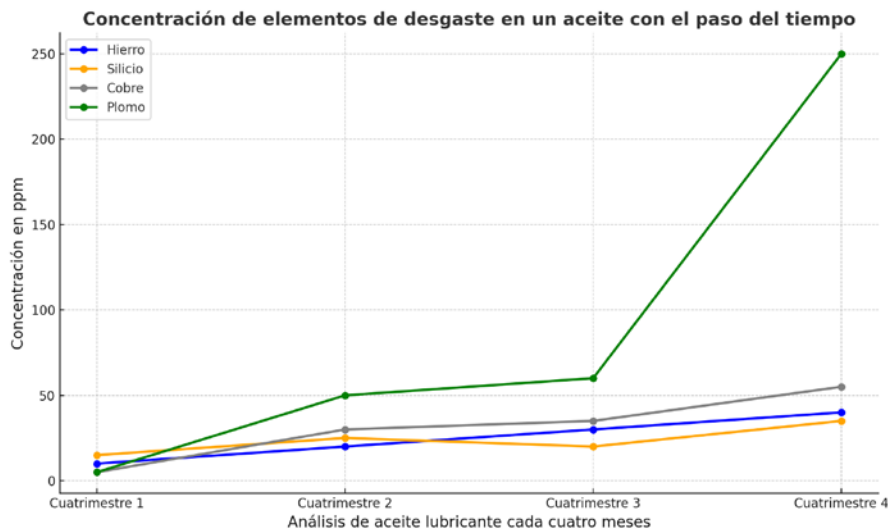


Figura 2-20: Evolución de elementos de desgaste con el paso del tiempo [62]

Tal y como se puede ver en la **Figura 2-20**, el seguimiento de la concentración en partes por millón (ppm) de metales como hierro, silicio, cobre y plomo en una muestra de aceite usado es un indicador de desgaste. Bajo condiciones normales, se espera que la presencia de estos metales aumente gradualmente, reflejando el desgaste natural de los componentes. Sin embargo, un pico inesperado en la concentración de cualquiera de estos elementos como puede ser la concentración de plomo en la **Figura 2-20**, puede señalar un desgaste acelerado y anormal.

Capítulo 2: Materiales y métodos

La detección temprana de un aumento atípico en los niveles de concentración de metales puede ser la diferencia entre una intervención correctiva menor y un fallo mecánico más grave y de mayor envergadura. Los análisis periódicos del aceite son, por tanto, una estrategia proactiva para identificar problemas incipientes antes de que se conviertan en averías serias. Este enfoque preventivo no solo ayuda a planificar mejor las intervenciones de mantenimiento, sino que también reduce el riesgo de inactividad imprevista y costes de reparación elevados [62].

En la interpretación de los análisis, como los presentados en la **Figura 2-20**, se considera 'CONFORME' cuando aparece un aumento controlado y esperado de la concentración de metales. Por otro lado, un incremento abrupto y fuera de lo común se clasificaría como 'NO CONFORME', lo que indica la necesidad de una inspección más detallada para identificar y corregir la fuente del problema.

Una lubricación adecuada es fundamental para minimizar el desgaste de los componentes mecánicos. El aceite no solo reduce la fricción entre las partes móviles, sino que también ayuda a disipar el calor y protege contra la corrosión. El mantenimiento regular y la atención a las señales de alerta, como las variaciones en la concentración de metales, son esenciales para la longevidad y el rendimiento óptimo del equipo.

Los lubricantes modernos se elaboran a partir de fórmulas especializadas para satisfacer exigencias específicas de rendimiento en diversas condiciones operativas. Los aceites base, la esencia de todo lubricante, se enriquecen con una serie de aditivos diseñados para mejorar su rendimiento. Estos incluyen detergentes, inhibidores de oxidación y corrosión, agentes antiespumantes y compuestos antidesgaste como ya se explicó en la primera parte del presente trabajo. Cada aditivo es seleccionado meticulosamente para potenciar las propiedades beneficiosas del aceite base y mitigar cualquier característica no deseada. La sinergia de estos aditivos es lo que dota al aceite de un comportamiento específico bajo unas condiciones determinadas. Cuando se realiza un análisis espectrométrico del aceite, es necesario tener en cuenta que la presencia de ciertos elementos metálicos puede derivarse esos aditivos incorporados en la formulación del aceite. Estos componentes son añadidos intencionalmente para cumplir funciones específicas y no necesariamente son indicativos de desgaste [14].

A la hora de analizar los resultados de una analítica de aceites usados, la tarea se complica al tener que diferenciar los metales procedentes de los aditivos de aquellos que

Capítulo 2: Materiales y métodos

indican desgaste en el equipo. Es esencial que técnicos y especialistas lleven a cabo un examen meticuloso para distinguir entre los aditivos del aceite, diseñados para optimizar su rendimiento, y las señales de desgaste. Tal distinción es clave para prevenir diagnósticos erróneos que podrían llevar a acciones de mantenimiento equivocadas. Identificar correctamente entre los metales que señalan desgaste real del equipo y los introducidos a través de aditivos es esencial para evitar confusiones que conlleven a decisiones de mantenimiento desacertadas.

Los lubricantes contienen una amplia gama de elementos que, dependiendo de su origen, pueden clasificarse en varias categorías. Estos elementos, detectados mediante análisis espectrométrico del aceite, ofrecen pistas esenciales sobre el estado y la salud de los equipos lubricados. Los elementos presentes en los lubricantes como se indica en la **Tabla 2-18**, pueden originarse de diversas fuentes, las cuales generalmente se agrupan en tres grandes categorías:

- **Elementos de desgaste:** Estos son los elementos que se desgastan mecánicamente en las partes internas de la maquinaria. Los metales como el hierro, el cobre, el plomo y el zinc pueden detectar el desgaste de engranajes, cojinetes y otros componentes importantes. El análisis cuantitativo de estos componentes permite evaluar la tasa de desgaste y tomar medidas preventivas para prevenir daños mayores.
- **Contaminantes externos:** Los componentes de esta categoría ingresan al lubricante a través de procesos internos de la maquinaria o del ambiente externo. Las partículas de polvo, los desechos de combustión, el agua y otros contaminantes químicos pueden estar entre ellos. La presencia de estos componentes puede reducir la eficacia del lubricante y acelerar el desgaste y la corrosión de las partes.
- **Aditivos:** Estos componentes son parte de la composición original del lubricante. Incluyen aditivos destinados a mejorar las propiedades del lubricante, como su resistencia a la oxidación, protección contra el desgaste y capacidad para soportar presiones extremas. La presencia y concentración de estos elementos indican la calidad y el estado del lubricante.

Tabla 2-18: Elementos comunes en el análisis de lubricantes [49]

Elemento	Elemento de Desgaste	Contaminante externo	Aditivo
Hierro	x	x	-
Cobre	x	x	x
Cromo	x	-	-
Estaño	x	-	-
Aluminio	x	x	-
Plomo	x		-
Silicio	-	x	x
Sodio	-	x	x
Boro	-	x	x
Calcio	-	x	x
Magnesio	-	x	x
Zinc	x	-	x
Fósforo	-	x	x
Molibdeno	x	-	x
Potasio	-	x	-

2.4.5.5 Análisis físico químico y medición

Los átomos de la muestra de aceite usado se volatilizan utilizando la técnica de descarga de arco controlada. Al excitarse, estos átomos liberan energía con una serie de frecuencias específicas. El espectrómetro mide esta radiación y determina la concentración de cada elemento presente en la muestra: hierro, plomo o silicio basándose en su intensidad y frecuencia. Este proceso permite la identificación precisa de los elementos químicos presentes, facilitando una evaluación detallada de la condición del aceite.

Para capturar y analizar las energías radiantes emitidas durante este proceso, se emplean tubos fotomultiplicadores, dispositivos de carga acoplada y otros detectores avanzados. Estos instrumentos son capaces de recoger las intensidades de las líneas analíticas seleccionadas, así como de las referencias, almacenando la información de manera precisa para su posterior análisis. Una vez obtenida la información, se procede a comparar las intensidades emitidas por los elementos presentes en la muestra de aceite

Capítulo 2: Materiales y métodos

usado con patrones de calibración establecidos. Este paso es fundamental, ya que permite determinar con exactitud las concentraciones de los elementos analizados, ofreciendo así una visión clara de la condición del aceite y, por tanto, del estado tanto del motor como de la caja de cambios [60].

2.4.5.6 Cálculo de los elementos de desgaste

Las concentraciones de los elementos presentes en el aceite lubricante analizado se calculan y visualizan mediante un software especializado del equipo que mostrará la ppm (microgramos de elemento por gramo de aceite) de cada elemento en la muestra ensayada directamente.

2.4.5.7 Limpieza y Mantenimiento

Después de cada medición, es esencial limpiar el equipo para evitar la contaminación de futuras muestras. El mantenimiento regular del equipo es crucial para garantizar la precisión y fiabilidad de las mediciones según las recomendaciones del fabricante.

2.4.6 Contenido en agua

La presencia de agua en el aceite lubricante constituye un elemento crítico que incide significativamente en la integridad y funcionamiento óptimo de los motores, transmisiones y maquinaria industrial de manera generalizada. El agua puede ser el elemento precursor de múltiples problemas que afectan a la durabilidad y eficacia de los equipos.

El agua es considerada como uno de los contaminantes más destructivos que afectan al aceite y uno de los principales motivos en la generación de fallos por lo que es muy importante determinar su presencia en los aceites lubricantes [11].

El agua puede presentarse en los lubricantes en tres estados distintos afectando de manera diferente al sistema que lubrica:

- **Agua disuelta:** Similar a la humedad en el aire, esta fase consiste en moléculas de agua dispersas individualmente en el aceite, no visible a simple vista pero capaz de influir negativamente en las propiedades del lubricante.

Capítulo 2: Materiales y métodos

- **Agua emulsionada:** Se forma cuando el agua excede el punto de saturación del aceite, resultando en la suspensión de gotas microscópicas de agua. Esta condición, que da al aceite un aspecto turbio, puede afectar gravemente la capacidad de lubricación.
- **Agua libre:** Es el agua que, debido a su exceso, se separa y se asienta en el fondo del contenedor (o en la parte superior en el caso de aceites sintéticos con densidades relativas superiores). Esta fase puede causar daños severos a los componentes de la maquinaria [49].

Determinar el contenido de agua en lubricantes consiste en medir la cantidad total de agua disuelta, emulsionada y libre en una muestra de aceite. Esto es crucial porque el agua provoca corrosión de componentes metálicos, acelera la corrosión de componentes no ferrosos y disminuye la efectividad del lubricante al agotar y degradar aditivos, además de promover la oxidación del aceite base. Concentraciones altas de agua llevan a la formación de emulsiones que, al combinarse con productos de oxidación insolubles, crean lodo, impactando gravemente la seguridad de los equipos debido a que se disminuye la lubricación y se obstruyen prematuramente los filtros. Además, el agua libre conduce a la creación de depósitos duros y quebradizos en los cojinetes, fomentando incluso el crecimiento bacteriano [49].

El origen del agua en el aceite lubricante es diverso. Puede proceder de diversas fuentes tales como la condensación por cambios de temperatura entre el día y la noche; de filtraciones por fugas en juntas, a través de uniones o incluso de la lluvia.

El método de laboratorio utilizado para medir y cuantificar el contenido en agua ha sido la especificación: ASTM D 6304-20” Standard test method for determination of water in petroleum products, lubricating oils, and additives by coulometric Karl Fischer titration” [63]. La siguiente **Tabla 2-19**, resume esta información:

Tabla 2-19: Método estándar para la determinación del agua en aceites lubricantes

Método de medición	Descripción
ASTM D 6595	Método estándar para la determinación de agua en productos de petróleo, aceites lubricantes y aditivos mediante titulación coulométrica de Karl Fischer.

2.4.6.1 Materiales y reactivos utilizados

Para la ejecución de este ensayo, es imprescindible utilizar una serie de materiales y reactivos especializados que garantizan la precisión y fiabilidad de los resultados obtenidos. Entre los equipos necesarios se incluyen:

- Granatario Sartorius para la medición exacta de las masas.
- Estufa de secado para eliminar la humedad presente en las muestras.
- Desecador con tapa y gel de sílice, utilizado para proteger las muestras de la humedad ambiental.
- Jeringuillas, viales (cápsulas) y un encapsulador, fundamentales para la manipulación y preparación de las muestras.
- Bala de nitrógeno (N_2), utilizada para crear un ambiente inerte durante ciertos procesos de análisis.

Además, se requiere un ordenador con procesador Intel® Core™ i5-8400 CPU y el software Windows 10 Pro versión 1909, que incluye OFFICE 2003 y Tiamo 3.0 para el manejo y análisis de datos.

En cuanto a los reactivos, se necesitan soluciones de alta pureza para las valoraciones coulométricas con el método Karl Fischer, las cuales contienen diferentes concentraciones de agua:

- Patrones de agua para Karl Fischer con concentraciones de 50.000 mg/kg, 1.000 mg/kg y 100 mg/kg.
- Soluciones específicas como HYDRANAL Coulomat AG (anólito) y HYDRANAL Coulomat CG (católito), que son esenciales para el funcionamiento del sistema de titulación Karl Fischer.

Otros reactivos fundamentales incluyen:

- Metanol anhidro p.a. (para análisis), utilizado como disolvente.
- Ácido nítrico al 69% p.a., que actúa como agente oxidante en el análisis.
- Xileno p.a. (para análisis), que se emplea como disolvente en algunas etapas del ensayo.
- Tamiz molecular de 0,4 nm, que se utiliza para la eliminación de agua en determinadas muestras o reactivos.

Capítulo 2: Materiales y métodos

Estos materiales y reactivos son cruciales para asegurar la precisión en el análisis y obtener resultados confiables que permitan realizar un correcto control y evaluación de los aceites estudiados.

2.4.6.2 Equipo utilizado

El equipo para determinar el contenido en agua ha sido el titulador automático coulométrico: Coulómetro Karl Fischer (**Figura 2-21**), compuesto de:

- 851 Titrand (valorador).
- 801 Stirrer (agitador).
- 874 Oven Sample Processor (procesador de muestras de horno).
- y accesorios: vasos de valoración, electrodos indicador y generador.



Figura 2-21: Equipo para determinar la cantidad en agua

2.4.6.3 Preparación de la muestra

Para analizar el aceite de forma fiable, evitando al máximo los posibles errores que puedan afectar a los resultados, es esencial seguir estos pasos:

- 1. Homogeneización del aceite:** Es esencial mezclar el aceite de forma uniforme para que todos los sedimentos o componentes insolubles se repartan de manera equitativa en la muestra. Esto asegura que las mediciones reflejen fielmente toda la muestra de aceite.
- 2. Eliminación de partículas:** El aceite debe estar libre de partículas sólidas antes de medir cualquier propiedad. Para ello se puede usar filtración o decantación. Las partículas pueden alterar los métodos de análisis y reducir la exactitud de los resultados.

3. **Estabilización de la temperatura:** La temperatura del aceite puede afectar notablemente a las mediciones. Por eso, hay que normalizar la temperatura de la muestra a un nivel determinado antes de realizar la medición. Esto se logra poniendo la muestra en un baño de control de temperatura o dejando que llegue a la temperatura ambiente de forma homogénea.
4. **Volumen adecuado de la muestra:** Verificar que el volumen de la muestra sea adecuado para realizar el ensayo sin comprometer la homogeneidad y representatividad de la muestra.

2.4.6.4 Límites de degradación del aceite basados en el contenido en agua

Para asegurar el correcto funcionamiento de motores y cajas de cambios, es fundamental no solo detectar la presencia de agua en el aceite lubricante, sino también controlar y eliminar las fuentes de ingreso de este contaminante. Un escenario ideal es mantener los niveles de humedad por debajo del punto de saturación del aceite a la temperatura de operación. Cuanto menor sea la concentración de agua en el lubricante, mayor será la capacidad del aceite para cumplir sus funciones críticas dentro del motor o sistema mecánico.

La presencia de agua en el aceite puede afectar gravemente la capacidad lubricante del fluido, lo que lleva a una disminución de la eficiencia y, en casos extremos, a fallos prematuros en los componentes del sistema. Por este motivo, es crucial definir límites estrictos para el contenido de agua en los aceites de motor y caja de cambios.

En cuanto a los aceites analizados, las normas militares relevantes, como la MIL-PRF-2104M para el aceite de motor con código OTAN O-1236 y la TL 9150-0080 para el aceite de caja de cambios con código OTAN O-1178, no especifican un límite concreto para el contenido de agua. Sin embargo, los límites establecidos no son arbitrarios. Estos se basan en la experiencia acumulada por el Laboratorio Central del Ejército, así como en la información técnica proporcionada por los fabricantes de los aceites. Estos valores se fundamentan en estudios que consideran la composición química del lubricante, la interacción con componentes metálicos, y las condiciones operativas extremas a las que los aceites están sometidos.

Los límites fijados para el contenido de agua en los aceites lubricantes se presentan en la **Tabla 2-20**, y son esenciales para prevenir la degradación acelerada del aceite y

Capítulo 2: Materiales y métodos

garantizar la protección adecuada de los componentes mecánicos bajo condiciones normales de operación.

Tabla 2-20: Límites del contenido en agua del O-1236 y O-1178

Contenido en agua (ppm)			
Tipo de aceite	Normal	Precaución	Alarma
O-1236	0-0,2	0,21-0,4	>0,41
O-1178	0-0,2	0,21-0,4	>0,41

Estos límites para el contenido de agua en aceites son esenciales no solo para mantener la integridad mecánica y la eficiencia de los motores y cajas de cambios, sino también para prolongar su vida útil.

2.4.6.5 Análisis físico químico y medición

Uno de los factores clave que afectan la calidad y el rendimiento de los aceites lubricantes es el contenido de agua presente en ellos. Para medir este parámetro con precisión, se ha utilizado el método B según la norma ASTM D6304, que permite cuantificar de manera precisa la cantidad de agua en aceites lubricantes.

El método B implica el calentamiento de una muestra de aceite dentro de un vial de vidrio sellado utilizando un horno especializado. Este proceso permite la vaporización del agua contenida en el aceite, la cual es transportada a una celda de titulación de Karl Fischer mediante un gas portador seco y no reactivo, como el nitrógeno. La precisión de este método radica en su capacidad para medir el contenido de agua sin interferencias de otros componentes del aceite.

Para realizar el análisis correctamente, es fundamental configurar el equipo de titulación automática coulométrica de acuerdo con las instrucciones del fabricante. Esto incluye ajustar el flujo de gas portador seco (nitrógeno) y el calentamiento del horno a una temperatura adecuada para el tipo de aceite a analizar. La temperatura debe ser suficientemente alta para vaporizar el agua, pero sin causar la degradación del aceite. En este caso, la temperatura mínima recomendada es de 90°C, aunque la temperatura de extracción establecida es de 150°C.

El cálculo de la concentración de agua en la muestra se realiza utilizando la fórmula correspondiente, como se detalla en la **Ecuación 2-5** del siguiente apartado. Este cálculo toma en cuenta el peso de la muestra antes y después de la vaporización, así como el valor

Capítulo 2: Materiales y métodos

en blanco determinado para el procedimiento B. Además, es crucial medir la densidad de la muestra para convertir correctamente los resultados en porcentajes de masa o volumen.

Es fundamental reportar los valores de concentración de agua con precisión, dependiendo de si son inferiores o superiores a 1000 mg/kg (0,1% en masa o volumen). Estos valores se informan tal como los determina el método de prueba ASTM D6304, ya sea mediante el procedimiento A, B o C. Es necesario realizar una determinación en blanco del vial y del co-solvente utilizado para corregir cualquier posible contaminación por humedad en los materiales empleados, asegurando así la precisión y fiabilidad de los resultados obtenidos.

2.4.6.6 Cálculo del contenido en agua

Para determinar el porcentaje de agua por peso se hace uso de la siguiente Ecuación 2-5:

$$\text{Contenido en agua \% masa} = \frac{[A - B]}{W \cdot 1000} \quad \text{Ecuación 2-5}$$

Donde:

- A =µg de agua de la muestra.
- B = µg de agua de la determinación en blanco.
- W =masa de muestra en gramos.

Esta ecuación convierte la cantidad de agua en una base porcentual, lo cual es útil para evaluar el impacto del agua en la muestra de aceite. Es particularmente útil cuando se requiere comparar el nivel de agua entre diferentes muestras o lotes de aceite.

2.4.6.7 Limpieza y Mantenimiento

Después de cada medición del contenido en agua, es esencial limpiar el equipo para evitar la contaminación de futuras muestras. El mantenimiento regular del equipo es crucial para garantizar la precisión y fiabilidad de las mediciones según las recomendaciones del fabricante.

2.5 Equipamiento fotográfico

El equipamiento fotográfico es clave para capturar imágenes de alta calidad, indispensables para el análisis mediante técnicas de inteligencia artificial (IA). En este apartado, se detallan los equipos empleados, como la cámara réflex y endoscópica, y el equipamiento adicional que ha utilizado en la realización del estudio. Las imágenes precisas constituyen la base sobre la que se aplicarán los algoritmos de IA para obtener resultados confiables.

2.5.1 Cámara fotográfica

El éxito en la fotografía de aceites comienza con la selección adecuada del equipo para capturar la esencia y los detalles de cada fotografía. Para la elección de una cámara, se realizó un análisis detallado de las características y funcionalidades que mejor se adapten a los requerimientos específicos del objetivo. El proceso de selección de la cámara fotográfica involucró una cuidadosa comparación entre dos modelos destacados:

- la cámara Sony DSC-RX100M4, conocida por su portabilidad y calidad de imagen en un diseño compacto (**Figura 2-22**).



Figura 2-22: Cámara Sony DSC-RX100M4

- la cámara Canon EOS 100D (DS126441), una cámara réflex con capacidades avanzadas y mayor flexibilidad en ajustes manuales (**Figura 2-23**).



Figura 2-23: Cámara Canon EOS 100D (DS126441)

La evaluación de estos dispositivos fotográficos implica comparar las especificaciones y características de ambos modelos de cámaras. A continuación, se presenta una tabla comparativa, **Tabla 2-21**, de las cámaras Sony DSC-RX100M4 y Canon EOS 100D (DS126441), así como el objetivo utilizado con esta última. Esta comparación busca resaltar las diferencias y similitudes en términos de rendimiento, características técnicas y capacidades fotográficas.

Tabla 2-21: Tabla comparativa de las cámaras Sony DSC-RX100M4, Canon EOS 100D (DS126441) y objetivo utilizado

Característica	CÁMARAS		OBJETIVO
	Sony DSC-RX100M4	Canon EOS 100D (DS126441)	Canon Zoom Lens EF-S 18-55 mm f/3.5-5.6 IS STM
Tipo de Cámara/ Objetivo	Compacta avanzada	DSLR	-
Sensor	CMOS Exmor RS de 1 pulgada y 20.1 megapíxeles	APS-C CMOS de 18 megapíxeles	-
Resolución	20.1 MP	18 MP	-
Pantalla	3.0" LCD inclinable de 1,229k puntos	3.0" LCD táctil de 1,040k puntos	-
Visor	Electrónico	Óptico (pentamirror) con cobertura aprox. del 95%	-
Grabación de Video	4K a 30fps, Full HD a 120fps	Full HD (1080p) a 30fps	-

Capítulo 2: Materiales y métodos

Enfoque Automático	Detección de contraste con 25 puntos	Sistema híbrido de enfoque automático con 9 puntos (1 punto tipo cruz central)	STM (motor de paso a paso)
Disparo Continuo	Hasta 16 fps	Hasta 4 fps	-
Lente	ZEISS Vario-Sonnar T* 24-70 mm f/1.8-2.8 zoom óptico	Lentes EF y EF-S intercambiables	18-55 mm f/3.5-5.6 IS STM
Estabilización de Imagen	Óptica	Depende del lente	Sí, estabilizador de imagen óptico (IS)
Conectividad	Wi-Fi y NFC	Sin Wi-Fi, Eye-Fi compatible	-
Peso	Aprox. 298 g (con batería y medios)	Aprox. 407 g (solo cuerpo)	Aproximadamente 205 g
Dimensiones	102 x 58 x 41 mm	117 x 91 x 69 mm	69 mm x 75.2 mm
Longitud focal	-	-	18-55 mm
Apertura máxima	-	-	f/3.5-5.6
Apertura mínima	-	-	f/22-38
Compatibilidad del formato	-	-	APS-C
Ángulo de visión	-	-	74° 20' - 27° 50'
Distancia mínima de enfoque	-	-	0.25 m (25 cm)
Magnificación máxima	-	-	0.36x
Elementos ópticos	-	-	13 elementos en 11 grupos
Hojas del diafragma	-	-	7 (de apertura circular)
Diámetro del filtro	-	-	58 mm

La decisión final se inclinó hacia la cámara réflex Canon EOS 100D (DS126441) por varias razones clave: (i) la Canon ofrecía la posibilidad de utilizar lentes intercambiables, lo cual podría ser crucial para adaptarse a una variedad de situaciones fotográficas y

Capítulo 2: Materiales y métodos

necesidades específicas del proyecto. (ii) Además, poseía las capacidades avanzadas en términos de ajustes manuales de exposición, enfoque y apertura que permitieron un mayor control sobre la calidad final de la imagen, un aspecto crítico para superar los desafíos identificados durante la fase de pruebas y altamente importante ya que cada detalle en la fotografía cuenta. (iii) Otro factor decisivo fue el rendimiento superior de la Canon en condiciones de baja luminosidad, gracias a su sensor de mayor tamaño (APS-C) y a las opciones avanzadas de ISO, proporcionando imágenes de alta calidad, nítidas y ricas en detalle bajo cualquier condición de iluminación. Esto es particularmente importante en la fotografía de aceites, donde la luz juega un papel crucial en la apreciación de la viscosidad y el color de la muestra fotografiada y se busca registrar detalles minuciosos y texturas delicadas, elementos cruciales en la representación de las muestras de aceite. Esto, sumado a la robustez y ergonomía de la cámara réflex, que facilitaba su manejo durante largas sesiones de fotografía, hizo que la Canon EOS 100D (DS126441) fuera la elección óptima para el proyecto en cuestión, asegurando la capacidad de capturar imágenes detalladas y precisas necesarias para el análisis posterior.

2.5.1.1 Cámara réflex

Para este trabajo, se utilizó una cámara fotográfica modelo Canon EOS 100D y un objetivo EF-S 18-55 mm, que son una combinación notable en la fotografía digital ya que ofrece unas capacidades técnicas avanzadas en un cuerpo extremadamente pequeño y ligero. Esta cámara fue lanzada al mercado en marzo de 2013 y se posicionó como una de las DSLR más ligeras y compactas del mercado. Se trata de una cámara diseñada para realizar fotografías de alto rendimiento en un cuerpo pequeño, combinando ergonomía con tecnología avanzada y haciendo de la fotografía de alta calidad.

2.5.1.1.1 Especificaciones técnicas de la cámara fotográfica modelo Canon EOS 100D

En este apartado se describen las especificaciones técnicas de la cámara réflex Canon EOS 100D utilizada en el estudio. Estas características son esenciales para garantizar la captura de imágenes de alta resolución, necesarias para un análisis preciso de las muestras de aceite. Se detallarán aspectos como la resolución, el rango ISO, y las capacidades del objetivo EF-S 18-55 mm, que permiten obtener imágenes nítidas y detalladas en diversas condiciones de luz y entorno. Estos detalles son fundamentales para la posterior

Capítulo 2: Materiales y métodos

aplicación de técnicas de inteligencia artificial en el análisis de las imágenes. Las características son las siguientes:

- **Sensor y calidad de imagen:** La cámara Canon EOS 100D dispone de un sensor CMOS APS-C de 18 megapíxeles y un procesador de imagen DIGIC 5 que mejora el rendimiento en condiciones de baja luminosidad, reduciendo el ruido en imágenes de alta ISO y permitiendo una rápida respuesta de la cámara con tiempos de arranque cortos. El rango ISO es de 100-12800, expandible hasta ISO 25600, ofreciendo versatilidad en situaciones de poca luz, reduciendo la necesidad de flash en entornos oscuros.
- **Sistema de enfoque y disparo:** El sistema de enfoque automático es de 9 puntos, incluido un punto central AF de tipo cruz, asegurando una alta precisión de enfoque especialmente en condiciones de poca luz o cuando existe poco contraste. La capacidad de disparo continuo es de hasta 4 fotogramas por segundo (fps). Los modos AF incluyen modos de enfoque automático: One-Shot AF, AI Focus AF, y AI Servo AF, adaptándose a diferentes situaciones, desde objetos estáticos hasta sujetos en movimiento.
- **Funciones de vídeo:** La cámara EOS 100D permite grabar vídeos en Full HD (1080p) a 30, 25, o 24 fps, con control manual completo sobre la exposición y el enfoque. Dispone de un micrófono mono incorporado, aunque también ofrece la posibilidad de conectar un micrófono externo, mejorando significativamente la calidad del audio para las grabaciones de vídeo.
- **Pantalla y visor:** La cámara dispone de una pantalla táctil Clear View de 3.0 pulgadas y 1,04 millones de puntos que facilita la navegación por los menús y la selección de puntos de enfoque. El visor óptico proporciona aproximadamente el 95% de cobertura de visión, permitiendo a los usuarios componer sus imágenes con precisión.
- **Almacenamiento:** La cámara es compatible con tarjetas SD, SDHC, o SDXC, incluyendo soporte para tarjetas UHS-I, para un almacenamiento y transferencia de datos rápidos.
- **Diseño y portabilidad:** Las dimensiones de la cámara son: 116.8 x 90.7 x 69.4 mm y un peso de solo 407 g (solo el cuerpo), lo que hace que la cámara Canon EOS 100D sea notablemente compacta y ligera para una DSLR.

2.5.1.1.2 Características del objetivo Canon EF-S 18-55mm f/3.5-5.6 IS STM

Las características ópticas del objetivo utilizado son las siguientes:

- **Longitud focal:** 18-55mm, proporcionando un rango de zoom versátil equivalente a aproximadamente 29-88mm en un formato de 35mm, cubriendo gran angular hasta teleobjetivo corto.
- **Apertura máxima:** f/3.5-5.6, con una apertura variable que disminuye a medida que se aumenta la longitud focal.
- **Estabilización de Imagen:** Incorpora el sistema de Estabilización de Imagen (IS) de Canon, que compensa hasta cuatro pasos de movimiento de cámara, lo que es especialmente útil en condiciones de poca luz o al usar velocidades de obturación más lentas.

Con respecto a la construcción y el diseño, el objetivo está compuesto por 13 elementos en 11 grupos, incluyendo elementos esféricos para reducir las aberraciones y mejorar la claridad a lo largo de todo el rango de zoom. Está equipado con un motor de pasos (STM), que ofrece un enfoque automático suave, silencioso y preciso, ideal para la grabación de vídeo. El diámetro del filtro es de 58mm, permitiendo el uso de filtros de rosca para efectos creativos o protección del objetivo.

El objetivo utilizado dispone de una distancia mínima de enfoque de 0.25m, permitiendo acercarse bastante a los sujetos. Esto es excelente para la fotografía de retratos o detalles pequeños.

Cuenta con un diafragma de 7 hojas, lo que contribuye a un agradable bokeh (el efecto de desenfoco del fondo) en las fotografías con apertura amplia y a través del “manual focus override”, permite a los usuarios ajustar el enfoque manualmente, incluso cuando el modo de enfoque automático está activado, ofreciendo mayor control creativo.

Con respecto a las dimensiones es compacto y ligero, lo que lo hace un complemento ideal para la cámara DSLR de Canon utilizada. El peso es aproximadamente de 205g, lo que añade muy poco peso al equipo fotográfico, facilitando la colocación en el trípode a la hora de hacer las fotografías.

2.5.1.2 Cámara endoscópica

La cámara endoscópica utilizada en este estudio se trata de un dispositivo avanzado de visualización e inspección, diseñado para diversas aplicaciones en el ámbito industrial.

2.5.1.2.1 Especificaciones técnicas

En este apartado se detallan las especificaciones técnicas de la cámara endoscópica utilizada en el estudio. Estas características son fundamentales para comprender su capacidad de capturar imágenes en entornos reducidos y difíciles de acceder, garantizando la precisión y el detalle necesarios para el análisis posterior mediante técnicas de inteligencia artificial. Las especificaciones abarcan desde la resolución de la cámara hasta su diseño físico, adaptado para aplicaciones específicas en la investigación de muestras de aceite. Las características son las siguientes:

- **Sensor y calidad de imagen:** El sensor incorporado en la cámara endoscópica es un componente de alta definición con una resolución de 2 megapíxeles y un ángulo de visión de 70°, capaz de capturar imágenes estáticas con una resolución de 1920 x 1080 píxeles. Esta alta resolución permite la realización de fotografías con una calidad aceptable para la diferenciación de tonalidades.
- **Sistema de enfoque y disparo:** El sistema de enfoque de la cámara está diseñado para optimizar la mejor distancia focal, con una lente frontal de 50-80 mm. Esta funcionalidad asegura una imagen clara en distintas condiciones operativas. El disparo de la cámara se gestiona a través de controles que contiene el cuerpo de la propia cámara.
- **Funciones de vídeo:** La cámara proporciona una resolución de 1280 x 720 píxeles en grabaciones de vídeo. Esta función está reforzada por la luz LED de brillo ajustable, que mejora la calidad de la imagen en condiciones de baja luminosidad.
- **Pantalla y visor:** La unidad viene equipada con una pantalla LCD a color IPS de 854 x 480 píxeles, que ofrece una visualización nítida y colores precisos desde cualquier ángulo, eliminando la necesidad de un visor adicional. La tecnología IPS asegura una excelente visibilidad y claridad, lo cual es muy importante para la interpretación inmediata de las imágenes.

- **Almacenamiento:** El dispositivo dispone de una ranura para tarjeta de memoria TF, permitiendo una expansión significativa de la capacidad de almacenamiento y facilitando el intercambio de datos.
- **Diseño y portabilidad:** El diseño de la cámara endoscópica destaca por su ergonomía y portabilidad. La integración de una batería de 3000 mAh proporciona una autonomía de 3 a 4 horas y un tiempo de recarga de 3 horas, lo que asegura una operatividad eficiente y continua. El cuerpo de la cámara integra además tres luces LED de alto brillo que sirven como linterna, aumentando su versatilidad en diferentes entornos operativos. La temperatura de trabajo de la cámara, que varía de 0°C a 45°C, permite su uso en una amplia gama de condiciones ambientales.

2.5.1.3 Comparativa de cámaras fotográficas

La elección de la cámara es fundamental para la calidad y eficacia de los proyectos de fotografía e inspección visual. Para comprender las opciones de cámaras en contextos específicos, la **Tabla 2-22** muestra una comparativa entre los dos tipos de cámaras utilizadas en el estudio: una cámara réflex Canon EOS 100D y una cámara endoscópica modelo Zealtron Industrial Endoscope 3.9 mm. La decisión de iniciar un proyecto fotográfico con una cámara réflex de alta resolución como la Canon y luego pasar a una cámara más especializada de menor resolución (la cámara endoscópica) es una estrategia basada en la adaptación a las demandas concretas del proyecto. Las cámaras réflex de alta resolución generan una calidad de imagen superior y versatilidad al principio, mientras que las cámaras especializadas como las endoscópicas, permiten economizar recursos y satisfacer requisitos específicos a medida que el proyecto progresa. Esta transición es clave para garantizar cada etapa del trabajo esté apoyada por el equipo más apropiado.

Tabla 2-22: Comparación de Cámaras: Réflex vs. Endoscópica

Característica	Cámara Réflex: Canon EOS 100D	Cámara Endoscópica: modelo Zealtron Industrial Endoscope 3.9mm
Sensor y calidad de imagen	Sensor CMOS APS-C de 18 MP	Sensor de alta definición de 2 MP

Capítulo 2: Materiales y métodos

Rango ISO	100-12800, expandible hasta 25600.	N/A
Resolución de video	Full HD 1080p a 30/25/24 fps.	1280 x 720p.
Pantalla	3.0" táctil Clear View, 1,04 millones de puntos.	LCD a color IPS de 854 x 480 píxeles.
Funciones de enfoque	AF de 9 puntos con punto central tipo cruz.	Enfoque fijo optimizado para 50-80 mm.
Funciones adicionales	Varios modos de AF, micrófono incorporado.	Luces LED de brillo ajustable, linterna integrada.
Capacidad de almacenamiento	Tarjetas SD, SDHC, SDXC, soporte UHS-I.	Ranura para tarjeta de memoria TF.
Dimensiones y peso	116.8 x 90.7 x 69.4 mm, 407 g.	Portátil con batería de 3000 mAh.
Uso recomendado	Fotografía de alta calidad y versatilidad en ambientes variados.	Inspección visual en ambientes industriales o de difícil acceso.

La cámara Canon EOS 100D se distingue por su sensor CMOS APS-C de 18 megapíxeles el cual genera imágenes de calidad superior y una variedad de funciones avanzadas. A pesar de contar con capacidades de enfoque automático, se optó por el enfoque manual debido a los inconvenientes que supone el aceite para el enfoque automático, lo que resultó ser esencial en las condiciones específicas del estudio. Por otro lado, la cámara endoscópica, diseñada para visualizar espacios reducidos y de difícil acceso, tiene un sensor de 2 megapíxeles y no permite ajustes de enfoque. Aunque estas cámaras no tienen la misma calidad de imagen que las cámaras réflex de alta resolución, se adaptan a las necesidades particulares del proyecto, como la velocidad en la toma de imágenes o el funcionamiento en condiciones extremas.

El uso inicial de la cámara réflex se basa en su capacidad para ofrecer imágenes de alta resolución y su adaptabilidad en diversas situaciones. Esto permite evaluar las

necesidades de calidad de imagen y funcionamiento en un entorno controlado. Una vez que se comprueba la viabilidad del proyecto y se definen los requisitos específicos, se utilizó la cámara endoscópica descrita anteriormente.

2.5.2 Equipamiento adicional

Este apartado describe los accesorios que complementan el equipo fotográfico principal, proporcionando estabilidad, protección y optimización en las condiciones de trabajo. La correcta selección de estos elementos no solo facilita las operaciones, sino que también contribuye a la precisión y repetibilidad de los resultados obtenidos. A continuación, se presentan tres componentes clave: el trípode, la iluminación especializada y el maletín rugerizado, cada uno con características específicas que mejoran el rendimiento global del sistema.

2.5.2.1 Trípode

Se hizo uso de un trípode (**Figura 2-24**) ya que aporta la estabilidad requerida para conseguir la nitidez y claridad deseada de tal manera que se previenen las vibraciones indeseadas, incluso las más mínimas, que pueden arruinar una toma correcta de la imagen. Al utilizar un trípode, se asegura que la cámara permanece inmóvil durante la exposición. Esto es particularmente importante en situaciones de baja iluminación o al capturar escenas que requieren una larga exposición, garantizando que cada imagen conserve la nitidez deseada.



Figura 2-24: Trípode utilizado en la realización de las fotografías

Capítulo 2: Materiales y métodos

Se han utilizado dos tipos de trípode, uno para la fotografía en plato (**Figura 2-25 izquierda**) y otro más pequeño para la fotografía de la cubeta (**Figura 2-25 derecha**).



Figura 2-25: Trípode usado para fotografía en plato (izquierda) vs trípode usado en fotografía de cubeta (derecha)

Además, con el uso del trípode, se asegura que cada fotografía mantenga la misma distancia de la cámara al recipiente que contiene la muestra a fotografiar:

- 33 cm para la fotografía del crisol.
- 22 cm para la fotografía de cubeta.

Con el trípode también se consigue obtener siempre el mismo encuadre y composición, aspectos esenciales para la realización de las fotografías y su posterior análisis mediante inteligencia artificial (IA).

2.5.2.2 Iluminación

Para capturar las imágenes de aceite en crisoles, se empleó una iluminación LED ajustable (**Figura 2-26 izquierda**), complementada con un foco ubicado a cada lado de la muestra (**Figura 2-26 derecha**). Esta configuración proporciona una luz uniforme y modulable, esencial para resaltar las texturas y colores vibrantes de los aceites. La disposición cuidadosa de las fuentes de luz minimiza la aparición de reflejos no deseados, garantizando que cada detalle sutil y característico de los aceites sea fielmente representado en la fotografía.



Figura 2-26: Iluminación complementaria de la fotografía en crisol

2.5.2.3 Maletín ruggedizado

Con el objetivo de llevar a cabo evaluaciones en campo del estado del aceite lubricante en vehículos militares, surgió la necesidad de diseñar un equipo portátil capaz de operar en condiciones extremas, como zonas de operaciones o campos de maniobras, donde no se dispone de laboratorios móviles. Para resolver este desafío, se optó por el uso de un maletín ruggedizado, que proporciona una solución robusta para la protección y transporte del equipo fotográfico necesario para el estudio.

Este maletín está diseñado para soportar golpes, vibraciones, humedad y temperaturas extremas, manteniendo la integridad del equipo durante las tareas de captura de imágenes de muestras de aceite. En su interior, cuenta con compartimentos específicos para la cámara endoscópica y otros accesorios esenciales, lo que facilita la organización y el acceso rápido al equipo.

Gracias a su diseño resistente, el maletín asegura que las imágenes puedan ser capturadas con precisión y seguridad, sin comprometer la calidad del equipo, incluso en entornos militares adversos. Este método permitirá realizar evaluaciones del estado del aceite lubricante en motores y cajas de cambio, apoyando el análisis visual posterior y la aplicación de técnicas de inteligencia artificial para obtener resultados precisos sobre el estado del aceite.

2.5.2.3.1 Descripción del maletín y sus componentes

En este apartado se describen detalladamente los componentes y el diseño del maletín ruggedizado, que es utilizado para la captura de imágenes de muestras de aceite lubricante en condiciones controladas. Cada componente ha sido seleccionado y alguno de ellos diseñado para garantizar la máxima eficiencia y precisión en el análisis fotográfico.

Los componentes que forman este nuevo modelo fotográfico para determinar el estado del aceite son los siguientes (**Figura 2-27**):

1. Maletín ruggedizado.
2. Cubeta para contener la muestra de aceite.
3. Estructura de sostenimiento de la cubeta.
4. Sistema de iluminación.
5. Cámara fotográfica endoscópica.



Figura 2-27: Componentes del modelo fotográfico del maletín

1. Maletín ruggedizado

El maletín ruggedizado está diseñado para proporcionar una solución robusta y eficiente para la fotografía de aceites de vehículos del Ejército de Tierra. Construido con materiales de alta resistencia, este maletín ofrece una protección excepcional contra impactos, humedad y otras condiciones adversas, asegurando la integridad de los componentes internos en todo momento.



Figura 2-28: Maletín ruggedizado

2. Cubeta para contener la muestra de aceite

La cubeta utilizada para contener la muestra de aceite es un recipiente especializado, previamente utilizado en otros modelos fotográficos (Kartell LABWARE para espectrofotometría), con todas sus caras transparentes (**Figura 2-62** y **Figura 2-29-a**), lo que facilita una evaluación precisa.

3. Estructura de sostenimiento de la cubeta

La estructura que sostiene la cubeta está diseñada con dimensiones específicas para asegurar su funcionalidad y estabilidad. Está fabricada de ácido poliláctico (PLA) mediante impresión 3D, y con unas dimensiones que permite un soporte robusto y confiable para la cubeta (**Figura 2-29-b**).

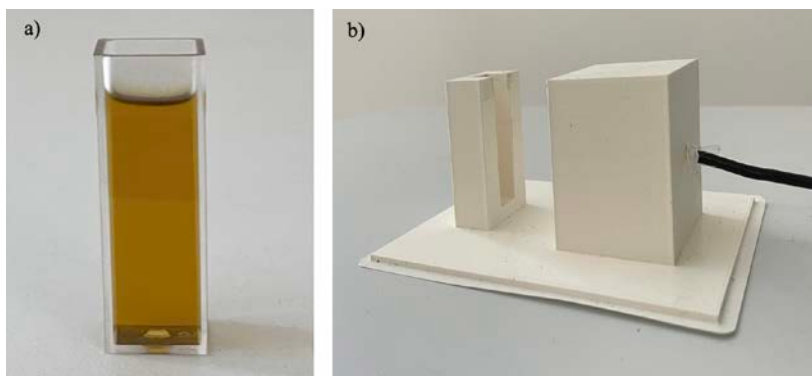


Figura 2-29: Cubeta (a) y estructura utilizada (b) para el modelo fotográfico del maletín

La cubeta se inserta en la estructura de PLA dentro del maletín, garantizando una fijación estable para la captura de fotografías.

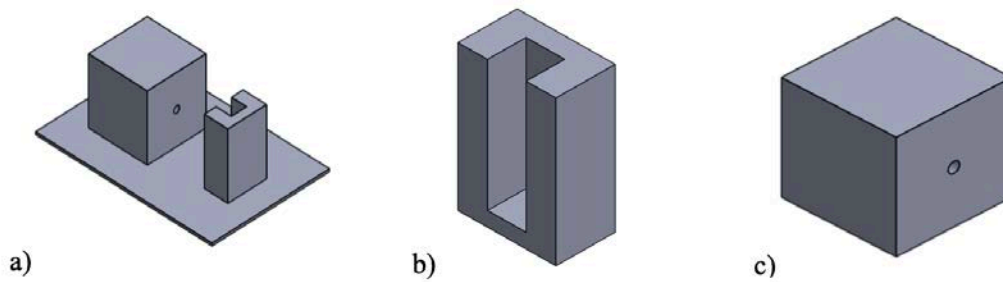


Figura 2-30: *Diseño de la estructura porta muestra (a); estructura para colocar la cubeta (b); estructura a través de la cual pasa la cámara endoscópica (c)*

Esta estructura ha sido diseñada específicamente para sostener la cubeta de aceite, como se muestra en la **Figura 2-30-a**, permitiendo una disposición ordenada y funcional de todo el equipo necesario. El diseño del soporte se detalla en los planos correspondientes, incluidos en el Apéndice A (ver Plano A.1). La estructura está compuesta por un recipiente que aloja la cubeta de aceite (**Figura 2-30-b**) (Apéndice A ver Plano A.3) y una estructura cúbica con una cavidad destinada a la inserción de una cámara endoscópica (**Figura 2-30 -c**) (Apéndice A ver Plano A.2), lo que facilita la captura de imágenes detalladas del aceite sin necesidad de manipular directamente la cubeta.

La base de la estructura diseñada para el soporte de la cubeta con la muestra de aceite tiene unas dimensiones específicas que aseguran su funcionalidad y estabilidad. Las dimensiones exactas de la pieza son las siguientes (Apéndice A ver Plano A.4):

- Longitud: 150 mm
- Anchura: 100 mm

Esta estructura, fabricada mediante impresión 3D con material PLA, proporciona un soporte robusto y confiable para la cubeta, permitiendo una evaluación precisa del aceite. La pieza está diseñada con tolerancias ajustadas para garantizar un ajuste perfecto y una alineación correcta de todos los componentes, **Figura 2-31**.

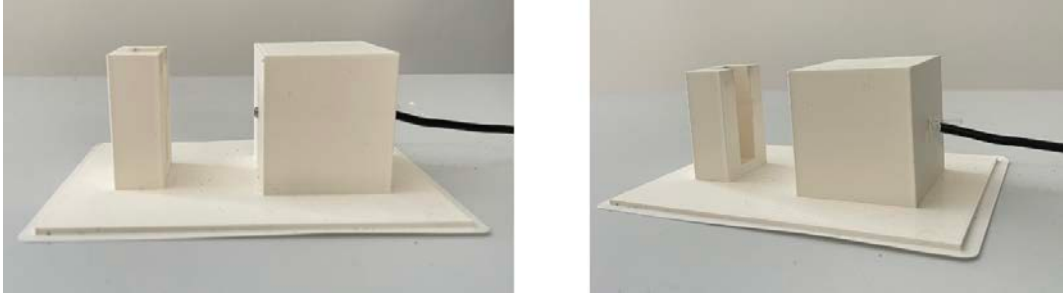


Figura 2-31: Soporte fotográfico visto desde diferentes ángulos para fotografiar muestras de aceite en el maletín

4. Sistema de iluminación

El sistema de iluminación del maletín consiste en dos tiras LED, alimentadas por una batería externa recargable.

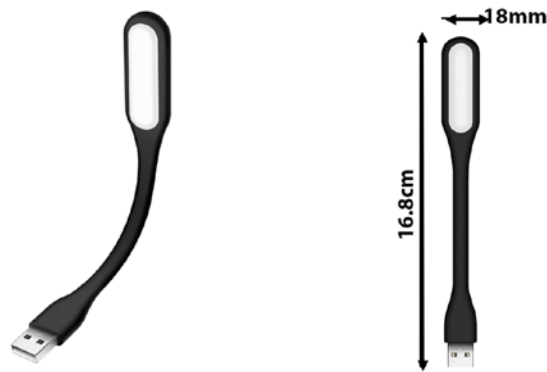


Figura 2-32: Tira LED utilizada para iluminar la muestra dentro del maletín

Estas tiras LED están alimentadas por una batería externa, **Figura 2-33**, lo que elimina la necesidad de una fuente de alimentación fija y proporciona flexibilidad y portabilidad. La batería externa recargable ofrece suficiente energía para sesiones prolongadas, asegurando que las tiras LED mantengan un brillo constante y óptimo. La iluminación de las dos tiras LED usadas como fuente de luz es de 12.439 lux dentro del maletín y completamente a oscuras. Este nivel de iluminación, proporcionado exclusivamente por las tiras LED, es considerablemente alto y garantiza una iluminación intensa y uniforme en el entorno, adecuada para aplicaciones que requieren una visibilidad máxima y un alto nivel de detalle visual.



Figura 2-33: Iluminación con dos tiras LED y el uso de batería externa

5. Cámara endoscópica

La cámara endoscópica (modelo Zealtron Industrial Endoscope 3.9mm con una pantalla IPS de 4.5 pulgadas) (**Figura 2-69**), que se inserta a través de la estructura de PLA ya pasa a través del maletín, es un componente crucial para el proceso de fotografía. Esta cámara, descrita en el apartado 2.5.1.2., permite la captura de imágenes detalladas del aceite, proporcionando una visión clara y precisa de su estado y características. Los cables conectores necesarios para el funcionamiento de la cámara están organizados dentro del maletín, asegurando un uso sencillo y libre de enredos (**Figura 2-34**).

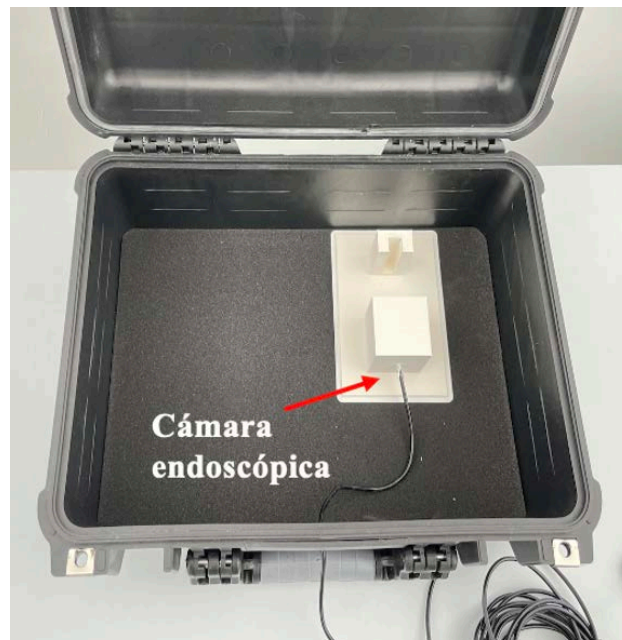


Figura 2-34: Colocación de la cámara endoscópica en el maletín rugerizado

2.5.2.3.2 Disposición interna del maletín

El maletín está equipado con espuma de alta densidad para garantizar la estabilidad y protección de la estructura de PLA y otros componentes, **Figura 2-35**. Esta espuma ha sido recortada cuidadosamente para ajustarse de manera precisa a la estructura, evitando movimientos y posibles daños o derrames tanto durante la captura de las fotografías como en el transporte.



Figura 2-35: Maletín sin espuma de sujeción (izquierda) y con espuma de sujeción (derecha)

El diseño del maletín facilita un acceso rápido y eficiente a todos los componentes. Las piezas se pueden ensamblar y desensamblar con facilidad, permitiendo al usuario preparar y recoger el equipo en poco tiempo. Además, el maletín cuenta con un asa ergonómica que facilita su transporte, y un sistema de cierre seguro que garantiza que todos los componentes permanezcan protegidos durante el traslado.

2.6 Selección del recipiente

El primer paso crucial en la fotografía de muestras de aceite es la elección del recipiente apropiado. Este no solo debe ser del tamaño adecuado para la cantidad de líquido a fotografiar, sino que también debe facilitar una iluminación óptima. La transparencia y la forma del recipiente juegan un papel fundamental en cómo la luz interactúa con el aceite, evitando reflejos indeseados que puedan distorsionar la imagen final. La selección cuidadosa del recipiente es, por lo tanto, esencial para preparar el escenario para una fotografía exitosa. Por ello, dada la incertidumbre sobre el recipiente

Capítulo 2: Materiales y métodos

más adecuado, se optó por la selección entre distintos tipos de recipientes con la finalidad de determinar el más adecuado para las necesidades establecidas.

Inicialmente, se evaluaron diversas opciones de recipientes que contendrían el aceite para posteriormente fotografiarlos. La estrategia fue experimentar con todos ellos para encontrar el más conveniente. Se planteó inicialmente que los recipientes fueran desechables, para ahorrar tiempo y evitar la limpieza tal y como se indica en la **Figura 2-36**.



Figura 2-36: Recipientes iniciales

Tras seleccionar los recipientes iniciales candidatos para contener las muestras de aceite, el siguiente paso consistía en añadir el aceite a cada uno de ellos y observar el comportamiento del aceite (**Figura 2-37**). Este proceso era crucial para determinar la idoneidad de cada recipiente en términos de visualización y comportamiento de la muestra de aceite.

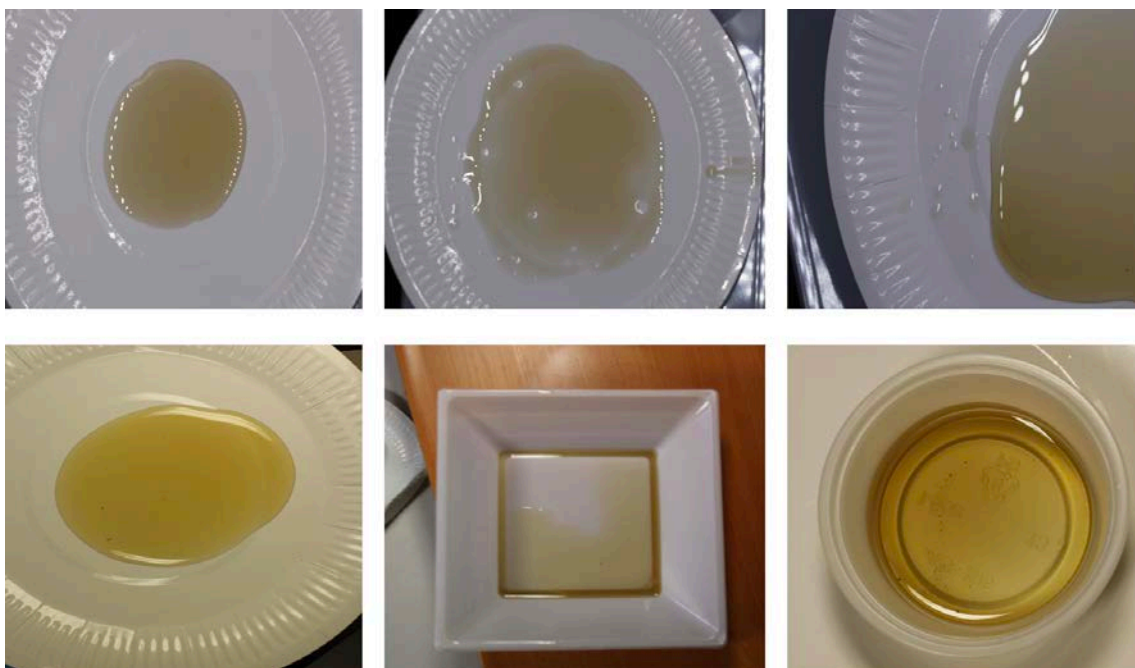


Figura 2-37: Prueba del comportamiento de diferentes recipientes con el aceite

Capítulo 2: Materiales y métodos

Inicialmente, resultó difícil encontrar el recipiente adecuado. Lograr fotografiar el aceite con claridad y precisión fue aún más complicado, ya que, al ser un líquido uniforme, la cámara no podía identificar un punto de referencia claro para facilitar el enfoque tal y como se indica en la **Figura 2-38**.

Al utilizar el primer recipiente para colocar el aceite, surgieron varios problemas que complicaron la toma de fotografías adecuadas. Inmediatamente después de verter el aceite, este se dispersaba rápidamente por todo el plato (**Figura 2-38**), evitando que se mantuviera concentrado y agrupado como se deseaba para su captura visual. Este comportamiento no solo dificultaba la obtención de una imagen clara y enfocada del aceite, sino que también afectaba la precisión de la representación visual deseada.



Figura 2-38: Dispersión del aceite en el plato

Además, el plato utilizado presentaba desniveles en su superficie (**Figura 2-39**), un aspecto que podría tener implicaciones significativas en estudios realizados mediante inteligencia artificial.



Figura 2-39: Irregularidades del primer recipiente estudiado

Los algoritmos encargados de analizar las imágenes podrían interpretar incorrectamente estos desniveles como características propias del aceite, introduciendo

Capítulo 2: Materiales y métodos

errores en la interpretación de los datos. Este tipo de confusión podría comprometer la validez de cualquier análisis realizado, ya que se basaría en información errónea sobre la naturaleza física del aceite.

Por lo tanto, era crucial seleccionar un recipiente que no solo mantuviera el aceite concentrado y agrupado para su fotografiado, sino que también tuviera una superficie uniforme y plana para evitar malinterpretaciones durante el análisis de las imágenes.

El problema con el segundo recipiente radicaba en un aspecto distinto al del primero. Aunque este recipiente permitía lograr la concentración y agrupación deseada del aceite, presentaba una nueva complicación: símbolos visibles en su superficie (**Figura 2-40**). Estos símbolos, a diferencia de los problemas de desniveles mencionados anteriormente, podrían ser interpretados erróneamente por la inteligencia artificial como parte de la información inherente al aceite.



Figura 2-40: Símbolos del recipiente que pueden afectar al posterior análisis con IA

La presencia de estos símbolos en las imágenes podría confundir a los algoritmos de IA, llevándolos a analizar estos marcadores gráficos como si fueran características o impurezas del aceite, lo que distorsionaría los resultados del análisis. La inteligencia artificial, al no distinguir entre los símbolos del recipiente y las propiedades físicas y químicas reales del aceite, podría generar conclusiones incorrectas sobre la clasificación de la muestra.

Este tipo de error en la interpretación de datos resalta la importancia de utilizar recipientes completamente neutros y sin marcas cuando se realizan estudios fotográficos destinados a análisis por IA. La selección cuidadosa de los recipientes es crucial para evitar la inclusión de elementos visuales no relacionados que podrían afectar negativamente la precisión de los resultados obtenidos.

Capítulo 2: Materiales y métodos

El tercer recipiente introducido en el estudio planteó una nueva problemática. A diferencia de los recipientes anteriores, este no poseía símbolos en su superficie que pudieran ser malinterpretados por la inteligencia artificial como parte del análisis del aceite. Sin embargo, el problema radicaba en su incapacidad para mantener el aceite concentrado en una zona específica; en vez de ello, el aceite se dispersaba hacia los bordes del recipiente (**Figura 2-41**).



Figura 2-41: Dispersión del aceite en el tercer recipiente

Esta dispersión hacia los laterales del recipiente mostrada en la **Figura 2-41**, impedía la formación de una muestra compacta y definida del aceite, esencial para realizar fotografías claras y detalladas necesarias para el análisis. La dispersión no solo afectaba la calidad visual de las imágenes, sino que también podría complicar el proceso de análisis por parte de la inteligencia artificial, dado que una distribución uniforme y concentrada de la muestra es crucial para un estudio preciso de sus propiedades.

Este comportamiento evidencia la importancia de elegir un recipiente que no solo esté libre de marcas que puedan confundir a los algoritmos inteligentes que se aplicaran, sino que también sea capaz de mantener la muestra de aceite adecuadamente agrupada para la captura y análisis fotográfico.

Ante estas situaciones, era necesario experimentar con un nuevo recipiente que buscara equilibrar las necesidades de retención y presentación visual del aceite sin introducir elementos que pudieran confundir el análisis de IA.

La búsqueda del recipiente ideal comenzó con un análisis detallado de los diseños anteriores, identificando los pros y contras de cada uno. La intención era diseñar un nuevo modelo que retuviera las ventajas sin incurrir en las desventajas observadas. Esto requería encontrar un recipiente que evitara relieves o dígitos que interfirieran con el análisis de IA

Capítulo 2: Materiales y métodos

y que, al mismo tiempo, retuviera y concentrara adecuadamente el aceite para su fotografía.

La capacidad de retener y concentrar el aceite en un espacio definido es esencial para obtener una fotografía de alta calidad. Esto permite no solo una mejor representación visual de la muestra sino también una interpretación más exacta por parte de la IA, que se basa en estas imágenes para su análisis.

Al final de este proceso iterativo de selección de continente, se llegó a dos recipientes cerámicos (crisoles) que se caracterizaban por su capacidad para concentrar la muestra sin añadir elementos distractores o distorsionantes, facilitando así la obtención de imágenes claras y precisas tal y como se muestra en la **Figura 2-42**.



Figura 2-42: Recipientes cerámicos (A: crisol esmaltado y brillante; B: crisol no esmaltado y mate)

La decisión de optar por un recipiente más brillante (**Figura 2-42-A**) frente a uno más mate (**Figura 2-42-B**), introducía una reflexión adicional respecto al impacto que la reflectividad de la superficie tendría en la toma de imágenes. Mientras que una superficie mate podría reducir los reflejos no deseados, la brillante podría proporcionar una estética visualmente más atractiva, aunque esto podría conllevar problemas debido a los reflejos.

Después de un meticuloso proceso de selección y análisis del recipiente, la elección final recayó en el crisol con acabado mate (**Figura 2-42-B**), eligiendo esta opción específicamente para minimizar los reflejos indeseados en las fotografías. La decisión se fundamentó en la necesidad de evitar cualquier brillo que pudiera interferir con la claridad y precisión de las imágenes capturadas. Este acabado mate, **Figura 2-43**, no solo facilitaba una representación visual más fiel de la muestra de aceite, al eliminar los reflejos que podían distorsionar la percepción de sus características, sino que también contribuía a una mayor consistencia en los resultados del análisis mediante inteligencia artificial, al proporcionar un fondo uniforme y sin alteraciones ajenas a las muestras.



Figura 2-43: Recipiente seleccionado (Capacidad de 100 mL)

Optar por un acabado mate en lugar de uno brillante se ajustaba al propósito de capturar imágenes de la más alta calidad, garantizando que las características del aceite se mantuvieran como el centro de interés, evitando las alteraciones y complicaciones que los reflejos podrían agregar al proceso de análisis del aceite.

2.7 Procedimientos fotográficos

Los procedimientos fotográficos desempeñan un papel esencial en la obtención de imágenes de calidad, que posteriormente serán analizadas mediante técnicas de inteligencia artificial. En este apartado, se detalla el protocolo seguido para la captura de imágenes de las muestras de aceite, desde la configuración de las cámaras utilizadas hasta los diferentes tipos de fotografías realizadas.

A continuación, se describen los métodos empleados para obtener imágenes en diferentes condiciones, como la fotografía en crisol, la fotografía en cubeta espectroscópica con iluminación LED, el uso de la cámara endoscópica para capturas en espacios reducidos, y la fotografía utilizando un maletín rugerizado para asegurar la portabilidad y seguridad del equipo. Cada tipo de fotografía se adapta a las características específicas del aceite y a las condiciones operativas, garantizando que las imágenes sean consistentes y adecuadas para el análisis detallado posterior.

2.7.1 Protocolo de fotografía a las muestras de aceite

En el campo del análisis de muestras de aceite mediante fotografía para su posterior evaluación a través de inteligencia artificial, es crucial contar con un método que

Capítulo 2: Materiales y métodos

garantice la reproducibilidad y la precisión. La búsqueda de un sistema óptimo para la toma de imágenes de las muestras es sumamente importante para obtener imágenes de alta calidad que faciliten la posterior interpretación mediante algoritmos.

Inicialmente, se propuso un procedimiento simple: una cámara fijada en un trípode y el cambio manual del porta muestras. Este sistema requería mínima intervención y prometía una ejecución rápida. No obstante, se presentaron inconvenientes significativos, tales como la dificultad para mantener la muestra en su lugar, tal y como se comentó anteriormente y para posicionar adecuadamente el plato porta muestras bajo la cámara, además de la variabilidad en las condiciones de iluminación.

Para superar estas limitaciones, se implementó un nuevo sistema que consiste en una caja de luz con una estructura cúbica de dimensiones 23x23x23 cm (**Figura 2-44**), diseñada para proporcionar iluminación uniforme y consistente para la fotografía de objetos pequeños. En concreto, se ha utilizado para fotografiar las muestras de aceite en estudio. La caja está construida con material plástico de color blanco, lo que ayuda a difundir la luz y minimizar las sombras y reflejos no deseados.



Figura 2-44: Modelo del segundo protocolo fotográfico

A continuación, se detalla la estructura de la caja de luz anterior:

- Estructura exterior:
 - La caja es de color blanco con un acabado mate que evita reflejos.
 - Las paredes laterales tienen un diseño curvado hacia el interior por el propio peso de la parte superior con los LED, lo que contribuye a la dispersión uniforme de la luz.
 - En la parte superior, la caja tiene una apertura circular, que puede estar cubierta por una tapa removible, permitiendo la entrada de luz desde arriba.

Capítulo 2: Materiales y métodos

- Estructura interior:
 - El interior de la caja es completamente blanco, lo que ayuda a reflejar la luz de manera uniforme.
- Iluminación:
 - La caja cuenta con dos series de luces LED integradas en la parte superior, que proporcionan una iluminación uniforme sobre el objeto.
 - Las luces LED están alineadas en el borde interior superior de la caja y tienen una distribución equidistante para asegurar una cobertura completa.
- Conexiones:
 - La caja tiene un cable que proporciona energía a las luces LED, conectado a una fuente de alimentación externa.

El sistema descrito es una caja que facilita la fotografía de las muestras, con una apertura frontal para facilitar la introducción de estas (**Figura 2-44**). El orificio en la parte superior de la caja, a través del cual se realiza la fotografía, está diseñado para alinear perfectamente la lente de la cámara con la muestra, minimizando las distorsiones y asegurando una captura precisa (**Figura 2-45**).



Figura 2-45: Detalle del segundo protocolo fotográfico

Este diseño optimiza las condiciones de iluminación y encuadre, obteniendo fotografías que capturan con detalle las características de la muestra. Tan sólo es necesario el cambio de muestra para fotografiar cada una de ellas.

Sin embargo, a pesar de los avances en la estabilidad de la luz, surgió un nuevo problema: los reflejos generados por la propia estructura y la iluminación LED, podían comprometer el análisis mediante IA tal y como se muestra en la **Figura 2-46**.

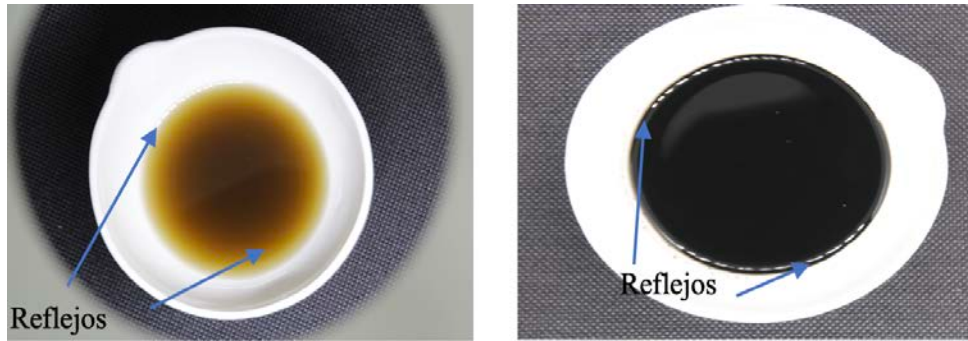


Figura 2-46: Reflejos en el segundo protocolo fotográfico

Para reducir estos problemas de reflejos no deseados en la superficie del aceite (**Figura 2-46**), se decidió abandonar la caja de luz y utilizar otro escenario fotográfico en el que se utilizaba un único foco de luz lateral.

El uso de solamente una fuente de luz atenuó algunos reflejos, pero no fue suficiente para iluminar bien las imágenes ni para eliminar del todo las sombras y los reflejos no deseados. La calidad de las imágenes seguía siendo inferior a la necesaria para capturar detalles exactos de las muestras de aceite.

Finalmente, se adoptó un sistema de doble iluminación lateral para abordar las limitaciones anteriores. Este sistema, representado en la **Figura 2-47**, consistió en la utilización de dos fuentes de luz posicionadas lateralmente. Este cambio permitió una mejor compensación de la luz, eliminando eficazmente las sombras y los reflejos no deseados. Al apagar las luces ambientales y emplear esta configuración dual, se logró una fuente de luz más equilibrada y direccional, lo que minimizó las variables no deseadas en las imágenes y enfocó la atención en las propiedades esenciales del aceite lubricante en estudio.



Figura 2-47: Doble sistema de iluminación

Capítulo 2: Materiales y métodos

Por tanto, la transición en la técnica fotográfica utilizada para capturar imágenes de las muestras de aceite fue fundamental para mejorar la calidad de estas. Inicialmente, se empezó a realizar las fotografías del aceite lubricante en el crisol, dentro de una caja blanca con iluminación LED (**Figura 2-44**). Sin embargo, debido a que las tiras de LED estaban demasiado cerca de la superficie del aceite, se producían reflejos indeseados que afectaban la claridad de las imágenes (**Figura 2-46**). Para solucionar este problema, se optó por tomar las fotografías desde un trípode y utilizando dos focos de iluminación lateral (**Figura 2-47**), lo que permitió obtener imágenes más claras y precisas. Este ajuste fue crucial para obtener fotografías claras y precisas de las muestras de aceite, libres de interferencias por reflejos o sombras no deseadas, permitiendo así una mejor evaluación de las propiedades del aceite en estudio.

Se realizaron pruebas fotográficas con diferentes ángulos de captura para reducir al mínimo los reflejos y lograr un enfoque más preciso del aceite, aunque los resultados no fueron satisfactorios (**Figura 2-48**). Asimismo, no se consiguió enfocar el aceite de manera óptima, como se observa en las siguientes imágenes.

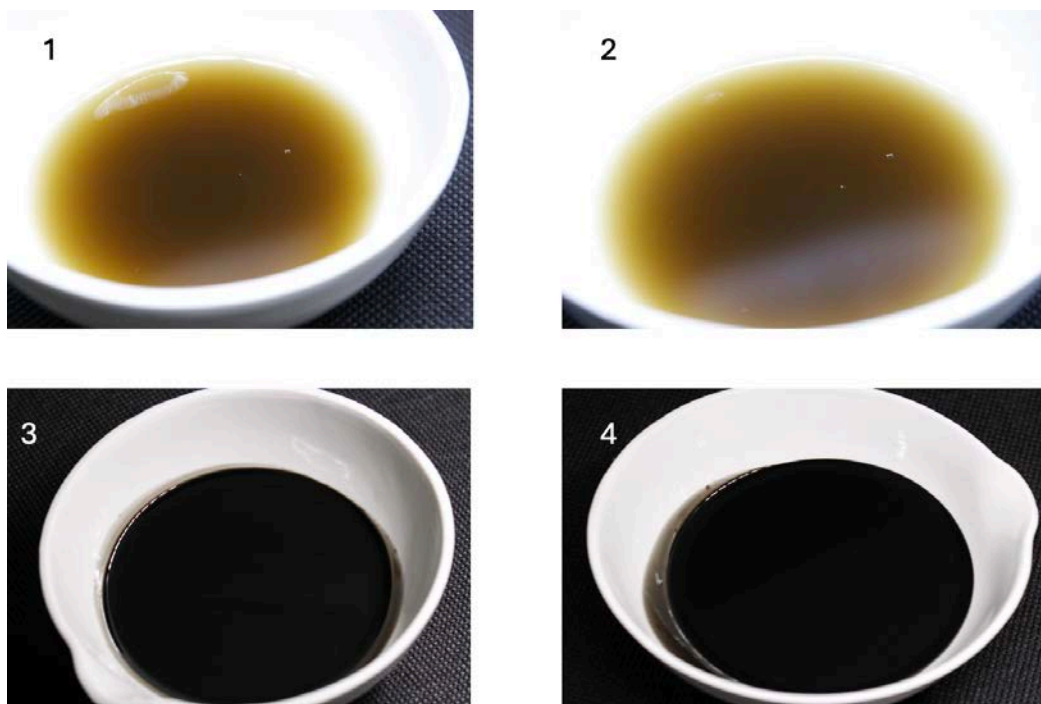


Figura 2-48: Toma de fotografía a diversos ángulos (La imagen 1 y 2 se trata de aceite O-1178 y la imagen 3 y 4 O-1236)

Después de una serie de pruebas, se concluyó que la mejor técnica era realizar las fotografías verticalmente desde arriba. Este enfoque permitió estabilizar las variables inicialmente desconocidas, como el tipo de recipiente para la muestra, la cámara adecuada y la disposición precisa para la toma de fotografías. Por tanto, a través de un proceso de

prueba y error, se ha establecido un método que permite una toma de imágenes estandarizada y reproducible, adecuada para la evaluación por IA.

Tras realizar diversas pruebas, y a través de un proceso de ensayo y error, se logró desarrollar un procedimiento estandarizado y reproducible para la captura de imágenes, optimizando su uso para su posterior evaluación por inteligencia artificial. Se concluyó que la técnica más eficaz para fotografiar las muestras era mediante tomas perpendiculares desde arriba tal y como se muestra en la **Figura 2-47**. Mediante esta técnica fue posible estabilizar variables que antes eran desconocidas, como el tipo de contenedor de la muestra, la selección de la cámara y la configuración precisa del equipo de fotografía.

2.7.2 Configuración de la cámara fotográfica

Como se detalló en el **Apartado 2.5.1** de este trabajo, la cámara fotográfica elegida para fotografiar los aceites usados ha sido la cámara Canon EOS 100D (DS126441) junto con el objetivo Canon EF-S 18-55mm con estabilizador de imagen (Image Stabilizer, IS) y capacidad macro de 0,25 m/ 0,8 ft.

Para capturar efectivamente imágenes de aceites en el recipiente seleccionado, se preparó cuidadosamente un entorno fotográfico para realizar todas las fotos con las mismas condiciones. Tal y como se explicó anteriormente, se fijó la iluminación y la distancia entre la cámara y el recipiente, asegurando condiciones constantes mediante el uso de un trípode. A continuación, se procedió a configurar la cámara fotográfica y para ello es fundamental considerar cómo los ajustes de la cámara afectan la captura de imágenes y cómo el enfoque manual puede ser una herramienta muy útil para poder enfocar las muestras de aceite.

A través de la velocidad de obturación, la apertura del diafragma y el ISO, se tiene el control de cómo la luz interactúa con el sensor de la cámara, influenciando directamente en la calidad de la imagen. Además, el enfoque manual ofrece un nivel de precisión y control que el enfoque automático no siempre puede proporcionar, especialmente en situaciones complicadas como cuando hay baja luz o elementos con poco contraste como es el caso de los aceites de motor y caja de cambios. Mediante el control de estos parámetros se va a conseguir fotografiar las muestras de aceites y obtener la máxima información posible de la imagen para posteriormente aplicar la IA.

2.7.2.1 Velocidad de obturación

La velocidad de obturación es un concepto fundamental en fotografía que determina cuánto tiempo permanece abierto el obturador de la cámara, permitiendo que la luz alcance el sensor. Este parámetro es clave para controlar la apariencia de los objetos en movimiento en las imágenes. Al seleccionar una velocidad de obturación alta, se puede "congelar" la acción, capturando momentos con gran precisión y sin desenfoque, lo que es ideal para deportes o aves en vuelo. Por otro lado, una velocidad de obturación baja crea un efecto de desenfoque en objetos en movimiento (**Figura 2-49**), lo que puede añadir una sensación de velocidad y fluidez a la foto, ideal para capturar el flujo de agua o las luces de la ciudad en movimiento por la noche [64].

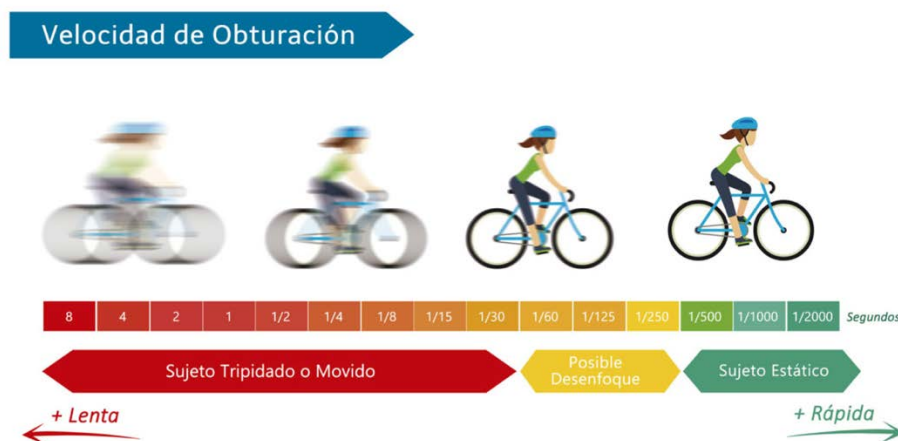


Figura 2-49: Velocidad de obturación [64]

La elección de la velocidad de obturación no solo influye en la nitidez o el desenfoque del movimiento, sino también en la exposición general de la imagen. Una velocidad más lenta permite que entre más luz, lo que puede ser útil en condiciones de baja luminosidad, pero requiere de un trípode para evitar el desenfoque por el movimiento de la cámara. La interacción entre la velocidad de obturación y la apertura (el tamaño del diafragma) es crucial para lograr el efecto deseado sin comprometer la exposición.

2.7.2.2 Apertura del diafragma

El diafragma es un elemento crucial de la cámara fotográfica y está diseñado con palas interconectadas que ajustan su apertura para controlar el flujo de luz que entra al sensor. Este mecanismo, análogo al iris del ojo humano, regula la intensidad de luz permitida, afectando directamente la exposición de la fotografía (**Figura 2-50**). La apertura del diafragma se mide mediante valores " f ", una relación que surge de dividir la

Capítulo 2: Materiales y métodos

longitud focal del lente por el diámetro efectivo de apertura del diafragma. Dicha relación es inversa; es decir, valores f más altos indican aperturas más pequeñas, restringiendo la entrada de luz y, consecuentemente, oscureciendo la imagen [65].

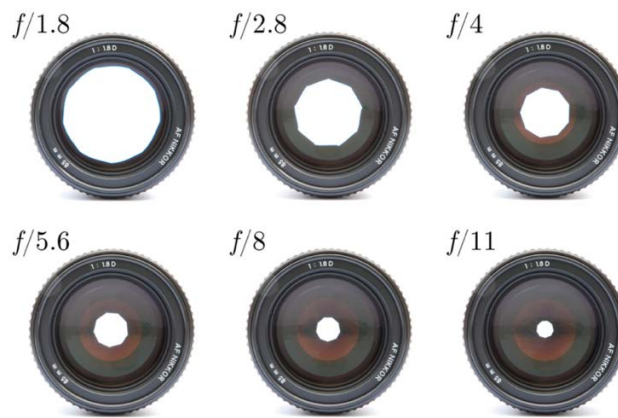


Figura 2-50: Apertura del diafragma [65]

La función del diafragma va más allá de la simple regulación de luz; también es determinante en la profundidad de campo de la imagen, es decir, el rango de distancia dentro del cual los objetos se perciben con claridad. Con aperturas grandes (números f pequeños), se logra una profundidad de campo reducida, enfocando selectivamente un sujeto mientras se difumina el fondo y viceversa para aperturas pequeñas (números f grandes), que extienden la nitidez desde el primer plano hasta el fondo (**Figura 2-51**).

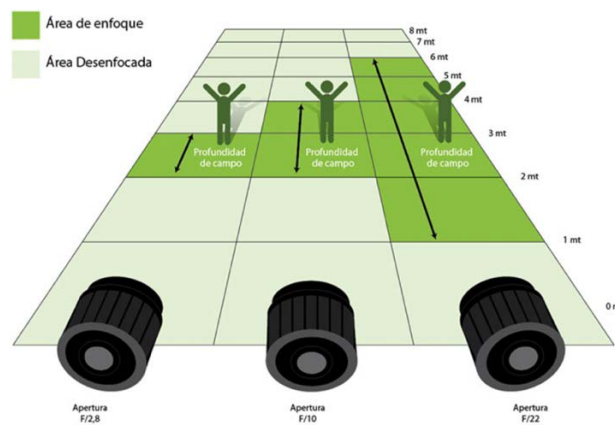


Figura 2-51: Apertura de diafragma y profundidad de campo [66]

2.7.2.3 Sensibilidad ISO

La sensibilidad ISO (del inglés, International Organization for Standardization) es un concepto clave en fotografía que se refiere a la capacidad del sensor de la cámara para captar luz. Esencialmente, ajustar el ISO cambia la sensibilidad del sensor a la luz disponible; valores más bajos (como ISO 100) indican menos sensibilidad, ideales para

Capítulo 2: Materiales y métodos

condiciones de luz brillante, mientras que valores más altos (como ISO 6400) aumentan la sensibilidad, permitiendo fotografiar en condiciones de baja iluminación sin recurrir a una fuente de luz alternativa (flash).

A diferencia de la velocidad de obturación y la apertura del diafragma, que físicamente controlan cuánta luz entra en la cámara, ajustar el ISO modifica cómo el sensor de imagen interpreta la luz que recibe. Al aumentar el ISO, se amplifica la señal del sensor, haciendo que la imagen parezca más brillante. Sin embargo, este proceso de amplificación no solo incrementa la visibilidad de los detalles en escenas oscuras sino también el ruido de la imagen, manifestado como un grano o pixelación que puede degradar la calidad.

El ruido es una alteración visual que resulta de la amplificación electrónica en altas sensibilidades ISO; es más notable en áreas de color uniforme, como cielos nocturnos o paredes lisas. Mientras que un ISO bajo produce imágenes limpias y claras, un ISO alto, necesario en entornos con poca luz, puede resultar en imágenes con ruido significativo.

Al fotografiar, es crucial encontrar un equilibrio entre la necesidad de luz y la tolerancia al ruido. Los fotógrafos a menudo ajustan el ISO junto con la velocidad de obturación y la apertura para lograr la exposición deseada sin comprometer excesivamente la calidad de la imagen. La comprensión y manipulación efectiva del ISO permiten una mayor flexibilidad creativa, permitiendo capturar imágenes en una amplia gama de condiciones de iluminación mientras se controla el impacto visual del ruido.

2.7.3 Tipos de fotografía realizada

En el presente apartado, se detallan la aplicación de cuatro técnicas fotográficas aplicadas al análisis de los aceites multigrado de motor (O-1236) y de transmisiones (O-1178). La implementación de estas técnicas permitió la documentación visual detallada de las muestras de aceite, previamente analizadas mediante pruebas fisicoquímicas estandarizadas, con el objetivo de facilitar un análisis exhaustivo y su posterior estudio comparativo.

La finalidad de fotografiar las muestras de aceite es implementar un método innovador que amplíe la comprensión y el conocimiento sobre los aceites de motor y de caja de cambios. La integración de estas imágenes en el estudio proporciona una rica base de datos que respalda un análisis comparativo detallado, permitiendo una comprensión

Capítulo 2: Materiales y métodos

más profunda de los aceites estudiados. Estas imágenes, junto con los resultados de los ensayos fisicoquímicos realizados, forman una base sólida para la aplicación de técnicas de inteligencia artificial que facilitarán la evaluación del estado del aceite.

El proceso fotográfico comienza con la captura de muestras de aceite en un crisol, como se muestra en la **Figura 2-43**, que sirve como referencia visual para comparaciones futuras. Posteriormente, se realiza un segundo tipo de fotografía utilizando una cubeta espectroscópica transparente dentro de una caja con iluminación LED controlada (**Figura 2-61** y **Figura 2-62**). Ambas técnicas fueron llevadas a cabo con la cámara Canon EOS 100D (DS126441) y el objetivo Canon EF-S 18-55mm, descritos en la **Tabla 2-21** del **apartado 2.5.1**.

En una fase más avanzada, se implementó un tercer modelo fotográfico utilizando una cámara endoscópica, con el objetivo de evaluar si la inteligencia artificial podía generar buenos resultados incluso con imágenes capturadas por un equipo de menores prestaciones que la cámara réflex. Este enfoque permitió probar la viabilidad de usar una cámara más compacta y versátil, reduciendo la dependencia de equipos voluminosos, sin comprometer la precisión necesaria para el análisis.

Debido a los buenos resultados obtenidos con estos tres modelos fotográficos, se incorporó un cuarto modelo: el uso del maletín rugerizado. Este método proporcionó ventajas adicionales en términos de portabilidad y protección del equipo en condiciones extremas, permitiendo realizar las capturas fotográficas en entornos operativos exigentes, sin comprometer la calidad de las imágenes.

En todos los casos, se mantuvo un riguroso control sobre la iluminación y la distancia de la cámara a la muestra para asegurar la uniformidad en los resultados. Este control preciso evitó distorsiones en las características de las muestras causadas por cambios en las condiciones de captura. La consistencia en estas variables es crucial para preservar la validez del análisis fotográfico y garantizar que las imágenes generadas formen parte de una base de datos confiable, que respalde un análisis comparativo detallado de las propiedades del aceite.

2.7.3.1 Fotografía en crisol

Mediante la fotografía de aceite en un cuenco cerámico (**Figura 2-43**) se busca aprovechar las propiedades visuales del aceite para crear imágenes con las que se pueda

Capítulo 2: Materiales y métodos

determinar su calidad como “conforme” o “no conforme”. Al verter aceite sobre el cuenco cerámico elegido y bajo unas determinadas condiciones de iluminación, se pueden obtener patrones y texturas únicos que caracterizan a los aceites previamente analizados.

Esta metodología permite una observación detallada que puede revelar información valiosa sobre la condición del aceite y, por tanto, del motor y de la caja de cambios en función del aceite analizado.

Para la optimización de los modelos inteligentes que se aplicaran posteriormente es necesario contar con las imágenes y con la calificación del aceite como “Conforme” o “No Conforme”. Es importante destacar que antes de proceder al análisis fotográfico, y para el proceso de optimización de los algoritmos inteligentes, todos los aceites fueron evaluados mediante pruebas fisicoquímicas y categorizados según los resultados obtenidos en dos grupos: “Conforme” y “No conforme”. Antes de iniciar el análisis fotográfico, es esencial verter el aceite lubricante que se quiere fotografiar: aceite de motor o caja cambios en el recipiente de cerámica limpio. La elección del cuenco cerámico, debido a su superficie no porosa, es crucial para prevenir la contaminación que podría alterar los resultados del estudio como ya se mencionó.

2.7.3.1.1 Proceso de colocación del aceite en el recipiente de cerámica

El aceite se añade al cuenco de manera gradual y meticulosa, con el objetivo de minimizar cualquier posible derrame y posible turbulencia. Es crucial, además, prevenir la formación de burbujas dentro del cuenco, dado que pueden afectar negativamente la homogeneidad de la muestra destinada a ser fotografiada. Para evitar dicha formación de burbujas, es recomendable no agitar el recipiente que contiene la muestra original con el tapón cerrado durante el proceso de homogeneización. La presencia de burbujas podría introducir patrones artificiales en los aceites, los cuales no corresponden a sus características intrínsecas.

Se añaden 40 mililitros de aceite en el recipiente, tras efectuar múltiples ensayos preliminares (viscosidad a 40 y 100°C, punto de inflamación, determinación de elementos metálicos, contenido en agua, ...). Esta cantidad específica se determinó con el objetivo de evitar la formación de una capa superficial de aceite excesivamente delgada o, por el contrario, una cantidad excesiva que obstaculizara la visualización y análisis de las características relevantes mediante la imagen.

Capítulo 2: Materiales y métodos

Para minimizar la probabilidad de que acontezca cualquier error ya sea antes o después de la toma de las imágenes o de la optimización de los algoritmos. Y establecer un protocolo claro en el experimento, se ha definido un orden específico en la manipulación de las muestras de aceite: comenzando con el aceite multigrado de la caja de cambios (O-1178) y luego el aceite multigrado de motor (O-1236), tal como se evidencia en la **Figura 2-52**. La metodología unifica los pasos a seguir, situando el cuenco para las muestras de aceite frente al contenedor porta muestras, el cual está adecuadamente numerado e identificado, garantizando una precisa correlación entre cada muestra y su documentación asociada.



Figura 2-52: Colocación de las muestras previamente a ser analizadas

2.7.3.1.2 Equipo y configuración

Para la realización de este tipo de fotografía se hizo uso del siguiente material, ya descrito anteriormente, tal y como se muestra en la **Figura 2-47**:

- Cámara Canon EOS 100D (DS126441) junto con el objetivo Canon EF S 18-55mm (**Figura 2-23**).
- Trípode para fijar la cámara y asegurar una fotografía de calidad (**Figura 2-24**).
- Dos focos colocados a los laterales del cuenco donde se deposita el aceite (**Figura 2-47**).
- Crisol con una capacidad de 100 mL en donde depositar la muestra de aceite (**Figura 2-43**).

Capítulo 2: Materiales y métodos

- Alfombrilla negra en donde se coloca en cuenco cerámico tal y como se indica en la **Figura 2-53**.



Figura 2-53: Colocación de la cámara fotográfica en el trípode

La selección de una alfombrilla de color negro se realiza con el propósito específico de establecer un fondo uniforme y sin distracciones. Esto facilita que el aceite contenido en el cuenco adquiera un protagonismo visual destacado, al minimizar interferencias visuales del entorno. Dicha estrategia se fundamenta en principios de cómo la percepción visual humana responde a contrastes fuertes para mejorar la apreciación de los detalles y la textura del aceite.

Una vez establecido el escenario, incluyendo condiciones constantes de iluminación de 503 lux y la distancia fija entre la cámara y al cuenco con aceite de 33 cm (**Figura 2-47**), se procedió a establecer la configuración, tal y como se determinó anteriormente, de los parámetros óptimos de la cámara para garantizar la calidad fotográfica deseada. La configuración final que se ha utilizado para esta primera configuración fotográfica y con la finalidad de maximizar la nitidez de la imagen y el detalle del aceite es la siguiente:

- velocidad de obturación de 1/4 de segundo.
- apertura de diafragma de $f/16$.
- sensibilidad ISO establecida en 100.

A continuación, tras colocar el recipiente con la muestra de aceite para fotografiar en el escenario fotográfico establecido, se procede a la realización del enfoque de la imagen

Capítulo 2: Materiales y métodos

lo cual supone una etapa muy importante dada la naturaleza líquida y homogénea del aceite. El enfoque se realiza utilizando la trama descrita anteriormente.

Después de posicionar el crisol con la muestra de aceite de manera adecuada, configurar la cámara y asegurar las condiciones de iluminación óptimas, se procedió a la toma fotográfica de la muestra. El protocolo fotográfico implementado requirió la obtención de cuatro fotografías por muestra, divididas en dos en formato JPEG y dos en formato RAW. Para ello, el recipiente con el aceite fue rotado 90 grados desde su posición inicial, como se muestra en la **Figura 2-54**.

De este modo se consiguió tener más fotografías de cada una de las muestras y enriquecer el archivo fotográfico de cada muestra. Además, cada imagen podía variar dependiendo de la posición de la muestra, lo que añadía una capa adicional de diversidad y detalle a la documentación visual.

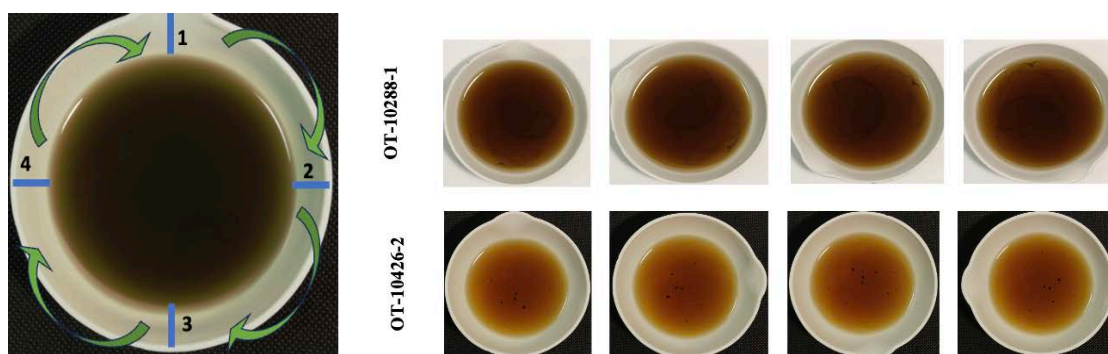


Figura 2-54: Posiciones del cuenco porta muestras para un aceite O-1178

Ante la gran diversidad de muestras de aceites y con el fin de evitar errores humanos, tales como la realización de un número insuficiente de fotografías por muestra o la confusión entre estas, se ha establecido un protocolo fotográfico. Dicho protocolo establece que se debe comenzar fotografiando el número de orden de trabajo y el número de la muestra, indicados en una etiqueta tal y como se indica en la **Figura 2-55**. Este procedimiento facilita la organización y clasificación de las fotografías, asegurando que, para cada muestra de aceite fotografiada, la primera imagen corresponda a la identificación de la orden de trabajo y el número de muestra, seguida de las cuatro fotografías detalladas de cada muestra, conforme se indica en la **Figura 2-54**.



Figura 2-55: Identificación fotográfica del número de Orden de Trabajo y número de muestra para una muestra de aceite O-1178

Como ya se mencionó en el **apartado 2.3.3**, la orden de trabajo hace referencia a un número que se le da al conjunto de aceites que cada Unidad operativa del Ejército de Tierra envía para que se analice en el laboratorio y el número de muestra se refiere al número asignado a cada muestra dentro de cada orden de trabajo.

A continuación, en la **Tabla 2-23**, se indica el número de fotografías realizado para cada tipo de muestras en esta primera configuración fotográfica.

Tabla 2-23: Número de fotografías realizadas

	TIPO DE ACEITE			
	O-1178		O-1236	
	CONFORME	NO CONFORME	CONFORME	NO CONFORME
Número de fotografías	421	140	496	153

2.7.3.1.3 Enfoque de la imagen

Enfocar correctamente una muestra de aceite para tomar una fotografía presenta varios desafíos. Uno de los primeros obstáculos es encontrar el recipiente adecuado para la muestra. Este recipiente no solo debe ser el tamaño correcto para la cantidad de aceite que se desea fotografiar, sino que también debe permitir que la luz se refleje de manera adecuada sin crear reflejos indeseados que puedan distorsionar la imagen.

El principal desafío radica en la naturaleza homogénea del aceite. Al ser un líquido con una superficie lisa y uniforme, sin variaciones visibles, la cámara tiene dificultades para encontrar un punto de referencia claro que le permita enfocar correctamente. La mayoría de las cámaras están diseñadas para detectar contrastes o detalles específicos para determinar el punto de enfoque. En el caso del aceite, la ausencia de estos elementos

Capítulo 2: Materiales y métodos

hace que el autoenfoco de la cámara falle, resultando fotografías en las que la muestra aparece borrosa o no completamente enfocada tal y como se muestra en la **Figura 2-56**.



Figura 2-56: Problemas de enfoque en los recipientes utilizados

En estos ejemplos visuales de fotografías se observa que no se logró enfocar correctamente la muestra de aceite debido a la falta de puntos de referencia claros. Esto, junto con el reflejo homogéneo de la luz sobre la superficie del aceite, pueden interferir significativamente con la capacidad de la cámara para capturar la muestra con claridad y precisión.

Para resolver la problemática del enfoque de la muestra de aceite se utilizaron dos soluciones: una solución efectiva fue el uso del enfoque manual, que permite ajustar precisamente el enfoque hasta que la muestra de aceite se vea clara y definida. Esta técnica requiere habilidad, pero ofrece control total sobre el resultado final de la imagen. Y la otra solución fue incorporar un elemento de contraste en el aceite tal y como se muestra en la **Figura 2-57**. Este objeto debe ser suficiente para proporcionar un punto de referencia para el enfoque de la cámara.

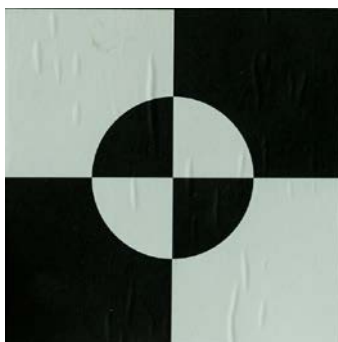


Figura 2-57: Imagen de contraste para facilitar el enfoque de forma manual (trama)

Para lograr un enfoque preciso en la fotografía de muestras de aceite, es esencial la colocación de una trama sobre la superficie del líquido. Esta trama actúa como una guía visual que proporciona los puntos de referencia necesarios para que la cámara pueda ajustar su enfoque de manera efectiva. Al posicionar la trama cuidadosamente sobre el

Capítulo 2: Materiales y métodos

aceite, es mucho más fácil ajustar manualmente el enfoque hasta que la imagen de la trama se visualice con total claridad.

A continuación, tal y como se indica en la **Figura 2-58**, se muestra la colocación de la trama en la superficie del aceite y sobre la que se enfocaba la cámara de forma manual.



Figura 2-58: Colocación de la trama en el aceite para realizar el enfoque

En la **Figura 2-59** se observa cómo se ve en la cámara la colocación de la trama sobre el aceite que se va a fotografiar.



Figura 2-59: Visión de la trama en la cámara

El proceso descrito en la **Figura 2-58** y **Figura 2-59**, describe el procedimiento para superar los desafíos de enfocar un líquido homogéneo como es el aceite. Colocando una trama sobre la superficie del aceite, se proporciona un punto de referencia claro para el mecanismo de enfoque de la cámara. Esta trama, compuesta por líneas delgadas que forman cuadrados o rectángulos, actúa como un elemento rico en contraste contra el suave fondo del aceite, permitiendo que la cámara se enfoque en un área específica con mayor facilidad.

En la **Figura 2-60** se observa el proceso de enfoque de la cámara con la trama colocada sobre el aceite que se va a fotografiar en el crisol.

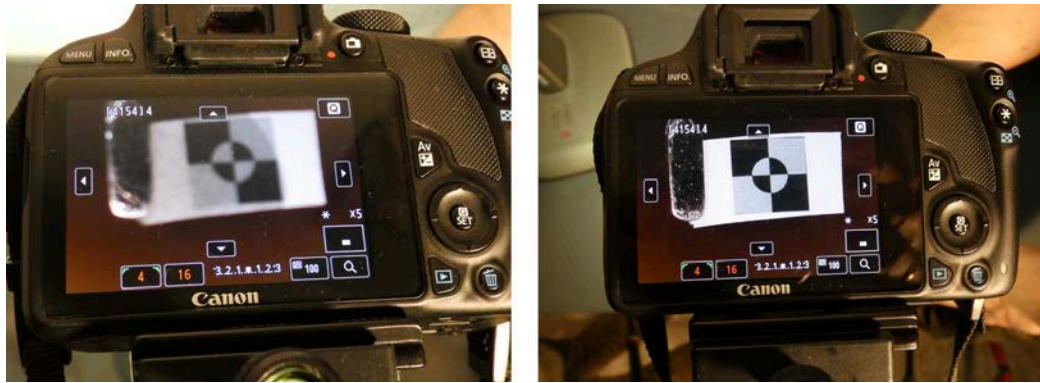


Figura 2-60: Enfoque de la trama

La trama debe ser colocada cuidadosamente sobre la superficie del aceite de manera que no se hunda en el aceite o perturbe demasiado la superficie, lo que podría crear ondulaciones o reflejos no deseados. El objetivo de este proceso es mantener la integridad de la superficie del aceite mientras se introduce suficiente detalle visual para un enfoque efectivo.

Una vez la trama está en su lugar, la cámara se ajusta al modo de enfoque manual. Esto permite al fotógrafo evitar el sistema automático de enfoque de la cámara, que podría tener dificultades para encontrar el enfoque en la superficie homogénea del aceite. Ajustando manualmente el enfoque, se puede controlar precisamente el punto de enfoque, asegurando que las líneas de la trama sean nítidas y claramente definidas en la imagen final (**Figura 2-60**).

2.7.3.2 Fotografía en cubeta espectroscópica dentro de caja con LED

El segundo método fotográfico consiste en tomar imágenes de las muestras de aceite colocadas en una cubeta transparente situada dentro de una caja con una iluminación específica como se puede ver en la **Figura 2-61**. Al introducir la muestra de aceite dentro de una cubeta transparente, se restringe su interacción con el ambiente externo, lo que permite un control más detallado de las condiciones lumínicas y del entorno de captura fotográfica. Este método pretende imitar un sistema auxiliar emergente del cárter, que se encarga específicamente de recoger y analizar muestras de aceite.

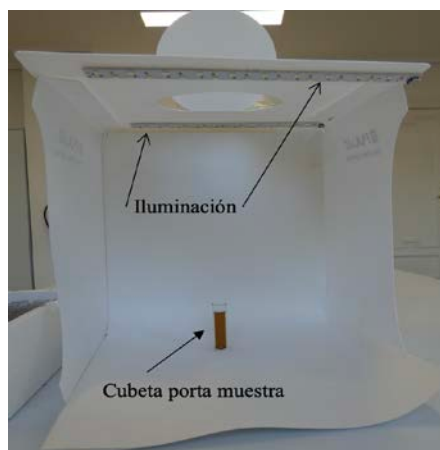


Figura 2-61: Disposición del escenario fotográfico 2

2.7.3.2.1 Proceso de colocación del aceite en cubeta

El proceso de colocación del aceite en cubetas sigue un procedimiento estandarizado tanto para las fotografías realizadas con la cámara réflex como con la cámara endoscópica. Estos tipos de fotografía se describirán más adelante. La transferencia de la muestra debe realizarse con sumo cuidado para evitar derrames y la formación de burbujas, ya que estas podrían interferir en la calidad de las imágenes y generar patrones anómalos durante el análisis con inteligencia artificial, lo que afectaría los resultados del estudio.

Para realizar este modelo de fotografía se han usado las cubetas de Kartell LABWARE para espectrofotometría con todas las caras transparentes. Estas cubetas son idóneas para análisis ópticos precisos, ya que están fabricadas con PS óptico y permiten analizar espectros de 280 a 800 nm. El modelo elegido tiene 4 caras ópticas y una capacidad máxima de 4,5 mL.



Figura 2-62: Muestra de aceite contenido en la cubeta transparente Kartell LABWARE para espectrofotometría

Capítulo 2: Materiales y métodos

Para evitar la aparición de burbujas, es fundamental no agitar el recipiente con la muestra original durante el proceso de homogeneización. Las cubetas se llenan de manera uniforme, añadiendo primero el aceite multigrado de caja de cambios (O-1178) y luego el aceite multigrado de motor (O-1236), como se muestra en la **Figura 2-63**. Se introduce una cantidad de 3 mililitros de muestra de aceite en cada cubeta.



Figura 2-63: Colocación de las cubetas

Independientemente del tipo de cámara utilizada, las cubetas se llenan siguiendo un orden específico para asegurar la consistencia y orden en todas las muestras. Las cubetas llenas se inspeccionan visualmente para garantizar la ausencia de burbujas. En caso de detectarse burbujas, estas se eliminan cuidadosamente con una espátula pequeña.

2.7.3.2.2 Equipo y configuración

Para la realización de este tipo de fotografía se hizo uso del siguiente material, ya descrito anteriormente:

- Cámara Canon EOS 100D (DS126441) junto con el objetivo Canon EF S 18-55mm (**Figura 2-23**).
- Trípode para fijar la cámara y asegurar una fotografía de calidad (**Figura 2-25 derecha**).
- Caja con apertura frontal y dos tiras de luz LED en la parte superior (**Figura 2-61**).
- Cubeta espectroscópica transparente en donde depositar la muestra de aceite (**Figura 2-62**).

La precisión en la captura fotográfica es crítica para luego realizar análisis cualitativos y cuantitativos con la mayor exactitud posible.

Capítulo 2: Materiales y métodos

Después de definir el escenario con una iluminación constante de 1806 lux proporcionada por las dos tiras de LED de la caja y mantener fija la distancia entre la cámara y el objeto a fotografiar (la cubeta rellena con aceite) de 22 cm, se establecieron los parámetros de la cámara para asegurar la calidad de imagen deseada. Para esta segunda configuración fotográfica y con el fin de maximizar la claridad y los detalles del aceite, se adoptaron los siguientes ajustes:

- Distancia focal: 46 mm
- Apertura de diafragma: f/5,6
- Tiempo de exposición: 1/50

Con la distancia focal de 46 mm se acerca a la perspectiva natural del ojo humano, ofreciendo una representación fiel de la escena sin las distorsiones características de lentes gran angular o teleobjetivos. Al utilizar esta distancia focal, se garantiza que los detalles de la muestra sean capturados con claridad y sin alteraciones geométricas como se puede ver en la **Figura 2-65**. La apertura de f/5.6 es un término medio que permite una entrada suficiente de luz, al tiempo que mantiene una profundidad de campo adecuada para que la muestra se muestre nítida, desde el frente hasta el fondo. Con un tiempo de exposición de 1/50 de segundo, se encuentra el balance óptimo entre la obtención de una imagen con buena iluminación y la prevención de desenfoques por movimiento. Con estos ajustes se consigue que cada detalle se capture en la imagen con exactitud y adecuada resolución (**Figura 2-65**).

2.7.3.2.3 Enfoque de la imagen

Para fotografiar el aceite, se utiliza un recipiente transparente y de un solo uso, que facilita la visualización de la muestra. Lo que diferencia a este recipiente es su diseño simple, que permite examinar la muestra desde cualquiera de sus cuatro lados, como se muestra en la **Figura 2-62**.

La cubeta que contiene el aceite se coloca dentro de una caja con una iluminación constante proporcionada por dos tiras LED situadas en la parte superior de la estructura (**Figura 2-64**). Este sistema de iluminación LED permite controlar la intensidad y dirección de la luz, realizando características específicas del aceite como su viscosidad, color y reflejos. La caja está diseñada con un solo lado abierto para facilitar la introducción de la muestra sin dañarla, asegurando condiciones controladas y reproducibles para la fotografía del aceite.

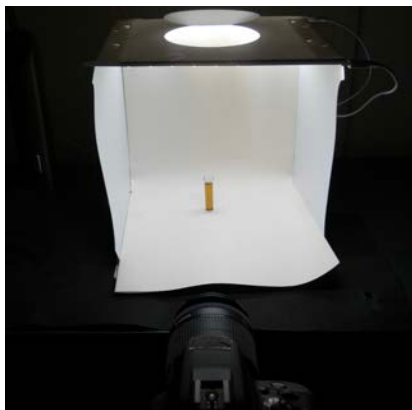


Figura 2-64: Escenario fotográfico 2° para fotografiar una muestra de aceite en cubeta

El control de la luz es clave para obtener imágenes que reflejen fielmente y con detalle el aceite lubricante, como se observa en la **Figura 2-65**. Las dos bandas LED proveen una iluminación potente y homogénea, necesaria para destacar las características físicas de la muestra. La iluminación LED es eficiente desde el punto de vista energético sin generar un calor apreciable, lo cual es vital para conservar la muestra sin cambios provocados por fuentes de calor.



Figura 2-65: Cubetas con muestra de aceite en la que se ven contaminantes

Para evaluar la influencia de la iluminación LED en la estabilidad térmica, se realizó un experimento manteniendo los LEDs activados y monitoreando cualquier fluctuación de la temperatura. Durante el experimento, se midió la temperatura utilizando el sensor Crison TM65, con una incertidumbre de ± 0.1 °C. Se registró que, en ausencia de luz LED, la temperatura permanecía en 26°C. Sin embargo, al encender los LEDs y tras un periodo de 10 minutos, la temperatura ascendió levemente a 26,4°C. A los 15 minutos, la temperatura alcanzó 26,5°C y se estabilizó, manteniéndose constante. Estos resultados proporcionan una cuantificación más precisa del efecto térmico de la iluminación LED y confirma que, aunque hay un ligero incremento, este es mínimo y no debería tener un efecto significativo en la muestra.

Capítulo 2: Materiales y métodos

En base a lo anterior, se puede concluir que la iluminación LED es una opción eficiente y segura para mantener la integridad de la muestra sin alteraciones significativas debido al calor, lo que la convierte en una herramienta ideal para capturar imágenes detalladas y precisas en este tipo de análisis.

Tras situar la cubeta con aceite en el área preparada para la fotografía, se inicia el proceso de enfoque de la imagen. Esta etapa, al igual que en el primer escenario fotográfico, es crucial debido a la textura homogénea y líquida del aceite y el proceso de enfoque también se realiza empleando una trama para facilitar la tarea tal y como se muestra en la **Figura 2-66**.

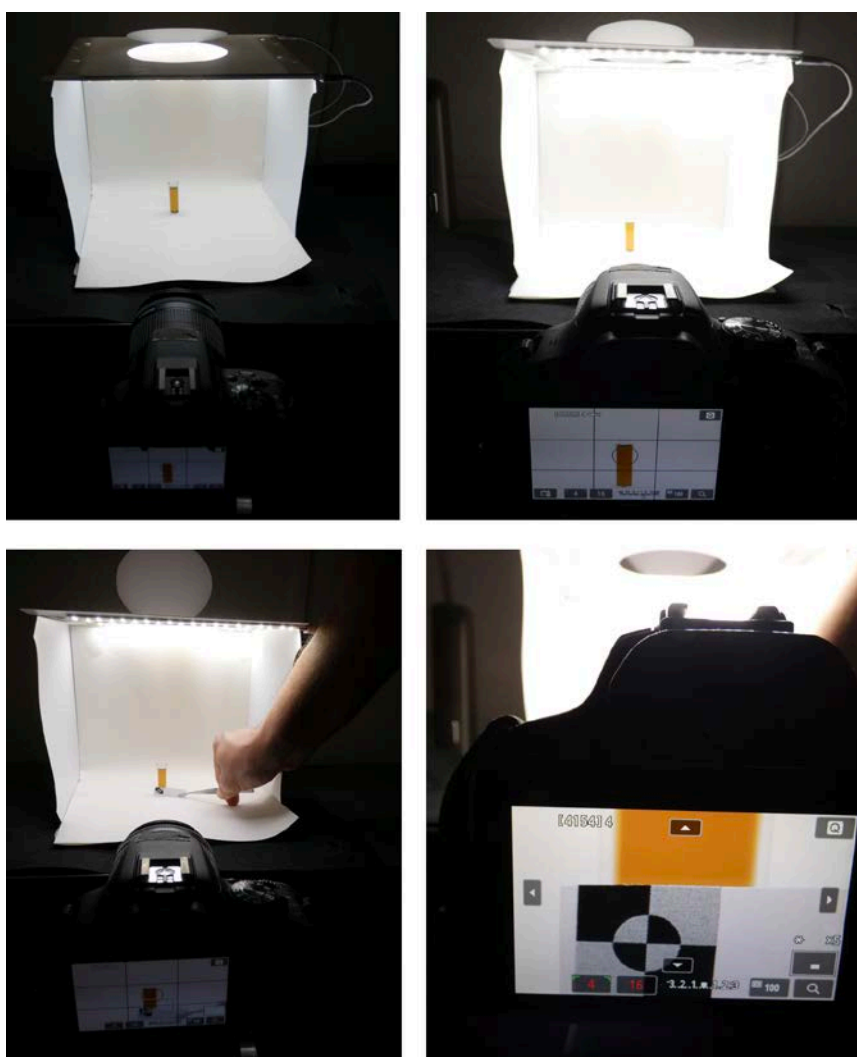


Figura 2-66: Procedimiento de enfoque en el escenario fotográfico 2º

A continuación, se procede a fotografiar cada una de las muestras. Cada muestra de aceite es fotografiada desde cada una de las cuatro caras del recipiente, resultando en un total de cuatro fotografías por muestra (**Figura 2-67**). Asimismo, cada imagen capturada

Capítulo 2: Materiales y métodos

puede ofrecer una perspectiva distinta según la posición de la muestra, aportando variedad y un mayor nivel de precisión en la documentación visual.

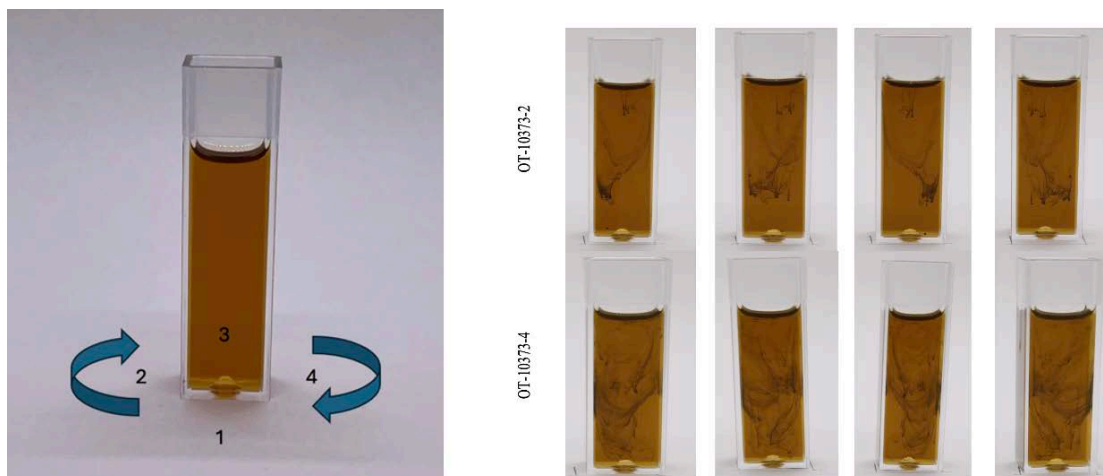


Figura 2-67: Fotografía de cada una de las cuatro caras de la misma cubeta para un aceite O-1178

Este método de cuatro pasos (una fotografía en cada posición) proporciona una visión completa y detallada de la muestra, permitiendo intuir visualmente si un aceite es más viscoso que otro con relativa facilidad y detectar con mayor exactitud la presencia de impurezas o la coloración. La detección de impurezas se observa mucho mejor en el aceite de la caja de cambios que en el aceite de motor, como se puede ver en la **Figura 2-67** o en la **Figura 2-68**, donde se comparan ambos tipos de aceite.



Figura 2-68: Cubeta rellena con aceite de motor (izquierda) y caja de cambios (derecha)

Tener una visualización de la muestra desde cuatro perspectivas diferentes permite llevar a cabo una evaluación mucho más detallada y precisa. Además, esta metodología incrementa la confiabilidad del diagnóstico y reduce la probabilidad de cometer errores. Esta técnica ofrece una valoración más exhaustiva al obtener una imagen de los cuatro

Capítulo 2: Materiales y métodos

lados de la muestra. Además, esta metodología aumenta la fiabilidad del diagnóstico y reduce la probabilidad de errores.

Al igual que se hizo en el primer procedimiento fotográfico, la primera foto de cada muestra de aceite se hace con una etiqueta que indica el número de la orden de trabajo y el número de muestra. Este procedimiento facilita y evita errores en la posterior clasificación de las fotografías.

2.7.3.3 Fotografía con cámara endoscópica

El uso de una cámara endoscópica para fotografiar el aceite surgió inicialmente con la idea de explorar la posibilidad de fotografiar el aceite *in situ*, sin necesidad de extraer una muestra para posteriormente analizarlo. Gracias a su diseño, la cámara endoscópica facilita la inspección de espacios confinados y permite la documentación de detalles minúsculos, previamente inalcanzables con métodos convencionales. Con la capacidad de la cámara endoscópica para navegar por entornos reducidos y su flexibilidad, se abría la posibilidad de fotografiar el aceite directamente en su entorno natural (motor y caja de cambios), evitando así la necesidad de extracción de muestras de aceite para su posterior análisis. Este enfoque no solo posibilita fotografiar texturas internas únicas, sino que también permite registrar la interacción del aceite con diversos materiales.

El objetivo era que la fotografía endoscópica, junto con tecnologías como la inteligencia artificial y el aprendizaje automático, ofreciera un mayor nivel de automatización y precisión en el diagnóstico y mantenimiento de los vehículos examinados. La aplicación de este método se ideó no solo para mejorar la calidad de las inspecciones, sino también para permitir el análisis detallado de los componentes internos del motor y caja de cambios que, de otro modo, serían inaccesibles o exigirían un desmontaje completo del motor.

Este dispositivo, **Figura 2-69**, permite adquirir imágenes de las muestras de aceite bajo condiciones lumínicas similares a las del segundo método. La inclusión de la cámara endoscópica busca determinar si es posible lograr resultados comparables o prácticamente equivalentes a los conseguidos con cámaras de alta gama, como la mencionada Canon EOS 100D (DS126441), pero utilizando un dispositivo de capacidades técnicas más limitadas.



Figura 2-69: Cámara endoscópica (modelo Zealtron Industrial Endoscope 3.9mm)

En cuanto a la cámara donde captar las imágenes, el principio fundamental de este sistema reside en la construcción de un entorno simulado que reproduce las condiciones internas de un cárter. El desarrollo de un prototipo en forma de caja oscura (**Figura 2-70**), fabricada con madera, permite no solo simular la oscuridad y estrechez del espacio dentro del cárter, sino también controlar los factores de iluminación y posición de la cámara para capturas óptimas.

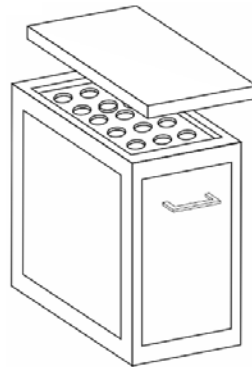


Figura 2-70: Caja de madera que simula el cárter

La precisión de las imágenes obtenidas permitiría un diagnóstico más acertado de las condiciones internas del cárter y, por tanto, una intervención más efectiva. La capacidad para detectar problemas sin necesidad de desmontar el motor o la caja de cambios completa o parcialmente es una ventaja considerable en términos de ahorro de tiempo y recursos.

La hipótesis inicial se sustentaba en que las imágenes con gran detalle y nitidez ayudarían a una mejor valoración del estado de las piezas y componentes internos de los equipos analizados, lo que supondría un aumento en la fiabilidad de las valoraciones, haciendo posible y más fácil tomar decisiones mejor fundamentadas sobre el mantenimiento requerido.

Capítulo 2: Materiales y métodos

Las muestras de aceite, conservadas en sus recipientes originales, se colocaban dentro de una caja de madera diseñada específicamente para simular el entorno interno de un cárter (**Figura 2-70**). Dichas muestras se colocan en ubicaciones predeterminadas dentro de esta estructura, asegurando su alineación con los parámetros de diseño (**Figura 2-70**).

Posteriormente, una vez posicionadas, las muestras se cubrían para imitar la ausencia de luz dentro de un cárter real y recrear de manera precisa las condiciones bajo las cuales el aceite opera en su contexto natural (**Figura 2-71**).



Figura 2-71: Sistema para cubrir el recipiente contenedor de la muestra de aceite y la introducción de la cámara endoscópica

Para el análisis minucioso de las muestras de aceite, se introduce con cuidado la cámara endoscópica por el hueco designado en el tapón. Este método permite examinar a fondo el ambiente interno simulado y recoger imágenes y datos visuales fidedignos desde el interior, lo cual es fundamental para la investigación y el análisis posteriores pues simula el estado del aceite en condiciones que se asemejan mucho a su entorno operativo (**Figura 2-72**).

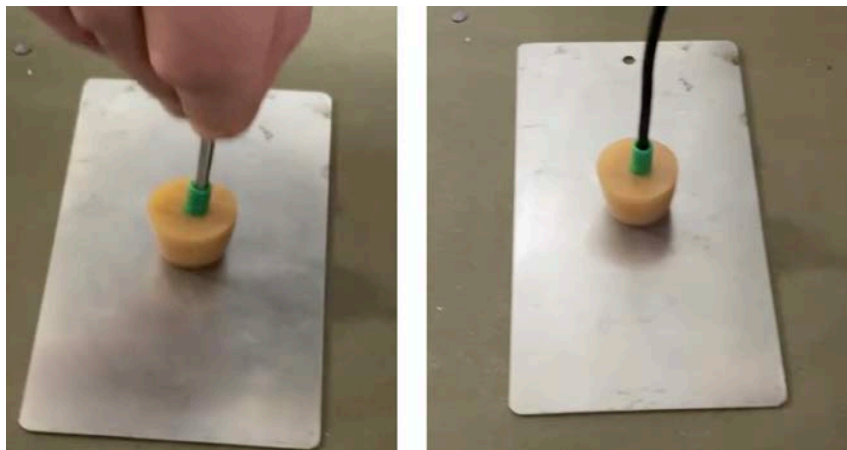


Figura 2-72: Colocación de la cámara endoscópica

Capítulo 2: Materiales y métodos

Después de insertar la cámara endoscópica, se procede a tomar fotografías de las muestras de aceite (**Figura 2-73**).



Figura 2-73: Fotografía del aceite con la cámara endoscópica

La aplicación de este método reveló múltiples limitaciones tal y como se puede observar en la **Figura 2-74**, entre las cuales destacan:

- **Reflejos:** La iluminación LED integrada en la cámara endoscópica generaba reflejos indeseados, comprometiendo la claridad de la imagen.
- **Baja nitidez de las imágenes:** Las fotografías obtenidas tenían una resolución baja, lo que hacía difícil ver el aceite en el entorno simulado, debido a la oscuridad extrema y al aspecto del aceite como una capa espesa sin rasgos distintivos visibles.
- **Reflejo compuesto:** La interacción de la luz LED con el aceite y su posterior reflejo en componentes metálicos de la tapa complicaba aún más la obtención de imágenes claras y precisas.



Figura 2-74: Limitaciones con la cámara endoscópica

Con el objetivo de mitigar los problemas asociados a los reflejos provocados por los LEDs de la cámara endoscópica, se propuso un método alternativo de iluminación para

Capítulo 2: Materiales y métodos

la captura fotográfica de las muestras de aceite. Este enfoque consistió en iluminar las muestras desde una posición inferior, imitando la configuración de un microscopio, y prescindiendo del uso de la iluminación LED de la cámara (**Figura 2-75**).



Figura 2-75: *Iluminación de la muestra desde abajo*

Sin embargo, cuando se utilizó esta técnica con las muestras de aceites de motor, se encontró que eran totalmente opacas; el aceite se comportaba como una sustancia sólida, bloqueando completamente la luz y, por consiguiente, dificultando la observación de sus propiedades.

Dado que los resultados no fueron satisfactorios, se aprovecharon las cubetas del segundo modelo fotográfico para fotografiarlas con la cámara endoscópica, por lo que la finalidad del estudio se modificó.

2.7.3.3.1 Equipo y configuración

El uso de la cámara endoscópica está orientado hacia la captación de imágenes detalladas de las muestras, procurando replicar las condiciones establecidas en el segundo método fotográfico, al tiempo que se aspira a descubrir particularidades insospechadas mediante técnicas convencionales. El objetivo fundamental de implementar el uso de esta cámara endoscópica radica en la evaluación de su capacidad para producir resultados comparables, o prácticamente equivalentes, a aquellos logrados mediante el uso de cámaras de alta gama, como la cámara Canon EOS 100D previamente empleada, a pesar de las limitaciones inherentes al dispositivo en términos de rendimiento y resolución fotográfica.

Para la realización de este tipo de fotografía se hizo uso del siguiente material, ya descrito anteriormente:

Capítulo 2: Materiales y métodos

- Cámara endoscópica (modelo Zealtron Industrial Endoscope 3.9mm con una pantalla IPS de 4.5 pulgadas) (**Figura 2-69**).
- Caja con apertura frontal y dos tiras de iluminación LED en la cara (**Figura 2-61**).
- Cubeta transparente en donde depositar la muestra de aceite (**Figura 2-62**).

El escenario fotográfico es el mismo que el descrito en el **apartado 2.7.3.2.** con una iluminación constante de 1806 lux que aportan las dos tiras de LED de la caja. Se mantiene fija la distancia entre la cámara endoscópica y el objeto a fotografiar (la cubeta rellena con aceite) de 18 cm. En esta tercera configuración fotográfica, la modificación de los parámetros de la cámara para alcanzar una calidad de imagen específica, tal como se logró en configuraciones anteriores, no es factible. Las fotografías se capturan en modo automático, lo que impide la alteración manual de sus ajustes con el fin de buscar optimizar la claridad y resaltar los detalles del aceite.

Con la cámara endoscópica, donde no se pueden ajustar manualmente los parámetros de ajuste fotográfico, tan sólo se puede actuar en algunos parámetros externos para maximizar la claridad y los detalles del aceite en las fotografías. A continuación, se muestran los parámetros en los que se puede actuar utilizando la cámara endoscópica:

- **Preparación de la escena:** Se mantiene la iluminación con las dos tiras de LED y el fondo blanco para generar contraste utilizado en la segunda configuración fotográfica.
- **Configuración del entorno:** La cubeta se posiciona en el mismo lugar utilizado en la segunda configuración fotográfica y se mantiene la distancia establecida de la cubeta a la cámara (18cm).

Con estos ajustes se asegura que cada detalle quede fijado en la imagen con la precisión que puede generar la cámara endoscópica utilizada como se muestra en la **Figura 2-76:**



Figura 2-76: Fotografía obtenida mediante la cámara endoscópica a un aceite O-1178

Capítulo 2: Materiales y métodos

Cada muestra de aceite se fotografió desde cada una de las cuatro caras de la cubeta, obteniendo así un total de cuatro fotografías por muestra (**Figura 2-77**). Después de tomar cada fotografía, se giraba la cubeta 90° para capturar la siguiente cara. A su vez, la posición de la muestra permitía que cada imagen fuera única, proporcionando una representación más completa y variada de cada caso.

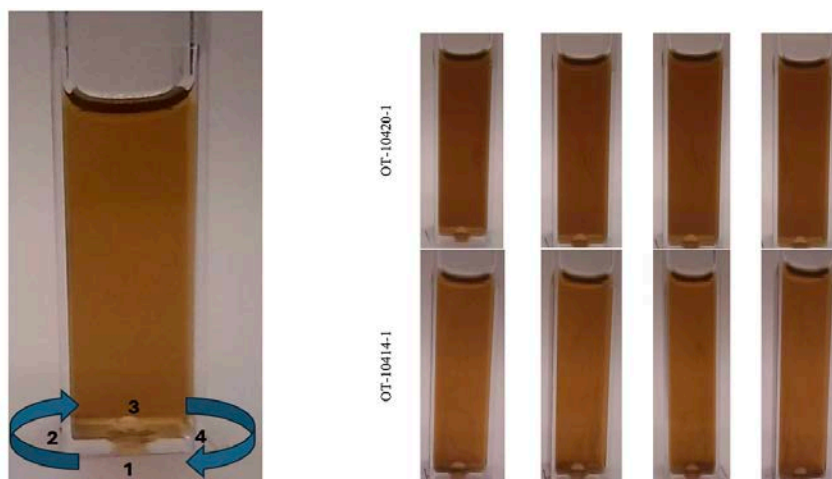


Figura 2-77: Posiciones de las cuatro caras de la cubeta

Este procedimiento se ha seguido en cada uno de los dos procedimientos fotográficos anteriores.

A continuación, en la **Figura 2-78**, se presenta el resultado de la fotografía de una misma muestra de aceite utilizando dos tipos de cámaras fotográficas descritas previamente: una cámara réflex de la marca Canon EOS 100D y una cámara endoscópica Zealtron Industrial Endoscope 3.9 mm, ambas capturando la misma muestra específica de aceite.

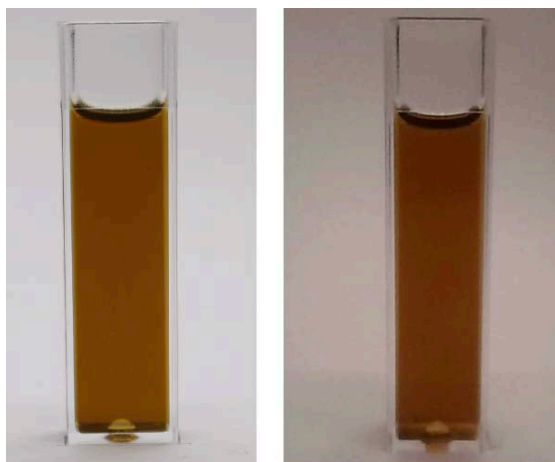


Figura 2-78: Comparación fotográfica realizada entre las dos cámaras utilizadas: Canon (izquierda) y cámara endoscópica (derecha) para el aceite O-1178 de la OT-10373

Capítulo 2: Materiales y métodos

La calidad de la imagen es un factor determinante en el análisis de muestras de aceite, ya que una imagen clara y detallada puede revelar información crucial sobre la composición y las propiedades del aceite.

Como se puede apreciar en la **Figura 2-78**, la calidad y la resolución de las imágenes varían significativamente entre las dos cámaras utilizadas. La cámara Canon proporciona una imagen más nítida y con mejor resolución, lo que permite una observación más detallada de la muestra. Por otro lado, la cámara endoscópica, aunque funcional, muestra una imagen con menor claridad y detalle.

La cámara Canon, reconocida por su alta calidad de imagen, permite capturar detalles finos y colores precisos. En el análisis del aceite O-1178, la imagen obtenida con esta cámara revela texturas y variaciones de color que son cruciales para una evaluación precisa de la muestra. Por otro lado, la cámara endoscópica, diseñada para inspecciones internas en espacios reducidos, ofrece una funcionalidad específica, pero con limitaciones en cuanto a la calidad de la imagen. La imagen capturada de la muestra de aceite (**Figura 2-79**) muestra menos detalles y puede dificultar la identificación de características sutiles.



Figura 2-79: OT-10373 muestra 23

2.7.3.4 Fotografía en maletín rugerizado

Basado en los resultados obtenidos en los estudios fotográficos anteriores, se puede concluir que la fotografía de aceites lubricantes puede ser una herramienta útil para investigar el estado de los aceites en cajas de cambio y motores de los vehículos del Ejército de Tierra. Los avances tecnológicos en inteligencia artificial, junto con una amplia base de datos, han permitido capturar imágenes con mayor precisión y detalle, lo cual es crucial para un análisis exhaustivo de las muestras del aceite lubricante estudiado.

Capítulo 2: Materiales y métodos

Hasta ahora se han obtenido buenos resultados a partir de los tres métodos fotográficos descritos anteriormente:

- recipiente cerámico usando cámara réflex (**Apartado 2.7.3.1**).
- cubeta usando cámara réflex dentro de caja iluminada con LED,s (**Apartado 2.7.3.2**).
- cubeta usando cámara endoscópica (**Apartado 2.7.3.3**).

Considerando los resultados positivos de los métodos fotográficos anteriores, se propone un paso adicional: el uso de un maletín rugerizado, es decir, un maletín reforzado y diseñado para soportar golpes, vibraciones, humedad y condiciones extremas, que permita evaluar el estado del aceite lubricante de los vehículos del Ejército de Tierra. Este maletín, concebido para ser portátil y resistente, sería adecuado para su uso en una amplia variedad de entornos ambientales y operativos, facilitando la determinación del estado del aceite lubricante de los carros de combate (Conforme o No Conforme) a través de una fotografía de este.

2.7.3.4.1 Procedimiento para la utilización del maletín

En este apartado se explican los pasos que se deben seguir para utilizar correctamente el maletín rugerizado. Desde la colocación de la muestra de aceite en la cubeta hasta la captura de la imagen final, cada etapa es crucial para asegurar la calidad y consistencia de los resultados.

1. Colocación de la muestra en la cubeta

La evaluación del aceite lubricante se lleva a cabo con una muestra de pequeño volumen (4 mL), la cual se deposita dentro de la cubeta específica para análisis. La cubeta se coloca en el soporte diseñado expresamente para asegurar su correcta fijación dentro del maletín, **Figura 2-80**.

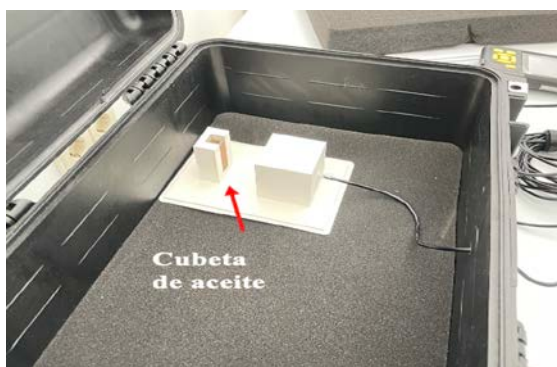


Figura 2-80: Colocación de cubeta con aceite en el maletín

2. Preparación para la fotografía

Una vez posicionada la espuma de sujeción en el maletín y colocada la cubeta en su estructura de soporte (**Figura 2-35-derecha**), se sitúan las tiras LED sobre la estructura para garantizar una iluminación óptima (**Figura 2-33**). A continuación, se cierra el maletín para mantener un entorno controlado, mientras que la cámara endoscópica, previamente insertada en la estructura, transmite la imagen de la muestra de aceite a su pantalla.

La distancia de la cubeta a la cámara endoscópica está fijada a 4 cm, permitiendo que todas las fotografías sean tomadas a la misma distancia, **Figura 2-81**.

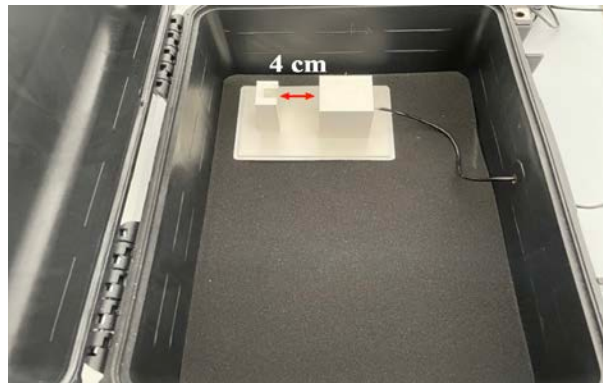


Figura 2-81: Distancia de la cubeta a la cámara endoscópica (4cm)

Esta distancia específica se ha determinado a través de numerosas pruebas fotográficas que aseguran la mejor calidad de imagen posible. Mantener una distancia constante es esencial por varias razones:

- **Uniformidad en las imágenes:** Al fijar la distancia a 4 cm, se garantiza que todas las imágenes sean comparables entre sí. La consistencia en la distancia elimina variables que podrían afectar la calidad y el enfoque de las imágenes.
- **Estandarización de procedimientos:** Mantener una distancia constante garantiza que las fotografías conserven la misma escala, lo cual simplifica el proceso de detectar variaciones menores entre ellas. Esto resulta crucial para los análisis repetidos utilizando inteligencia artificial, donde se comparan las diferentes imágenes y es necesario capturar detalles finos que podrían ser cruciales para establecer el estado del aceite.
- **Optimización del enfoque y la iluminación:** Mantener una distancia constante asegura que la cámara endoscópica esté siempre en el punto óptimo para el enfoque

y la iluminación. Esto resulta en imágenes más nítidas y bien iluminadas, esenciales para un análisis detallado que posteriormente se hace utilizando la IA.

3. Captura de imágenes

Con todo el equipo preparado, se procede a capturar una fotografía de la muestra. La distancia fija de 4 cm entre la cubeta y la cámara endoscópica asegura que todas las fotografías mantengan la misma calidad y uniformidad, esenciales para el análisis detallado posterior utilizando inteligencia artificial (**Figura 2-82**).



Figura 2-82: Fotografía de aceite en el maletín

2.8 Inteligencia Artificial

La inteligencia artificial (IA), un campo de estudio que se remonta a mediados del siglo pasado, ha cobrado un impulso extraordinario en los últimos años y avanza a pasos agigantados hacia un futuro desconocido. Esta disciplina, centrada en el desarrollo de algoritmos capaces de simular procesos de inteligencia humana y que alguna vez fue considerada ciencia ficción; ahora es una realidad palpable que impacta desde la forma en que interactuamos con nuestros dispositivos hasta los avances en campos como la medicina y la logística.

La IA se está convirtiendo en un poderoso agente de cambio que remodela la forma en que interactuamos con la tecnología, entendemos el mundo y visualizamos el futuro. En la vida cotidiana, la IA se ha integrado a través de asistentes de texto inteligentes y

Capítulo 2: Materiales y métodos

recomendaciones personalizadas en servicios de streaming y comercio electrónico. Desde la década de 2010, en el ámbito tecnológico, los algoritmos de IA han sido fundamentales. En 2016, el programa informático de inteligencia artificial AlphaGo, desarrollado por Google DeepMind, marcó un hito importante al dominar juegos de estrategia complejos demostrando el potencial de la IA en varios otros campos más allá de los juegos. Este logro demostró la capacidad de la IA para aprender, adaptarse y ejecutar estrategias a un nivel que desafía la experiencia humana. Los vehículos autónomos son otro ejemplo destacado del impacto de la IA. No solo están diseñados para reconocer su entorno, sino también para tomar decisiones en tiempo real. Esta capacidad mejora significativamente la seguridad y eficiencia en el transporte, ofreciendo una visión del futuro de la tecnología de conducción autónoma. En el campo de la investigación científica, especialmente en bioinformática, la IA ha realizado avances notables. Por ejemplo, el programa informático AlphaFold, ha revolucionado la predicción de la estructura de proteínas. La capacidad de esta herramienta para predecir con precisión las estructuras tridimensionales de las proteínas es fundamental para comprender los procesos biológicos y acelerar el descubrimiento de medicamentos y otros avances médicos.

El avance en la IA ha sido posible gracias a la disponibilidad masiva de datos. Internet se ha convertido en una fuente inagotable de información que nutre a los algoritmos, permitiéndoles aprender y mejorar continuamente. Este flujo constante de datos es el combustible que impulsa el desarrollo de soluciones cada vez más sofisticadas y precisas en la IA.

Al frente de la revolución tecnológica, la inteligencia artificial (IA), el aprendizaje automático (Machine Learning, ML) y el aprendizaje profundo (Deep Learning) representan pilares fundamentales en el desarrollo de sistemas computacionales avanzados, **Figura 2-83**. Estos conceptos, aunque interrelacionados, se distinguen por sus aplicaciones específicas y su enfoque en la resolución de problemas complejos.

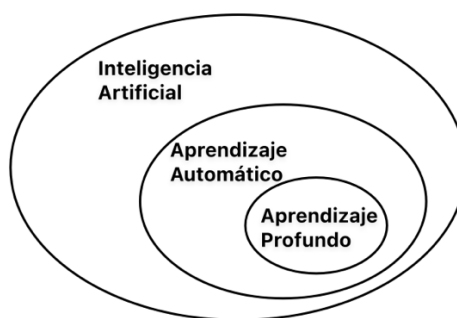


Figura 2-83: Inteligencia Artificial, Aprendizaje Automático y Aprendizaje Profundo

La inteligencia artificial (IA) es un campo de la ciencia de la computación que se enfoca en la creación de máquinas capaces de realizar tareas que, de otro modo, requerirían inteligencia humana. Esto incluye habilidades como el aprendizaje, el razonamiento, la percepción, la comprensión del lenguaje y la solución de problemas.

2.8.1 Aprendizaje automático (Machine Learning, ML)

El aprendizaje automático (Machine Learning, ML), un subcampo de la IA se centra en el desarrollo de algoritmos que permiten a las máquinas aprender y mejorar a partir de la experiencia, es decir, del análisis de datos. Este aprendizaje se basa en el reconocimiento de patrones y la toma de decisiones sin ser explícitamente programadas para cada tarea específica. Esta técnica es la base de muchas aplicaciones actuales, desde el reconocimiento facial hasta la personalización de experiencias de usuario. Este enfoque permite que los sistemas se adapten y mejoren continuamente, aumentando su eficacia en la realización de diversas tareas.

El avance tecnológico ha transformado radicalmente la manera en que los ordenadores procesan y analizan información. Tradicionalmente, tal y como se muestra en la **Figura 2-84**, los programadores humanos eran quienes establecían las normas y escribían programas informáticos para que las máquinas realizaran tareas específicas.

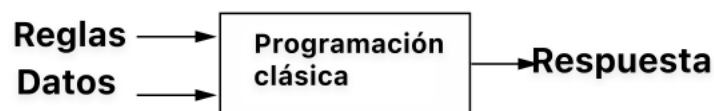


Figura 2-84: Programación clásica

En el ámbito del aprendizaje automático, la relación entre el ordenador y los datos se invierte como se muestra en la **Figura 2-85**. En lugar de seguir reglas preestablecidas, la máquina examina y analiza los datos de entrada junto con sus respuestas correspondientes para deducir reglas propias. Este enfoque permite que el sistema no solo siga instrucciones, sino que 'aprenda' y se adapte a partir de los ejemplos proporcionados [67].



Figura 2-85: Esquema del aprendizaje automático

Capítulo 2: Materiales y métodos

Un aspecto crucial del aprendizaje automático es el entrenamiento del sistema. A diferencia de la programación convencional, donde las reglas se definen explícitamente, en el aprendizaje automático se utilizan grandes conjuntos de datos relacionados con una tarea específica. El sistema, mediante algoritmos avanzados, detecta patrones y estructuras estadísticas en estos datos, lo que le permite crear reglas automatizadas para ejecutar tareas.

Para que una máquina pueda extraer información valiosa de los datos, es crucial que acceda a una variedad de algoritmos que le permitan identificar patrones. Este proceso se divide en dos fases principales [68]:

1. **Entrenamiento:** Esta etapa es fundamental y se centra en la adquisición de conocimientos a través del análisis de tendencias, comportamientos y patrones. El objetivo principal es optimizar los parámetros de una función matemática para obtener resultados lo más precisos posibles. Dentro del entrenamiento, se identifican dos enfoques principales:
 - Entrenamiento supervisado: Se utilizan variables independientes y dependientes ya conocidas. El proceso implica la asignación de valores numéricos a determinadas entradas, como podría ser la cuantificación de la masa total de productos en una reacción química. Este método es particularmente efectivo en situaciones donde se requiere una predicción precisa basada en datos históricos o preexistentes.
 - Entrenamiento no supervisado: se caracteriza por el uso de variables dependientes no conocidas previamente. Aquí, el objetivo es descubrir patrones ocultos o características no evidentes en los datos. Un ejemplo práctico podría ser la identificación de adulteraciones en alimentos a través del análisis de imágenes, donde el resultado no se expresa en valores numéricos, sino en clasificaciones o agrupaciones basadas en las características detectadas.
2. **Predicción:** Una vez que se ha desarrollado y optimizado un modelo mediante el entrenamiento, se procede a evaluar su eficacia utilizando nuevos conjuntos de datos. Esta fase es crucial para validar la precisión y la utilidad del modelo en situaciones reales y no controladas. La predicción permite verificar si el modelo puede generalizar lo aprendido a nuevas instancias y situaciones, lo cual es un indicador clave de su éxito.

2.8.2 Aprendizaje profundo (Deep Learning)

El aprendizaje profundo (Deep Learning) es una técnica avanzada dentro del aprendizaje automático, caracterizada por el uso de redes neuronales profundas. Estas redes son capaces de aprender a partir de grandes cantidades de datos no estructurados, identificando patrones complejos y realizando tareas como reconocimiento de imágenes y procesamiento de lenguaje natural con un alto grado de precisión y eficiencia. Dentro del aprendizaje automático (machine learning), las redes neuronales artificiales destacan como una herramienta poderosa. Estas redes simulan la manera en que el cerebro humano procesa la información, permitiendo que los sistemas aprendan de manera eficiente y profunda. La popularización de estas tecnologías comenzó alrededor de 2012 con el modelo computacional de redes neuronales convolucionales conocido como AlexNet, que marcó un hito en el campo de la visión computacional.

Gran parte de los desarrollos en IA se basan en el aprendizaje supervisado, una metodología donde los datos alimentados al algoritmo están previamente etiquetados. Esto permite que los sistemas aprendan a distinguir patrones y realizar tareas específicas, como diferenciar imágenes de perros y gatos o traducir textos entre idiomas con herramientas como Google Translate.

El progreso en inteligencia artificial ha sido posible gracias a la combinación de grandes cantidades de datos disponibles en Internet y el avance en el poder de cómputo, especialmente a través de tarjetas gráficas utilizadas en videojuegos. Estos componentes han sido fundamentales para entrenar y optimizar los algoritmos de IA, permitiendo que realicen operaciones complejas como la multiplicación de matrices de manera eficiente.

2.8.2.1 Redes neuronales artificiales

La comprensión de la neurona biológica es esencial para replicar sus funciones en el ámbito de la inteligencia artificial. La neurona biológica, **Figura 2-86**, representa la unidad básica del sistema nervioso y tiene una estructura específica: un cuerpo celular, dendritas y axón.

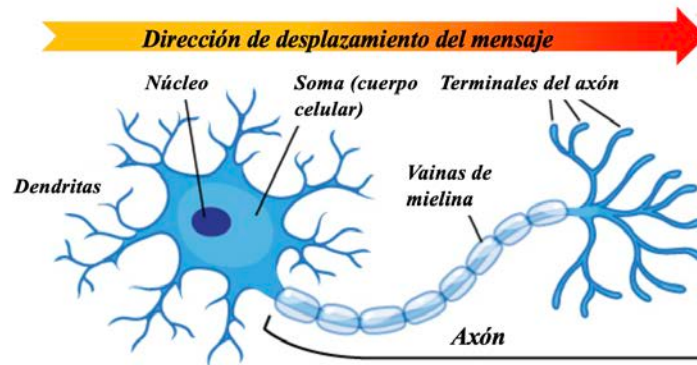


Figura 2-86: Neurona biológica [69]

Las dendritas actúan como receptores de señales, se procesa la información en el soma, y el axón envía las señales a otras neuronas, creando una red de comunicación que es vital para la vida. Las dendritas, con su capacidad de recibir múltiples señales simultáneamente, se asemejan a las entradas múltiples en un modelo de neurona artificial. El axón, por otro lado, transmite una señal única, similar a la salida de una neurona artificial. Esta analogía estructural es clave para el diseño de redes neuronales en la IA. La comunicación neuronal se produce a través de impulsos eléctricos y químicos. Este proceso desencadena una cadena de reacciones, provocando excitación o inhibición en la neurona receptora.

La sinapsis, el punto de encuentro entre el axón de una neurona y las dendritas de otra, es donde ocurre la transmisión de señales. En la IA, este proceso es modelado como una función matemática, donde los neurotransmisores y receptores son representados por pesos y funciones de activación.

El reto de la IA es crear un sistema que pueda simular la complejidad de las redes neuronales biológicas, pero simplificando su complejidad. Esto se logra a través de modelos que pueden ser matemáticamente definidos y computacionalmente gestionados.

Las neuronas artificiales, aunque inspiradas en las biológicas, son simplificaciones y se representan a menudo como círculos en modelos de red, donde cada círculo es una neurona, **Figura 2-87**. La neurona artificial y la biológica comparten una base común: ambas reciben señales, las procesan y transmiten una respuesta[70]. En la neurona artificial, este proceso se modela a través de ecuaciones matemáticas que incluyen variables de entrada, pesos y el “bias”.

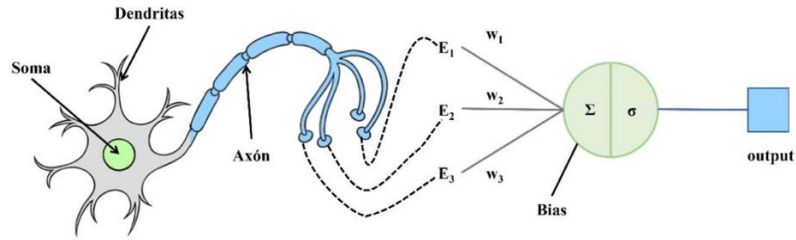


Figura 2-87: Neurona biológica y neurona artificial [71]

El modelado matemático de las neuronas artificiales, como se ilustra en la **Figura 2-88-a**, implica varios pasos clave:

1. **Asignación de las entradas (inputs):** Las entradas de la neurona, representadas por x_1, x_2, x_3 , son análogas a los estímulos recibidos por una neurona biológica.
2. **Asignación de pesos:** Cada entrada está asociada a un peso (w_1, w_2, w_3), que representa la intensidad de las conexiones sinápticas, similar a cómo las neuronas biológicas ajustan la fuerza de sus conexiones a través de neurotransmisores.

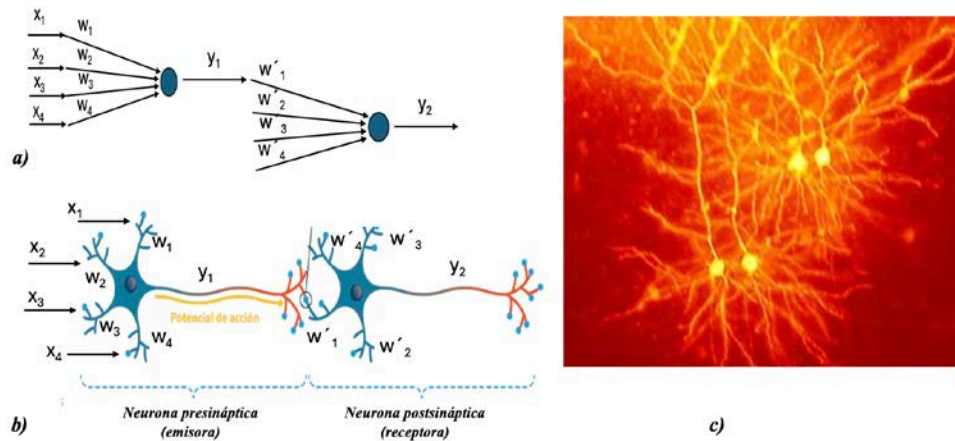


Figura 2-88: Conexión de neuronas: **a)** Neurona artificial; **b)** Neurona biológica [72]; **c)** Neuronas reales [73]

La operación básica en una neurona artificial consiste en realizar un producto escalar entre las entradas y sus respectivos pesos, seguido de una suma (**Ecuación 2-6**). Esto simplifica considerablemente las complejidades de las interacciones sinápticas reales en las neuronas biológicas, como se muestra en la **Figura 2-88**:

$$y_1 = \sum_i x_i \cdot w_i = x_1 \cdot w_1 + x_2 \cdot w_2 + x_3 \cdot w_3 + x_4 \cdot w_4 \quad \text{Ecuación 2-6}$$

Al simular las conexiones de una neurona con m entradas, se generaliza la expresión a la siguiente ecuación:

$$z = w_1 \cdot x_1 + w_2 \cdot x_2 + \dots + w_m \cdot x_m \quad \text{Ecuación 2-7}$$

Capítulo 2: Materiales y métodos

Esta operación es lineal, donde los vectores de pesos ($\mathbf{w}$) y entradas ($\mathbf{x}$) interactúan como se indica en la **Ecuación 2-8** y donde z es la llamada entrada neta [74]:

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_m \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_m \end{bmatrix}$$
$$z = w_1 \cdot x_1 + w_2 \cdot x_2 + \cdots + w_m \cdot x_m = \sum_{j=0}^m x_j w_j = \mathbf{w}^T \mathbf{x} \quad \text{Ecuación 2-8}$$

Posteriormente, a este resultado se le aplican funciones de activación no lineales, tales como Sigmoid, Tanh o ReLU, que se explicarán más adelante y permiten a la red neuronal resolver problemas más complejos. Estas funciones no lineales son esenciales para introducir capacidades avanzadas en el procesamiento de la red.

Los pesos en una red neuronal artificial son ajustados durante el proceso de aprendizaje, lo que permite que la red se adapte a los datos y mejore su precisión. Como se observa en la **Ecuación 2-8**, los pesos determinan la fuerza de la conexión entre las neuronas, similar a las conexiones sinápticas en el cerebro.

La construcción de una red neuronal artificial comienza con un clasificador lineal, que, aunque es limitado y no puede capturar la complejidad de los datos por sí solo, sienta las bases para modelos más complejos (**Figura 2-89**). La adición de capas y la introducción de no linealidades permiten que la red maneje tareas cada vez más complejas.

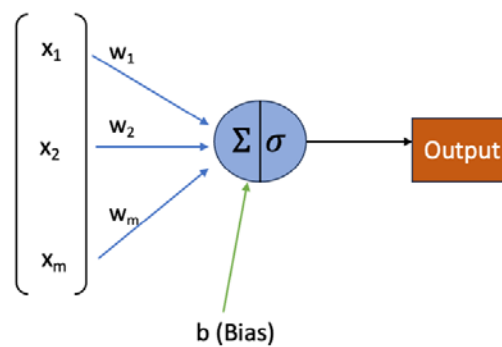


Figura 2-89: Neurona artificial

En la **Figura 2-89**, la salida de una neurona artificial (z), antes de aplicar la función de activación, se expresa como la **Ecuación 2-9**:

$$z = \sum_i x_i \cdot w_i + b \quad \text{Ecuación 2-9}$$

Capítulo 2: Materiales y métodos

Tal y como se muestra en la **Ecuación 2-9**, esta operación lineal es fundamental para el funcionamiento de la neurona artificial, ya que suma y pondera las entradas antes de pasar por la función de activación. El término bias (**b**) desempeña un papel crucial al ajustar la salida, permitiendo a la red adaptarse mejor a los datos.

La salida (output) de la neurona, tras pasar por la función de activación σ , se representa como:

$$output = f\left(\sum_i x_i \cdot w_i + bias\right) \quad \text{Ecuación 2-10}$$

Un componente crucial en este sistema es el "bias" o sesgo, que es un parámetro esencial para facilitar el aprendizaje eficaz en la inteligencia artificial. El bias actúa como un umbral ajustable que puede activar o inhibir la señal de salida de la neurona artificial, similar a cómo las condiciones químicas y eléctricas controlan la actividad de una neurona biológica. Este umbral permite que la red neuronal se ajuste mejor a la realidad de los datos con los que se entrena.

Por tanto, el bias es un parámetro de la red neuronal, al igual que los pesos, que se utiliza para ajustar la salida de la neurona, permitiendo que la red pueda representar mejor los patrones en los datos de entrenamiento.

En un ejemplo concreto, como se ilustra en la **Figura 2-90**, una imagen procesada puede estar compuesta por cuatro valores de entrada (píxeles), que se utilizan como inputs para la neurona. En este caso, cada valor de entrada (x_1, x_2, x_3, x_4) tiene un peso asociado (w_1, w_2, w_3, w_4) y un valor de sesgo (**b**) que juntos determinan la salida de la neurona (y_1).

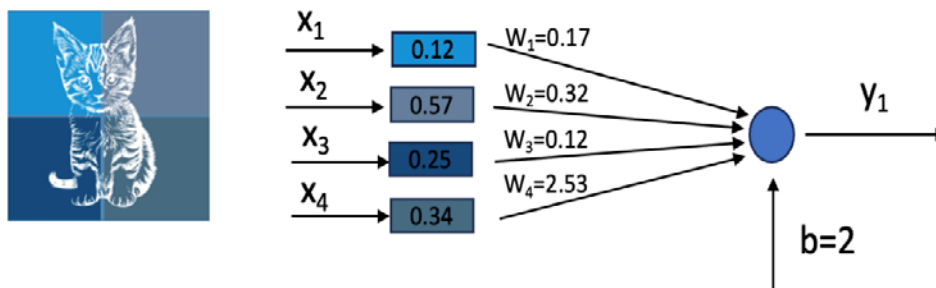


Figura 2-90: Ejemplo de cálculo de la salida de una red neuronal

Utilizando la **Ecuación 2-9** se obtiene la salida y_1 :

$$y_1 = 0,12 \cdot 0,17 + 0,57 \cdot 0,32 + 0,12 \cdot 0,25 + 0,34 \cdot 2,53 + 2 = 3,09$$

Capítulo 2: Materiales y métodos

Si se quiere unir esta neurona con otra neurona para hacer un procesamiento jerárquico en cascada y que el poder de abstracción sea más poderoso se hace uso de una función no lineal por lo que al escalar anterior obtenido a partir de la **Ecuación 2-9** se le aplica una función de activación no lineal tal y como se muestra en la **Figura 2-91**.

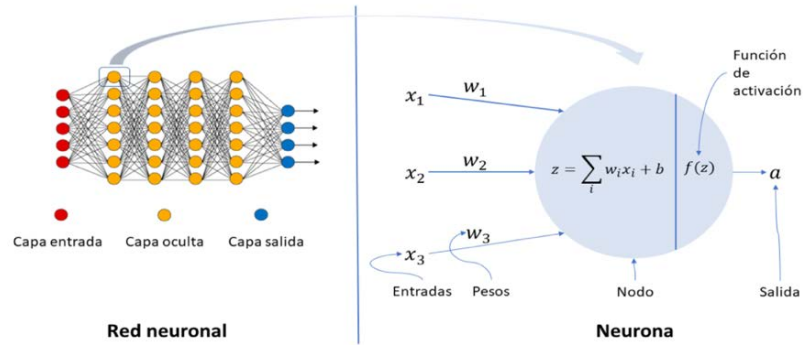


Figura 2-91: Red neuronal y neurona [75]

El bias funciona como un término de ajuste en la función de activación de la neurona, permitiéndole activarse en el momento adecuado. Es decir, el bias permite que la función de activación se desplace a la izquierda o a la derecha tal y como se observa en la **Figura 2-92**, facilitando que la red neuronal no solo aprenda patrones de datos, sino que también generalice y funcione correctamente con datos nuevos y desconocidos[76]. De este modo, se puede garantizar un aprendizaje exitoso.

Durante el entrenamiento en un escenario de aprendizaje supervisado, los parámetros clave que se ajustarán son el valor de bias y los pesos. La optimización de estos parámetros es esencial para alcanzar la salida correcta. Es decir, estos son los elementos que la red aprenderá y perfeccionará a lo largo del proceso de entrenamiento tal y como se verá más adelante.

Para ilustrar el efecto del bias, considerando un ejemplo simple de una neurona con un único input y un output, el bias actúa como un ajustador que modifica la activación de la neurona. Por ejemplo, en la **Figura 2-92 (izquierda)**, se puede observar cómo la curva sigmoidea, explicada más adelante, se altera al modificar únicamente el peso del input.

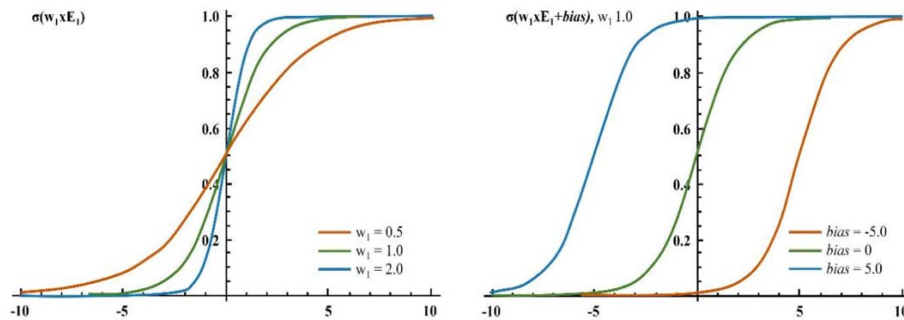


Figura 2-92: Representación gráfica de una curva sigmoideal en la que se modifican solamente los pesos(izquierda) y representación gráfica de una curva sigmoideal modificada solamente por el bias (derecha)[71]

Sin embargo, en la **Figura 2-92 (derecha)**, se modifica el valor de bias manteniendo un peso constante. Se puede observar que esto permite una mayor flexibilidad en el ajuste del peso w_1 ya que se puede variar el peso en un rango más amplio para obtener la salida deseada. Por lo tanto, el bias permite una mayor flexibilidad en el ajuste de los pesos, lo que permite que la red neuronal se ajuste de manera más eficaz a los patrones presentes en los datos, optimizando así su capacidad de aprendizaje.

2.8.2.2 Estructura y Evolución de las Redes Neuronales Artificiales

Las redes neuronales artificiales están compuestas por diversas neuronas interconectadas, organizadas en capas que procesan y transmiten información de manera secuencial y unidireccional. Esta estructura esencial de las redes neuronales se fundamenta en el principio de las redes feed-forward, donde la información fluye únicamente hacia adelante, sin formar bucles.

Las capas se pueden dividir en tres tipos [77]:

- **Capa de entrada:** La capa de entrada es el punto inicial de cualquier red neuronal. Aquí, los datos reales son introducidos en la red a través de unidades conocidas como nodos. Esta capa es crucial para comenzar el proceso de análisis y procesamiento de datos.
- **Capa de salida:** La capa de salida representa el final del proceso de la red neuronal. Es aquí donde se obtienen los resultados o salidas finales después de haber sido procesados a través de las distintas capas de la red.
- **Capas ocultas:** Entre la capa de entrada y la de salida, se encuentran las capas ocultas. Estas capas son las responsables de realizar la mayor parte del procesamiento a través de una serie de transformaciones y cálculos complejos. El

Capítulo 2: Materiales y métodos

número de capas ocultas y su configuración son determinantes en la capacidad y la eficacia de la red.

Las neuronas artificiales se conectan entre sí mediante lo que se podría llamar conexiones sinápticas artificiales. Estas conexiones permiten que la salida de una neurona se convierta en la entrada de otra, creando una red de interacciones complejas.

Las redes neuronales están estructuradas en capas, cada una compuesta por nodos o neuronas que procesan la información. La capa de entrada es la primera en recibir datos, pero no se cuenta al describir el número total de capas de una red, ya que su función principal es introducir información en la red. En este contexto, una red de "una capa" se refiere a una red sin capas ocultas.

En las redes neuronales, el tipo de capa más común es la fully-connected, donde cada neurona en una capa está conectada a todas las neuronas de la capa siguiente. Este diseño asegura un flujo completo de información a través de la red, como se ilustra en la **Figura 2-93**, donde una red feed-forward está compuesta por tres capas fully-connected, incluyendo dos capas ocultas. La estructura de una red neuronal artificial, como la ilustrada en la **Figura 2-93**, ofrece una visión de cómo estas redes procesan la información desde la entrada hasta la salida.

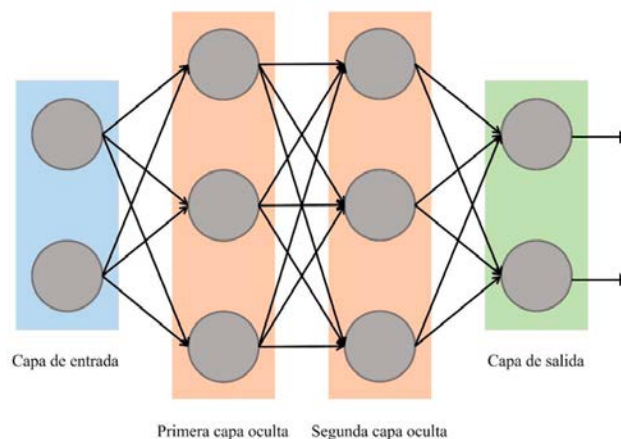


Figura 2-93: Ejemplo de red neuronal compuesta por tres capas Fully connected [71]

La comprensión de la estructura de una red neuronal artificial es fundamental para apreciar cómo procesan la información y toman decisiones. Al examinar la **Figura 2-93**, se puede obtener una visión clara de la configuración típica de una red neuronal.

La capa de entrada de una red neuronal es el primer punto de contacto con los datos externos. En el ejemplo de la **Figura 2-93**, esta capa está compuesta por dos nodos. Cada nodo representa un atributo único de los datos de entrada, actuando como receptores y

Capítulo 2: Materiales y métodos

transmisores de información hacia las capas subsiguientes. En las capas ocultas de una red neuronal es donde ocurre la mayor parte del procesamiento de datos. En el caso de la **Figura 2-93**, la red cuenta con dos capas ocultas, cada una compuesta por tres neuronas. Estas neuronas trabajan en conjunto para detectar y aprender patrones complejos en los datos, permitiendo que la red realice tareas de clasificación o predicción con alta precisión. La capa de salida, en el ejemplo de la **Figura 2-93**, consiste en dos neuronas. Esta capa es crucial, ya que es aquí donde la red neuronal “decide” y presenta el resultado final del proceso de análisis de datos. Las neuronas de esta capa interpretan y sintetizan las características aprendidas en las capas ocultas, ofreciendo una salida clara y definida que corresponde a la tarea que la red ha sido entrenada para realizar.

El perceptrón simple, desarrollado por el Dr. Rosenblatt en 1957, marcó el inicio de las redes neuronales. Este modelo, definido como un clasificador binario de una sola capa, utilizaba una función de activación escalonada, produciendo salidas binarias que solo pueden tener valores de 0 ó 1 tal y como muestra la **Ecuación 2-11**.

$$u(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 0 \\ 1 & \text{si } x \geq 0 \end{cases} \quad \text{Ecuación 2-11}$$

Posteriormente, en 1965, surgió el perceptrón multicapa (MLP, de las siglas en inglés Multilayer Perceptron), **Figura 2-94**, una evolución del modelo simple que incorporaba múltiples capas y empleaba la función sigmoidea en lugar de la escalonada, lo que permitió un procesamiento de datos más profundo y complejo. Esta ampliación significó un salto cualitativo en la capacidad de las redes neuronales artificiales para aprender y realizar tareas más complicadas.

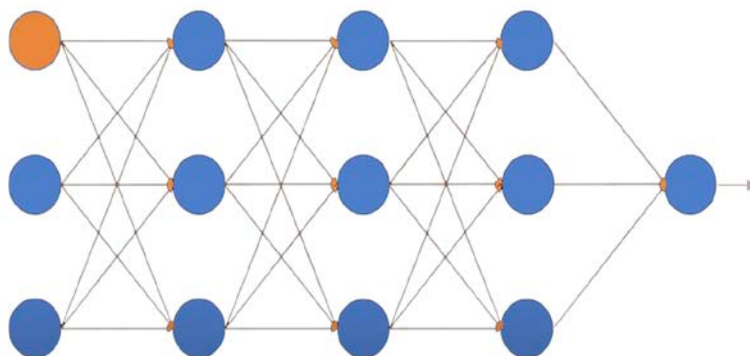


Figura 2-94: Perceptrón multicapa

A pesar de la incorporación de múltiples capas y la función sigmoidea, estas redes neuronales seguían operando bajo el aprendizaje supervisado. En este contexto, era responsabilidad del operador seleccionar y ajustar los pesos de la red, buscando alcanzar

Capítulo 2: Materiales y métodos

la salida deseada. Este enfoque requería una intervención humana significativa, limitando la autonomía del sistema de aprendizaje. Para facilitar la tarea del operador y minimizar la complejidad computacional, estas redes no solían tener un número elevado de capas ocultas. Además, la salida de estas redes a menudo seguía siendo binaria [78], lo que restringía su aplicación a tareas que requerían una clasificación más sutil o compleja.

La transición del perceptrón simple a redes neuronales con múltiples capas y funciones de activación más avanzadas como la sigmoidea marcó una era de innovación en el campo del aprendizaje automático. Aunque inicialmente limitadas por la necesidad de una intensa supervisión humana y por su salida binaria, estas redes sentaron las bases para el desarrollo de sistemas de aprendizaje profundo más autónomos y capaces de abordar tareas de mayor complejidad.

Un avance crucial en el desarrollo de redes neuronales fue el algoritmo de retro-propagación el cual surgió como una solución innovadora para entrenar redes neuronales de manera más eficaz. A diferencia de los métodos anteriores, este algoritmo facilita el entrenamiento de redes con varias capas, superando las limitaciones de los modelos más simples y permitiendo un procesamiento de datos más profundo y sofisticado. Para ello, este algoritmo utiliza la función de coste. La función coste, también conocida como error de estimación, juega un papel crucial en el algoritmo de retro-propagación. Esta función mide la diferencia entre la salida deseada y la obtenida por la red neuronal. El objetivo principal durante el entrenamiento es minimizar esta función coste, lo cual indica que la red está aprendiendo y mejorando su precisión. Una de las mayores ventajas del algoritmo de retro-propagación es su capacidad para ajustar automáticamente los pesos de las diferentes capas de la red [79]. Este proceso se realiza de manera iterativa, modificando los pesos en función de los errores calculados por la función coste. A través de este método, la red neuronal se va ajustando gradualmente hasta alcanzar la salida deseada, optimizando su rendimiento y precisión.

El algoritmo de retro-propagación ha transformado el campo del aprendizaje automático, ofreciendo una herramienta poderosa para el entrenamiento de redes neuronales complejas. Su capacidad para ajustar automáticamente los pesos y minimizar la función coste ha abierto nuevas posibilidades en la inteligencia artificial, permitiendo el desarrollo de modelos más precisos y capaces.

Es importante destacar que la función de activación utilizada en las neuronas, como la función sigmoide, no es una función lineal. Esto es fundamental porque si todas las funciones de activación fueran lineales, el resultado de la red sería lineal, lo cual sería equivalente a tener una sola capa y no justificaría el uso de múltiples capas. La no linealidad introducida por funciones como la sigmoide permite que las redes neuronales modelen relaciones complejas y no lineales en los datos, lo que es esencial para aprovechar todo el potencial de las redes profundas.

2.8.3 Mecanismos de aprendizaje en redes neuronales

Las redes neuronales artificiales, inspiradas en las redes neuronales biológicas, son un componente esencial de la inteligencia artificial. Consisten en un subconjunto de algoritmos de aprendizaje automático diseñados para interpretar y procesar patrones complejos de datos. Su capacidad para aprender y adaptarse a diversos tipos de datos las convierte en una herramienta esencial del avance tecnológico experimentado. Los principios fundamentales que sustentan estas redes, incluyendo su arquitectura y los tipos de procesos de aprendizaje que emplean, se verán en los siguientes puntos.

2.8.3.1 Cómo funciona el aprendizaje profundo: Red neuronal parametrizada por sus pesos

Las redes neuronales profundas aprenden estableciendo conexiones entre entradas (inputs) y resultados deseados (targets). Este proceso se logra a través de una serie de transformaciones de datos simples, realizadas por capas sucesivas en la red. Cada capa de la red es responsable de una transformación específica, influenciada directamente por sus pesos o parámetros. Al recibir datos de entrada, cada capa los manipula siguiendo un conjunto de reglas matemáticas dictadas por sus pesos tal y como se observa en la **Figura 2-95**. Estos pesos son ajustables y se van modificando a medida que la red aprende, a través de un proceso conocido como entrenamiento. La capacidad de la red neuronal para ajustar sus pesos es lo que le permite adaptarse y realizar tareas como reconocimiento de patrones.

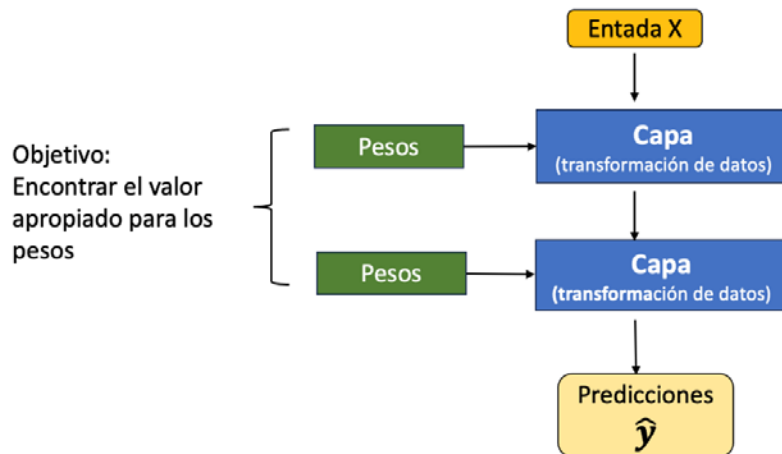


Figura 2-95: Red neuronal parametrizada por sus pesos

Aprender, en este contexto, significa encontrar un conjunto de valores para los pesos de todas las capas en la red, de manera que la red pueda mapear correctamente las entradas de ejemplo a sus targets asociados como por ejemplo gato, perro o como es en el caso de la presente tesis: aceite conforme o no conforme. Una red neuronal profunda puede contener decenas de millones de parámetros por lo que encontrar los valores correctos para todos ellos es una tarea muy complicada principalmente porque modificar el valor de un parámetro afecta el comportamiento de todos los demás. Por lo tanto, el aprendizaje en redes neuronales profundas es un proceso complejo que requiere un cuidadosa ajuste y optimización de estos parámetros a través de la exposición a multitud de ejemplos [67].

A continuación, a modo de ejemplo, se desarrolla un sistema basado en redes neuronales capaz de identificar si una imagen pertenece a una categoría específica, como puede ser un gato, un perro o pájaro. Para clasificar imágenes, se emplea una red neuronal artificial que consta de múltiples capas de neuronas interconectadas. Para el ejemplo, se parte de una red neuronal completa con una capa de tres neuronas que recibe los píxeles de la imagen de entrada. Cada neurona recibe señales de entrada, en este caso, los píxeles de la imagen, y produce una señal de salida.

La primera capa de la red, conocida como capa de entrada, recibe directamente los píxeles de la imagen y comienza el proceso de identificación. El diseño de la red neuronal es crucial para su funcionamiento eficiente. En el ejemplo, la red comienza con una capa completa, compuesta por tres neuronas. Estas neuronas no solo funcionan como receptoras de las señales de entrada, sino que también actúan como la capa de salida del sistema. Esto significa que cada neurona en la capa de salida está asociada con una clase

Capítulo 2: Materiales y métodos

específica: gato, perro o pájaro. Por lo tanto, la activación de una de estas neuronas indica la clasificación de la imagen.

Según la **Figura 2-96**, los píxeles de entrada corresponden a los píxeles de las imágenes y a cada neurona le llegan unos pesos determinados, de manera que el número que sale de la primera neurona verde representa la clase gato, la de color rojo representa la clase perro y la azul la clase pájaro.

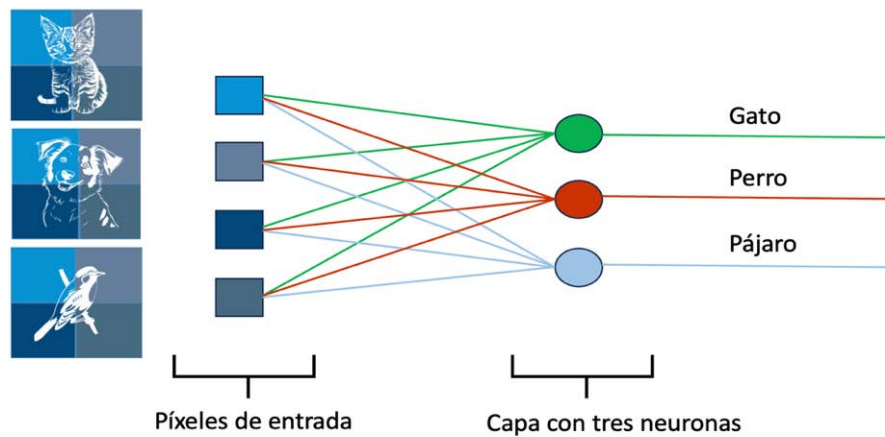


Figura 2-96: Ejemplo de clasificador lineal

Se quiere reconocer las tres clases anteriores: gato, perro y pájaro. Por lo tanto, cada neurona en la capa de salida de la red neuronal tiene que estar diseñada para responder a una de estas categorías. Esto va a depender de los pesos asociados a cada una de las neuronas. Según el ejemplo de la **Figura 2-96**:

- La neurona verde corresponde a la clase gato. Los valores de la fila verde corresponden a los pesos asociados a dicha neurona.
- La neurona roja corresponde a la clase perro. Los valores de la fila roja corresponden a los pesos asociados a dicha neurona.
- La neurona azul corresponde a la clase pájaro. Los valores de la fila azul corresponden a los pesos asociados a dicha neurona.

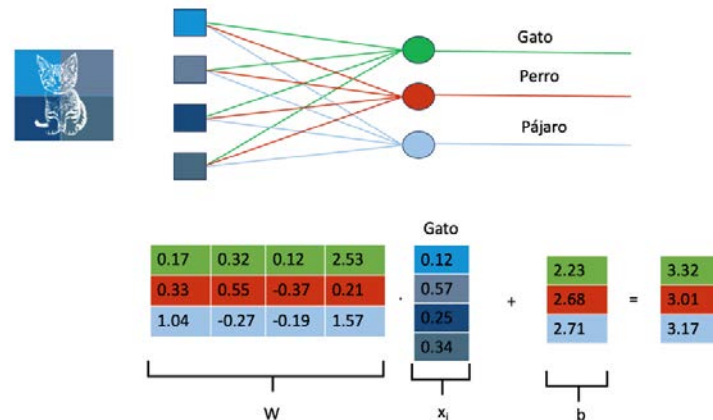


Figura 2-97: Ejemplo de clasificador lineal con una imagen de gato

Los valores de los que parte la matriz de los pesos (W), de los píxeles de entrada (x_i) y de los sesgos (b) del ejemplo anterior son valores iniciales aleatorios de los que se parte. Se quiere saber cómo funcionan estos valores para predecir cualquiera de los elementos analizados (gato, perro y pájaro).

La matriz de los pesos tiene una dimensión (3,4) y la de entrada de los píxeles (4,1) por lo que el producto escalar de ambas da una matriz de (3,1). Como ya se explicó anteriormente, el sesgo (b) de cada neurona asegura que las neuronas tengan un nivel mayor de un determinado valor.

Según el ejemplo, el valor obtenido para la clase gato (3.32) es mayor que para la clase perro (3.01) y pájaro (3.17) por lo que se puede decir que la red reconoce correctamente que la imagen de entrada corresponde a un gato.

Si la imagen de entrada de la red neuronal corresponde ahora a un perro, los píxeles de entrada cambiarán, mientras que los valores de los pesos " W " y los sesgos " b " se mantendrán constantes.

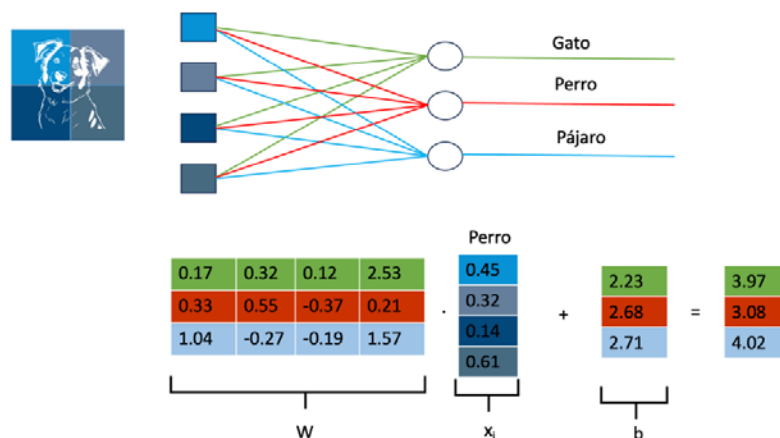


Figura 2-98: Ejemplo de clasificador lineal con una imagen de perro

Capítulo 2: Materiales y métodos

En este caso, **Figura 2-98**, tras realizar las operaciones correspondientes, de los resultados obtenidos se observa que el valor más alto corresponde a la clase pájaro (4.02), el siguiente a la clase gato (3.97) y el resultado más bajo corresponde a la clase perro (3.08) que en teoría tendría que ser la correcta. Por tanto, a diferencia del ejemplo anterior, en este caso la red neuronal dice que la imagen de entrada, lo más probable es que corresponda a un pájaro porque es el valor más alto siendo errónea la clasificación.

Ahora, si la imagen de entrada es un pájaro, por lo que cambian los píxeles de entrada y se mantienen los valores de W y b :

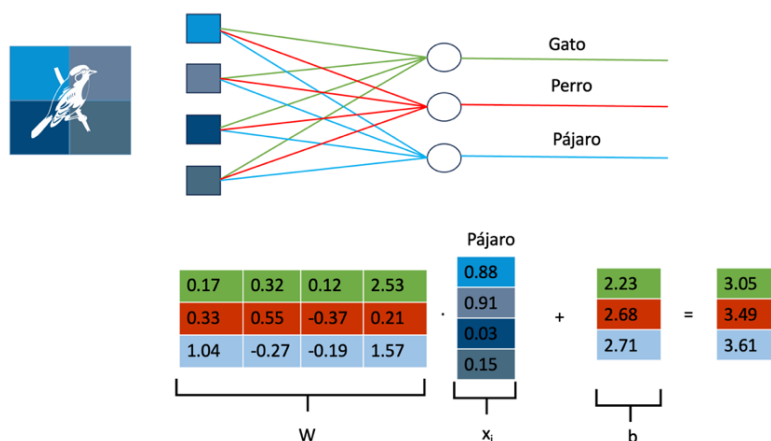


Figura 2-99: Ejemplo de clasificador lineal con una imagen de un pájaro

Ahora se observa que la red predice bien ya que el valor más alto es el del pájaro (3.61). Por tanto, esta red ha sido capaz de predecir bien el resultado con la imagen de gato y pájaro pero no con la clase perro. Por tanto, como el objetivo es que la red sea capaz de predecir cualquier tipo de clase (gato, perro y gato) va a ser necesario recalcular los parámetros de W y b de manera que la red vaya aprendiendo y sea más precisa en sus clasificaciones.

2.8.3.2 Aprendizaje de una red neuronal a clasificar imágenes. Cálculo de los valores de pesos y sesgos.

Las redes neuronales son modelos que aprenden a partir de la experiencia, lo que les permite realizar tareas como la clasificación de imágenes. En este contexto, una red neuronal debe diferenciar entre diversas categorías, como, por ejemplo, gatos, perros o pájaros, según el ejemplo mencionado previamente. El proceso de aprendizaje de estas categorías se basa en una operación lineal que asigna un valor numérico, o "score", a cada posible clase, como se ha descrito anteriormente.

Capítulo 2: Materiales y métodos

El primer paso en el proceso de clasificación es una operación lineal que combina los píxeles de entrada con un conjunto de pesos y sesgos, representados por las variables W y b . Durante el entrenamiento, estos pesos y sesgos se ajustan iterativamente con el objetivo de capturar la importancia relativa de cada píxel en la determinación de la categoría a la que pertenece la imagen.

En el ejemplo proporcionado (**Figura 2-98**), los valores iniciales de los parámetros W y b no son adecuados para clasificar correctamente la imagen de un perro. Por tanto, es necesario ajustar estos parámetros mediante un proceso de optimización, de manera que la red neuronal sea capaz de predecir correctamente la clase a la que pertenece la mayor cantidad de imágenes.

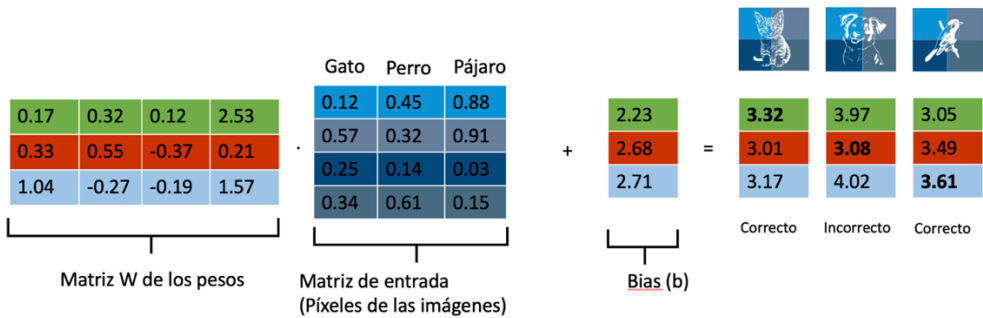


Figura 2-100: Clasificación de tres imágenes

2.8.3.2.1 Función de activación SOFTMAX

La función de activación Softmax es fundamental en tareas de clasificación multiclase, ya que convierte los scores lineales obtenidos en probabilidades, permitiendo asignar a cada clase una probabilidad específica de que la imagen pertenezca a ella [67]. Al realizar esta transformación, los resultados son más fácilmente interpretables, facilitando la identificación de la categoría con mayor probabilidad.

El uso de la función Softmax en la última capa de una red neuronal permite transformar los resultados de una operación lineal en probabilidades, lo que proporciona una interpretación más clara y comprensible de las predicciones del [74]. Esta función no lineal se aplica después de la combinación lineal de los pesos y sesgos de la capa de salida, y permite que los valores obtenidos puedan interpretarse como la probabilidad de que una imagen pertenezca a una clase en particular.

Matemáticamente, la función Softmax está definida en la **Ecuación 2-12** de la siguiente manera:

$$\hat{y} = P(Y = k|X = x_i) = \frac{e^{S_k}}{\sum_j e^{S_j}} \quad \text{Ecuación 2-12}$$

Donde S_k es el score lineal de la clase k , y el denominador es la suma de las exponenciales de los scores de todas las clases. Esto garantiza que las probabilidades estén normalizadas, sumando siempre 1.

Siguiendo con el ejemplo mencionado (**Figura 2-101**), la función Softmax aplicada en la última capa del modelo muestra una probabilidad de 0.17 para la clase "perro", lo cual indica que la predicción no es correcta. La baja probabilidad asignada a la clase correcta sugiere que los parámetros de la red, específicamente los pesos ($\mathbf{W}$) y los sesgos ($\mathbf{b}$), no están ajustados de manera adecuada. Para mejorar la precisión de la predicción, es necesario ajustar estos parámetros.

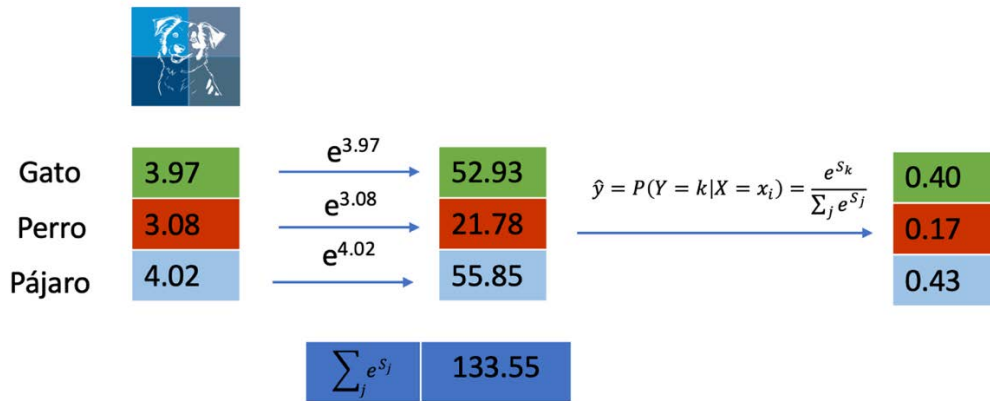


Figura 2-101: Función Softmax

Este ajuste se realiza mediante una función matemática denominada "Función de Pérdida", la cual mide la calidad de los parámetros utilizados. En los siguientes apartados se detallará cómo minimizar esta función de pérdida para reducir el error en las predicciones.

2.8.3.2.2 La función de pérdida

En el campo de las redes neuronales, una de las tareas más cruciales es optimizar el rendimiento del modelo. Esto implica medir con precisión la exactitud o el grado de desviación de las predicciones de la red, utilizando lo que se conoce como función de pérdida o función de coste. Esta herramienta es esencial para ajustar y mejorar el modelo, ya que proporciona una medida cuantitativa de las discrepancias entre las predicciones y los resultados reales deseados [67].

Capítulo 2: Materiales y métodos

La función de pérdida trabaja comparando las predicciones generadas por la red neuronal con las etiquetas verdaderas o los objetivos. Esta comparación produce un valor denominado pérdida, que refleja la distancia entre la predicción y la realidad (**Figura 2-102**). Este valor sirve como una guía clave para ajustar los parámetros de la red, es decir, los pesos (W) y los sesgos (b), con el objetivo de reducir la pérdida y, por tanto, mejorar la precisión de las predicciones.

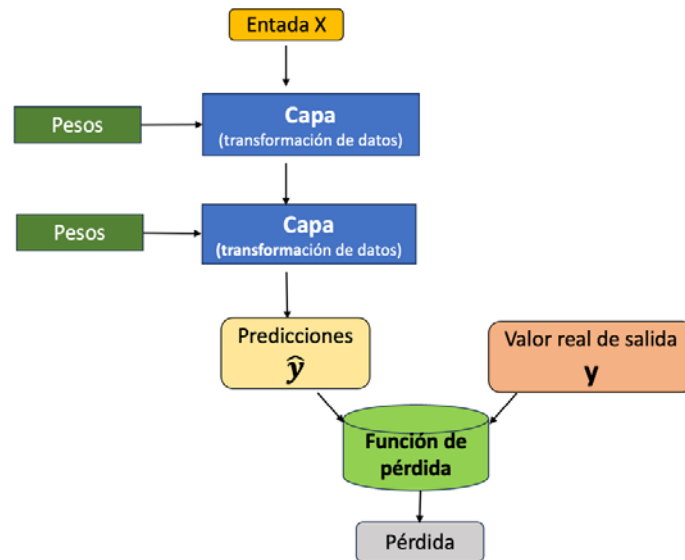


Figura 2-102: La función de pérdida midiendo la calidad de los resultados[67]

El proceso de optimización de una red neuronal es continuo y dinámico y la función de pérdida provee la retroalimentación necesaria para este proceso. Basándose en los resultados de la función de pérdida (**Figura 2-102**), se pueden realizar ajustes en los parámetros de la red: pesos y sesgos de las neuronas tal y como se verá más adelante. Estos ajustes se hacen con el objetivo de reducir el resultado de la función de pérdida, lo que indica una mayor precisión en las predicciones de la red.

Existen diferentes tipos de funciones de pérdida, cuya elección depende de la naturaleza del problema a resolver. Por ejemplo, en problemas de clasificación multiclase se utiliza comúnmente la entropía cruzada (cross-entropy loss), mientras que en problemas de regresión es frecuente el uso del error cuadrático medio (mean squared error). En este estudio, se emplea la entropía cruzada, que se define mediante la **Ecuación 2-13** [74]:

$$L_i = - \sum_{j=1}^{\#clases} y_j \ln(\hat{y}_j) \quad \text{Ecuación 2-13}$$

Capítulo 2: Materiales y métodos

En este proceso, se utiliza un vector "one hot vector" para representar las categorías posibles de cada imagen. Este vector tiene la misma dimensión que el número de clases que el modelo puede predecir. En él, se asigna un valor de 1 a la clase correcta y 0 a todas las demás clases. Por ejemplo, en el ejemplo utilizado que clasifica imágenes en tres categorías posibles: gato, perro y pájaro, el vector one hot para una imagen de un gato se representaría como:

$$y_{gato} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Esto indica que la imagen pertenece a la primera clase (gato) y no a las otras dos (perro y pájaro). Esta representación vectorial se utiliza tanto para evaluar como para entrenar el modelo.

Por ello, se puede expresar la función de pérdida L para un modelo de red neuronal mediante la ecuación mediante la **Ecuación 2-14**:

$$L_i = - \sum_{j=1}^{\#clases} y_j \ln(\hat{y}_j) = -y_j \cdot \ln(\hat{y}_j) = -\ln(\hat{y}_j) \quad \text{Ecuación 2-14}$$

Donde:

y_j = es 1 si la clase es la etiqueta verdadera y 0 en caso contrario.

$\hat{y}$ =es la probabilidad predicha para la clase j (la clase correcta).

Este valor permite medir lo lejos que están las predicciones del modelo con respecto a la realidad.

Aplicando la función Softmax para calcular las probabilidades de las clases, se obtiene una distribución probabilística de pertenencia de la imagen a cada clase (**Figura 2-103**):

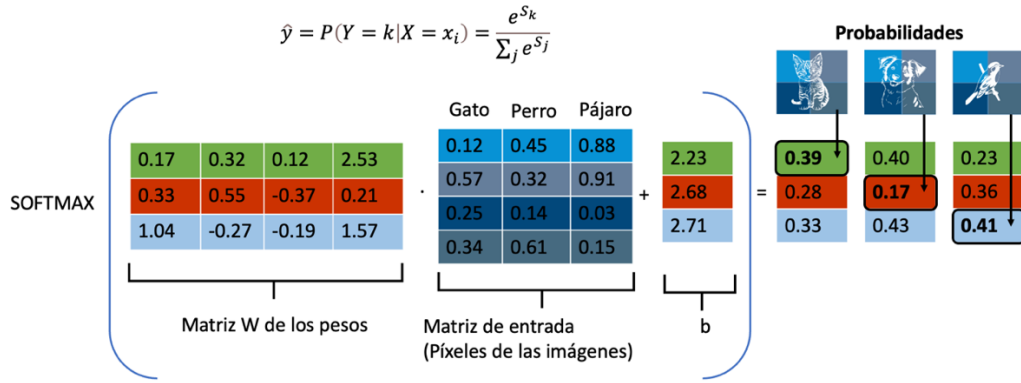


Figura 2-103: Resultados de la función Softmax

Con la finalidad de obtener los parámetros de $\mathbf{W}$ y $\mathbf{b}$ de manera que sean óptimos para cualquier imagen, es necesario aplicar la función de error para que te diga la calidad de los valores obtenidos. Esta función de error va a ser la función de pérdida calculada mediante la **Ecuación 2-14**.

Por tanto, aplicando la función de pérdida a los resultados obtenidos a partir de la función Softmax (**Ecuación 2-12**), evaluando de este modo la probabilidad que el modelo asigna a cada clase para una imagen específica y a continuación implementando la fórmula de entropía cruzada según la **Ecuación 2-14**, se obtienen los siguientes resultados:

$$L_{gato} = - \sum_{j=1}^{\#clases} y_j \ln(\hat{y}) = -(1 \cdot \ln(0.39) + 0 \cdot \ln(0.28) + 0 \cdot \ln(0.33)) = -\ln(0.39) = 0.94$$

$$L_{perro} = - \sum_{j=1}^{\#clases} y_j \ln(\hat{y}) = -(0 \cdot \ln(0.40) + 1 \cdot \ln(0.17) + 0 \cdot \ln(0.43)) = -\ln(0.17) = 1.77$$

$$L_{pájaro} = - \sum_{j=1}^{\#clases} y_j \ln(\hat{y}) = -(0 \cdot \ln(0.23) + 0 \cdot \ln(0.36) + 1 \cdot \ln(0.41)) = -\ln(0.41) = 0.89$$

Este análisis muestra cómo se evalúa la calidad del modelo en función de las probabilidades asignadas a las distintas clases. Cuanto menor sea el valor de la pérdida, mayor será la precisión de la predicción en la clasificación de imágenes.

Esta metodología permite que el modelo de aprendizaje automático compare de manera efectiva la predicción con la realidad, ajustando sus parámetros para mejorar el rendimiento en clasificaciones futuras.

La función de pérdida, al tratarse de una función logarítmica, cuanto menos se aproxime a 1 para la clase correcta mayor es la pérdida (**Figura 2-104**):

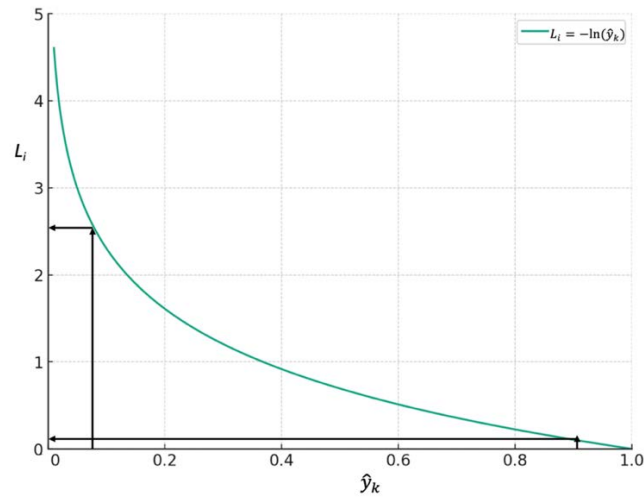


Figura 2-104: Representación gráfica de la función de pérdida

El aprendizaje supervisado es fundamental en el ámbito de la Inteligencia Artificial (IA). Se trata de un método donde el modelo aprende a partir de datos etiquetados, es decir, cada entrada de datos viene acompañada de la salida correcta [80]. En este proceso de enseñanza, la función de pérdida juega un papel fundamental, ya que es el mecanismo que mide la precisión de las predicciones del modelo y guía su optimización.

El entrenamiento de un modelo bajo un esquema de aprendizaje supervisado implica ajustar sus parámetros internos, como los pesos (**W**) y los sesgos (**b**), de manera que el modelo pueda realizar predicciones precisas sobre datos nuevos. La efectividad del entrenamiento se refleja en la capacidad del modelo para generalizar lo aprendido a ejemplos que no ha visto antes. Las entradas corresponden a los datos que se le proporcionan al modelo, los cuales pueden variar desde números simples hasta imágenes complejas, mientras que las salidas son las etiquetas o clases que el modelo debe aprender a predecir. Por lo tanto, las entradas y salidas conforman pares de ejemplos que el modelo utiliza durante su fase de aprendizaje.

El objetivo no es solo que el modelo aprenda a clasificar correctamente perros o gatos, sino que sea capaz de evaluar y predecir con precisión una amplia variedad de imágenes, independientemente de la clase a la que pertenezcan. Para lograrlo, el paso final consiste en agregar todas las pérdidas previamente calculadas y obtener un único valor que resuma el error global del modelo. Esto se logra implementando una función matemática, **Ecuación 2-15**, conocida como función de coste del inglés “Cost Function” [74]:

$$J(w, b) = -\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [y_i \cdot \ln(\hat{y}_i) + (1 - y_i) \cdot \ln(1 - \hat{y}_i)] \quad \text{Ecuación 2-15}$$

Por tanto, siguiendo el ejemplo estudiado hasta ahora y teniendo en cuenta que “m” es el número de clases:

$$J = \frac{1}{3} \cdot (0.94 + 1.77 + 0.89) = 1.2$$

Con esta fórmula se calcula cuál es la función de pérdida de todas las imágenes. Por eso se quiere encontrar los parámetros **W** y **b** que minimicen esta función de coste. En el ejemplo se han usado 3 imágenes, pero en un proceso real serían muchos más, miles. Por lo tanto, los únicos parámetros sobre los que se tiene control son **W** y **b**. Debido a que las entradas de píxeles de las imágenes son las que se quieren aprender a clasificar, no se pueden cambiar.

El fundamento de la optimización en el aprendizaje automático radica en la minimización efectiva de la función de coste. Esta función cuantifica el error entre las predicciones del modelo y los valores reales (**Figura 2-102**). Encontrar una estrategia para ajustar los valores de **W** y **b** es esencial, ya que son los únicos factores que podemos modificar para mejorar la clasificación al no poder alterar las entradas originales, es decir, los píxeles de las imágenes que buscamos clasificar. Esto se logra mediante algoritmos de optimización, como el descenso del gradiente que se estudia más adelante, que ajustan los parámetros del modelo en la dirección que reduce el error de la predicción.

Para ello, a continuación, se empieza con un ejemplo sencillo de un paso completo es decir un “*forward pass*” de un modelo de red neuronal que permite clasificar tres tipos de imágenes: gatos, perros y pájaros. Para ello se asume un modelo de una sola capa con tres neuronas las cuales representan el clasificador del modelo para la clase gato, perro y pájaro. Después se pasará por la función “Softmax” (**Ecuación 2-12**) para convertir los scores que arroja el modelo de red normal en probabilidades y luego se calculará la función de pérdida la cual está dada por la ecuación de entropía cruzada o “Cross entropy” (**Ecuación 2-14**) según **Figura 2-105**.

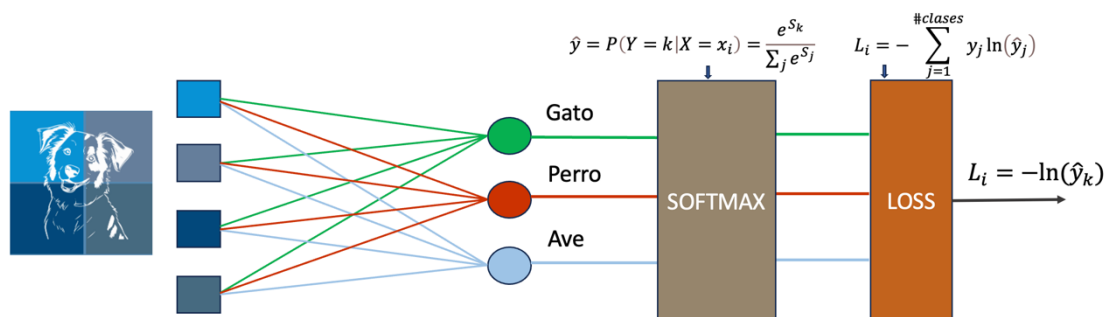


Figura 2-105: Ejemplo de un Forward pass para una imagen determinada

Según el ejemplo analizado (**Figura 2-105**) lo que se busca es que la segunda neurona, la que representa a la clase perro, tenga la salida más alta del score y que así represente la probabilidad más alta.

Para este ejemplo, se parte de una matriz de pesos sinápticos “**W**”, los píxeles de entrada de la imagen (formada con 4 píxeles) que se llaman “**x**” y los sesgos “**b**” inicializados en 0. Los valores de la matriz de pesos sinápticos “**W**” y la de los píxeles “**x**” han sido inicializadas con valores aleatorios. Los elementos que están en la fila en color verde representan a la primera neurona, en rojo a la segunda y en azul a la tercera. Mediante la **Ecuación 2-16** se obtiene el vector de salida Z que representa a los scores (**Figura 2-106**):

$$Z = W \cdot x + b$$

Ecuación 2-16

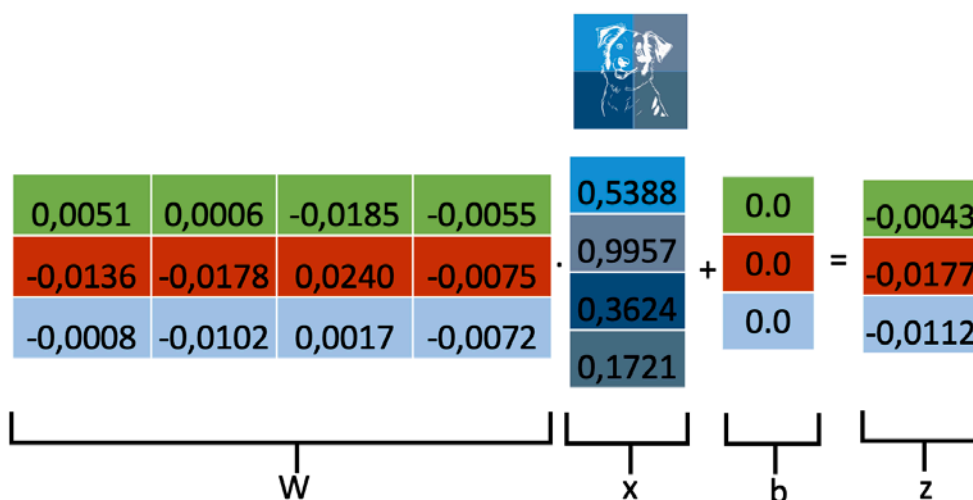


Figura 2-106: Cálculo de los scores en el ejemplo de Forward pass

Aplicando la función Softmax (**Ecuación 2-12**) al vector calculado **Z** se obtienen las siguientes probabilidades:

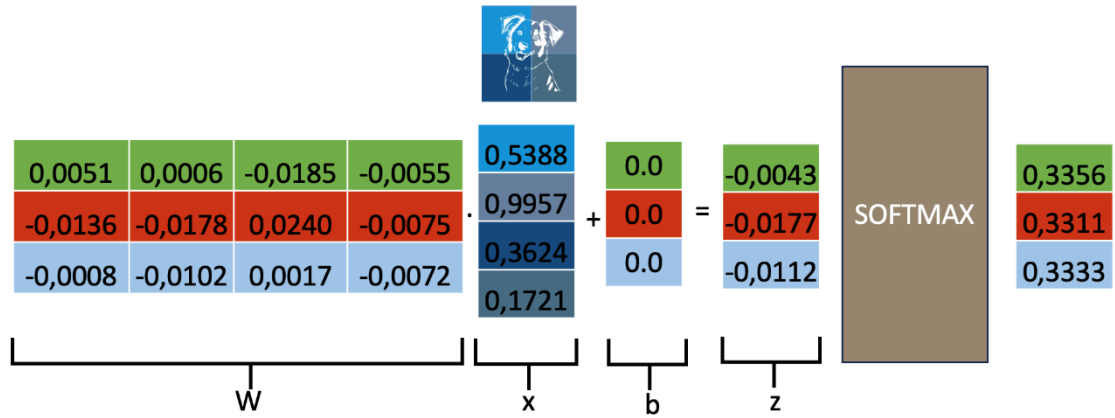


Figura 2-107: Cálculo de las probabilidades mediante Softmax en el ejemplo de Forward pass

A la salida de la función Softmax se obtiene la probabilidad de que, en este caso, la imagen introducida de tipo perro pertenezca a: la clase gato, a la clase perro o a la clase pájaro. Se puede observar que casi todas las clases están arrojando la misma probabilidad, pero, sin embargo, se puede ver que la clase que debería ser la correcta la del perro, es la que tiene la menor probabilidad (0.3311). Esto indica que el modelo no está prediciendo bien a esta imagen de entrada de tipo perro.

A continuación, estas probabilidades se utilizan en la función de pérdida mediante fórmula Crossentropy o entropía cruzada (**Ecuación 2-14**), para calcular lo bien que funciona el modelo con respecto a una entrada determinada con los parámetros actuales de la red neuronal.

Como ya se dijo anteriormente, el vector de etiquetas usualmente se va a dar por un vector tipo one hot vector, donde en este caso sería 0 para las clases no correctas y 1 para la clase correcta. En este caso, dado que la clase es perro sería el segundo elemento del vector “y” el que estaría indicado como 1.

$$y = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Por tanto, se tiene que:

$$y_j \cdot \ln(\hat{y}_j) = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} p_{gato} \\ p_{perro} \\ p_{pájaro} \end{pmatrix} = p_{perro}$$

Siendo p la predicción de que sea gato, perro o pájaro. Obteniendo:

$$L_i = -\ln(\hat{y}_k)$$

Siendo $\hat{y}_k$ la predicción arrojada por el modelo de que sea perro y aplicando la fórmula de pérdida a la predicción para la clase correcta, se obtiene una pérdida de 1,1053.

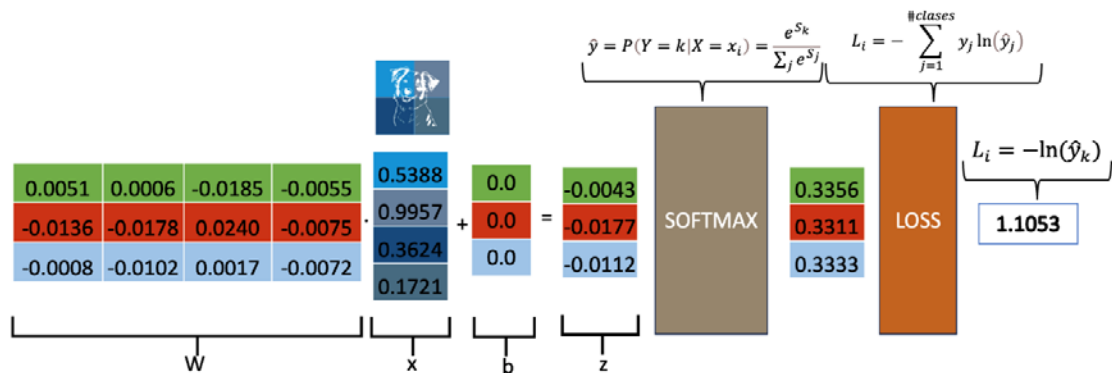


Figura 2-108: Resultado del ejemplo Forward pass a partir de una imagen

Todo este proceso se conoce como “Forward pass” e involucra desde la imagen de entrada, pasarla por todos los elementos de la red neuronal hasta obtener la función de pérdida para dicho elemento de entrada. Para recalculer los valores de W y b se hará uso del procedimiento estudiado a continuación.

2.8.3.2.3 Algoritmo del Descenso del gradiente y su implementación

El Descenso del Gradiente es una herramienta de optimización que ajusta iterativamente los parámetros W y b en dirección opuesta al gradiente de la función de pérdida J . Esta técnica permite "descender" por la pendiente de la función de coste hasta llegar a un mínimo, ya sea local o global, que representa el punto de menor error posible para el modelo en cuestión [67].

La siguiente Figura 2-109 muestra el concepto de mínimos locales y globales en la función de coste J . La letra J en el gráfico representa la función pérdida, que es la medida que se intenta minimizar durante el entrenamiento del modelo. El objetivo del descenso del gradiente es encontrar estos puntos mínimos para reducir el error del modelo.

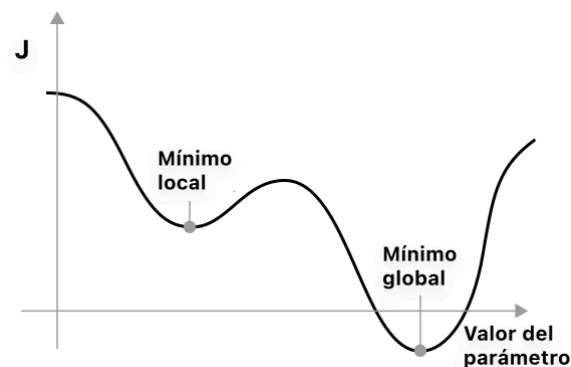


Figura 2-109: Mínimo local y global

Capítulo 2: Materiales y métodos

En el gráfico de la **Figura 2-109**, el mínimo local es un punto donde la función de coste J tiene un valor más bajo que en los puntos cercanos a él, pero no necesariamente el valor más bajo de toda la función. El mínimo global, en cambio, es el punto más bajo de la función de coste, representando el error más pequeño posible para el modelo. El algoritmo de descenso del gradiente trata de encontrar estos puntos mínimos modificando los parámetros de forma iterativa, con el objetivo ideal de llegar al mínimo global para obtener el mejor desempeño del modelo.

Para visualizar el proceso del descenso del gradiente, se puede imaginar una montaña (**Figura 2-110**) en la que la función de pérdida es la altitud y el objetivo es dar pasos en la dirección de mayor inclinación de la montaña para llegar al mínimo lo más rápido posible.

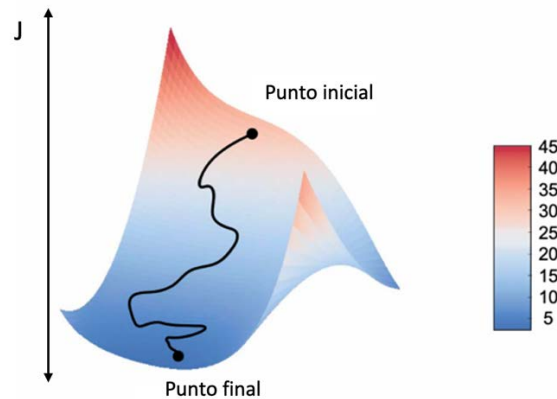


Figura 2-110: Descenso por gradiente en una superficie de pérdida 2D [67]

El Descenso del Gradiente aprovecha esta propiedad para ajustar los parámetros del modelo, como los pesos y sesgos en una red neuronal, y dirigirlos hacia el mínimo de la función de coste. Este proceso iterativo se asemeja a descender una colina (**Figura 2-110**), donde en cada paso se evalúa la pendiente para determinar la dirección óptima de movimiento. El gradiente indica la dirección de mayor cambio, por lo tanto, se actualizan los parámetros considerando el negativo del gradiente ya que se quiere minimizar la función de coste y se busca reducir el error.

También se puede entender el gradiente como una superficie tridimensional (**Figura 2-111**) donde el eje vertical representa la función de pérdida y los ejes horizontales corresponden a los parámetros $\mathbf{W}$ y $\mathbf{b}$. El objetivo es encontrar el punto más bajo en esta superficie, ajustando $\mathbf{W}$ y $\mathbf{b}$ de tal manera que se minimice el valor de la función de coste.

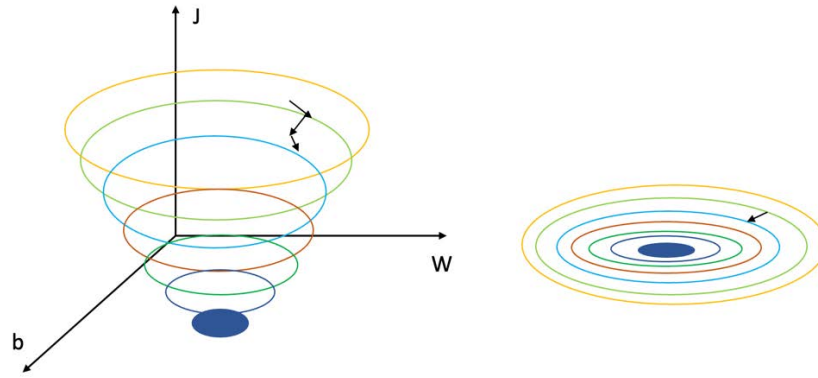


Figura 2-111: Descenso por gradiente en una superficie de pérdida 3D

La convexidad de la función de coste es una propiedad que simplifica el proceso de optimización. En un espacio multidimensional tal y como se observa en la **Figura 2-111**, una función convexa que se asemeja a un cuenco y con un único punto situado más bajo que es el mínimo global. Este punto representa la solución óptima del problema de optimización, donde el modelo alcanza su máxima eficiencia predictiva [74].

Cada iteración del algoritmo toma en cuenta el gradiente de la función de coste, moviéndose en dirección opuesta a este tal y como se muestra en la **Figura 2-112**.

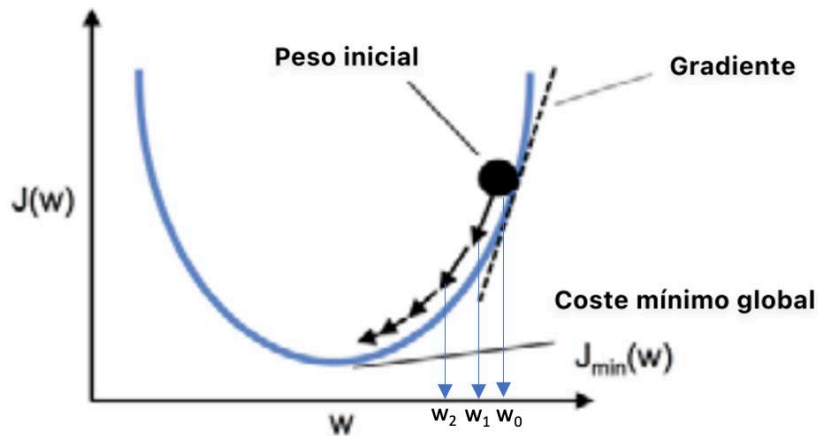


Figura 2-112: Gradiente de la función de coste [74]

Para actualizar el parámetro w , el algoritmo de descenso del gradiente sigue la siguiente regla de actualización que ajusta el valor de w en la dirección opuesta al gradiente de la función de pérdida:

$$w_1 = w_0 - \frac{dJ}{dw} \quad \text{Ecuación 2-17}$$

La magnitud de cada paso está determinada por la “tasa de aprendizaje” del inglés learning rate (α), que es un parámetro clave en el proceso de optimización. La tasa de aprendizaje influye en la rapidez y la suavidad del descenso de la función de pérdida. Una

Capítulo 2: Materiales y métodos

tasa de aprendizaje adecuada es fundamental para garantizar que el algoritmo avance de manera efectiva sin sobrepasar el mínimo de la función [74].

La regla de actualización, **Ecuación 2-18**, se puede expresar de la siguiente manera cuando se incorpora la tasa de aprendizaje:

$$w_1 = w_0 - \alpha \frac{dJ}{dw} \quad \text{Ecuación 2-18}$$

La tasa de aprendizaje es un parámetro muy importante en la optimización de las funciones de pérdida. La correcta selección de α puede marcar la diferencia entre un modelo que converge eficazmente y uno que no lo hace. En la figura izquierda de la **Figura 2-113** se observa que, al seleccionar una tasa de aprendizaje adecuada, el coste disminuye de manera lenta pero consistente, lo que indica que el modelo está aprendiendo eficazmente, ajustando sus parámetros y acercándose progresivamente al mínimo global de la función de pérdida.

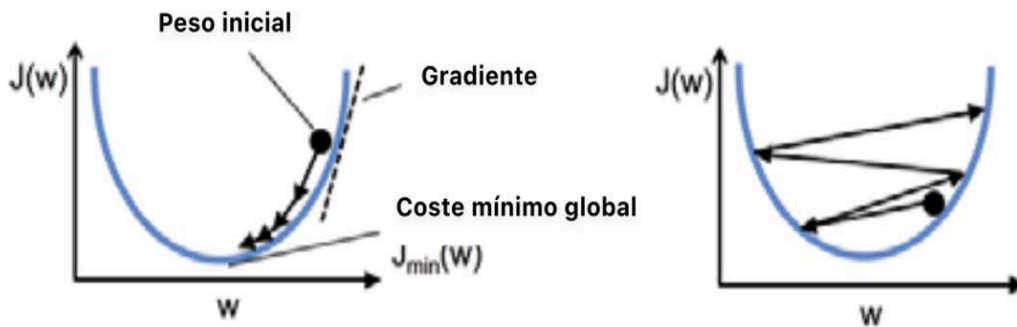


Figura 2-113: Elección correcta de la tasa de aprendizaje[74]

Por otro lado, una tasa de aprendizaje mal seleccionada puede llevar a problemas en el proceso de optimización. Si la tasa es demasiado alta, el modelo puede "sobrepasar" el mínimo global, como se muestra en la figura derecha de la **Figura 2-113**. Esto ocurre porque los ajustes en los parámetros son demasiado grandes, lo que provoca que el modelo oscile alrededor del punto óptimo sin llegar a converger de manera estable. Este fenómeno resulta en un aprendizaje deficiente, o incluso en la incapacidad del modelo para aprender correctamente [74].

2.8.3.2.4 Algoritmo de Retro-propagación

La retro-propagación, del inglés "Backpropagation", fue descubierta y popularizada hace más de 30 años por D. E. Rumelhart, G. E. Hinton y R. J. Williams en el artículo "Learning representations by error propagation" [81] y sigue siendo una técnica esencial en el campo del aprendizaje automático y las redes neuronales.

Capítulo 2: Materiales y métodos

El algoritmo de retro-propagación es el algoritmo central en el aprendizaje profundo y no solo representa el núcleo del proceso de optimización, sino que también es el mecanismo mediante el cual se realiza el ajuste efectivo de los pesos en una red neuronal.

El ajuste de los pesos es una tarea meticulosa y precisa, llevada a cabo por el optimizador tal y como se observa en la **Figura 2-114**. Este componente es responsable de modificar los pesos para mejorar continuamente el rendimiento del modelo durante el entrenamiento.

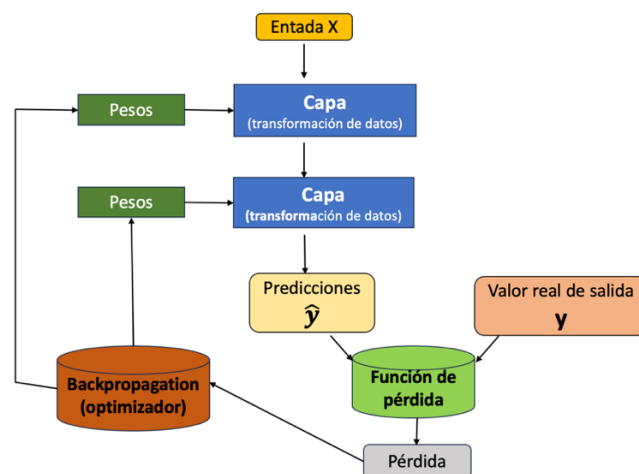


Figura 2-114: Retro-propagación: Ajuste de pesos

La retro-propagación funciona retrocediendo desde la capa de salida hacia las capas de entrada, ajustando los pesos en cada capa en función del error o diferencia entre la salida generada por la red y la salida deseada, **Figura 2-114**. Este error se calcula a partir de la función de pérdida, que es una medida crucial para determinar cuánto contribuye cada peso al error total. A través de este proceso, el algoritmo propaga el error hacia atrás desde la capa de salida hacia las capas intermedias, permitiendo ajustar los pesos de manera que se minimice la función de pérdida.

Basándose en este error, el algoritmo de retro-propagación calcula el gradiente de la función de pérdida para cada capa, empezando desde la salida y moviéndose hacia atrás. Este gradiente indica cómo los pesos de cada capa deben ajustarse para reducir el error. A través de este proceso iterativo, donde se calculan y ajustan los gradientes en cada capa, la red se optimiza gradualmente para mejorar su rendimiento en tareas específicas como clasificación, regresión o reconocimiento de patrones (**Figura 2-114**).

Al realizar estos ajustes, el algoritmo de retro-propagación asegura que cada capa de la red contribuya de manera más efectiva a la reducción del error total. Este proceso implica calcular el gradiente de la función de pérdida con respecto a cada peso en la red.

Capítulo 2: Materiales y métodos

Estos gradientes indican en qué dirección se deben ajustar los pesos para minimizar la pérdida.

El cálculo de estos gradientes y su aplicación para ajustar los pesos es lo que hace que la retro-propagación permita que la red “aprenda” de sus errores y se ajuste de manera que cada nueva iteración sea una mejora sobre la anterior, disminuyendo el error.

El bucle de entrenamiento es el núcleo del proceso de aprendizaje en una red neuronal. Con cada ejemplo que la red procesa, se ajustan los pesos de manera incremental en la dirección correcta. Este ajuste continuo lleva a una disminución progresiva de la puntuación de pérdida. La repetición de este ciclo es lo que permite a la red aprender y mejorar gradualmente. La meta final de este proceso de entrenamiento es alcanzar valores de peso que minimicen la función de pérdida. Una red con una pérdida mínima es aquella cuyas salidas son tan cercanas como sea posible a los objetivos establecidos [67]. Esto significa que la red ha aprendido eficazmente a realizar las predicciones o tareas para las que fue diseñada. A medida que la red procesa más ejemplos y ajusta sus pesos, su salida se vuelve cada vez más precisa y eficiente.

En el cálculo diferencial, y para la determinación del camino más eficiente a los extremos locales, la regla de la cadena es crucial en la retro-propagación, ya que permite calcular el gradiente de la función de pérdida con respecto a cada peso y sesgo en la red. Esta regla matemática descompone el cálculo de derivadas de funciones compuestas en productos de derivadas más simples. Una forma de encontrar la derivada de una función compleja anidada, como $f(g(x))$ es usar la regla de la cadena [74]. Esto implica que el gradiente en cada capa depende de los gradientes de las capas posteriores.

Durante la retro-propagación, el gradiente de la función de pérdida con respecto a cada peso y sesgo se calcula aplicando esta regla de la cadena. A continuación, estos gradientes se utilizan para actualizar los pesos y sesgos en la dirección opuesta al gradiente, con el objetivo de minimizar la función de coste, en un proceso conocido como descenso de gradiente. Esta relación entre el cálculo del gradiente y la retro-propagación es crucial para el aprendizaje en redes neuronales. La retro-propagación permite calcular de manera eficiente los gradientes que son necesarios para el descenso de gradiente, y estos gradientes son fundamentales para ajustar los parámetros de la red, mejorando así su rendimiento.

Capítulo 2: Materiales y métodos

La retro-propagación y el gradiente están intrínsecamente relacionados en el aprendizaje de las redes neuronales: la retro-propagación calcula los gradientes necesarios para el proceso de optimización del descenso de gradiente, lo cual es clave para mejorar y entrenar el modelo, por medio de la optimización de los pesos.

El descenso de gradiente estocástico (Stochastic gradient descent -SGD), por sus siglas en inglés) es una variante del método de descenso de gradiente y también se utiliza como un método de optimización que mejora el proceso estándar de descenso de gradiente. Mientras que el descenso de gradiente utiliza todo el conjunto de datos para calcular el gradiente en cada paso, el SGD actualiza los parámetros utilizando solo un subconjunto de datos o incluso un único punto de datos seleccionado al azar. Esta aproximación introduce un elemento de aleatoriedad que puede ayudar a evitar mínimos locales y mejorar la convergencia, haciéndolo efectivo para grandes conjuntos de datos y redes neuronales profundas [67].

El algoritmo de retro-propagación, combinado con el descenso de gradiente, se utiliza para actualizar los parámetros $\mathbf{w}$ (pesos) y $\mathbf{b}$ (sesgos) con el fin de minimizar la función de pérdida y mejorar el rendimiento de la red neuronal.

Volviendo al ejemplo que se ha estado utilizando hasta ahora, una vez calculada la función de pérdida con respecto a los parámetros actuales de la red neuronal (**Figura 2-108**), se procede a calcular el gradiente de la función de pérdida con respecto a todos los parámetros $\mathbf{w}$ y $\mathbf{b}$ que integran la región de estudio. Este gradiente es fundamental para ajustar los parámetros $\mathbf{w}$ y $\mathbf{b}$ y así minimizar la función de pérdida.

El objetivo es utilizar la retro-propagación para calcular los gradientes y luego actualizar los parámetros mediante el algoritmo de descenso de gradiente. Para simplificar este cálculo, se utiliza la combinación de la función Softmax y la función de pérdida (Cross-Entropy) como una sola unidad, lo que facilita la cancelación de términos y simplifica el resultado final. En este contexto, los valores de salida son los scores y la función de pérdida se muestra en la **Figura 2-115**.

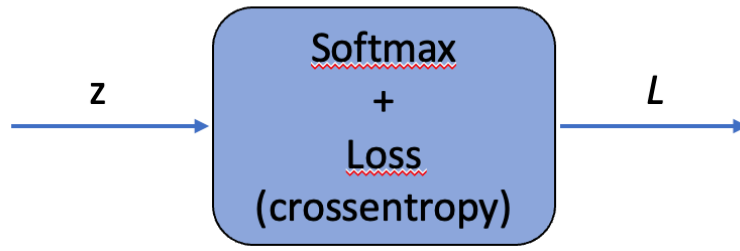


Figura 2-115: Función Softmax y Crossentropy como una sola unidad

La derivada de la función de pérdida con respecto a los valores de entrada en el vector $\mathbf{z}$ está dada por la diferencia entre la aproximación del modelo y los valores reales:

$$\frac{\partial L}{\partial \mathbf{z}} = \hat{\mathbf{y}} - \mathbf{y}$$

Por tanto, retomando los valores del ejemplo previamente utilizado, la derivada de la función de pérdida con respecto a las entradas a la función Softmax (los scores) se calcula de la siguiente manera:

$$\frac{\partial L}{\partial \mathbf{z}} = \begin{pmatrix} 0.3356 \\ 0.3311 \\ 0.3333 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.3356 \\ -0.6689 \\ 0.3333 \end{pmatrix}$$

Esta sería la forma en la que se calcula la derivada de la función de pérdida con respecto a las entradas a la función Softmax con respecto a $\mathbf{z}$, es decir, con respecto a los scores.

De esta forma se puede continuar con el proceso de retro-propagación aplicando continuamente la regla de la cadena hasta encontrar la derivada de la función de coste con respecto a los parámetros $\mathbf{w}$ y $\mathbf{b}$ y así proceder su actualización.

Representando el modelo completo como unidades en una gráfica computacional y a partir de los resultados establecidos en la **Figura 2-106** se aplica el proceso de retro-propagación:

Capítulo 2: Materiales y métodos

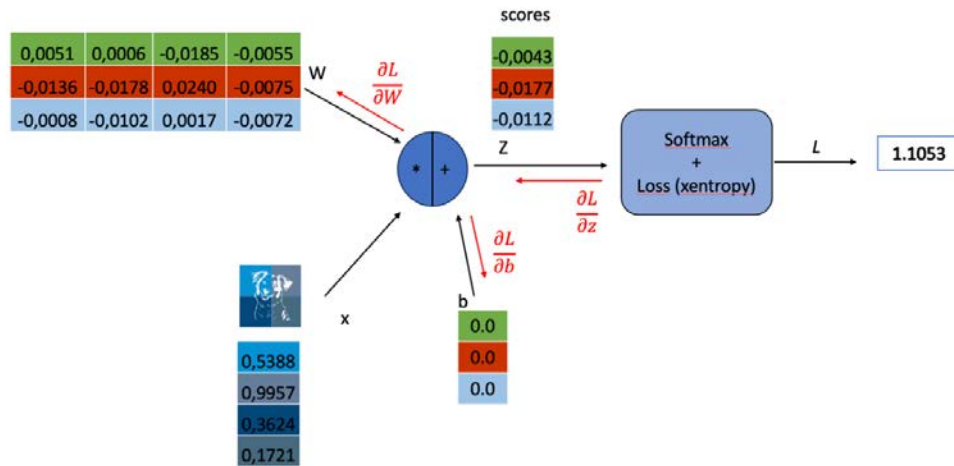


Figura 2-116: Valores de partida para el cálculo de la retro-propagación

El cálculo de la derivada de la función de pérdida con respecto a w se realiza aplicando la regla de la cadena:

$$\frac{\partial L}{\partial W} = \frac{\partial L}{\partial Z} \frac{\partial Z}{\partial W}$$

Sabiendo que $z = w \cdot x + b$, por lo que:

$$\frac{\partial Z}{\partial W} = x^T$$

Por tanto, se obtiene que:

$$\frac{\partial L}{\partial W} = \frac{\partial L}{\partial Z} x^T \quad \text{Ecuación 2-19}$$

Siendo x^T es la transpuesta del vector de entrada, lo cual es necesario para realizar correctamente la operación vectorial. Al aplicar esta fórmula:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial W} &= \frac{\partial L}{\partial Z} x^T = \begin{pmatrix} 0.3356 \\ -0.6689 \\ 0.3333 \end{pmatrix} (0.5388 \quad 0.9957 \quad 0.3624 \quad 0.1721) = \\ &= \begin{pmatrix} 0.1808 & 0.3342 & 0.1216 & 0.0578 \\ -0.3604 & -0.6660 & -0.2424 & -0.1151 \\ 0.1796 & 0.3319 & 0.1208 & 0.0574 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Para calcular $\frac{\partial Z}{\partial b}$, a partir de la ecuación $z = w \cdot x + b$:

$$\frac{\partial Z}{\partial b} = 1$$

Por tanto, a partir de:

Capítulo 2: Materiales y métodos

$$\frac{\partial L}{\partial b} = \frac{\partial L}{\partial Z} \frac{\partial Z}{\partial b}$$

Se obtiene:

$$\frac{\partial L}{\partial b} = \frac{\partial L}{\partial Z} \quad \text{Ecuación 2-20}$$

Lo que resulta en:

$$\frac{\partial L}{\partial b} = \frac{\partial L}{\partial Z} = \begin{pmatrix} 0.3356 \\ -0.6689 \\ 0.3333 \end{pmatrix}$$

El resultado de $\frac{\partial L}{\partial w}$ y $\frac{\partial L}{\partial b}$ son los valores que se van a enviar en el proceso de retro-propagación y así, utilizando esos valores, se van a actualizar los parámetros w y b .

De este modo se va haciendo la retro propagación y se van actualizando los parámetros obteniendo así nuevos valores de w y b que se deben aproximar hacia la dirección o acercar a un valor mínimo de la función de pérdida. Utilizando un learning rate de $\alpha = 0,01$ los nuevos valores de w se calculan de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} W_1 &= W_0 - \alpha \frac{\partial L}{\partial W} = \\ &= \begin{pmatrix} 0.0051 & 0.0006 & -0.0185 & -0.0055 \\ -0.0136 & -0.0178 & 0.0240 & -0.0075 \\ -0.0008 & -0.0102 & 0.0017 & -0.0072 \end{pmatrix} - 0.01 \cdot \begin{pmatrix} 0.1808 & 0.3342 & 0.1216 & 0.0578 \\ -0.3604 & -0.6660 & -0.2424 & -0.1151 \\ 0.1796 & 0.3319 & 0.1208 & 0.0574 \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} 0.0033 & -0.0027 & -0.0197 & -0.0061 \\ -0.0100 & -0.0112 & 0.0264 & -0.0063 \\ -0.0026 & -0.0135 & 0.0005 & -0.0078 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

De manera similar, para b :

$$b_1 = b_0 - \alpha \frac{\partial L}{\partial Z} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} - 0.01 \cdot \begin{pmatrix} 0.3356 \\ -0.6689 \\ 0.3333 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.0033 \\ 0.0067 \\ -0.0034 \end{pmatrix}$$

Con estos nuevos valores de w y b , se realiza un nuevo *forward pass* del modelo neuronal para observar cómo cambia la función de pérdida, **Figura 2-117**.

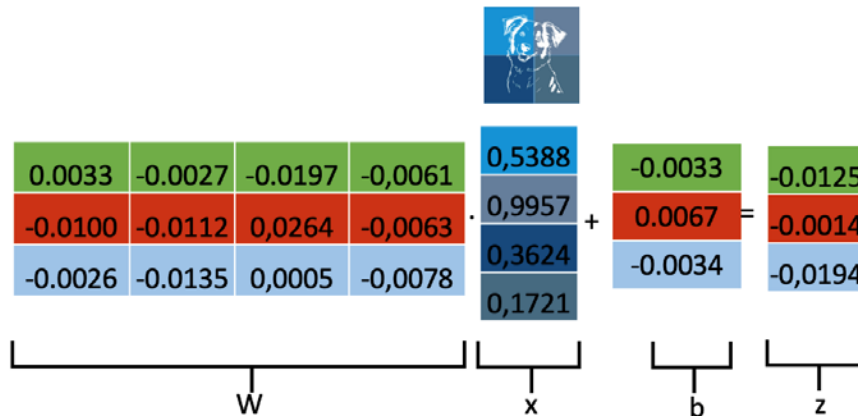


Figura 2-117: Cálculo de los scores a partir de los nuevos valores de w y b

Los pixeles de entrada siguen siendo los mismos ya que no se están entrenando. El objetivo es que el modelo aprenda a representar la clase del elemento de entrada. Al hacer nuevamente el proceso de multiplicación forward del modelo:

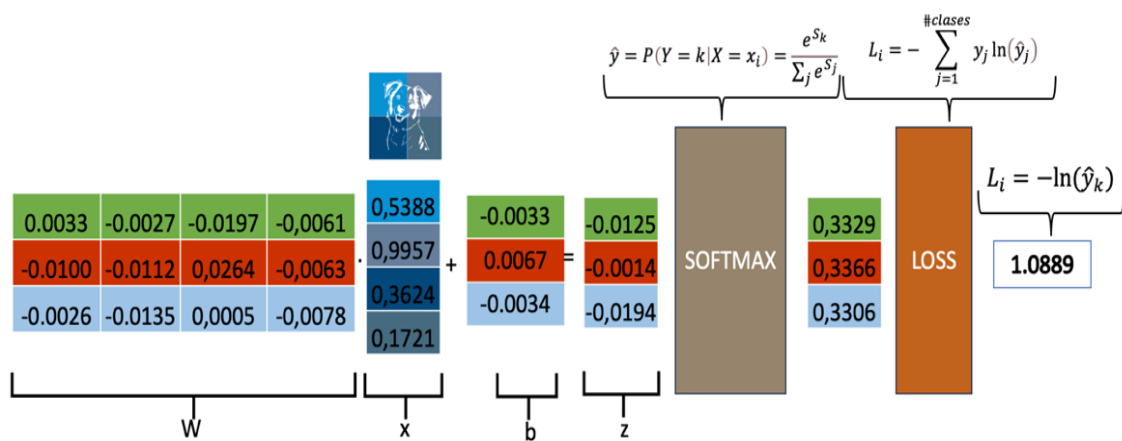


Figura 2-118: Nuevo proceso forward con los nuevos valores de w y b

Al pasar los scores por la función “Softmax” para que dichos valores se representen como probabilidades, se puede observar que los valores se ajustaron un poco y que los valores cambiaron. Este ajuste, con un solo paso usando el descenso por gradiente para calcular los gradientes, ahora se obtiene que la clase correcta, la clase perro, efectivamente tiene la mayor probabilidad (0,3366) (Figura 2-118) y después al calcular la pérdida se puede observar que ésta ha disminuido un poco pasando de 1,1053 a 1,0889.

Lo que queda por hacer es continuar con este proceso de forma iterativa con diferentes ejemplos o muestras de entrenamiento hasta que se vaya reduciendo la función de pérdida tratando de alcanzar el mínimo y de ese modo incrementar la eficiencia o accuracy del modelo.

Este ejemplo ilustra el uso del algoritmo de retropropagación y descenso por gradiente para actualizar los parámetros de un modelo de red neuronal, mostrando cómo disminuye el valor de la función de pérdida con cada iteración. En un escenario real, este proceso se lleva a cabo con muchas iteraciones y utilizando todo el conjunto de datos de entrenamiento para optimizar los parámetros y mejorar el rendimiento de la red.

2.8.3.3 Funciones de activación en redes neuronales

Para evitar que la red neuronal se reduzca a una mera secuencia de funciones lineales, es crucial incorporar funciones no lineales en la salida de las neuronas. Estas funciones aumentan significativamente el poder de representación y abstracción de la red. Las funciones de activación son críticas para permitir que la red neuronal artificial realice tareas complejas. Estas funciones introducen la no linealidad necesaria para que la red pueda aprender patrones no lineales y realizar tareas como el reconocimiento de imágenes [71].

Las redes neuronales requieren funciones no lineales después de transformaciones lineales para mejorar sus capacidades de clasificación y las funciones de activación introducen esa no linealidad deseada ayudando a interpretar puntuaciones o valores obtenidos de capas anteriores.

Una red neuronal equipada con funciones de activación no lineales puede ajustarse a funciones considerablemente más complejas que aquellas que emplean únicamente transformaciones lineales. Esto permite que las redes sean más aptas para procesar datos de alta dimensionalidad, como imágenes y señales de sonido. El valor de salida de una neurona se obtiene al aplicar la función de activación a la combinación lineal de las entradas, ponderada por los pesos y sesgos de las neuronas de la capa anterior, tal como se muestra en la **Figura 2-89** y la **Ecuación 2-10**.

Entre las funciones de activación más conocidas [77] y utilizadas en redes neuronales se encuentra las siguientes:

- **Sigmoidea, $\sigma(x)$:** La función sigmoidea representa un concepto fundamental en el ámbito del aprendizaje automático y la inteligencia artificial. Su principal función es comprimir los valores de entrada x en un rango comprendido entre 0 y 1. Esta característica permite que los números negativos de gran magnitud se aproximen al valor 0, mientras que los positivos de igual magnitud se acercan al valor 1 [67]. A

Capítulo 2: Materiales y métodos

pesar de que esta función ha sido ampliamente utilizada en el pasado debido a su fácil interpretación, su uso ha disminuido en los últimos años. Esto se debe principalmente a dos desventajas significativas que afectan el proceso de aprendizaje de los modelos:

- Tendencia a la saturación: Este fenómeno ocurre cuando los valores de la función se estancan en los extremos del rango, es decir, cerca de 0 o 1, llevando a que el gradiente, un factor crucial en el entrenamiento de algoritmos como se vio anteriormente, se reduzca casi a cero. Esta condición limita gravemente la habilidad de un modelo para aprender, ya que un gradiente cercano a cero implica que hay poco o ningún cambio en los pesos de la red durante el proceso de entrenamiento. Además, se debe tener en cuenta que, si los pesos asignados en la red son excesivamente altos, la función puede saturarse fácilmente, lo que reduce la sensibilidad necesaria para un aprendizaje efectivo.
- Las salidas de la función sigmoidea no están centradas en cero: Esto significa que la información procesada y transmitida a la neurona siguiente en una red neuronal tampoco estará centrada en este valor. En una red neuronal, la entrada x a una neurona se obtiene como una combinación lineal de las salidas de las neuronas de la capa anterior, ponderada por los respectivos pesos y sumada a un sesgo (bias). En consecuencia, si los datos ingresados a una neurona son consistentemente positivos o negativos, el gradiente en los pesos, que indica la zona donde la función alcanza sus mínimos valores, también tendrá una tendencia positiva o negativa. Este comportamiento puede originar una dinámica inestable en las actualizaciones del gradiente de los pesos. Aunque este problema no es tan severo como la saturación, sigue siendo un factor que puede comprometer la eficiencia del proceso de aprendizaje. No obstante, es importante mencionar que la suma de todos los gradientes a lo largo de la red puede resultar en ajustes de pesos con signos variados, lo que podría atenuar este problema.

La función sigmoidea se representa matemáticamente con la siguiente **Ecuación 2-21** donde x es la entrada a la neurona:

$$\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad \text{Ecuación 2-21}$$

Gráficamente se representa como en la **Figura 2-119**:

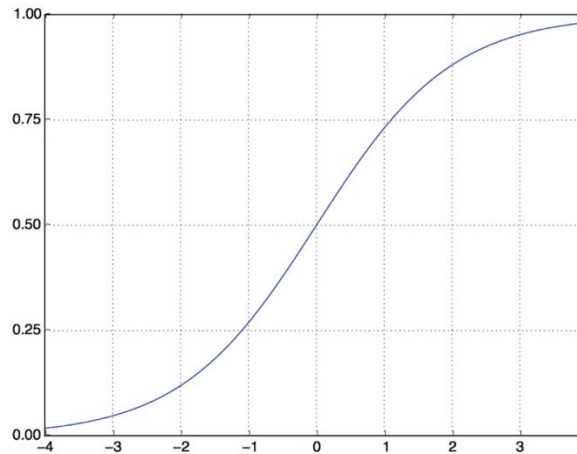


Figura 2-119: Representación gráfica de la función Sigmoidea [67]

- **Tangencial hiperbólica, $\tanh(x)$:** La función tangencial hiperbólica se distingue por mapear un valor real x en un rango de $[-1, 1]$, lo que la convierte en una variante más versátil y equilibrada en comparación con otras funciones de activación.

La principal ventaja de esta función de activación es que, a diferencia de la función sigmoidea cuyas activaciones se limitan a un rango entre 0 y 1, la tangencial hiperbólica se extiende en un rango más amplio que va desde -1 hasta 1. Esta característica es crucial, ya que permite que su salida esté centrada en cero, lo cual es beneficioso en muchos escenarios de modelado en aprendizaje automático. Esta centralización ayuda a mejorar la eficiencia del algoritmo durante el entrenamiento, evitando sesgos innecesarios en los datos. Al igual que la función sigmoidea, la función $\tanh(x)$ también presenta saturación en sus activaciones. Esto significa que, para valores de entrada muy altos o bajos, la función tiende a aproximarse a sus límites de -1 y 1. Sin embargo, a pesar de esta saturación, la centralización de sus salidas le confiere una ventaja en términos de balance y normalización de los datos.

La función tangencial hiperbólica se representa matemáticamente con la siguiente ecuación, donde x es la entrada a la neurona:

$$\sigma(x) = \frac{1 - e^{-x}}{1 + e^{-x}} \quad \text{Ecuación 2-22}$$

Gráficamente, su forma es similar a la sigmoidea, pero se extiende desde -1 hasta 1, como se muestra en la **Figura 2-120**:

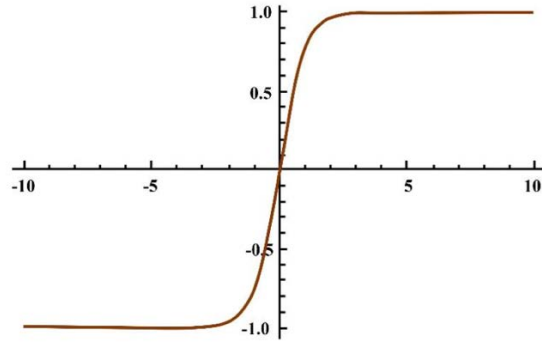


Figura 2-120: Función de activación $\tanh(x)$ [77]

- **Unidad lineal rectificadora o RELU (Rectified Linear Unit):** La Unidad Lineal Rectificadora, más conocida por sus siglas en inglés como ReLU, se ha convertido en una herramienta fundamental en el campo del aprendizaje automático y la inteligencia artificial. Su principal característica es que devuelve el valor de entrada x si es positivo y 0 si es negativo, lo que la convierte en la función de activación predilecta en numerosos modelos.

La función RELU se representa matemáticamente con la siguiente ecuación, siendo x la entrada a la neurona:

$$\sigma(x) = \max(0, x) \quad \text{Ecuación 2-23}$$

Gráficamente se representa en la **Figura 2-121**:

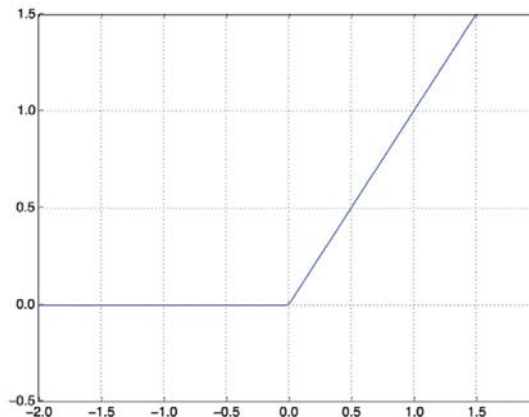


Figura 2-121: Función de activación ReLU [67]

Esta función de activación presenta las siguientes ventajas:

- Una de las ventajas más notables es su capacidad para acelerar la convergencia del método de descenso. Esto se atribuye a su naturaleza lineal y no saturante, como se ilustra en la **Figura 2-121**. A diferencia de otras funciones de activación que presentan saturación y pueden ralentizar el proceso de aprendizaje, la

función ReLU facilita un avance más rápido y eficiente hacia la optimización del modelo.

- En comparación con otras funciones de activación que requieren cálculos complejos, como las operaciones exponenciales, la ReLU destaca por su sencillez computacional (**Ecuación 2-23**). Esta característica la convierte en una opción preferente para los desarrolladores e investigadores, ya que simplifica la implementación y reduce los recursos computacionales necesarios.

A pesar de sus ventajas, la ReLU no está exenta de inconvenientes:

- Uno de los inconvenientes más relevantes es su fragilidad durante el proceso de entrenamiento. Un gradiente de pesos elevado puede ocasionar que los pesos se actualicen de tal manera que la neurona deje de activarse, resultando en un gradiente perpetuamente nulo desde esa neurona. Sin embargo, este problema puede mitigarse mediante un ajuste adecuado de la tasa de entrenamiento, lo que permite mantener la estabilidad y efectividad del modelo.
- **Función Softmax:** Como ya se dijo anteriormente, esta función se aplica habitualmente en la última etapa de una red neuronal y está diseñada para la clasificación multiclase. La función Softmax toma un vector de entradas x y transforma cada valor en una probabilidad entre 0 y 1, de manera que la suma de todas las probabilidades sea igual a 1. Esto permite interpretar los valores de salida como probabilidades de pertenencia a diferentes clases. La función Softmax se representa matemáticamente con la **Ecuación 2-12**, citada anteriormente.

2.8.4 Redes neuronales convolucionales (CNN)

Las redes neuronales convolucionales (CNNs del inglés) han revolucionado el campo de la inteligencia artificial, particularmente en áreas como la visión computacional y el procesamiento de imágenes. Aunque el auge de las CNNs se dio en 2012, sus raíces se remontan a décadas anteriores. Científicos como Yann LeCun ya habían contribuido significativamente al desarrollo de las redes neuronales convencionales desde finales de los 80 y durante los 90. Estos esfuerzos tempranos sentaron las bases para los avances posteriores en el campo. Uno de sus trabajos más famosos, publicado en 1989, mostró la aplicación práctica de estas redes, sentando un precedente para futuras investigaciones y desarrollos [82].

Capítulo 2: Materiales y métodos

Durante la década de 1990, las redes neuronales convolucionales comenzaron a ganar reconocimiento, especialmente en el ámbito del reconocimiento de caracteres numéricos. Esta época fue testigo de importantes avances, como la creación de bases de datos de caracteres numéricos (por ejemplo, MNIST del inglés, Modified National Institute of Standards and Technology database), que se convirtieron en puntos de referencia esenciales para el desarrollo y la evaluación de modelos de CNN.

El año 2012 marcó un punto de inflexión para las CNN con la introducción de AlexNet, un modelo que demostró la superioridad de las CNN en la clasificación de imágenes. Con una cantidad de datos sin precedentes y capacidades de procesamiento computacional avanzadas, AlexNet superó significativamente a los modelos anteriores, marcando el inicio de una nueva era en el campo de la visión computacional.

Antes de 2012, las CNNs no eran ampliamente reconocidas en la comunidad científica. Sin embargo, AlexNet cambió esto al ganar el concurso de clasificación de imágenes ImageNet con una ventaja significativa. ImageNet se trata de una extensa base de datos de imágenes y se ha establecido como un recurso fundamental en el campo de la visión por computadora. Desarrollada en la Universidad de Stanford, bajo la dirección de Fei-Fei Li, esta base de datos agrupa millones de imágenes, cada una meticulosamente etiquetada con información detallada. Esta riqueza de datos ha sido crucial para el avance de la tecnología en reconocimiento y procesamiento de imágenes. Este triunfo no solo demostró la efectividad de las CNNs, sino que también impulsó su popularidad en la investigación de la visión computacional.

El modelo AlexNet, desarrollado por Alex Krizhevsky, Ilya Sutskever y Geoffrey Hinton, marcó un antes y un después en la clasificación de imágenes. Utilizando una base de datos de aproximadamente un millón de imágenes y mil categorías diferentes, AlexNet pudo clasificar imágenes con una precisión notablemente superior a sus competidores [83]. Este éxito puso en evidencia la superioridad de las CNNs sobre los métodos tradicionales basados en descriptores y características lineales y se empezó a aplicar un enfoque más integrado y automatizado, donde las características de las imágenes se aprendían directamente por la red.

Después de 2012, las CNN experimentaron un crecimiento acelerado, con nuevos modelos que surgían anualmente, cada uno superando al anterior. Hasta 2015, el torneo ILSVRC, organizado por la Universidad de Stanford, fue un escenario clave para estos

desarrollos, culminando en modelos que alcanzaron un error de menos del 4%, superando incluso el desempeño humano estimado en la clasificación de imágenes. Por tanto, la base de datos y el torneo han contribuido enormemente al progreso en la inteligencia artificial. La base de datos proporciona el recurso esencial, mientras que el torneo representa un reto anual que fomenta el desarrollo tecnológico y la innovación en la comunidad científica. Juntos, han establecido un estándar en el campo y han impulsado el desarrollo de soluciones cada vez más sofisticadas en el procesamiento y análisis de imágenes.

Las CNN se distinguen por su arquitectura única la cual está diseñada para imitar la manera en que el cerebro humano procesa la información visual. Esta red, en contraste con las ANN, organiza su procesamiento en capas jerárquicas, lo que le permite descomponer y analizar las imágenes en niveles de complejidad creciente. En las etapas iniciales, las CNN se enfocan en identificar elementos básicos en las imágenes, como líneas y curvas. Esta capacidad inicial es fundamental para establecer las bases del reconocimiento de patrones más complejos [84].

El núcleo de las CNNs es la operación matemática de la convolución. Esta operación es fundamental para aplicar filtros digitales tanto en señales unidimensionales como en imágenes. La convolución permite mejorar, acentuar o modificar características de las imágenes, lo que ha llevado a su amplia aplicación en diversos campos, desde el reconocimiento de patrones hasta la mejora de imágenes en redes sociales.

2.8.4.1 Principios y arquitectura de las CNN

Las redes neuronales convolucionales destacan como el tipo de algoritmo más predominante en el ámbito del aprendizaje profundo o Deep-learning. Su amplia utilización se debe a su eficacia en tareas como el reconocimiento de imágenes, el procesamiento de video y otras aplicaciones que requieren el análisis de datos visuales complejos.

Una CNN está compuesta por tres tipos de capas diferenciadas tal y como se puede ver en la **Figura 2-122**:

1. Capa de convolución.
2. Capa de agrupación o pooling.
3. Capa fully-connected.

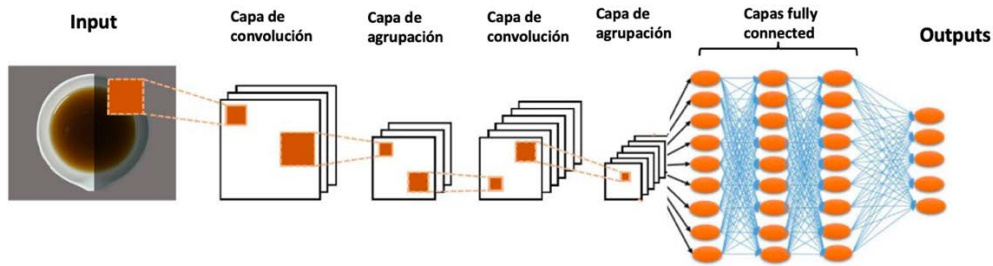


Figura 2-122: Estructura típica de una red neuronal convolucional

Las capas convolucionales y las capas fully-connected son dos elementos esenciales y distintos en las arquitecturas de redes neuronales, cada una de ellas con características y aplicaciones únicas.

Las capas convolucionales se enfocan en aprender patrones locales. En el análisis de imágenes, esto se traduce en identificar patrones dentro de pequeñas ventanas 2D de las entradas. Por ejemplo, en el estudio de imágenes, estas ventanas podrían tener dimensiones de 3×3 píxeles. Este enfoque permite que las capas convolucionales detecten detalles finos y específicos, como bordes y texturas, dentro de porciones limitadas de la imagen tal y como se observa en la **Figura 2-123** [67].

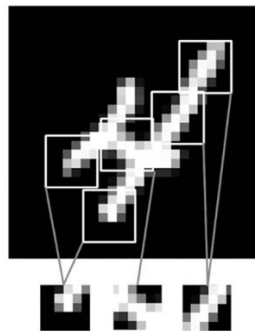


Figura 2-123: Las imágenes pueden dividirse en patrones locales, como bordes, texturas, etc.[67]

Esto las hace especialmente adecuadas para tareas como el reconocimiento de patrones en imágenes, donde es crucial identificar y aprender características visuales en diferentes partes de la imagen.

Las capas Fully-connected se caracterizan por tener conexiones neuronales que vinculan cada entrada con cada salida y son conocidas por su capacidad de aprender patrones globales en los datos. En términos de aplicaciones, son ampliamente utilizadas en tareas que requieren una interpretación holística de los datos, como la clasificación de imágenes donde es importante considerar la imagen en su totalidad. En el contexto del reconocimiento de dígitos, como en el caso del conjunto de datos MNIST, esto implica aprender patrones que involucran todos los píxeles de la imagen.

Capítulo 2: Materiales y métodos

La principal diferencia en el aprendizaje entre estas dos capas radica en su enfoque: mientras las capas densamente conectadas interpretan los datos en su conjunto, las capas convolucionales se centran en los detalles locales. Esta diversidad en el enfoque de aprendizaje hace que estas capas sean complementarias en muchas arquitecturas de redes neuronales, permitiendo una comprensión más profunda y detallada de los datos procesados.

Las capas convolucionales presentan dos propiedades interesantes que las diferencia respecto a las fully-connected:

- Las capas convolucionales, una vez que la red ha aprendido un patrón específico en una parte de la imagen, puede reconocerlo en cualquier otra parte de otra imagen. Sin embargo, un modelo densamente conectado o fully-connected tendría que aprender de nuevo el patrón si aparece en una nueva ubicación. Esta propiedad hace que las redes convolucionales sean eficientes en el procesamiento de imágenes, ya que necesitan menos muestras de entrenamiento para aprender representaciones con las que se pueda generalizar [67].
- Las capas convolucionales pueden aprender jerarquías espaciales de patrones. Una primera capa convolucional aprenderá patrones pequeños y locales, como bordes. Una segunda capa convolucional aprenderá patrones más grandes, compuestos por las características de las primeras capas, y así sucesivamente tal y como se muestra en la **Figura 2-124**. Esto permite que las redes convolucionales aprendan conceptos visuales cada vez más complejos y abstractos de manera eficiente, dado que el mundo visual es fundamentalmente jerárquico en términos espaciales [67].

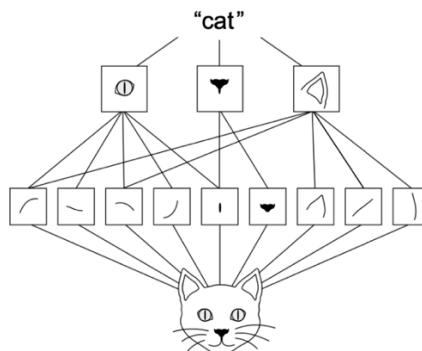


Figura 2-124: Organización jerárquicamente de diferentes elementos y su combinación para formar partes de objeto [67]

2.8.4.1.1 Capa de convolución

La principal función de la capa de convolución es la extracción eficiente de características de las imágenes. Este proceso se realiza mediante la creación de un mapa de características, que resalta aspectos únicos y distintivos de la imagen original. Este mapa es el resultado de la aplicación de operaciones matemáticas específicas, que transforman la imagen de entrada en una representación más manejable y significativa para el algoritmo [85].

Las dos operaciones fundamentales llevadas a cabo en esta capa son [86]:

- La convolución.
- La función de activación no lineal.

A continuación, se explica cada una de ellas:

a) La convolución: Es una operación lineal que involucra el cálculo de un producto escalar entre dos matrices. Una de estas matrices es la imagen de entrada o de partida y la otra es un kernel o filtro. Tal y como se indica en el ejemplo de la **Figura 2-125**, el mapa de características se origina aplicando un kernel o filtro al tensor de entrada.

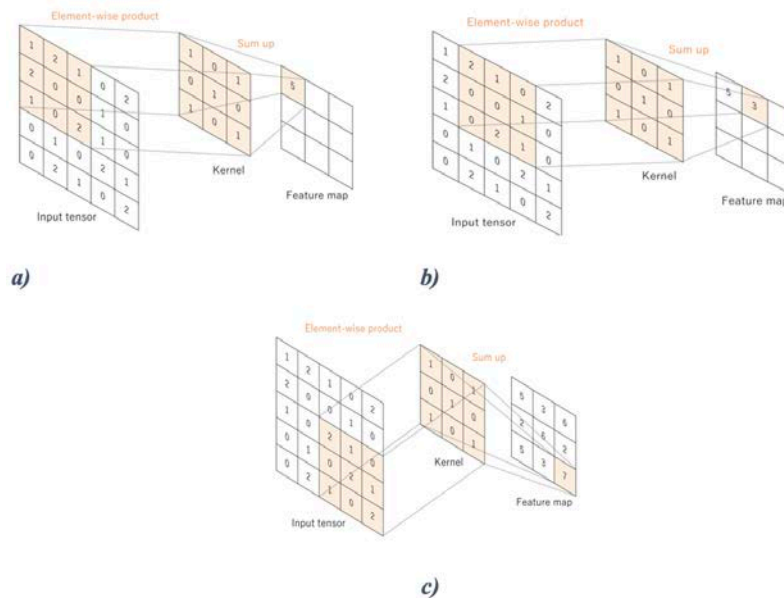


Figura 2-125: Ejemplo de convolución con un kernel de 3×3 y con un paso de 1 [87]

A continuación, se realiza un producto elemento a elemento entre cada elemento del tensor de entrada y el kernel en cada posición. Estas multiplicaciones se suman, dando como resultado un único número que forma parte de una nueva matriz,

conocida como capa convolucionada o mapa de características. El filtro se desplaza a lo largo de toda la imagen, aplicando la convolución en cada paso.

Este filtro suele ser una matriz pequeña, por ejemplo, una de 3×3 elementos como en los ejemplos de la **Figura 2-125** y **Figura 2-126**, que se superpone sobre un tensor 2D representativo de una imagen tal y como se muestra en la **Figura 2-125**. En el caso de una imagen en escala de grises de 7×7 , el proceso de convolución se inicia con la colocación del filtro sobre una parte específica de la imagen tal y como se muestra en la **Figura 2-126** [88].

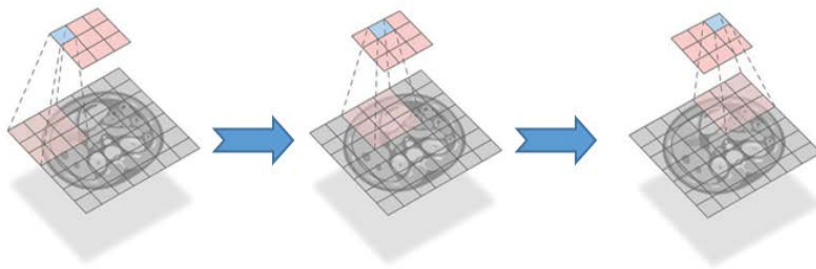


Figura 2-126: Ilustración de cómo funciona el filtro o kernel en cada zona de la imagen [86]

Tal y como indica la **Figura 2-125**, la capa convolucionada obtenida para el ejemplo aplicado es de menor dimensión (3×3) que la imagen original (5×5), y representa el resultado de aplicar el filtro (3×3) a la imagen original. El resultado de este proceso es una imagen transformada donde cada elemento refleja las características extraídas por el filtro. Es importante destacar que diferentes filtros pueden extraer distintas características, como bordes, texturas o patrones específicos. Esta capacidad de las CNN para identificar y extraer características relevantes de las imágenes es fundamental para tareas como la clasificación de imágenes, la detección de objetos y muchas otras aplicaciones en el campo de la visión por computadora [89].

Un aspecto destacado de la capa de convolución es su manejo de la dimensionalidad. Las imágenes son tratadas como matrices tridimensionales, con dimensiones correspondientes a altura, anchura y profundidad (**Figura 2-127**).

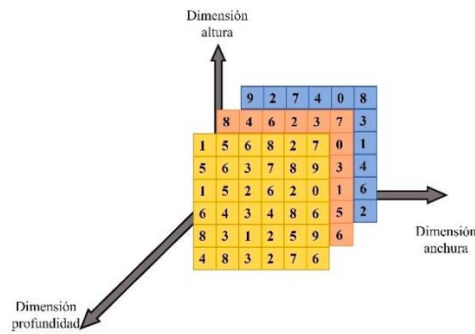


Figura 2-127: Dimensiones de una matriz [71]

Las convoluciones 3D son una extensión de las convoluciones 2D comúnmente utilizadas en el procesamiento de imágenes. En este tipo de convolución, el filtro empleado es un cuboide que se desplaza a través de tres dimensiones: alto, ancho y profundidad (**Figura 2-128**). Este enfoque permite procesar datos tridimensionales, como imágenes o modelos 3D de una manera más eficiente y detallada. Cuando se habla de convoluciones ND, se refieren a convoluciones que se aplican en un espacio de N dimensiones. Este concepto generaliza la idea de convolución más allá de las tres dimensiones habituales, permitiendo el procesamiento de datos en espacios de dimensiones superior.

Las imágenes en color se representan comúnmente mediante tres canales o planos que corresponden a los colores rojo (R), verde (G) y azul (B). Cuando se combinan, estos planos permiten representar una amplia gama de colores. Para procesar adecuadamente estas imágenes en una red neuronal, los filtros aplicados también deben contar con tres planos [90]. El núcleo tridimensional (3D) se aplica a imágenes RGB con el fin de extraer información detallada de cada uno de sus canales de color. Este proceso involucra el uso de un cubo formado por celdas de $3 \times 3 \times 3$, como se muestra en las **Figura 2-128** y **Figura 2-129**, que interactúa con la imagen procesando cada canal de color de forma independiente: rojo, verde y azul. Durante este procesamiento, se realizan multiplicaciones entre los píxeles correspondientes de la imagen y las celdas del filtro, tal como se ilustra en la **Figura 2-125**.

La técnica de convolución 3D se destaca por su capacidad para manejar de forma eficiente las complejidades de las imágenes en color, lo que proporciona resultados más detallados y precisos que las técnicas tradicionales de procesamiento de imágenes.

Capítulo 2: Materiales y métodos

Tal y como se muestra en el ejemplo de la **Figura 2-128** se parte de una matriz de entrada con dimensiones 6x6x3, donde cada dimensión corresponde a la altura, el ancho y la profundidad, respectivamente. Sobre esta matriz se aplica un filtro cúbico de 3x3x3, que cubre una porción de la matriz de entrada. La operación de convolución consiste en mover el filtro sobre la imagen de entrada y realizar productos escalares entre el filtro y las submatrices de la imagen de entrada, agregando después los resultados para obtener un único valor en la matriz de salida.

Inicialmente, se sitúa el filtro en la esquina superior izquierda de la matriz de entrada (**Figura 2-128**). En cada posición del filtro, se hace el producto escalar entre los elementos del filtro y los elementos correspondientes de la submatriz de entrada que el filtro abarca. Se suman estos productos para obtener un valor único. Se mueve el filtro a la siguiente posición (por ejemplo, un paso hacia la derecha si el stride es 1 y se repite el proceso hasta que el filtro haya cubierto toda la imagen de entrada.

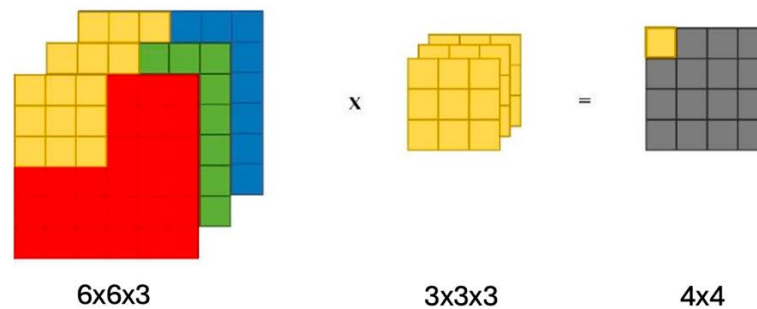


Figura 2-128: Ejemplo de convolución 3D y un filtro 3x3 [91]

Cuando se aplica el filtro a toda la imagen de entrada, se obtiene una matriz de salida. La imagen de entrada tiene dimensiones 6x6x3 y el filtro tiene dimensiones 3x3x3, por lo que la salida tendrá dimensiones 4x4x1, asumiendo un stride de 1 y sin padding. Cada valor en la matriz de salida corresponde a aplicar el filtro a una submatriz distinta de la imagen de entrada.

El cálculo de las dimensiones de la matriz de salida se puede generalizar mediante la siguiente **Ecuación 2-24**:

$$\text{Dimensión de salida} = \left(\frac{(n+2p-f)}{s} + 1 \right) \quad \text{Ecuación 2-24}$$

Donde:

- **n**= dimensión de la entrada.

Capítulo 2: Materiales y métodos

- f =tamaño del filtro.
- s =stride.
- p =padding.

Aplicando esta fórmula al ejemplo de la **Figura 2-128**, la dimensión de salida sería:

$$\text{Dimensión de salida} = \left(\frac{(6+0-3)}{1} + 1 \right) = 4$$

Por tanto, la matriz de salida sería una matriz de $4 \times 4 \times 1$.

En una red neuronal convolucional (CNN), se pueden usar dos filtros para procesar la imagen de entrada. Cada filtro opera de forma independiente y crea su propio mapa de características **Figura 2-129**. La salida de la capa convolucional será una combinación de los mapas de características creados por ambos filtros.

En el caso de usar dos filtros en lugar de tener una salida de $4 \times 4 \times 1$ como en el ejemplo anterior, se tendría una salida de $4 \times 4 \times 2$ tal y como se muestra en la **Figura 2-129**.

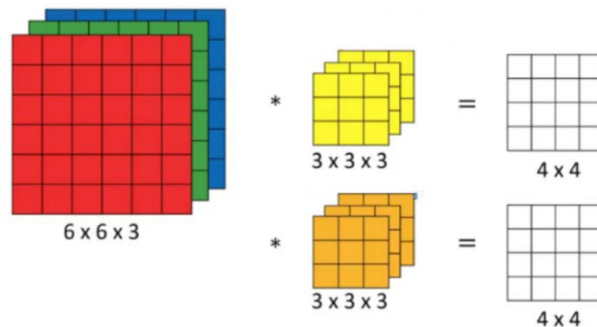


Figura 2-129: Ejemplo de convolución 3D con dos filtros 3×3 [91]

Un efecto secundario del proceso de convolución es la reducción del tamaño de la matriz original, lo que conlleva una pérdida potencial de información importante. Para mitigar la pérdida de información durante la convolución, se emplea una técnica conocida como zero-padding. Este proceso consiste en añadir una capa de ceros alrededor de la matriz original antes de aplicar el filtro (**Figura 2-130**). De esta manera, se preserva el tamaño original de la matriz, evitando así la pérdida de información en los bordes durante el proceso de convolución. Esto es particularmente importante en las arquitecturas de redes neuronales profundas, donde múltiples capas convolucionales pueden reducir significativamente el tamaño de la imagen si no se utiliza zero padding.

0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	5	6	8	2	7	0
0	5	6	3	7	8	9	0
0	1	5	2	6	2	0	0
0	6	4	3	4	8	6	0
0	8	3	1	2	5	9	0
0	4	8	3	2	7	6	0
0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 2-130: Técnica zero-padding

El zero-padding no solo ayuda a mantener la integridad de la información en la matriz original, sino que también asegura que la información relevante se posicione de manera más efectiva. Al rellenar la matriz con ceros, se permite que el filtro recorra de manera más uniforme toda la imagen, incluyendo sus bordes y esquinas (**Figura 2-131**). Esto es crucial para el aprendizaje uniforme de características a lo largo de toda la imagen, ya que sin zero padding, los píxeles de los bordes tendrían una menor participación en el proceso de convolución [90].

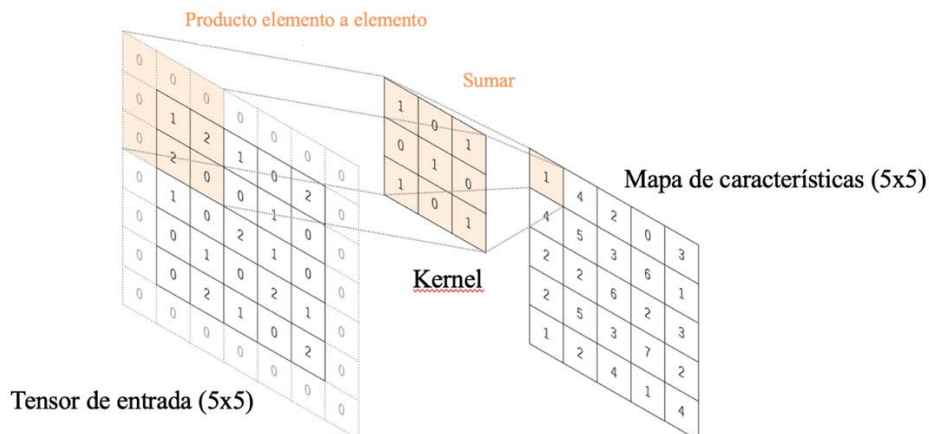


Figura 2-131: Aplicación de la técnica zero-padding para evitar la pérdida de información [87]

En arquitecturas de redes neuronales profundas, el zero padding es crucial para mantener una jerarquía coherente de características a medida que la información se propaga a través de las capas. Facilita la construcción de redes más profundas sin la pérdida significativa de información espacial, lo cual es vital para el rendimiento general del modelo.

Una ventaja adicional del zero-padding es que promueve la centralización de la información relevante en la matriz. Al añadir ceros en los bordes, se garantiza que el kernel pase más veces por el centro de la matriz, donde generalmente se

concentran los detalles más importantes de la imagen. Esto es crucial para el análisis y procesamiento eficiente de imágenes en aplicaciones como la visión por computadora y el reconocimiento de patrones [90].

b) La función de activación no lineal: Esta función sigue a la convolución y es crucial para introducir la no linealidad en el proceso, lo que permite al algoritmo aprender y modelar relaciones más complejas. Estas capas, aunque técnicamente no se consideran "capas" en el sentido estricto debido a la ausencia de parámetros o pesos aprendidos, juegan un rol crucial en la eficiencia y efectividad del aprendizaje automático. Funciones de activación, como ReLU, y otras explicadas anteriormente, son aplicadas tras cada capa convolucional (CONV) en una CNN. En los diagramas de red, estas capas de activación suelen representarse con la sigla RELU, dada la popularidad de esta función de activación. Sin embargo, también es común encontrar la abreviatura ACT, que generaliza el concepto de una función de activación dentro de la arquitectura de la red. Esta representación esquemática facilita la comprensión y el análisis de las estructuras de red [92].



Figura 2-132: Diagrama de red compuesto por la capa de entrada (INPUT), la capa convolucional (CONV), capa de activación (ACT) y la capa Fully connected (FC)

Es importante señalar que las capas de activación a veces se excluyen en los diagramas de arquitectura de red debido a su naturaleza implícita, pero su importancia no debe subestimarse. La función de activación que sigue a una convolución es fundamental para determinar el comportamiento y la capacidad de la red neuronal para detectar patrones y llevar a cabo tareas de clasificación con gran precisión.

2.8.4.1.2 Capa de agrupación o pooling

La capa de agrupación, conocida también como pooling layer en inglés, es una técnica utilizada dentro de las redes neuronales, especialmente en las Redes Neuronales Convolucionales para reducir las dimensiones espaciales de los mapas de características. Esto se traduce en una disminución del número de parámetros a procesar, lo que a su vez implica una menor carga computacional y un riesgo reducido de sobreajuste.

El proceso de agrupación consiste en combinar los píxeles vecinos dentro de un área definida, utilizando para ello una matriz cuadrada. Esta operación se realiza a lo largo de

Capítulo 2: Materiales y métodos

todo el mapa de características, resultando en una matriz de menor tamaño pero que conserva las propiedades esenciales del mapa original. Una de las grandes ventajas de la capa de agrupación es que hace al sistema más resistente a pequeñas variaciones en la posición de las imágenes [93]. Esto significa que, incluso si una imagen se modifica ligeramente, la red neuronal aún será capaz de reconocerla y procesarla eficientemente.

Las capas de agrupación suelen insertarse entre capas convolucionales (CONV) consecutivas en la arquitectura de una CNN, siguiendo un patrón común (**Figura 2-133**).



Figura 2-133: Arquitectura de una CNN introduciendo capa de agrupación

Los acrónimos de la **Figura 2-133** tienen el siguiente significado:

- **INPUT**= Capa de entrada.
- **CONV**= Capa convolucional.
- **RELU**= Capa de la función de activación: RELU.
- **POOL**= Capa de agrupación.
- **FC**= Capa fully connected.

Las capas de pooling (agrupación) operan de manera independiente en cada una de las secciones de profundidad del volumen de entrada en las redes neuronales convolucionales (CNN). Estas capas permiten reducir la dimensionalidad del mapa de características, preservando las características más relevantes. Los métodos de pooling más comunes son los siguientes [92]:

- **Max-pooling:** El Max-Pooling es una técnica frecuentemente utilizada en las CNN que se encarga de conservar únicamente el valor máximo dentro de cada región predefinida del mapa de características. Este enfoque es crucial para resaltar y preservar las características más importantes de la entrada, lo que contribuye a una mayor eficiencia del modelo.

Para una región R_i de tamaño $k \times k$ de una imagen $I(x,y)$ de tamaño $N \times N$, el valor máximo viene definido por:

$$Y = \max\{R_i\}_{i \in [k \times k]} \quad \text{Ecuación 2-25}$$

donde $R_i \in I(x,y) \forall \{x,y\} \in \{1 \dots N\}$

Capítulo 2: Materiales y métodos

El tamaño del filtro (o kernel) utilizado en el Max-Pooling, como 2×2 o 3×3 , debe definirse previamente. Este filtro se desplaza sobre el mapa de características de la imagen para extraer los valores máximos de las subregiones. El tamaño de pooling más común en las redes neuronales es 2×2 , que resulta adecuado para la mayoría de las imágenes. Sin embargo, en el caso de imágenes grandes (mayores a 200 píxeles), se recomienda utilizar un tamaño de pooling de 3×3 para manejar mejor la complejidad de los datos.

Además, es esencial definir el desplazamiento o stride, que determina el número de píxeles por los que el filtro se mueve en cada paso. Los valores de stride más comunes son 1 o 2 píxeles ($S=1$ o $S=2$, respectivamente), como se ilustra en la **Figura 2-134** [92].

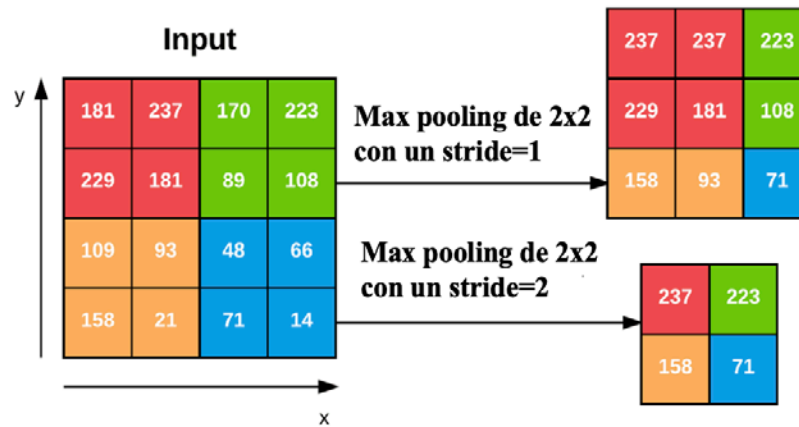


Figura 2-134: Resultado de aplicar un Max pooling de 2x2 con un stride=1 y con stride=2

A continuación, en la **Figura 2-135** se muestran tres ejemplos de la operación Max-pooling. Obsérvese que las imágenes tienen un factor de reducción de 2 pasando de 26×26 a 13×13 después de la operación de pooling.

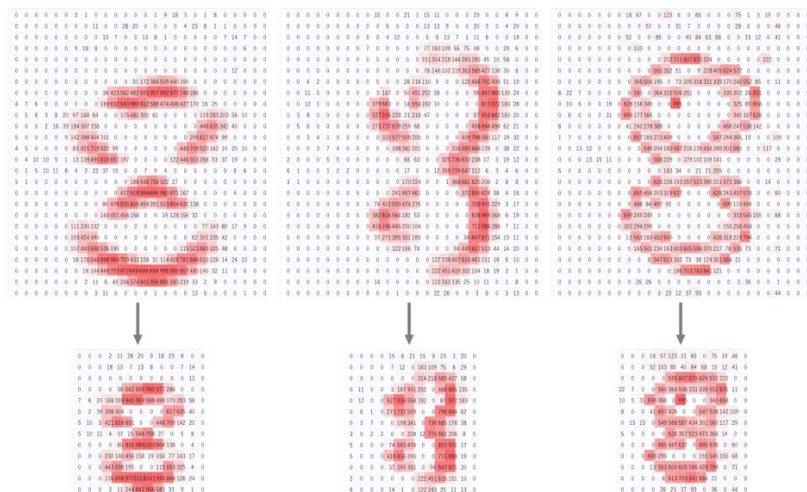


Figura 2-135: Ejemplo de Max pooling a imágenes [87]

- **Average pooling:** El Average-Pooling es un método que transforma el mapa de características en una matriz más pequeña al calcular el valor promedio de los elementos en una subregión definida. Este método es especialmente útil para reducir el tamaño del mapa de características sin perder la profundidad de los datos [94].

Para los elementos j de una región R_i de tamaño $k \times k$, perteneciente a una imagen $I(x,y)$ de tamaño $N \times N$, el valor promedio se calcula como:

$$Y = \frac{1}{k \times k} \sum_{j \in R_i} j \quad \text{Ecuación 2-26}$$

Donde $R_i \in I(x,y) \forall \{x,y\} \in \{1 \dots N\}$

El Average-Pooling se emplea normalmente como la última capa de la red, donde se busca evitar el uso de capas completamente conectadas. Una de las principales ventajas del Average Pooling es su capacidad para reducir significativamente el número de parámetros en una red neuronal. Al convertir un mapa de características grande en una matriz pequeña de 1×1 , se permite una simplificación considerable de la red, lo que resulta en un modelo más ligero y rápido.

Otro aspecto crucial del Average Pooling es su habilidad para manejar entradas de tamaño variable [87]. Esta característica lo hace particularmente útil en aplicaciones donde el tamaño de las imágenes o datos de entrada puede variar considerablemente. Al utilizar el Average Pooling, las redes neuronales pueden adaptarse de manera más eficiente a diferentes tamaños de entrada sin la necesidad de redimensionar o alterar los datos originales.

Tradicionalmente, el Average Pooling se aplica antes de las capas totalmente conectadas (fully-connected layers) en la arquitectura de una red neuronal. Esta colocación es estratégica, ya que prepara el mapa de características para una integración más efectiva en las capas siguientes, facilitando el proceso de aprendizaje y decisión de la red [87].

En la **Figura 2-136**, se muestra un ejemplo donde, utilizando un filtro (kernel) de 2×2 , un paso (stride) de 2, se aplica tanto Max-pooling como Average-pooling para obtener un mapa de características reducido proporcionalmente al tamaño de la ventana de muestreo.

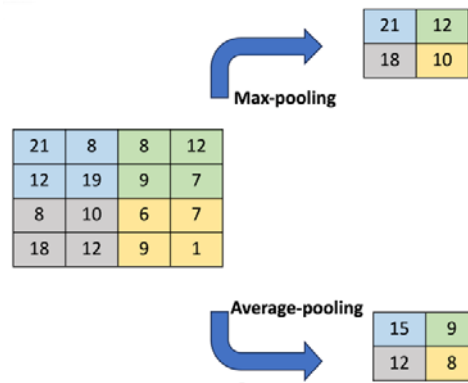


Figura 2-136: Ejemplo de operación de max-pooling y average-pooling en una matriz R

2.8.4.1.3 Capa fully-connected

En las arquitecturas de Redes Neuronales Convolucionales, se observa una disposición estándar donde las capas iniciales consisten en secuencias repetitivas de convolución y pooling (**Figura 2-137**), diseñadas para la extracción eficaz de características locales en imágenes, como bordes y texturas. Estas capas iniciales, especializadas en detectar patrones visuales elementales, preparan el terreno para etapas de procesamiento más complejas. En las etapas finales en la arquitectura de una CNN están las capas fully-connected (completamente conectadas), que desempeñan un papel fundamental en la interpretación de las características extraídas durante el proceso de convolución y pooling.

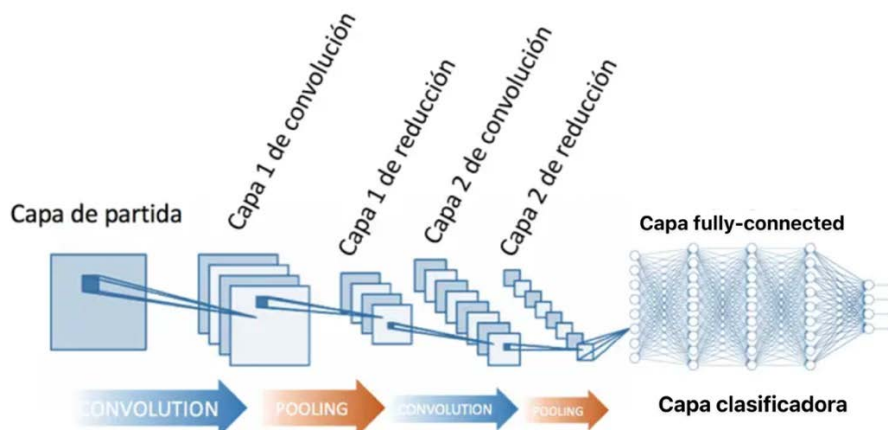


Figura 2-137: Estructura de una CNN incluyendo la capa fully-connected [88]

Las capas fully-connected reciben su nombre debido a que cada una de sus neuronas está conectada a todas las activaciones de la capa anterior tal y como se muestra en la **Figura 2-137** [88]. Esto permite que la red pueda combinar las características aprendidas en las etapas anteriores para formular una predicción o clasificación. Es decir, mientras las primeras capas se enfocan en detectar bordes, texturas y otros aspectos básicos de una imagen, las capas fully-connected sintetizan esta información para asignarla a una

Capítulo 2: Materiales y métodos

categoría específica. Un ejemplo ilustrativo de la función de estas capas es el reconocimiento de imágenes.

Después de que una imagen ha sido procesada por las capas de convolución y pooling la **Figura 2-137**, las capas fully-connected asumen la tarea de clasificar la imagen en la categoría adecuada. Estas capas actúan como un clasificador que decide, basándose en las características identificadas, si una imagen pertenece, por ejemplo, a la categoría de: gatos, perros o pájaro o como en el presente trabajo: Aceite conforme o aceite no conforme.

Las capas fully-connected están diseñadas para integrar las características aprendidas y preparar la información para la capa de salida. En una red con tres categorías de salida, la capa de salida final tendría tres neuronas, cada una representando una de las posibles categorías (Ciudad, Bosque o Costa). De esta forma, la red puede emitir una predicción concreta sobre la categoría a la que pertenece una nueva imagen analizada, tal como se muestra en la **Figura 2-138** [95], donde las tres salidas se encuentran al final del diagrama.

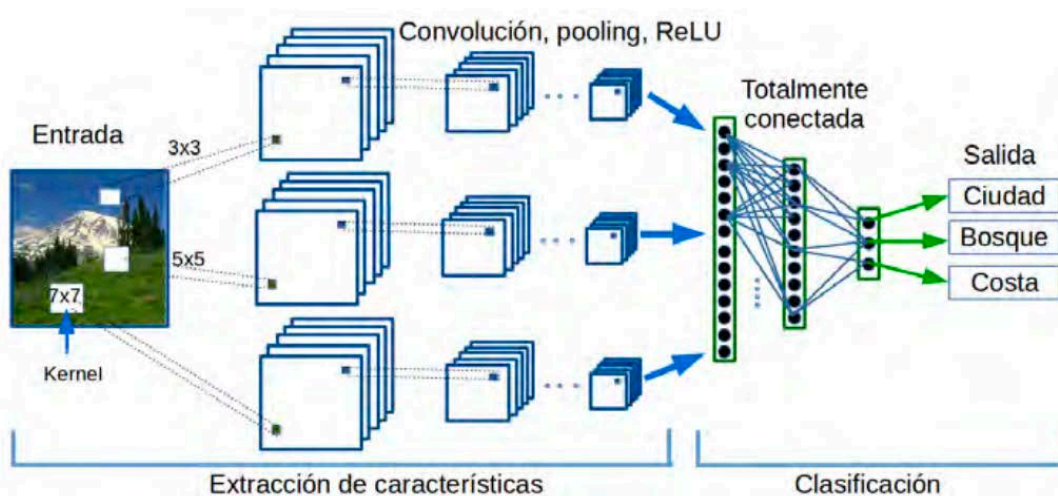


Figura 2-138: CNN en donde las capas fully-connected determinan la categoría a la que pertenece la imagen [96]

Las capas fully-connected en redes neuronales suelen ir acompañadas de funciones de activación no lineales, que juegan un papel crucial al permitir que la red maneje la complejidad y la no linealidad de los datos reales. Es importante destacar que la función de activación en la última capa totalmente conectada puede diferir de las que se usan en las capas intermedias, dependiendo de la tarea específica a resolver.

Por ejemplo:

- En clasificación binaria, la capa de salida generalmente utiliza una función de activación sigmoide, que transforma la salida en un valor entre 0 y 1, facilitando su interpretación como la probabilidad de pertenecer a una clase u otra [86,87].
- En clasificación multiclase con una sola clase por muestra, se usa la función softmax, que normaliza los valores de salida a probabilidades que suman 1, asignando una probabilidad a cada clase.
- Para la clasificación multiclase con múltiples clases por muestra (también conocido como multi-etiqueta), también se aplica la función sigmoide en cada neurona de salida, ya que permite asignar probabilidades independientes para cada clase.
- En tareas de regresión a valores continuos, la función de activación utilizada es la identidad, es decir, no se aplica ninguna transformación no lineal, lo que permite que la red produzca cualquier valor real necesario.

La elección de estas funciones de activación es fundamental para que la red afine sus predicciones y clasificaciones con gran precisión. La **Tabla 2-24** resume las funciones de activación más usadas en la última capa para diferentes tipos de tareas.

Tabla 2-24: *Funciones de activación utilizadas en la última capa dependiendo de la tarea*

Tarea	Función de activación de la última capa
Clasificación binaria	Sigmoide
Clasificación multiclase con una sola clase por muestra	Softmax
Clasificación multiclase multi-etiqueta	Sigmoide
Regresión a valores continuos	Identidad

2.8.4.2 Parámetros entrenables en una red neuronal convolucional (CNN)

El cálculo y la optimización de los parámetros entrenables son fundamentales para el entrenamiento de una red neuronal convolucional (CNN). Los parámetros entrenables incluyen los pesos y los sesgos, que se ajustan durante el proceso de aprendizaje para mejorar el rendimiento y la capacidad de generalización del modelo [97].

En las redes neuronales artificiales (ANN), el cálculo de los parámetros entrenables se realiza mediante la multiplicación del número de entradas (inputs) y salidas (outputs), más el sesgo correspondiente. Esto se expresa en **Ecuación 2-27**:

Capítulo 2: Materiales y métodos

$$\text{Parámetros entrenables} = \text{inputs} \times \text{outputs} + \text{biases} \quad \text{Ecuación 2-27}$$

Este enfoque es aplicable a las capas fully-connected en las CNN, donde cada neurona está conectada a todas las neuronas de la capa anterior. Por ejemplo, en una capa fully-connected con 128 entradas y 64 neuronas de salida, el número total de parámetros entrenables se calcula como:

$$128 \times 64 + 64 = 8256 \text{ parámetros}$$

Sin embargo, en las redes neuronales convolucionales (CNN), el cálculo de los parámetros entrenables requiere un enfoque diferente debido a su arquitectura, la cual incluye capas convolucionales y capas de pooling diseñadas específicamente para procesar datos estructurados en cuadrículas, como imágenes o vídeos [98].

En las capas convolucionales, los kernels o filtros son los principales parámetros entrenables. El cálculo del número de parámetros entrenables en una capa convolucional depende del tamaño del filtro, el número de canales de entrada y el número de filtros. Además, cada filtro tiene un sesgo asociado. La fórmula para calcular los parámetros entrenables en una capa convolucional es la siguiente:

$$\text{Parámetros entrenables} = (\text{Tamaño del filtro} \times \text{Tamaño del filtro} \times \text{Canales de entrada}) \times \text{Número de filtros} + \text{Número de filtros} \quad \text{Ecuación 2-28}$$

Por ejemplo, si una capa convolucional tiene 32 filtros de tamaño 3×3 y se aplica a una imagen con 3 canales de entrada (como una imagen RGB), el número total de parámetros entrenables sería:

$$(3 \times 3 \times 3) \times 32 + 32 = 896 \text{ parámetros}$$

El correcto cálculo de estos parámetros es fundamental para el desarrollo y la optimización de modelos de aprendizaje automático. Un cálculo preciso asegura una mejor eficiencia y eficacia en el entrenamiento de las redes, lo cual se traduce en modelos más precisos y capaces de realizar tareas complejas de procesamiento de datos.

A diferencia de otras capas en las CNN, las capas de agrupación (pooling) tienen la particularidad de no contar con parámetros entrenables [97]. Esto significa que, durante el proceso de aprendizaje y ajuste de la red, estas capas no modifican su comportamiento en función de los datos de entrada. Su función se centra en consolidar la información presente en los mapas de características, seleccionando un valor representativo de una región específica.

Capítulo 2: Materiales y métodos

El proceso de entrenamiento de la capa de convolución de un modelo CNN consiste en identificar los kernels que mejor funcionan para una tarea específica a partir de un conjunto de datos de entrenamiento. Los únicos parámetros que se aprenden automáticamente durante el proceso de entrenamiento en la capa de convolución son los kernels. Sin embargo, el tamaño de los kernels, el número de kernels, el padding y el stride son hiperparámetros que deben establecerse antes del inicio del proceso de entrenamiento [87].

Es importante diferenciar entre parámetros entrenables e hiperparámetros. Mientras que los primeros se ajustan automáticamente durante el proceso de entrenamiento mediante algoritmos de optimización, como el descenso de gradiente, los hiperparámetros son definidos antes del entrenamiento y controlan aspectos clave de la arquitectura del modelo, como el tamaño del kernel, el número de filtros, el stride, el padding, la tasa de aprendizaje y la función de activación.

La **Tabla 2-25** resume los parámetros e hiperparámetros más comunes utilizados en las diferentes capas de una CNN [87].

Tabla 2-25: *Parámetros e hiperparámetros para una CNN* [87]

Capa	Parámetros	Hiperparámetros
Capa de convolución	Kernels	Tamaño del kernel (núcleo), número de kernels (núcleos), stride, padding, función de activación.
Capa de agrupamiento	Ninguno	Método de pooling (agrupamiento), tamaño del filtro, stride, padding.
Capa completamente conectada	Pesos	Número de pesos, función de activación.
Otros	---	Arquitectura del modelo, optimizador, tasa de aprendizaje, función de pérdida, tamaño de mini-lote, épocas, regularización, inicialización de pesos, división del conjunto de datos.

El cálculo adecuado de los parámetros entrenables es fundamental para garantizar un entrenamiento eficiente en las redes neuronales convolucionales y mejorar su capacidad para realizar tareas complejas de clasificación y procesamiento de datos. La correcta

optimización de estos parámetros contribuye significativamente a la precisión del modelo y su capacidad para generalizar con nuevos datos.

2.8.4.3 Redes residuales (ResNets)

Un avance significativo en el campo de la inteligencia artificial, específicamente en visión por computadora, fue la introducción de las Redes Residuales (ResNet) por Microsoft en 2015. Este desarrollo marcó un hito en la mejora de la precisión y eficiencia de los modelos de aprendizaje profundo, estableciendo nuevos estándares en tareas como la clasificación y detección de objetos.

Las redes residuales son una innovación importante dentro del uso de Redes Neuronales Convolucionales (CNN) para la clasificación de imágenes. Su baja tasa de error revolucionó la manera de abordar problemas de procesamiento y clasificación de imágenes. Una de las características más distintivas de ResNet es su gran profundidad, llegando en algunos modelos hasta 152 capas, lo que representaba un avance significativo en ese momento. Anteriormente, las redes neuronales más profundas enfrentaban dificultades, lo que afectaba su aprendizaje y eficiencia. Se creía que una mayor profundidad conllevaba un mejor rendimiento, pero esto no siempre era cierto debido a varios problemas que surgían en redes profundas:

- **Desvanecimiento del gradiente (vanishing gradient):** En redes profundas, el gradiente necesario para actualizar los pesos se vuelve demasiado pequeño, lo que dificulta la actualización de los parámetros y, por tanto, interrumpe el entrenamiento [67].
- **“Maldición de la dimensionalidad” (curse of dimensionality):** Este problema se presenta en situaciones con múltiples clasificaciones y datos insuficientes por clasificación. En tales casos, las características irrelevantes de los datos predominan, dificultando la clasificación efectiva [74].
- **Disminución de la precisión:** A medida que aumenta el número de capas, se incrementa también el número de parámetros entrenables, lo que complica la optimización de la red y puede llevar a una disminución en la precisión [71].

Uno de los principales problemas en el entrenamiento de redes neuronales profundas es la pérdida o degradación de la información a medida que se propaga a través de las capas de la red. Este fenómeno, conocido como destrucción de información, ocurre

Capítulo 2: Materiales y métodos

cuando las funciones en la cadena de procesamiento no conservan una versión intacta de la información recibida. Este desafío se agrava en redes con muchas capas, donde el gradiente del error puede desvanecerse o distorsionarse significativamente.

La implementación de conexiones residuales surge como solución a este problema como se indica en la **Figura 2-139** [67]. Estas conexiones funcionan añadiendo la entrada de una capa o bloque de capas de nuevo a su salida [99]. De esta manera, se crea un atajo de información que permite que los datos fluyan de forma más directa y sin alteraciones a través de la red. Este enfoque asegura que la información esencial no se pierda o degrade, incluso en redes con numerosas capas [67]. De este modo, al añadir la entrada original a la salida de la capa, se consigue que la salida final siempre conservará toda la información sobre la entrada original.

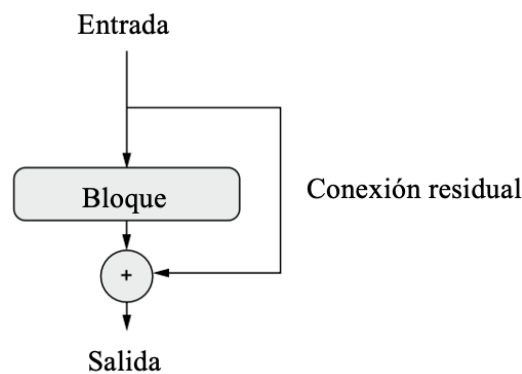


Figura 2-139: Conexión residual de un bloque de procesamiento [67]

Estos bloques consisten en patrones de dos capas convolucionales seguidas de una función de activación ReLU. La salida de cada bloque se combina con su entrada, permitiendo “saltar” capas a través de lo que se conoce como conexiones de acceso directo [99].

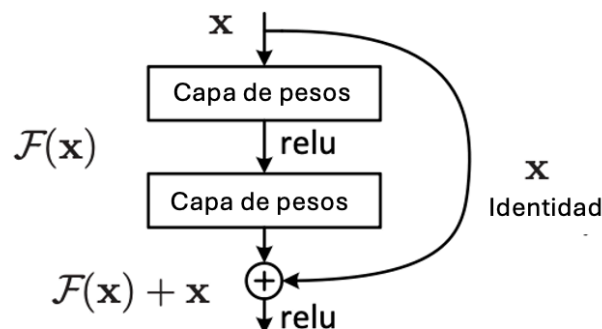


Figura 2-140: Bloque residual [99]

Con la integración de los bloques residuales en las redes neuronales se resuelven varios de los problemas críticos que previamente limitaban su eficacia. Uno de ellos es el

Capítulo 2: Materiales y métodos

desvanecimiento del gradiente, un fenómeno que ocurre durante el entrenamiento de redes profundas. Las conexiones de acceso directo permiten que el gradiente se propague de manera más eficaz a través de las capas, evitando que se "pierda" o disminuya su intensidad. Esto facilita la actualización de los pesos de la red y, por tanto, la mejora del proceso de aprendizaje.

Otra ventaja de los bloques residuales es la flexibilidad en los métodos de entrenamiento. Es posible entrenar las redes de dos maneras: utilizando las conexiones de acceso directo o pasando secuencialmente por todas las capas. Estas dos vías en el entrenamiento no solo mejoran la eficiencia, sino que también reduce la cantidad de datos considerados irrelevantes. En consecuencia, se facilita la clasificación en categorías más numerosas, evitando de este modo la “Maldición de la dimensionalidad” comentado anteriormente.

Por otro lado, las conexiones de acceso directo en los bloques residuales permiten la simplificación de las redes neuronales. Al reducir el número de capas necesarias sin comprometer la precisión, estas conexiones facilitan la creación de modelos más eficientes y menos costosos en términos de recursos computacionales.

Una característica propia de las ResNet es su variabilidad en términos de profundidad. Estas redes pueden tener desde 18 ó 34 capas, consideradas más simples, hasta configuraciones más complejas con 50, 101, o incluso 152 capas. Esta flexibilidad en la profundidad permite adaptar la red a diferentes necesidades y complejidades de procesamiento de datos. Al incrementar el número de capas en una ResNet, se observa un aumento correspondiente en el número de FLOPS (del inglés *Floating point of operations per second*) [99]. Los FLOPS, una medida de los cálculos matemáticos que una CPU (Unidad Central de Procesamiento) o una GPU (Unidad de Procesamiento Gráfico) puede realizar por segundo, son cruciales para evaluar la eficiencia y capacidad de procesamiento de una red. En el caso de las ResNet, a mayor profundidad, mayor es el número de cálculos necesarios, tanto para la optimización del modelo como para su validación.

La arquitectura de una ResNet está diseñada para maximizar la eficiencia y efectividad en el procesamiento de datos. La estructura típica incluye cinco capas de convolución, seguidas de dos capas de agrupación: la primera de ellas utiliza “max pooling” y la segunda, “average global pooling”. A estas capas se suma una capa final

Capítulo 2: Materiales y métodos

“fully-connected”. La variación entre las distintas ResNet se encuentra en el número de filtros de convolución en cada capa, así como en el tamaño de estos filtros y el número de FLOPS asociado a cada configuración. A continuación, se muestra un resumen de las estructuras de los cinco tipos de ResNet más comunes, con su número de filtros empleados y el tamaño de los mismo según se indica en la **Tabla 2-26**.

Tabla 2-26: Resumen de las estructuras de los cinco tipos de ResNet más comunes

Nombre de la capa	Tamaño de la salida	Tamaño de capa (Tamaño del filtro, Número de filtros) x Número de veces que se repite				
		ResNet18	ResNet34	ResNet50	ResNet101	ResNet152
Convolución 1	112x112	7x7, 64				
Agrupación 1	56x56	Max pooling, 3x3, stride 2				
Convolución 2	56x56	$\begin{bmatrix} 3 \times 3, 64 \\ 3 \times 3, 64 \end{bmatrix} \times 2$	$\begin{bmatrix} 3 \times 3, 64 \\ 3 \times 3, 64 \end{bmatrix} \times 3$	$\begin{bmatrix} 1 \times 1, 64 \\ 3 \times 3, 64 \\ 1 \times 1, 256 \end{bmatrix} \times 3$	$\begin{bmatrix} 1 \times 1, 64 \\ 3 \times 3, 64 \\ 1 \times 1, 256 \end{bmatrix} \times 3$	$\begin{bmatrix} 1 \times 1, 64 \\ 3 \times 3, 64 \\ 1 \times 1, 256 \end{bmatrix} \times 3$
Convolución 3	28x28	$\begin{bmatrix} 3 \times 3, 128 \\ 3 \times 3, 128 \end{bmatrix} \times 2$	$\begin{bmatrix} 3 \times 3, 128 \\ 3 \times 3, 128 \end{bmatrix} \times 4$	$\begin{bmatrix} 1 \times 1, 128 \\ 3 \times 3, 128 \\ 1 \times 1, 512 \end{bmatrix} \times 4$	$\begin{bmatrix} 1 \times 1, 128 \\ 3 \times 3, 128 \\ 1 \times 1, 512 \end{bmatrix} \times 4$	$\begin{bmatrix} 1 \times 1, 128 \\ 3 \times 3, 128 \\ 1 \times 1, 512 \end{bmatrix} \times 8$
Convolución 4	14x14	$\begin{bmatrix} 3 \times 3, 256 \\ 3 \times 3, 256 \end{bmatrix} \times 2$	$\begin{bmatrix} 3 \times 3, 256 \\ 3 \times 3, 256 \end{bmatrix} \times 6$	$\begin{bmatrix} 1 \times 1, 256 \\ 3 \times 3, 256 \\ 1 \times 1, 1024 \end{bmatrix} \times 6$	$\begin{bmatrix} 1 \times 1, 256 \\ 3 \times 3, 256 \\ 1 \times 1, 1024 \end{bmatrix} \times 23$	$\begin{bmatrix} 1 \times 1, 256 \\ 3 \times 3, 256 \\ 1 \times 1, 1024 \end{bmatrix} \times 36$
Convolución 5	7x7	$\begin{bmatrix} 3 \times 3, 512 \\ 3 \times 3, 512 \end{bmatrix} \times 2$	$\begin{bmatrix} 3 \times 3, 512 \\ 3 \times 3, 512 \end{bmatrix} \times 3$	$\begin{bmatrix} 1 \times 1, 512 \\ 3 \times 3, 512 \\ 1 \times 1, 2048 \end{bmatrix} \times 3$	$\begin{bmatrix} 1 \times 1, 512 \\ 3 \times 3, 512 \\ 1 \times 1, 2048 \end{bmatrix} \times 3$	$\begin{bmatrix} 1 \times 1, 512 \\ 3 \times 3, 512 \\ 1 \times 1, 2048 \end{bmatrix} \times 3$
Agrupación 2	1x1	Average global pooling				
Fully-connected	1x1	1x1000				
Número de FLOPS		$1,8 \cdot 10^9$	$3,6 \cdot 10^9$	$3,8 \cdot 10^9$	$7,6 \cdot 10^9$	$11,3 \cdot 10^9$

Se observa que, al profundizar en la estructura de las redes neuronales, el aumento de número de capas conlleva un aumento en la cantidad de kernels o núcleos empleados en cada una de ellas. Este incremento responde a la necesidad de procesar y extraer características más complejas de los datos a medida que avanzan a través de la red. Cada kernel tiene la tarea de identificar patrones específicos, y a mayor profundidad, mayor es la diversidad y especificidad de los patrones que se deben reconocer. Los corchetes de la **Tabla 2-26** simbolizan los bloques residuales empleados en las redes.

En el desarrollo de redes más profundas para ImageNet, una preocupación clave ha sido el tiempo de entrenamiento. Para abordar esto, se ha introducido un diseño innovador en el bloque de construcción: la arquitectura de cuello de botella [99]. Esta modificación no solo ha sido crucial para manejar el volumen de datos de ImageNet, sino también para hacer el proceso de entrenamiento más viable en términos de tiempo y recursos. En lugar

de utilizar el tradicional apilamiento de dos capas, la arquitectura de cuello de botella utiliza un conjunto de tres capas (**Figura 2-141**).

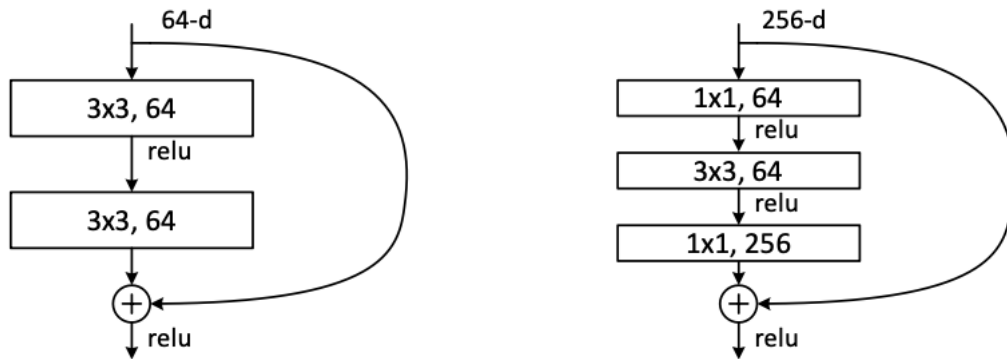


Figura 2-141: Esquema de un bloque residual básico para ResNet-34 (izquierda). Estructura de cuello de botella (bottleneck) para ResNet50/101/150 (derecha) [99]

Estas capas están compuestas por convoluciones de 1×1 y 3×3 . Las capas de 1×1 tienen la doble función de reducir y luego restaurar las dimensiones, mientras que la capa de 3×3 actúa como un cuello de botella, manejando dimensiones de entrada/salida más pequeña. Esta estructura permite un procesamiento más eficiente, manteniendo una complejidad temporal similar a diseños anteriores.

Para el análisis detallado de las imágenes obtenidas en los diversos casos de este estudio, se implementarán las redes neuronales convolucionales ResNet34 y ResNet50. Estas redes, conocidas por su eficacia y precisión, serán descritas en profundidad en las siguientes secciones, destacando sus características y aplicaciones.

2.8.4.3.1 ResNet34

La ResNet34 es una red neuronal convolucional compuesta por 34 capas. Su diseño estructural, aunque complejo, está bien organizado. La arquitectura se compone de cinco bloques convolucionales, seguidos de una capa completamente conectada (Fully-connected) tal y como se observa en la **Figura 2-142**. Aunque los bloques residuales no se muestran explícitamente en algunos esquemas básicos, su presencia es esencial para el funcionamiento de la red, ya que permiten mejorar la propagación del gradiente y evitar la degradación de la información.

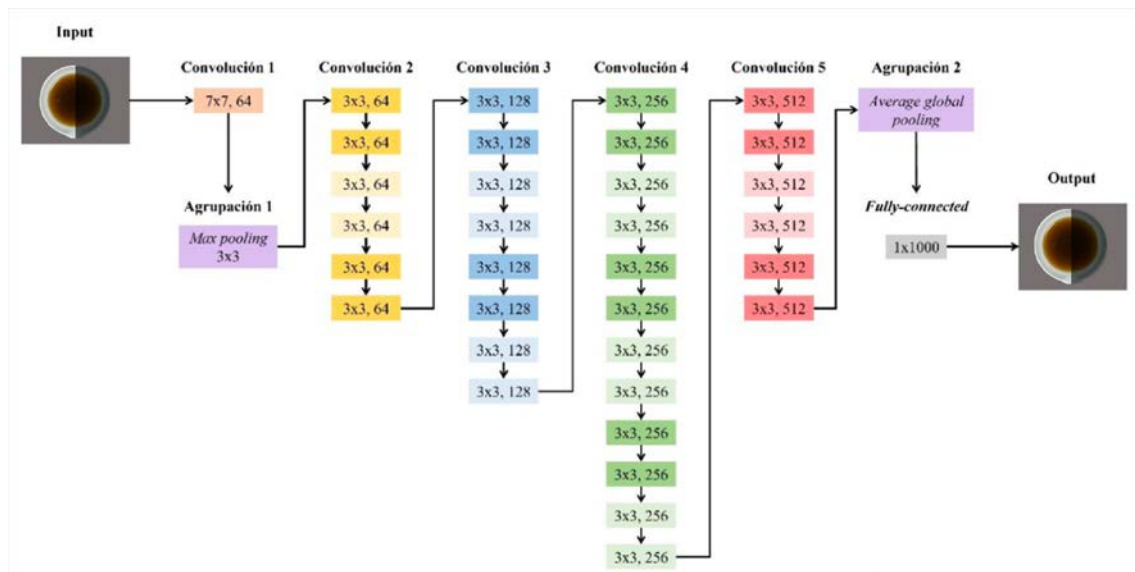


Figura 2-142: Estructura de la ResNet34 [99]

Una de las características distintivas de la ResNet34 es su flexibilidad y capacidad de adaptación. Esta red es ampliamente utilizada para clasificar imágenes en una variedad de tareas, ajustando sus parámetros para optimizar el rendimiento. En su implementación, el ajuste de parámetros se realiza en dos fases: primero, se optimizan los parámetros de la última capa, la capa completamente conectada (fully-connected), que es la responsable de realizar la clasificación final de las imágenes. En una segunda fase, se procede a ajustar los parámetros en todas las capas convolucionales de la red.

Los filtros en las capas convolucionales son los elementos clave en la extracción de características de las imágenes. Estos filtros están compuestos por funciones con parámetros ajustables, y su ajuste es esencial para mejorar la capacidad de la red de identificar patrones en los datos. Sin embargo, a diferencia de las capas convolucionales, las capas de agrupación (pooling) no tienen parámetros ajustables. Esto las convierte en elementos estables dentro de la red, proporcionando consistencia en el procesamiento de datos, independientemente de los ajustes realizados en otras partes de la red.

La optimización de las redes neuronales puede realizarse de diferentes maneras. Los dos enfoques principales que se destacan son:

- **Optimización de solo la última capa:** La optimización de la última capa, conocida también como "fine-tuning", es un método preferido cuando se dispone de un conjunto de datos limitado o cuando se quiere ajustar un modelo preentrenado a una nueva tarea específica. Este enfoque consiste en congelar todas las capas anteriores del modelo y solo actualizar los pesos de la última capa durante el

entrenamiento. La ventaja principal es que reduce significativamente el tiempo y los recursos computacionales necesarios, ya que solo se recalibra una pequeña parte del modelo. Este procedimiento tiene los siguientes beneficios:

- Eficiencia computacional: Menor carga computacional al ajustar menos parámetros.
- Prevención del sobreajuste: Al no reajustar todas las capas, se reduce el riesgo de adaptar excesivamente el modelo a los datos de entrenamiento, especialmente útil cuando el conjunto de datos es pequeño.
- **Optimización de todas las capas:** la optimización de todas las capas implica ajustar los pesos en todas las capas de la red. Este método es más exhaustivo y generalmente se recomienda cuando se cuenta con un gran volumen de datos y el modelo necesita adaptarse ampliamente a las características específicas de los nuevos datos. Las ventajas de este proceso son:
 - Mayor generalización: Al ajustar todos los parámetros, el modelo puede aprender características más complejas y abstractas, lo que potencialmente mejora su capacidad de generalización a nuevas muestras.
 - Personalización profunda: Este enfoque permite una adaptación más completa del modelo a las particularidades del conjunto de datos, lo que puede ser crucial en tareas complejas.

2.8.4.3.2 ResNet50

La ResNet50 es una versión extendida de la ResNet34, que cuenta con un total de 50 capas. Esta red es más profunda debido al incremento en el número de filtros aplicados en sus cinco bloques de convolución y la capa de clasificación final, conocida como Fully-connected. El esquema de la estructura de la ResNet50 puede observarse en la **Figura 2-143**, donde se destacan los bloques residuales, representados mediante diferentes tonalidades, al igual que en la ResNet34.

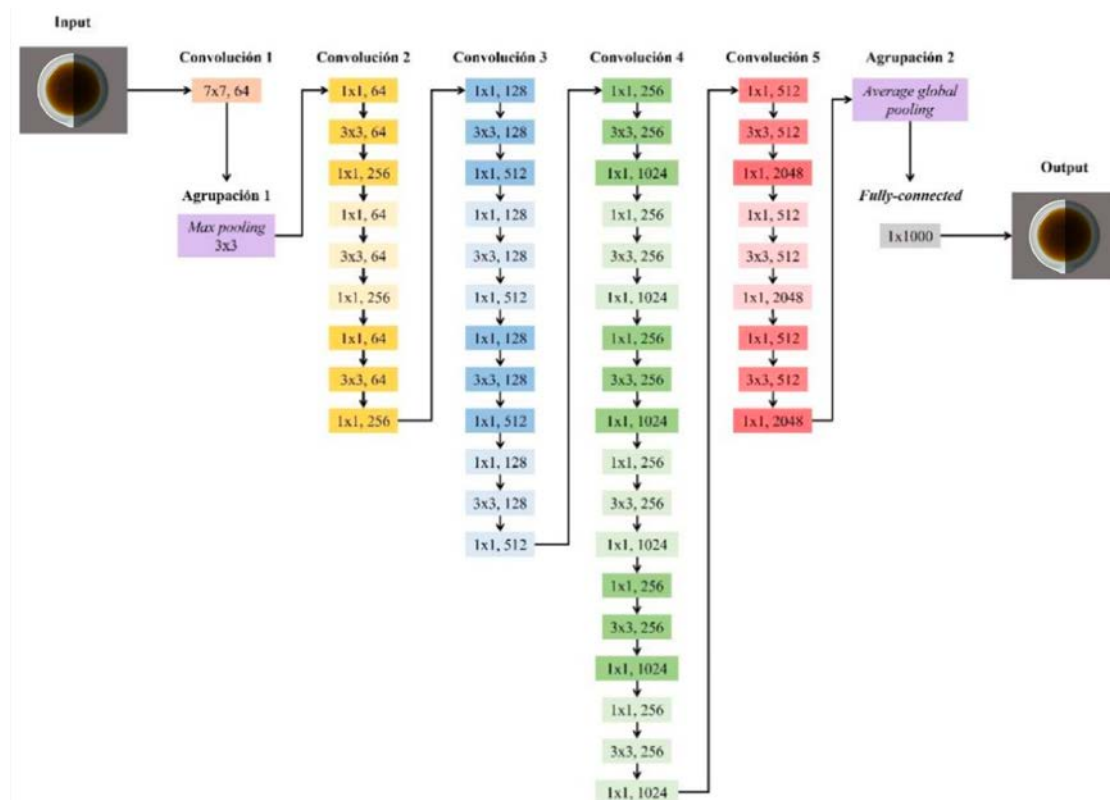


Figura 2-143: Esquema de la estructura de la ResNet50 [99]

El proceso de optimización en la ResNet50 sigue un procedimiento similar al de la ResNet34, con ajustes orientados a mejorar tanto la eficiencia como la precisión en la clasificación de imágenes. Si bien ambas redes comparten una estructura similar y un enfoque de optimización comparable, la ResNet50 introduce características adicionales que impactan su rendimiento, principalmente debido a su mayor profundidad.

Al igual que en la ResNet34, las capas de agrupación (pooling) en la ResNet50 no permiten modificaciones en sus parámetros, ya que su función es específica y no requiere ajustes para cumplir su propósito. En cambio, las capas convolucionales ofrecen la posibilidad de personalizar y ajustar sus funciones, permitiendo adaptar la red a tareas más específicas o complejas.

La optimización de los parámetros en la ResNet50 pone un énfasis especial en la última capa, la capa completamente conectada (fully-connected). Dado que esta capa es la responsable de realizar la clasificación final de las imágenes, su ajuste es crítico para el rendimiento global de la red. Cuando se habla de la optimización de "todas las capas", se hace referencia a la modificación de aquellas capas cuya naturaleza lo permite, abarcando tanto la capa completamente conectada como otras capas convolucionales. Este enfoque integral asegura que la red pueda adaptarse completamente a las

características de los datos que está procesando, mejorando su capacidad de generalización y su precisión en tareas de clasificación.

2.8.4.4 Estrategia para la distribución y optimización de las imágenes

En el campo del aprendizaje automático y la inteligencia artificial, la correcta distribución y manejo de las imágenes es fundamental para el desarrollo eficiente de los modelos. Para asegurar que el modelo funcione de manera efectiva, las imágenes del conjunto de datos se dividen de manera aleatoria y cuidadosamente planificada. Este proceso es crucial para evitar sesgos o errores durante el entrenamiento, y garantizar que la red cumpla con los objetivos de manera óptima.

La distribución de las imágenes se realiza en tres conjuntos principales, **Figura 2-144**:

- Conjunto de entrenamiento.
- Conjunto de validación.
- Conjunto de prueba.



Figura 2-144: Tratamiento de los datos: entrenamiento, validación y prueba [87]

También existen algunas variantes, como la validación cruzada [87].

Para garantizar la eficacia del modelo, es fundamental que las imágenes se dividan de manera estratégica. El 90% de las imágenes se asigna para el proceso de entrenamiento y validación, mientras que el 10% restante se utiliza para la prueba final del modelo. De este 90%, el 80% se destina específicamente al entrenamiento del modelo, donde la red aprende a identificar patrones y características esenciales. Durante esta fase de entrenamiento, se utiliza la propagación hacia adelante para calcular las pérdidas,

Capítulo 2: Materiales y métodos

mientras que la retropropagación ajusta los parámetros de la red para optimizar su rendimiento [87]. Es durante esta fase que la red adquiere la mayoría de sus capacidades analíticas y de clasificación. Este proceso se ilustra en la **Figura 2-145**, que muestra el flujo de la información desde la entrada de la imagen hasta la salida, pasando por la actualización de los pesos del modelo.

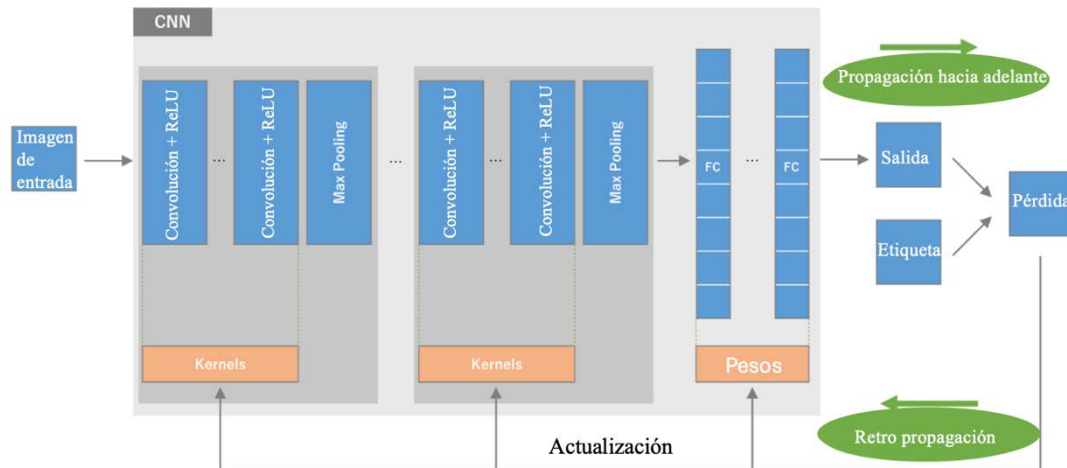


Figura 2-145: Estructura de una CNN y el proceso de propagación hacia adelante y retropropagación [87]

El 20% de las imágenes restantes se emplea para la validación interna. Esta fase es crítica para evaluar cómo los cambios realizados en los parámetros del modelo afectan su rendimiento. La validación interna actúa como un control de calidad que garantiza que cada ajuste incrementa la precisión y efectividad general del modelo.

Además, se separa el 10% de las imágenes originales para realizar la validación ciega o de prueba. Esta etapa es fundamental para evaluar el rendimiento final del modelo, ya que implica clasificar imágenes que no fueron vistas durante el entrenamiento ni la validación interna. Al probar el modelo en este conjunto de imágenes, se simula su uso en situaciones reales, evaluando así su capacidad de generalización a datos desconocidos.

El proceso de optimización del modelo es dinámico y no se realiza en una sola etapa. Se lleva a cabo en ciclos que alternan entre entrenamiento y validación interna. En cada ciclo, las imágenes asignadas a cada fase pueden variar, lo que permite que el modelo se ajuste y mejore continuamente al enfrentar nuevos datos y escenarios. Este enfoque garantiza que el modelo sea flexible y capaz de adaptarse a las necesidades de cada aplicación.

La metodología de división y distribución de imágenes se aplica de manera uniforme en todos los modelos estudiados a lo largo de este trabajo. Además, se implementa tanto

en la optimización de la última capa del modelo como en la optimización de todas las capas, asegurando un enfoque coherente y uniforme en cada caso.

2.8.5 Cuaderno Jupyter

Para la separación, el análisis matemático detallado y la clasificación precisa de imágenes en el presente estudio se han elegido:

- Python 3.7.x por su versatilidad.
- Jupyter Notebook 3.0.2 por su interfaz intuitiva.

De este modo, se ha facilitado la programación y la aplicación efectiva de los modelos de inteligencia artificial utilizados en este trabajo.

2.8.5.1 Jupyter Notebook

Jupyter Notebook es una aplicación web de código abierto que proporciona un entorno interactivo para la programación y el análisis de datos. Funciona como un cuaderno de laboratorio virtual, ofreciendo un espacio donde los usuarios pueden escribir códigos, visualizar datos y compartir sus resultados de manera eficiente y efectiva [100]. Una de las principales ventajas de Jupyter Notebook es su capacidad para apoyar una amplia variedad de tareas, desde la escritura de código hasta el análisis de datos complejos.

Esta herramienta facilita la organización de flujos de trabajo, permitiendo a los usuarios concentrarse en la creación y exploración de soluciones innovadoras. El nombre "Jupyter" proviene de la combinación de los tres entornos de ejecución principales que soporta: Julia, Python y R. Esta integración hace que Jupyter Notebook sea excepcionalmente poderoso y adaptable a diversas necesidades de programación y análisis de datos [101]. Cada uno de estos lenguajes ofrece características únicas que Jupyter combina en una sola plataforma, simplificando el proceso de desarrollo y experimentación.

Jupyter Notebook permite a los usuarios crear, editar y compartir cuadernos con la extensión .ipynb. Esta herramienta se ha convertido en un estándar en el mundo de la programación y el análisis de datos debido a su interfaz intuitiva y su capacidad para integrar código, visualización de datos y textos en un solo documento.

Capítulo 2: Materiales y métodos

Una de las características más destacadas de Jupyter Notebook es la capacidad de crear celdas de código que pueden ejecutarse en tiempo real. Esto permite a los usuarios obtener resultados inmediatos, lo que facilita el desarrollo ágil y la depuración de código. La posibilidad de ejecutar y ajustar el código en tiempo real es crucial para la corrección eficiente de errores y para obtener resultados iterativos sin necesidad de reiniciar todo el proceso de ejecución.

Además de las celdas de código, Jupyter Notebook permite la inclusión de celdas de texto, que utilizan un formato similar al de un documento de texto tradicional, pero con la ventaja de permitir la modificación del formato, el uso de Markdown y la integración de fórmulas matemáticas usando LaTeX. Esto lo convierte en una herramienta útil para documentar el trabajo, hacer análisis detallados y compartir hallazgos de manera clara símbolos [102].

2.8.5.2 Python

Python se ha establecido como uno de los lenguajes de programación más populares y utilizados en la actualidad. Su naturaleza interpretada, junto con una amplia gama de librerías y entornos de desarrollo, lo hacen ideal para múltiples fases del proceso de desarrollo tecnológico, especialmente en ciencia de datos, aprendizaje automático e inteligencia artificial [103]. La facilidad de aprendizaje y la capacidad de crear soluciones rápidas y efectivas hacen de Python una herramienta indispensable en estos campos.

Una de las principales ventajas de Python es su sencillez y accesibilidad para programadores de todos los niveles, desde principiantes hasta expertos. Su sintaxis simple y su diseño orientado a la legibilidad permiten a los desarrolladores crear soluciones robustas y personalizadas. Esta característica, combinada con su flexibilidad, lo hace adecuado para una amplia gama de aplicaciones, desde el desarrollo web hasta la investigación científica y el análisis de grandes volúmenes de datos.

Python es compatible con una vasta colección de bibliotecas y frameworks como NumPy, Pandas, TensorFlow, Keras y Scikit-learn, que son esenciales para tareas de análisis de datos, modelado de inteligencia artificial y aprendizaje automático. Estas bibliotecas ofrecen herramientas preconstruidas para realizar cálculos complejos, manipulación de datos y el desarrollo de modelos avanzados con pocas líneas de código, lo que aumenta significativamente la eficiencia y productividad en el desarrollo de proyectos de inteligencia artificial.

Capítulo 2: Materiales y métodos

Jupyter Notebook y Python juntos forman una poderosa combinación, permitiendo a los usuarios escribir, ejecutar y documentar su código en un solo entorno. Esta versatilidad es especialmente útil en aplicaciones de ciencia de datos, donde se requiere un ciclo iterativo de desarrollo, análisis y ajuste de modelos. Además, la posibilidad de trabajar colaborativamente en un mismo proyecto dentro de un entorno compartido es un valor añadido en equipos multidisciplinarios que buscan desarrollar soluciones complejas de manera eficiente.

Capítulo 3: Resultados y discusión

3.1 Introducción

El capítulo previo, denominado "Materiales y Métodos", trata de forma detallada los enfoques metodológicos de la investigación. Dicha sección proporciona una descripción detallada de los diferentes aceites analizados, las técnicas de toma de muestra utilizadas y las metodologías analíticas adoptadas para el análisis. También se destaca la importancia de la precisión en las mediciones y la integración de herramientas de inteligencia artificial para mejorar la calidad de los resultados.

Ese capítulo describe las variedades de aceites lubricantes incluyendo tanto los de origen mineral como los sintéticos, y menciona sus respectivos códigos de la OTAN para su identificación. Además, se detalla la calibración y mantenimiento de la instrumentación analítica para garantizar que los métodos implementados alcancen el estándar exigido para resultados confiables. También se discute cómo asegurar la representatividad de las muestras y la estandarización de los métodos de muestreo, además de describir el equipo requerido y los procedimientos adecuados para la toma de muestra.

En este capítulo, titulado "Resultados y discusión", se presentan y analizan los hallazgos obtenidos de los análisis experimentales realizados sobre los dos tipos de aceite estudiado: el aceite mineral multigrado 15W40 (con denominación OTAN O-1236), empleado como aceite de motor, y el aceite sintético multigrado 5W30 (con denominación OTAN O-1178), utilizado en las cajas de cambios de vehículos militares seleccionados. Esta parte del documento se dedica a interpretar los resultados obtenidos y a discutir su relevancia y significado en el contexto de la investigación.

Lo primero que se hace en este capítulo es explicar un análisis estadístico de los resultados fisicoquímicos obtenidos y la base de datos diseñada ex profeso para el tratamiento de los datos fisicoquímicos y las fotografías realizadas. Se analizan las propiedades fisicoquímicas de los aceites, como la viscosidad y el punto de inflamación, que son indicadores críticos para evaluar la eficacia del aceite como lubricante y su capacidad para proteger los componentes del motor y la caja de cambios bajo diversas condiciones. Además, se examinan los procedimientos de gestión de muestras y los resultados del análisis estadístico, proporcionando una comprensión

Capítulo 3: Resultados y discusión

profunda del estado del aceite lubricante, incluyendo la detección de metales de desgaste y contaminantes, factores cruciales para asegurar el rendimiento y la durabilidad de los sistemas mecánicos en los que se emplean estos lubricantes.

En esta sección, también se examina la implementación de técnicas de inteligencia artificial (IA) para estimar la calidad del aceite, comparando estas estimaciones con los datos experimentales obtenidos. La correlación entre las proyecciones generadas por la IA y la evidencia experimental de los ensayos fisicoquímicos permite evaluar el rendimiento de los modelos desarrollados y analizar sus implicaciones prácticas. Además, se profundiza en la aplicación innovadora de la fotografía combinada con IA para caracterizar de manera rápida y precisa si un aceite es conforme o no. Este enfoque utiliza imágenes de los aceites usados previamente analizados mediante ensayos fisicoquímicos para entrenar modelos de IA que son capaces de identificar variaciones sutiles en las características del aceite, las cuales no son fácilmente detectables mediante métodos tradicionales. La integración de la IA en esta investigación no solo demuestra su potencial para avanzar en el análisis de aceites usados, sino que también establece un precedente importante para futuros estudios que busquen combinar métodos empíricos, tecnologías digitales y herramientas inteligentes. Este capítulo concluye con una evaluación crítica de la eficacia de las técnicas de IA empleadas.

3.2 Análisis estadístico

En este apartado se analizan estadísticamente los resultados de los ensayos fisicoquímicos de los dos tipos de aceite estudiados. Este análisis garantiza la validez y fiabilidad de los datos, permitiendo interpretar correctamente las propiedades y comportamientos de los aceites. Se emplean métodos estadísticos para identificar tendencias, patrones y posibles anomalías, fortaleciendo la integridad de los resultados y proporcionando una base para futuras recomendaciones técnicas.

Se utilizan la estadística descriptiva y modelos predictivos para comprender las características de los aceites y predecir posibles resultados y tendencias. Este enfoque metodológico facilita la toma de decisiones basadas en evidencia y el diseño de estrategias futuras. Mediante el tratamiento estadístico de las muestras de aceite, se busca evaluar su rendimiento, desgaste y la fiabilidad de los equipos que mantienen en funcionamiento.

Capítulo 3: Resultados y discusión

Un paso clave en el análisis es el análisis exploratorio de datos, que organiza, describe y resume la información obtenida. Se presentan tablas estructuradas que destacan variables clave, como la viscosidad, el punto de inflamación y los elementos de desgaste, junto con variables categóricas binarias como el dictamen de conformidad (codificadas como 1 para "CONFORME" y 0 para "NO CONFORME"). Esta codificación simplifica el análisis y permite establecer la influencia de diferentes variables en los resultados.

Posteriormente, se segmentan las muestras en grupos específicos para analizar sus características particulares, dada la heterogeneidad entre ellas. Se clasifican los registros de aceite según su uso, como el aceite O-1178 y O-1236 para los carros Leopard, asegurando que las conclusiones sean aplicables a cada subconjunto.

El tratamiento de datos faltantes y atípicos es esencial. Según la importancia de la variable, se pueden eliminar registros incompletos o imputar valores faltantes mediante estimadores como la media del grupo. Los valores atípicos también se tratan para evitar sesgos en el análisis.

Antes de hacer cualquier modelización, se evalúa la normalidad para todas las variables numéricas a partir del método Shapiro-Wilk [104]. También, se revisa la multicolinealidad para identificar relaciones intensas entre las variables, porque si existen estas relaciones pueden afectar a la validez de los modelos predictivos.

Finalmente, se construye un modelo de regresión logística binaria para estimar la conformidad de las muestras, basado en patrones matemáticos. Las variables relacionadas con el desgaste se normalizan a condiciones comunes, y aunque los datos de kilometraje son incompletos, se asume que las muestras provienen de intervalos similares para facilitar esta normalización.

A continuación, se muestra el análisis estadístico para cada uno de los aceites estudiados, O-1178 y O-1236, del carro de combate Leopard.

3.2.1 Carro de combate Leopard y tipo de aceite: O-1178

Este apartado se centrará en el análisis del tipo de aceite O-1178 utilizado en las cajas de cambio de los carros de combate Leopard. Este análisis es fundamental para comprender las propiedades fisicoquímicas específicas del aceite y su comportamiento en condiciones operativas reales. Dado el papel crítico del aceite en el funcionamiento y mantenimiento de los carros de combate, un examen detallado de sus características puede proporcionar valiosa

Capítulo 3: Resultados y discusión

información para optimizar su rendimiento y prolongar la vida útil de los equipos lubricados por el correspondiente aceite. A continuación, se presenta un análisis descriptivo que incluye medidas de centralización, dispersión y forma, permitiendo una visión integral de los datos recolectados.

3.2.1.1 Medidas de centralización, dispersión y forma

Mediante el análisis estadístico de diferentes variables que afectan al rendimiento y al desgaste de componentes en los carros Leopard, se obtiene información útil para el mantenimiento predictivo y la optimización operativa de dichos vehículos. En las tablas que se presentan a continuación, se muestran medidas de centralización, dispersión y forma para cada variable (**Tabla 3-1**), así como un análisis estadístico detallado y su correspondiente aplicación práctica (**Tabla 3-3**). Este enfoque no solo facilita una comprensión detallada de los datos desde una perspectiva estadística, sino que también transforma estos conocimientos en acciones concretas y recomendaciones prácticas. Al vincular los datos con su impacto real en el rendimiento y el mantenimiento de los carros Leopard, se pueden detectar áreas críticas que necesitan control continuo y diseñar sensores específicos que mejoren la eficiencia y la seguridad operativa.

La **Tabla 3-1** refleja una variedad de comportamientos en las variables analizadas, desde distribuciones muy concentradas y asimétricas hasta otras más dispersas y equilibradas.

Medidas de centralización			Medidas de dispersión							Medidas de forma		
	Media	Mediana	Moda	Rango	Mín	Máx	Q ₁	Q ₃	Desviación Estándar	Varianza	Curtosis	Coef. de asimetría
V40	52,9	52,0	52,6	27,7	47,0	74,8	50,3	54,1	4,3	18,1	8,5	2,4
V100	9,2	9,1	8,9	4,5	8,2	12,7	8,9	9,4	0,6	0,4	6,1	2,0
IV	157,2	157,0	157,0	41,0	133,0	174,0	155,7	159,0	4,7	22,5	8,3	-1,5
PI	218,3	225,0	227,0	78,5	166,5	245,0	205,5	231,0	15,2	231,8	0,3	-0,8
Fe	15,6	13,0	9,0	71,0	0,0	71,0	8,0	20,0	11,0	120,9	4,7	1,8
Ag	0,6	0,0	0,0	6,0	0,0	6,0	0,0	1,0	0,9	0,8	6,9	2,2
Al	9,9	9,0	9,0	39,0	0,0	39,0	7,0	12,0	4,3	18,4	7,0	1,6
Cr	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,2	0,0	43,0	6,3
Cu	44,8	38,0	33,0	205,0	0,0	205,0	24,0	62,0	31,4	986,4	3,0	1,4
Si	15,6	15,0	16,0	120,0	0,0	120,0	10,0	19,0	9,7	94,2	44,1	4,9
Sn	0,0	0,0	0,0	4,0	0,0	4,0	0,0	0,0	0,3	0,7	198,9	13,6
Ni	0,1	0,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,3	0,1	3,7	2,4
Pb	36,5	28,0	10,0	252,0	0,0	252,0	17,0	46,0	31,0	963,1	10,3	2,6
Mo	54,7	60,0	62,0	127,0	0,0	127,0	29,0	73,0	26,9	723,6	-0,7	-0,0
TAN	2,2	2,2	2,3	1,6	1,4	3,0	2,1	2,3	0,3	0,1	0,6	0,2
H ₂ O	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,2	0,0	0,6	0,0	0,0	29,1	3,6
TBN	10,2	10,4	10,7	6,2	6,3	12,5	9,6	10,8	1,0	1,1	0,8	-0,8

Capítulo 3: Resultados y discusión

Los valores de Q_1 (primer cuartil) y Q_3 (tercer cuartil) ofrecen una visión de la distribución de los datos dentro de cada variable y son esenciales para entender cómo se distribuyen los valores dentro de cada variable ayudando a identificar la presencia de valores atípicos o características particulares de la distribución de los datos. Estos cuartiles dividen los datos ordenados en cuatro partes iguales. Q_1 es el valor debajo del cual se encuentra el 25% de los datos, mientras que Q_3 es el valor debajo del cual se encuentra el 75% de los datos. Lo que significa que entre el Q_1 y Q_3 se concentran el 50% de los valores muestrales. Con respecto a Q_1 y Q_3 se observa que:

- En algunas variables tales como Cr, Ag, Sn, y Ni, ambos Q_1 y Q_3 son bajos, indicando una concentración de valores en el extremo inferior de la distribución. Esto puede ser indicativo de una alta prevalencia de valores cercanos a cero en estos elementos.
- Para variables con rangos más amplios y valores extremos, como Cu, Si, y Pb, los cuartiles están más separados, indicando una distribución más amplia de los valores.
- En variables como Fe y Mo, el rango entre Q_1 y Q_3 es relativamente grande, mostrando una variabilidad significativa en el 50% de los datos.
- Para TAN y H_2O , los cuartiles están muy próximos entre sí, lo que sugiere poca variabilidad entre el 25% y el 75% de los datos.

La curtosis es un valor estadístico que describe la forma de la distribución de los datos, centrándose especialmente en la altura y amplitud de sus picos y extremos[105]. En el análisis de aceites de caja de cambios, la curtosis puede proporcionar información valiosa sobre la calidad del aceite y los factores que podrían afectar su rendimiento. Por lo tanto, esta medida estadística es útil para evaluar tanto la calidad como el desempeño de los aceites de caja de cambios. Comprender las diferencias entre una distribución leptocúrtica, platicúrtica o mesocúrtica puede ayudar a tomar decisiones informadas sobre el mantenimiento y la selección de aceites.

La siguiente **Tabla 3-2**, muestra cómo la forma de la distribución (determinada por la curtosis) para el conjunto de datos obtenidos del aceite O-1178, puede influir en la interpretación de las variables en el contexto del rendimiento y la condición del aceite de caja de cambios.

Capítulo 3: Resultados y discusión

Tabla 3-2: Tipo de distribución en función de la Curtosis para el aceite O-1178

Variable	Curtosis	Tipo	Interpretación
V40	8,53	Leptocúrtica - Forma muy apuntada y colas extendidas, indicando valores extremos.	Alta probabilidad de variabilidad en viscosidad, indicando posibles episodios de desgaste extremo o contaminantes.
V100	6,11	Leptocúrtica - Forma apuntada y colas extendidas, sugiriendo valores extremos.	Alta probabilidad de variabilidad en concentración de aditivos.
IV	8,25	Leptocúrtica - Forma muy apuntada y colas extendidas, indicando valores extremos.	Alta probabilidad de variabilidad en pureza del aceite.
PI	0,31	Mesocúrtica - Forma similar a una distribución normal.	Rendimiento esperado y consistente del aceite.
Fe	4,68	Leptocúrtica - Forma apuntada y colas extendidas, sugiriendo valores extremos.	Probabilidad de eventos de desgaste anormal de metales.
Ag	6,91	Leptocúrtica - Forma muy apuntada y colas extendidas, indicando valores extremos.	Alta probabilidad de presencia de plata, sugiriendo contaminación o desgaste específico.
Al	7,00	Leptocúrtica - Forma apuntada y colas extendidas, sugiriendo valores extremos.	Variabilidad en el desgaste de componentes de aluminio.
Cr	43,99	Extremadamente Leptocúrtica - Forma muy apuntada y colas muy extendidas, sugiriendo alta concentración de outliers.	Alta probabilidad de desgaste extremo o contaminantes significativos.
Cu	2,99	Leptocúrtica - Forma apuntada y colas extendidas, indicando valores extremos.	Variabilidad en desgaste de componentes de cobre.

Capítulo 3: Resultados y discusión

Si	44,08	Extremadamente Leptocúrtica - Forma muy apuntada y colas muy extendidas, sugiriendo alta concentración de outliers.	Alta probabilidad de contaminación por polvo o desgaste de sellos de silicona.
Sn	198,91	Extremadamente Leptocúrtica - Forma muy apuntada y colas muy extendidas, sugiriendo alta concentración de outliers.	Alta probabilidad de desgaste de componentes con estaño.
Ni	3,74	Leptocúrtica - Forma apuntada y colas extendidas, indicando algunos valores extremos.	Variabilidad en desgaste de componentes de níquel.
Pb	10,35	Leptocúrtica - Forma muy apuntada y colas extendidas, sugiriendo alta presencia de valores extremos.	Alta probabilidad de desgaste de componentes con plomo.
Mo	-0,69	Platicúrtica - Distribución más plana con colas delgadas, sin valores extremos significativos.	Estabilidad en desgaste de componentes tratados con molibdeno.
TAN	0,64	Mesocúrtica - Forma similar a una distribución normal.	Rendimiento consistente en la acidez del aceite.
H₂O	29,12	Extremadamente Leptocúrtica - Forma muy apuntada y colas extendidas, sugiriendo alta concentración de outliers.	Alta probabilidad de contaminación por agua.
TBN	0,84	Mesocúrtica - Forma similar a una distribución normal.	Rendimiento consistente en la alcalinidad del aceite.

Con respecto al coeficiente de asimetría [105], todas las variables son asimétricas a la derecha salvo: IV, PI, TBN que están sesgadas a la izquierda. El molibdeno puede considerarse que tiene una distribución simétrica.

Capítulo 3: Resultados y discusión

A continuación, como resultado del análisis estadístico llevado a cabo y de los valores observados, se presenta **Tabla 3-3**, con la interpretación práctica de cada una de las variables analizadas aplicada al estudio de los aceites:

Tabla 3-3: Evaluación estadística y aplicaciones prácticas de variables clave en el aceite lubricante O-1178

Variable	Análisis Estadístico	Aplicación Práctica
Rendimiento a baja temperatura		
V40	La media y mediana son cercanas, lo que indica una distribución relativamente simétrica. Sin embargo, un coeficiente de asimetría positivo y una alta curtosis indican una cola hacia valores mayores y una mayor concentración de valores alrededor de la media.	La variabilidad en la viscosidad a 40 °C sugiere que, en condiciones de bajas temperaturas, algunos aceites pueden presentar viscosidades significativamente más altas, afectando el arranque de la caja de cambios. Este análisis permite seleccionar aceites que aseguren un arranque más eficiente y menor desgaste en climas fríos.
Rendimiento a alta temperatura		
V100	Distribución simétrica y más concentrada, con poca dispersión como lo indica la baja desviación estándar.	La estabilidad de la viscosidad a 100 °C indica un rendimiento predecible del aceite a altas temperaturas, lo cual es esencial para la protección de la caja de cambios bajo condiciones de carga elevada. Un aceite con estas características puede prolongar la vida útil de la caja de cambios y reducir los costes de mantenimiento.
Estabilidad en amplio rango de temperatura		
IV	Asimetría negativa y alta curtosis, indicando una cola hacia valores menores y una aguda concentración de los valores.	Un índice de viscosidad alto y consistente es deseable, pues indica que el aceite mantiene su viscosidad en un rango amplio de temperaturas, protegiendo eficazmente la caja de cambios. Este factor es esencial para vehículos que operan en climas con grandes variaciones de temperatura.
Seguridad		
PI	Ligeramente asimétrica hacia valores menores con una curtosis baja, indicando una distribución menos pronunciada alrededor de la media.	Un punto de inflamación alto es crucial para la seguridad. Sensores que midan este punto pueden prevenir riesgos de incendio al alertar sobre aceites que han perdido su capacidad de resistir altas temperaturas.

<i>Presencia de metales: Indicador de desgaste y contaminación</i>		
Fe	Asimetría positiva y alta curtosis, mostrando una distribución con valores que se extienden más hacia los valores superiores.	La presencia de hierro indica desgaste de la caja de cambios. Sensores que monitoreen los niveles de hierro pueden ayudar a detectar problemas de desgaste temprano, permitiendo intervenciones preventivas y evitando fallos catastróficos de la caja de cambios.
Ag	La media es baja (0,61 ppm) y la mediana es 0, indicando una concentración de valores muy baja o ausencia de plata en muchas muestras. La alta curtosis (6,91) y el coeficiente de asimetría positivo (2,19) sugieren una distribución con una cola hacia valores mayores.	La presencia de plata en concentraciones significativas podría indicar contaminación o desgaste de componentes recubiertos con plata.
Al	La media y la mediana son cercanas (9,89 y 9,00 ppm respectivamente), con una distribución ligeramente asimétrica hacia valores mayores (asimetría de 1,61) y alta curtosis (7,00).	Altos niveles de aluminio pueden indicar desgaste de componentes de aleaciones de aluminio. Controlar esta variable puede ayudar a prevenir fallos catastróficos en componentes críticos, asegurando la durabilidad de la caja de cambios.
Cr	La media es muy baja (0,03 ppm) y tanto la mediana como la moda son 0. La alta curtosis (43,99) y la asimetría positiva (6,33) indican una alta concentración de valores cercanos a cero.	El cromo en el aceite puede indicar desgaste de componentes cromados. Aunque los niveles son generalmente bajos, sensores sensibles para cromo pueden detectar incrementos que sugieran desgaste anormal, permitiendo intervenciones preventivas oportunas.
Cu	La media es 44,77 ppm y la mediana 38,00 ppm, con una alta varianza (986,39) y una asimetría positiva (1,37).	La alta varianza en los niveles de cobre sugiere que esta variable es crítica para el control de la salud del sistema de lubricación. Detectar estos niveles permite tomar medidas correctivas para evitar daños mayores y asegurar el buen funcionamiento de la caja de cambios.

Capítulo 3: Resultados y discusión

Si	La media es 15,64 ppm y la mediana 15,00 ppm, con una alta curtosis (44,08) y una asimetría positiva (4,89).	Altos niveles de silicio pueden indicar contaminación por polvo o arena. Sensores que monitoreen silicio pueden ayudar a identificar la necesidad de mejorar la filtración de aire o revisar sellos de la caja de cambios, previniendo el desgaste prematuro.
Sn	La media es muy baja (0,02 ppm) y tanto la mediana como la moda son 0. La extremadamente alta curtosis (198,91) y la asimetría positiva (13,61) sugieren que la mayoría de los valores son cero.	La presencia de estaño puede indicar desgaste de componentes recubiertos con estaño. Controlar esta variable permite detectar problemas en etapas tempranas y planificar el mantenimiento necesario.
Ni	La media es muy baja (0,12 ppm) con una mediana y moda de 0. La curtosis (3,74) y la asimetría positiva (2,39) indican una concentración hacia valores bajos.	El níquel puede provenir de componentes de aleación. Controlar los niveles de níquel puede ayudar a identificar desgaste en componentes específicos, permitiendo un mantenimiento focalizado y eficiente.
Pb	La media es 36,52 ppm y la mediana 28,00 ppm, con una alta varianza (963,09) y una asimetría positiva (2,60).	La alta varianza en los niveles de plomo sugiere que esta variable es crítica para el control de la salud del sistema de lubricación. Detectar y controlar estos niveles puede prevenir problemas graves en la caja de cambios.
Propiedades adicionales del aceite		
Mo	La media es 54,67 ppm y la mediana 60,00 ppm, con una curtosis negativa (-0,69) y una ligera asimetría negativa (-0,02).	El molibdeno se usa como aditivo en aceites para mejorar las propiedades de lubricación. Niveles anómalos pueden indicar problemas en la formulación del aceite o desgaste inusual, sugiriendo la necesidad de ajustes en la composición del aceite o revisiones técnicas.
TAN	La media es 2,21, la mediana 2,20 y la moda 2,30, con una baja variabilidad entre el 25% y el 75% de los datos.	El número de acidez total (TAN) es un indicador de la degradación del aceite. Un control riguroso de esta variable asegura que el aceite mantenga su eficacia y proteja la caja de cambios durante su vida útil.

Capítulo 3: Resultados y discusión

H₂O	La media es 0,04, la mediana 0,04 y la moda 0,04, con una baja variabilidad entre el 25% y el 75% de los datos.	La presencia de agua en el aceite puede ser indicativa de contaminación, afectando la lubricación y protección de la caja de cambios. Monitorizar esta variable ayuda a mantener la integridad del aceite y prevenir daños costosos.
TBN	La media es 10,15, la mediana 10,40 y la moda 10,70, con una distribución simétrica y baja variabilidad.	La estabilidad del TBN indica que el aceite mantiene su capacidad de neutralizar ácidos a través de su vida útil, asegurando la protección continua de la caja de cambios.

3.2.1.2 Análisis de correlación

Con el objetivo de identificar la relación entre las variables, se utiliza el coeficiente de correlación de Pearson, el cual mide la asociación lineal entre las variables explicativas, tal como se muestra en la **Tabla 3-4**. Este coeficiente es fundamental para entender cómo las variables se influyen entre sí y constituye un paso preliminar antes de realizar el análisis de regresión.

Tabla 3-4: Matriz de correlación para el aceite O-1178

	V40	V100	IV	PI	Fe	Ag	Al	Cr	Cu	Si	Sn	Ni	Pb	Mo	TAN	H ₂ O	TBN
V40	1,00																
V100	0,88	1,00															
IV	-0,03	0,08	1,00														
PI	-0,26	-0,20	0,01	1,00													
Fe	-0,34	-0,29	-0,04	0,22	1,00												
Ag	-0,13	-0,11	-0,10	0,17	0,22	1,00											
Al	-0,42	-0,33	-0,02	0,21	0,63	0,23	1,00										
Cr	-0,04	-0,06	-0,07	-0,16	-0,01	-0,10	-0,06	1,00									
Cu	-0,39	-0,39	-0,20	0,22	0,52	0,41	0,58	-0,05	1,00								
Si	-0,09	-0,04	0,17	0,18	0,15	-0,03	0,22	-0,06	-0,06	1,00							
Sn	0,00	-0,01	-0,02	0,06	0,21	0,09	0,37	-0,01	0,17	0,18	1,00						
Ni	-0,07	0,01	0,04	0,24	0,09	0,23	0,14	0,03	0,16	-0,05	0,04	1,00					
Pb	-0,08	-0,09	0,01	0,24	0,22	0,39	0,36	-0,07	0,50	-0,02	0,11	0,28	1,00				
Mo	-0,37	-0,41	-0,10	0,42	0,27	-0,05	0,13	-0,05	0,18	0,25	-0,05	-0,03	-0,05	1,00			
TAN	-0,13	-0,07	0,04	-0,17	-0,05	-0,06	0,04	0,02	-0,11	0,16	-0,02	-0,04	-0,13	0,02	1,00		
H₂O	0,05	0,03	-0,07	0,00	-0,22	-0,10	-0,18	-0,02	-0,21	0,04	-0,05	-0,20	0,01	0,00	0,06	1,00	
TBN	-0,17	-0,14	0,26	0,04	0,01	-0,14	0,02	0,02	-0,18	0,17	-0,07	-0,15	-0,10	0,09	0,22	0,20	1,00

Capítulo 3: Resultados y discusión

Para la interpretación de los datos mostrados en la **Tabla 3-4**, en la **Tabla 3-5** se define el tipo de relación lineal que puede haber entre variables teniendo en cuenta los coeficientes de correlación.

Tabla 3-5: Tipo de relación lineal entre variables

Rango		Relación lineal
0,96	$\pm 1,0$	Perfecta
0,85	$\pm 0,95$	Fuerte
0,70	$\pm 0,84$	Significativa
0,50	$\pm 0,69$	Moderada
0,20	$\pm 0,49$	Débil
0,10	$\pm 0,19$	Muy débil
0,09	$\pm 0,0$	Nula

La **Tabla 3-4** permite extraer una serie de conclusiones que explican a continuación:

- **V40 y V100:** Existe una correlación fuerte y positiva (0,88) entre la viscosidad a 40°C (V40) y la viscosidad a 100°C (V100). Esto sugiere que las variaciones en la viscosidad a baja temperatura están asociadas con las variaciones en la viscosidad a alta temperatura. Esto podría indicar que ambas medidas tienden a variar juntas y posiblemente representen aspectos similares del fenómeno estudiado lo cual es lógico, ya que se trata de la viscosidad de cada aceite a 40 y 100 °C y a partir de ellas se calcula el índice de viscosidad.
- **IV (Índice de Viscosidad):** A pesar de que el índice de viscosidad se calcula a partir de las viscosidades a 40°C y 100°C, no muestra correlaciones significativas con V40 (-0,03) y V100 (0,08). Esto puede deberse a la fórmula específica utilizada para calcular el IV puede introducir complejidades que no se reflejan directamente en una correlación lineal simple. La viscosidad no parece estar fuertemente influenciada por la mayoría de los metales medidos (Fe, Ag, Al, ...), dado que la mayoría de las correlaciones son muy bajas o negativas. Esto podría sugerir que el IV es relativamente estable a cambios en estas concentraciones.
- **PI (Punto de Inflamación):** Presenta correlaciones negativas débiles con V40 (-0,26) y V100 (-0,20). Esto sugiere que el punto de inflamación no está fuertemente relacionado con la viscosidad del aceite.

Capítulo 3: Resultados y discusión

- **Metales (Fe, Ag, Al, Cr, Cu, Si, Sn, Ni, Pb, Mo):**
 - **Fe:** Tiene correlaciones positivas moderadas con Al (0,63) y Cu (0,52). Esto indica que la presencia de hierro en el aceite tiende a estar asociada con la presencia de otros metales de desgaste.
 - **Ag:** Muestra correlaciones positivas débiles con Pb (0,39), Cu (0,41) y Fe (0,22). La presencia de plata parece asociarse con varios otros metales.
 - **Al:** Presenta correlaciones positivas con Cu (0,58) y Fe (0,63). Esto sugiere que el aluminio puede estar asociado con componentes que contienen estos elementos.
 - **Cr:** No muestra correlaciones significativas con otras variables, indicando que su presencia es independiente de otros metales y propiedades del aceite.
 - **Cu:** Muestra una correlación positiva fuerte con Al (0,58) y moderada con Fe (0,52). Esto indica posibles fuentes comunes de desgaste.
 - **Si:** Tiene una correlación positiva débil con Al (0,22), sugiriendo una ligera asociación con componentes que contienen aluminio.
 - **Sn:** Muestra correlaciones débiles con Al (0,37) y Cu (0,17), lo que puede indicar alguna relación con estos metales.
 - **Ni:** No presenta correlaciones significativas con otras variables, sugiriendo independencia.
 - **Pb:** Exhibe una correlación moderada con Cu (0,50) y Ag (0,39), lo cual podría sugerir que niveles más altos de plomo están asociados con estos metales.
 - **Mo:** Presenta correlaciones negativas moderadas con V40 (-0,37) y V100 (-0,41), lo que indica que el molibdeno puede estar asociado con viscosidades más bajas del aceite.
- **TAN:** No muestra correlaciones significativas con las demás variables, lo que sugiere que la acidez del aceite no está relacionada con las propiedades de viscosidad ni con la presencia de metales de desgaste.
- **H₂O:** Aunque en teoría la presencia de agua puede afectar la viscosidad del aceite, en esta matriz de correlación no se observan correlaciones significativas entre el contenido de agua y la viscosidad (V40: 0,05 y V100: 0,03). Esto puede deberse a la eficacia de los aditivos del aceite para mantener la viscosidad estable o a la variabilidad de las muestras analizadas.

Capítulo 3: Resultados y discusión

- **TBN:** Muestra una correlación positiva débil con IV (0,26) y una correlación negativa muy débil con V40 (-0,17) y V100 (-0,14), lo que sugiere que la alcalinidad del aceite tiene una relación mínima con la viscosidad.

3.2.1.3 Análisis gráfico

RealStats no solo ofrece robustez numérica, sino que también tiene la capacidad de la visualización gráfica.

3.2.1.3.1 Histogramas de frecuencias

Los histogramas de frecuencias muestran la disposición de los datos de forma gráfica. A continuación, se muestran los histogramas más significativos (**Figura 3-1**).

La **Figura 3-1-a** muestra el histograma de la viscosidad a 100 °C y se puede interpretar de la siguiente manera:

- **Concentración de valores:** La mayor concentración de valores se encuentra en el rango de viscosidad más bajo, específicamente alrededor de 8,93 a 9,43 cSt. Esto sugiere que la mayoría de las muestras analizadas tienen una viscosidad en este rango a 100 °C, lo que podría mostrar un comportamiento generalizado o una especificación común para este tipo particular de aceite (O-1178).
- **Distribución de viscosidad:** La distribución sesgada hacia la izquierda indica que hay menos muestras con viscosidades más altas a 100 °C. Esto puede implicar que los aceites O-1178 tienden a ser menos viscosos bajo condiciones de alta temperatura.
- **Potenciales valores atípicos (outliers):** La presencia de barras individuales hacia la derecha del histograma indica la existencia de valores atípicos con viscosidades más altas, lo cual podría ser el resultado de contaminación del aceite, variaciones en la formulación del producto, o posibles errores de medición.

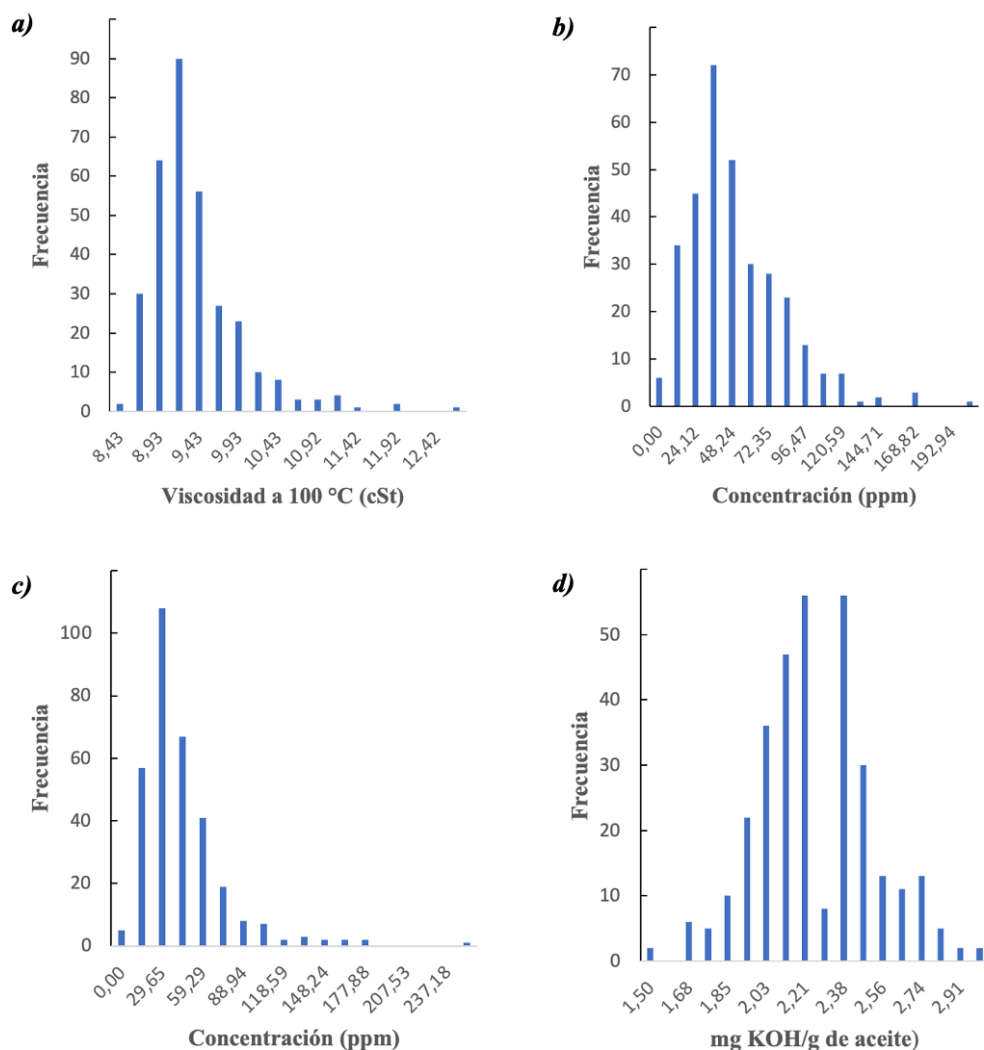


Figura 3-1: Histogramas más significativos para el aceite O-1178: **a)** Viscosidad a 100 °C; **b)** Concentración de cobre; **c)** Concentración de plomo; **d)** TAN)

En la **Figura 3-1-b**, histograma de cobre, se observa lo siguiente:

- La distribución de cobre muestra una moda en el extremo inferior, con un pico destacado que señala que la mayoría de las muestras tienen una concentración de cobre baja. Esto implica una tasa de desgaste de los componentes de cobre baja o una filtración de partículas de cobre en el aceite eficiente.
- Existen algunos datos extremos con concentraciones más altas de cobre, lo que podría indicar desgaste o contaminación puntual.
- La frecuencia de cobre se reduce a medida que la concentración de este metal se hace más alta, pero hay una gran variación en la concentración de cobre.
- Presenta frecuencias bajas en los extremos más altos, sugiriendo que los altos niveles de metales no son comunes lo que podría ser indicativo de problemas.

Capítulo 3: Resultados y discusión

Para el histograma de plomo, **Figura 3-1-c**, se puede observar que:

- La mayoría de las muestras tienen una concentración de plomo baja, lo que se observa en la moda para el plomo que está en el extremo inferior de la escala. Esto es generalmente preferible para prevenir la toxicidad y el deterioro en las piezas que contienen plomo.
- El histograma de plomo presenta algunos valores atípicos, aunque no tantos como el cobre. Estos valores podrían indicar casos fuera de lo normal que necesitan ser revisados.
- El plomo tiene una menor frecuencia a medida que la concentración aumenta, con pocos datos anómalos.
- Al igual que el cobre, presenta escasas frecuencias altas en las zonas más altas, lo que revela que los niveles de metales son reducidos y podrían indicar problemas.

Para el histograma del número de acidez total (TAN), **Figura 3-1-d**, se observa lo siguiente:

- TAN tiene una moda más próxima al centro y menos marcada que los histogramas del cobre y del plomo, lo que muestra una distribución más homogénea de la acidez en las muestras de aceite.
- Algunos valores de TAN son más elevados, pero la distribución es menos asimétrica que en los histogramas de metales cobre y plomo, lo que indica que hay menos variación en la acidez del aceite entre las muestras.
- El TAN muestra una distribución de concentración más estrecha y centrada que los histogramas de metales cobre y plomo, lo que sugiere que el proceso de acidificación del aceite es más uniforme o regulado que el desgaste metálico.
- Las frecuencias en los bordes son relativamente más elevadas que en los histogramas de metales cobre y plomo, lo que sugiere que el proceso de acidificación del aceite es más uniforme o regulado, pero no tan marcadas como las concentraciones bajas y medias, lo que indica una acidez generalmente moderada en las muestras.

Analizando de manera conjunta los resultados anteriores se puede llegar a la conclusión de que el aceite lubricante O-1178 muestra un estado generalmente bueno en términos de desgaste metálico y acidez, ya que tiene bajas concentraciones de metales y un TAN moderado. Sin embargo, se sugiere examinar los casos con concentraciones elevadas de metales, especialmente cuando se detectan valores atípicos y altos, para determinar si existe algún problema. En tales situaciones, es recomendable realizar un seguimiento del motor o la caja de

Capítulo 3: Resultados y discusión

cambios afectados y evaluar si es necesario tomar medidas correctivas. El TAN indica que el nivel de degradación del aceite suele ser bajo a moderado, pero también hay valores más elevados que podrían señalar situaciones específicas en las que el aceite puede estar llegando al final de su vida útil.

3.2.1.3.2 Gráficos de caja y bigotes

Los gráficos de caja y bigotes proporcionan una representación visual efectiva de la distribución de múltiples variables, permitiendo la identificación de tendencias centrales, dispersión, y la presencia de valores atípicos. La comparación entre las cajas de diferentes colores facilita la evaluación de diferencias significativas entre los grupos o condiciones experimentales, contribuyendo a una interpretación más rica y detallada en el contexto del análisis científico.

Este tipo de gráfico es un método gráfico que resume cinco estadísticos descriptivos:

- Mínimo: es el valor más bajo no atípico.
- Primer cuartil (Q_1): es el 25% de los datos.
- Mediana (Q_2).
- Tercer cuartil (Q_3): es el 75% de los datos.
- Máximo: es el valor más alto no atípico.

A continuación, se describe cada uno de los elementos presentes en la **Figura 3-2** y su significado[104]:

- **Caja (Boxplot):** Las cajas representan el rango intercuartílico (RIC), que es el rango entre el primer cuartil (Q_1) y el tercer cuartil (Q_3). Este rango contiene el 50% central de los datos. Los colores naranja y gris se usan para diferenciar entre dos grupos o condiciones en el análisis.
 - Caja de color naranja: Representa la diferencia entre Q_3 y la mediana del conjunto de datos.
 - Caja de color gris: Representa la diferencia entre Q_3 y la mediana del conjunto de datos.

Es importante señalar que una caja de mayor tamaño no necesariamente indica la presencia de más datos, sino que éstos están más dispersos.

Capítulo 3: Resultados y discusión

- **Línea horizontal que divide las cajas:** La línea que separa la caja naranja de la gris representa la mediana (Q_2) de los datos, que es el valor central cuando los datos están ordenados.
- **Cruces negras (X):** Las cruces indican la media aritmética de los valores para cada variable. La media es sensible a los valores extremos, por lo que su posición en relación con la mediana puede proporcionar información sobre la simetría o asimetría de la distribución. Una gran discrepancia entre la media y la mediana podría indicar una distribución sesgada.
- **Bigotes (líneas verticales):** Los bigotes son las líneas que se extienden desde la parte superior e inferior de las cajas. Su función es mostrar el rango de los datos que no se consideran atípicos. Los bigotes se extienden hasta los valores más alejados (tanto por encima como por debajo) que aún están dentro de un rango considerado "normal". Este rango se calcula como 1.5 veces el rango intercuartílico (RIC), que es la distancia entre el primer cuartil (Q_1) y el tercer cuartil (Q_3).
 - Bigote superior: Se extiende desde el borde superior de la caja (Q_3) hasta el valor máximo de los datos, siempre que no supere $Q_3 + 1.5$ veces el RIC.
 - Bigote inferior: Se extiende desde el borde inferior de la caja (Q_1) hasta el valor mínimo de los datos, siempre que no sea menor que $Q_1 - 1.5$ veces el RIC.

Por tanto, los bigotes ayudan a mostrar la dispersión de la mayoría de los datos sin incluir los valores atípicos. Representan el rango donde se encuentran la mayoría de los datos.
- **Círculos azules:** Estos círculos azules representan los valores atípicos, también conocidos como outliers. Los outliers son puntos de datos que se encuentran significativamente alejados del resto de las observaciones. Estos valores pueden afectar notablemente al análisis estadístico y, por lo tanto, es esencial detectarlos visualmente para un correcto tratamiento analítico.

Capítulo 3: Resultados y discusión

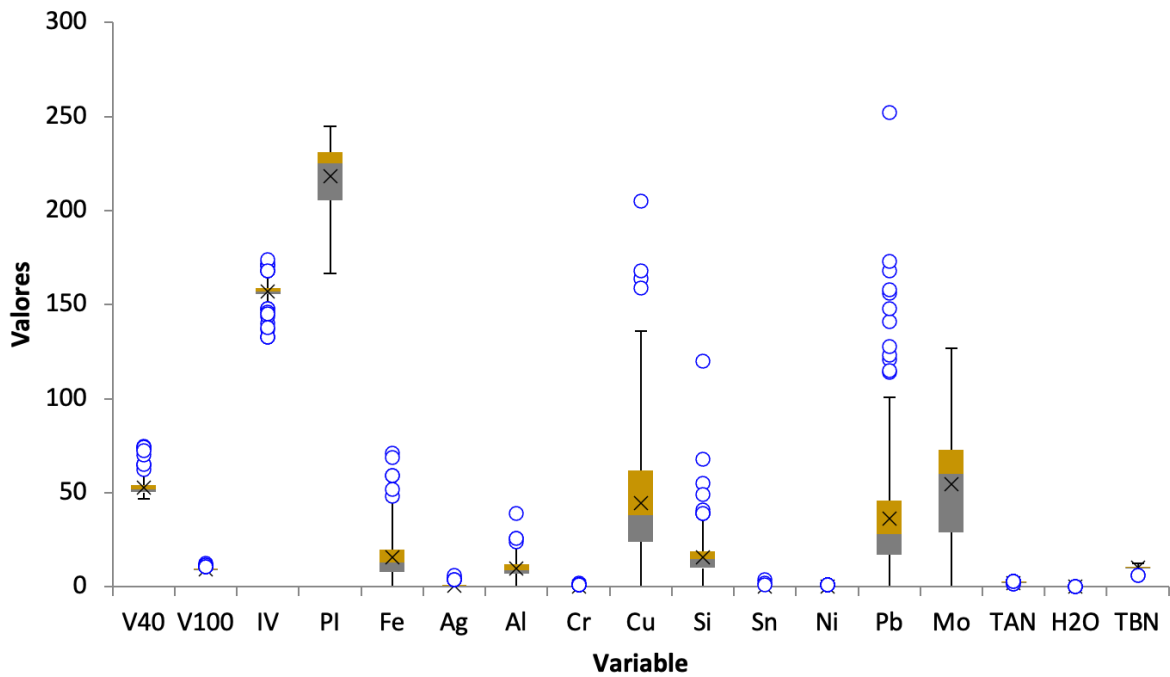


Figura 3-2: Gráfico de caja y bigotes del aceite O-1178

A continuación, se muestra un análisis para cada variable:

- **Viscosidad a 40 y 100°C (V40 y V100):** presentan una agrupación de datos con medias y medianas próximas, lo que señala una distribución equilibrada. La existencia de valores anómalos indica variaciones en la viscosidad en algunos ejemplos, pero la mayor parte de los datos se sitúan cerca de la media.
- **Índice de viscosidad (IV):** el IV tiene una variabilidad moderada y apenas presenta valores atípicos significativos. La media y la mediana se aproximan bastante, lo que implica que no hay una gran asimetría debida a valores extremos. Esto significa que el IV de las muestras de aceite de transmisiones es bastante estable en el conjunto de datos presentado.
- **Punto de inflamación (PI):** el PI presenta una variabilidad limitada entre las muestras, con la mayoría de los valores concentrados alrededor de la mediana. La mediana, indicada por la línea dentro de la caja, está ubicada hacia el extremo superior del rango intercuartílico (RIC), lo que sugiere que más de la mitad de las muestras tienen puntos de inflamación en el lado más alto del RIC. La caja en sí no es muy larga, lo que indica que los valores de PI se agrupan relativamente cerca unos de otros.

Capítulo 3: Resultados y discusión

- **Fe:** Presenta una mediana baja con respecto a su rango intercuartílico, y hay un número notable de valores atípicos por encima del bigote superior, lo que podría indicar episodios de desgaste en componentes de hierro o acero en las transmisiones.
- **Ag:** La distribución de la plata muestra una mediana muy cercana al borde inferior de la caja, con un rango intercuartílico estrecho y sin valores atípicos visibles. Esto indica una baja variabilidad y que los niveles de plata son consistentemente bajos en las muestras.
- **Al:** Similar al hierro, el aluminio muestra una mediana más baja dentro de un rango intercuartílico más amplio y presenta valores atípicos por encima del bigote superior, lo que sugiere cierta variabilidad y posibles incidentes de desgaste en componentes que contienen aluminio.
- **Cr:** El cromo presenta una mediana baja y un rango intercuartílico relativamente estrecho sin valores atípicos evidentes, indicando que los niveles de cromo son generalmente bajos y consistentes.
- **Cu:** El cobre muestra una distribución con una mediana ligeramente elevada y un rango intercuartílico algo más amplio, con varios valores atípicos arriba, lo que sugiere variaciones en la concentración de cobre que podrían estar asociadas a desgaste o contaminación.
- **Si:** La caja muestra una variabilidad moderada en los valores, con algunos valores atípicos bastante alejados de la media, que está marcada con una 'X'. La mediana no está en el centro de la caja, lo que indica una distribución asimétrica.
- **Pb:** Esta variable presenta una gran dispersión de datos con varios valores atípicos. La mediana está en el extremo inferior de la caja, sugiriendo que la mayoría de los valores son bajos, pero hay una cola larga de valores altos.
- **Mo:** Hay una concentración de datos cerca de la mediana y no presenta valores atípicos. Esto puede indicar que los valores de molibdeno no varían tanto como en otros elementos.
- **TAN:** La caja del número de acidez total es muy estrecha, lo que indica que los valores del segundo al tercer cuartil están bastante concentrados.

Capítulo 3: Resultados y discusión

3.2.1.3.3 Gráficos de dispersión

Los gráficos de dispersión son una herramienta visual que facilita identificar patrones, tendencias y correlaciones que podrían ser difíciles de detectar en análisis meramente numéricos.

Los gráficos de dispersión son representaciones visuales que muestran cómo una variable se asocia con otra. Al representar dos variables en un eje de coordenadas, se pueden apreciar las tendencias y patrones de su interacción. Estos gráficos son especialmente útiles para detectar correlaciones moderadas y fuertes, así como para eliminar relaciones débiles o nulas entre los datos.

Los resultados de la matriz de correlación, **Tabla 3-4**, muestran que existen algunas correlaciones moderadas entre elementos químicos como: Fe-Al, Fe-Cu, Al-Cu y Cu-Pb, que se pueden observar en los gráficos de dispersión. Estas correlaciones podrían sugerir que hay relaciones ocultas que requieren más estudio. Las demás correlaciones son débiles o casi inexistentes.

A continuación, se muestran las correlaciones moderadas encontradas para examinar visualmente la correlación entre dos variables. La forma en que se distribuyen estos puntos puede señalar la presencia de una correlación lineal, donde un patrón definido implica una relación sólida, mientras que una dispersión más arbitraria de puntos sugiere una relación más débil o inexistente.

El gráfico de dispersión de la viscosidad a 40 y 100°C, **Figura 3-3**, se muestra a continuación:

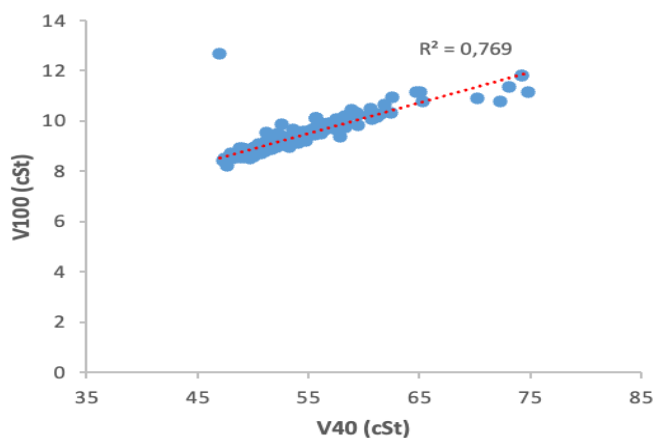


Figura 3-3: Gráfico de dispersión de la viscosidad a 40 y 100°C para el O-1178

La viscosidad del aceite O-1178 a 40°C tiene una fuerte relación positiva con su viscosidad a 100°C, lo que implica que una de ellas puede predecir la otra de forma eficaz. Esto se debe a

Capítulo 3: Resultados y discusión

que la viscosidad del aceite tiende a disminuir de forma regular con el aumento de la temperatura. La mayoría de los puntos de datos se agrupan en el centro del gráfico. Esto sugiere que hay una concentración de mediciones en un rango específico para ambas viscosidades. Un R^2 de 0,769 es alto y muestra que la viscosidad medida a una de estas temperaturas puede utilizarse para calcular la otra con bastante exactitud. De hecho, hay una relación entre ambas variables que es el índice de viscosidad (IV). En la gráfica se puede ver que hay un valor atípico. Esto podría deberse a un error de medición, una condición anómala de la muestra o una característica particular de ese caso específico que requiere investigación adicional.

El gráfico de dispersión de la concentración de hierro y aluminio, **Figura 3-4**, se muestra a continuación:

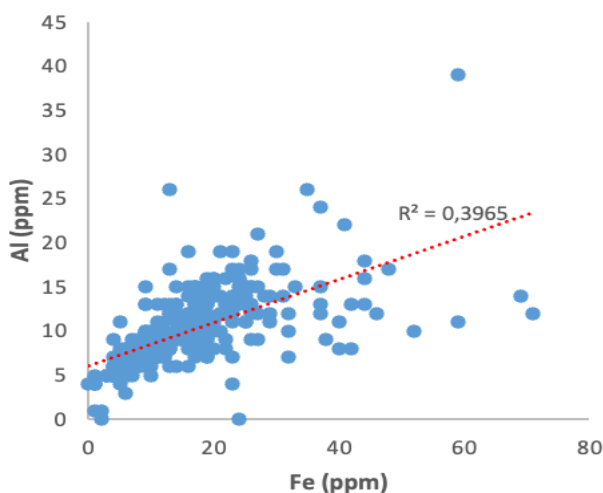


Figura 3-4: Gráfico de dispersión de la concentración de hierro y aluminio para el O-1178

En este gráfico, los datos no están tan agrupados y no muestran un patrón lineal tan evidente como en el gráfico anterior, **Figura 3-3** de la viscosidad. La línea de puntos roja muestra una tendencia positiva, pero los datos están tan dispersos que indican que la relación entre hierro y aluminio no es muy fuerte.

Esta gran variabilidad sugiere la influencia de otros factores en los niveles de aluminio, o que la relación no es estrictamente lineal. La presencia de ambos metales en el aceite podría estar relacionada con el desgaste de componentes que contienen hierro y aluminio, pero la correlación entre ellos no es significativa. Esto podría deberse a que las diferentes partes lubricadas de la caja de cambios se deterioran a distintas velocidades, o a la existencia de otras fuentes de estos metales en el aceite.

El gráfico de dispersión de la concentración de hierro y cobre, **Figura 3-5**, se muestra a continuación:

Capítulo 3: Resultados y discusión

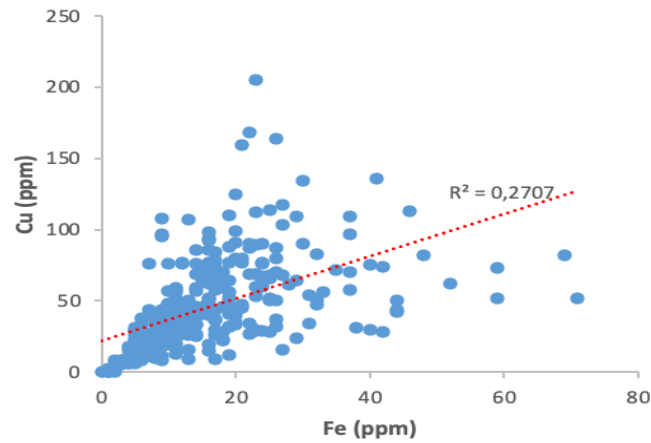


Figura 3-5: Gráfico de dispersión de la concentración de hierro (Fe) y cobre (Cu) para el O-1178

Similar al gráfico de Fe-Al, **Figura 3-4**, este gráfico, **Figura 3-5**, también muestra una correlación positiva, como se indica con la línea de puntos roja ascendente entre el hierro y el cobre. Esto podría significar que hay un desgaste conjunto en componentes que tienen ambos metales.

El valor de R^2 indica una relación que no explica la mayoría de la variabilidad en las concentraciones de cobre con el hierro. El Fe y el Cu que se encuentran juntos indican que hay componentes con estos dos metales que se están desgastando. No obstante, como la correlación no es muy fuerte, puede haber metales que vengan de partes diferentes y se desgasten a velocidades distintas. Como se dijo anteriormente, el cobre en las cajas de cambios puede proceder de sincronizadores, cojinetes de bronce o elementos electrónicos, mientras que el hierro puede provenir de los engranajes y los ejes.

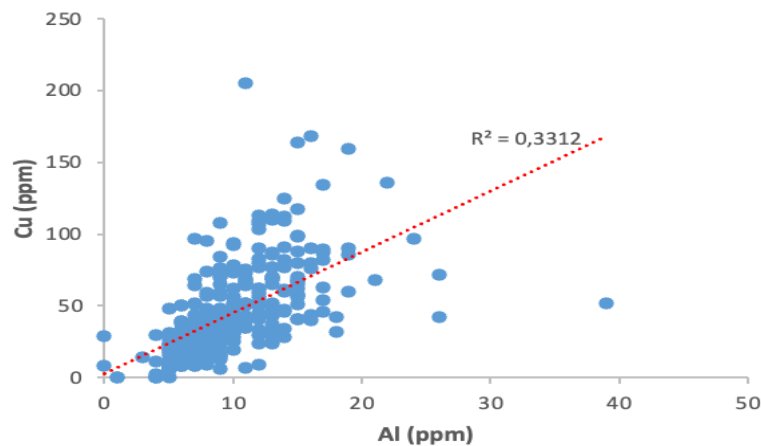


Figura 3-6: Gráfico de dispersión de la concentración de aluminio y cobre para el O-1178

Tal y como se observa en la **Figura 3-6**, la correlación es algo mayor que las anteriores, lo que implica una relación más consistente entre Al y Cu que entre Cu y Pb o Fe y Cu. Sin embargo, la variación de Al solo explica menos de un tercio de la variación de Cu, lo que señala

Capítulo 3: Resultados y discusión

que hay otros factores que influyen en los niveles de Cu. Una posible explicación de la presencia tanto del aluminio como del cobre es que procedan de partes de la transmisión que están en contacto o que son parte de una misma aleación. Estos metales pueden indicar el desgaste habitual de cojinetes, casquillos, engranajes o sincronizadores que los utilizan. Sin embargo, como la correlación no es muy alta, puede que las fuentes de estos metales no se deterioren al mismo ritmo, o que haya otras fuentes de estos metales en el sistema. La relación moderada entre aluminio y cobre indica que los niveles de estos metales en el aceite están relacionados, pero también señala la importancia de tener en cuenta otros factores o fuentes de desgaste.

En el siguiente gráfico, **Figura 3-7**, se observa la relación entre el cobre y el plomo, que son los metales más abundantes en los aceites analizados.

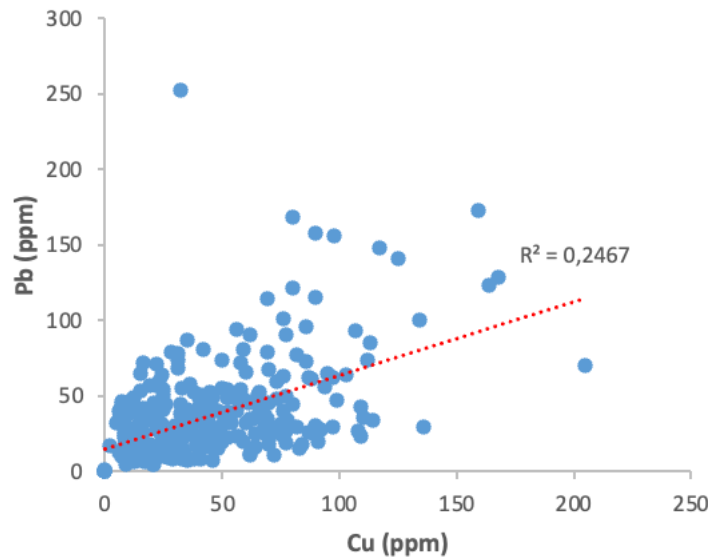


Figura 3-7: Gráfico de dispersión de la concentración de cobre y plomo para el O-1178

La correlación entre el Cu y el Pb es bastante baja, con un R^2 de 0,2467. Esto sugiere que las concentraciones de plomo no solo dependen del cobre en el aceite de transmisiones O-1178, sino también de otros factores.

La presencia de cobre y plomo en el aceite indica cierto nivel de desgaste. Aunque algunas muestras presentan altas concentraciones de estos metales, la relación no es lo suficientemente fuerte como para concluir que uno predice al otro. Esto muestra la importancia de usar un método de diagnóstico más integral que considere la combinación de análisis de aceite, condiciones de operación, y las especificaciones del fabricante del vehículo.

La cantidad de metales en el aceite, que refleja el desgaste de los componentes de la caja de cambios, puede variar en función de ~~según~~ la temperatura y la carga a las que se exponga el sistema. Por eso, una correlación moderada indica que hay una relación entre los niveles de los

Capítulo 3: Resultados y discusión

elementos metálicos que se muestran en las gráficas anteriores, pero no es determinante. Sin embargo, se debe vigilar la presencia de metales y considerar realizar inspecciones adicionales si se detectan aumentos o si los niveles no son coherentes con el historial típico de la caja de cambios.

De acuerdo con los resultados, si estos metales alcanzan niveles altos, sobre todo si aumentan de forma gradual o repentina, sería recomendable hacer un mantenimiento preventivo para evitar fallos.

3.2.1.3.4 Diagramas QQ (Cuantil-Cuantil)

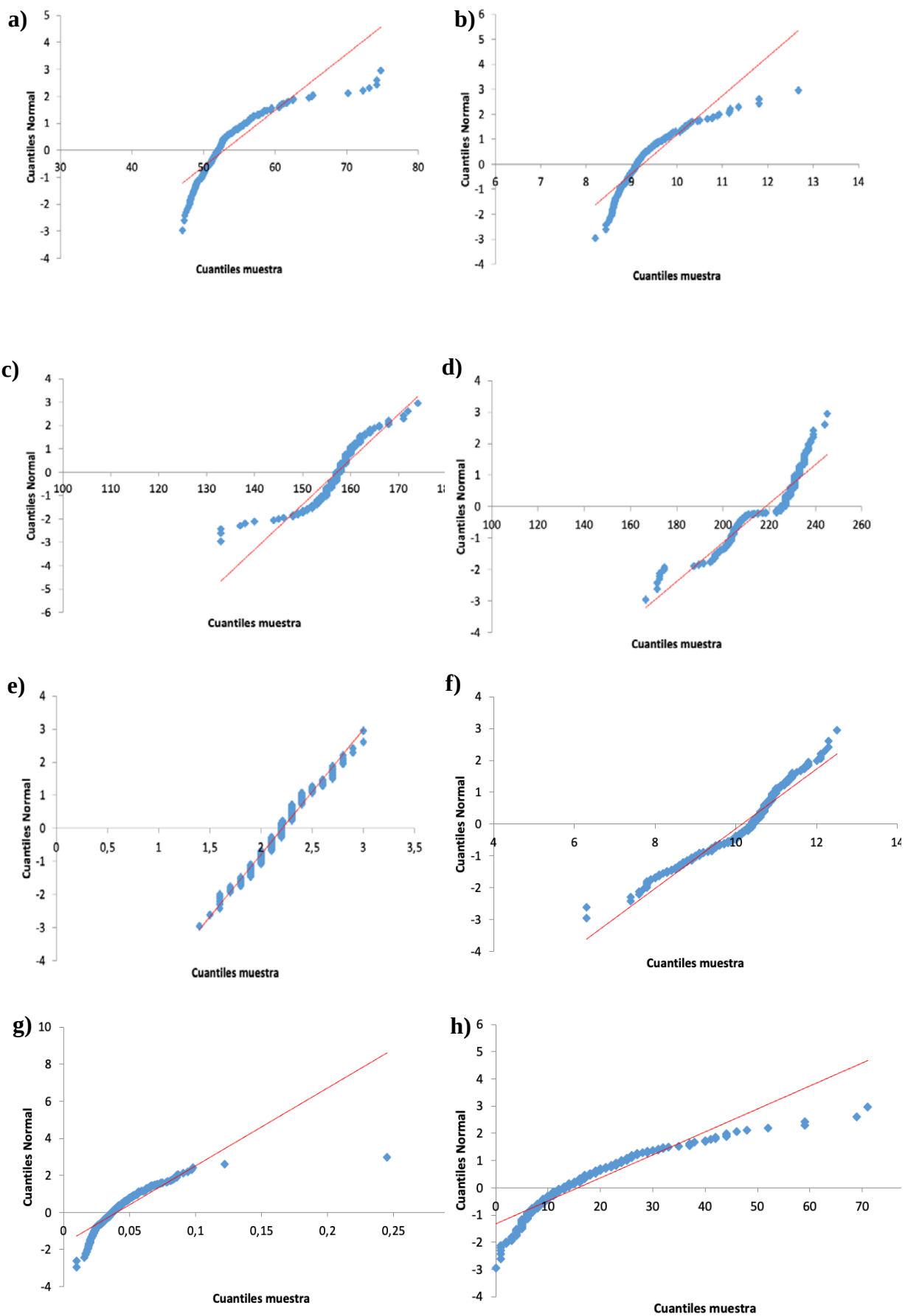
Para el análisis estadístico, es fundamental establecer cómo se comportan los datos que se analizan. Los diagramas QQ son una herramienta estadística que permite contrastar distribuciones empíricas con modelos teóricos, facilitando la evaluación visual de la semejanza entre los datos y una distribución normal.

El gráfico cuantil-cuantil, o diagrama QQ, es un método que compara dos distribuciones basándose en sus cuantiles. Si se quiere contrastar una muestra con una distribución teórica conocida, como la normal, el gráfico cuantil-cuantil ubica los cuantiles de los datos junto a los cuantiles teóricos. Si la muestra en cuestión se ajusta a la distribución comparada, los puntos en el gráfico formarán una línea recta aproximadamente.

La forma de interpretar un diagrama QQ, **Figura 3-8**, es observar la linealidad de los puntos representados. Si los puntos se alinean cerca de la línea recta central, significa que la distribución de la muestra se parece a la distribución normal, al menos en el centro de la distribución. Este grado de ajuste es un signo de normalidad y, por lo tanto, puede confirmar ciertas suposiciones estadísticas necesarias para tests y modelos que requieren normalidad.

Por otro lado, las desviaciones significativas de esta linealidad, **Figura 3-8**, son indicativas de que los datos no siguen una distribución normal. En los diagramas QQ, estas desviaciones pueden manifestarse como curvas o patrones sistemáticos que se apartan de la línea de referencia, lo que llevaría a rechazar la hipótesis nula de que los datos provienen de una.

Capítulo 3: Resultados y discusión



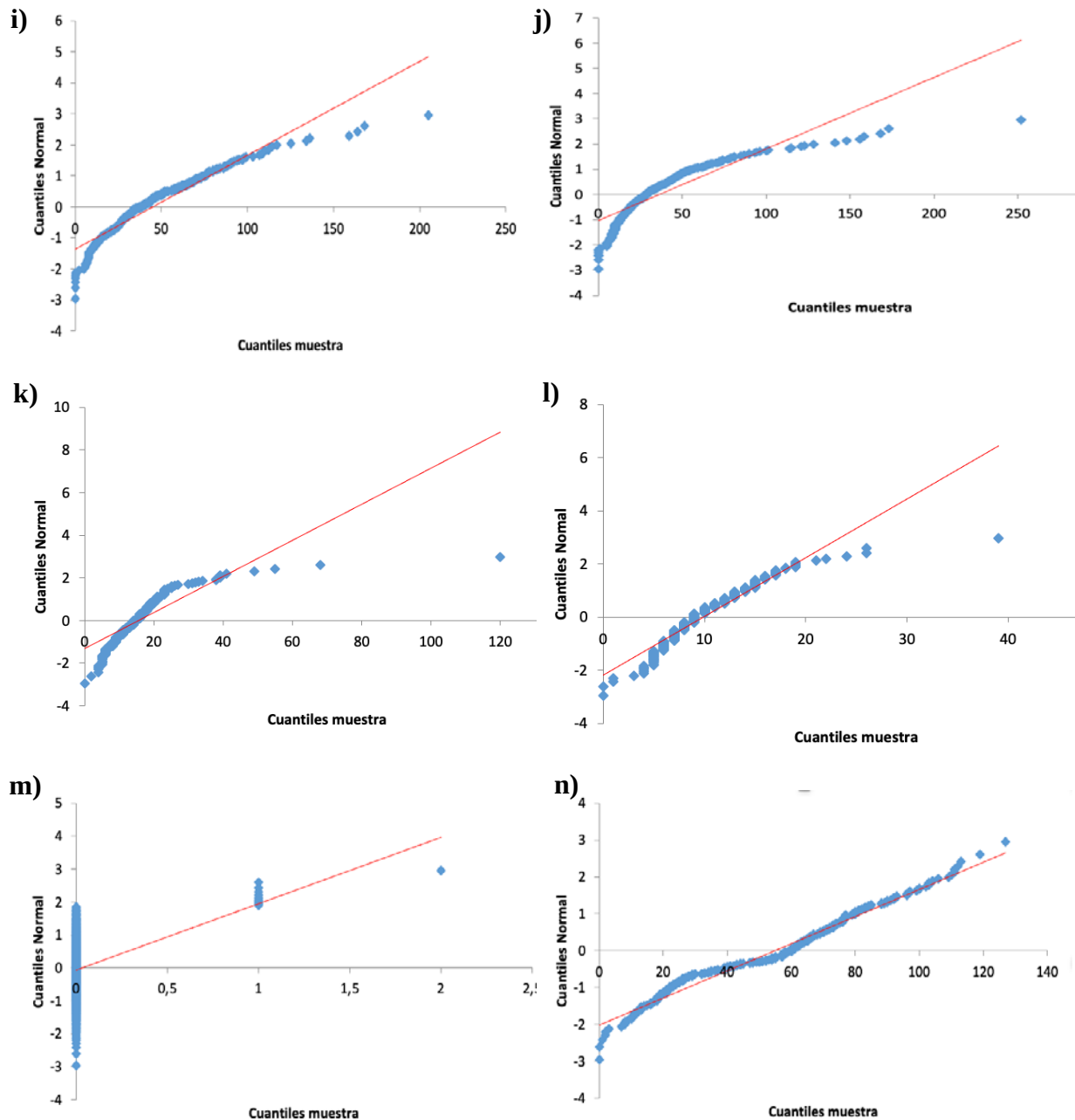


Figura 3-8: Diagramas QQ-Plot para el aceite O-1178 (a) QQ-Plot Viscosidad a 40 °C; b) QQ-Plot Viscosidad a 100 °C; c) QQ-Plot Índice de viscosidad; d) QQ-Plot Punto de inflamación; e) QQ-Plot TAN; f) QQ-Plot TBN; g) QQ-Plot H₂O; h) QQ-Plot hierro; i) QQ-Plot cobre; j) QQ-Plot plomo; k) QQ-Plot silicio; l) QQ-Plot aluminio; m) QQ-Plot cromo; n) QQ-Plot molibdeno

3.2.1.4 Evaluación de la normalidad

Para verificar que los datos no siguen una distribución normal, se pueden aplicar pruebas estadísticas diseñadas para este fin, como el test de Shapiro-Wilk. Si el resultado de la prueba arroja valores bajos para el estadístico del test, esto sugiere una falta de normalidad, lo cual es relevante para la toma de decisiones en el análisis estadístico posterior, debido a la suposición de normalidad que poseen muchos métodos estadísticos.

Capítulo 3: Resultados y discusión

Como ya se ha mencionado, se trata de un contraste de ajuste que trata de comprobar si los datos provienen de una distribución normal. La hipótesis nula es que la variable se distribuye como una normal. Si el p-valor es menor que 0,05, se rechaza la hipótesis nula, es decir, los datos no se distribuyen según una distribución probabilística normal.

A continuación, se presentan los resultados del test de Shapiro-Wilk aplicado a las distintas variables del aceite O-1178 en la **Tabla 3-6**. En esta tabla, se muestran los valores del estadístico W, los p-valores correspondientes y la decisión sobre la normalidad de cada variable basada en un nivel de significancia (alpha) de 0,05.

Tabla 3-6: Test de Shapiro-Wilk para el aceite O-1178

	W-Estadístico	p-valor	alpha	normal
V40	0,79	0,00*	0,05	no
V100	0,84	0,00*	0,05	no
IV	0,84	0,00*	0,05	no
PI	0,89	0,00*	0,05	no
F	0,86	0,00*	0,05	no
Ag	0,67	0,00*	0,05	no
Al	0,9	0,00*	0,05	no
Cr	0,16	0,00*	0,05	no
Cu	0,91	0,00*	0,05	no
Si	0,68	0,00*	0,05	no
Sn	0,06	0,00*	0,05	no
Ni	0,37	0,00*	0,05	no
Pb	0,77	0,00*	0,05	no
Mo	0,97	0,00*	0,05	no
TAN	0,97	0,00*	0,05	no
H₂O	0,77	0,00*	0,05	no
TBN	0,94	0,00*	0,05	no

*Los valores p son menores a 0,01 y se representan como 0,00 en la tabla

Puede comprobarse que los p-valores para todas las variables en estudio tienen un valor inferior a 0,05 por lo que no podemos asumir que ninguna variable independiente sea normal.

3.2.1.5 Análisis de componentes principales

Cuando se recoge información de una muestra de datos, lo más frecuente es tomar el mayor número posible de variables. Sin embargo, con demasiadas variables es difícil visualizar relaciones entre las mismas, y lo normal es que estén relacionadas o que midan lo mismo bajo distintos puntos de vista. Se hace necesario, pues, reducir el número de variables. El concepto de más información se relaciona con el de mayor variabilidad o varianza. Es decir, cuanto mayor sea la variabilidad de los datos (varianza) se considera que existe más información [106].

Se puede transformar el conjunto original de variables en otro conjunto de nuevas variables no correlacionadas entre sí (que no tenga redundancia en la información) llamado conjunto de componentes principales. Las nuevas variables transformadas son combinaciones lineales de las anteriores y se van construyendo según el orden de importancia en cuanto a la variabilidad total que recogen de la muestra, esto es, cuyas varianzas vayan decreciendo progresivamente. Se buscan $m < p$ variables que sean combinaciones lineales de las p originales y que no estén correlacionadas, recogiendo la mayor parte de la información o variabilidad de los datos. El análisis de componentes principales es una técnica matemática que no requiere la suposición de normalidad multivariante de los datos [106].

Cada componente será combinación lineal de las variables originales y se calculan eligiendo los coeficientes de modo que las componentes resultantes no estén correlacionadas entre sí, maximizando la varianza, pero de modo que vaya siendo cada vez menor, calculando dichos coeficientes mediante el método de los multiplicadores de Lagrange, lo que implica obtener un conjunto de autovalores y autovectores. Se demuestra que cada autovalor corresponde a la varianza de su componente principal asociado.

Habitualmente, se conservan sólo aquellos componentes que recogen la mayor parte de la variabilidad. Normalmente se aconseja llegar al menos al 80% del total de varianza explicada. Sin embargo, existen otros criterios, como el de la media aritmética, que indican que deben quedarse las componentes para las que su autovalor sea mayor que 1.

Se realiza un análisis de componentes principales para la muestra de análisis del aceite O-1178 y se valora su aplicación para posteriores modelos de regresión. En el estudio se obtienen los siguientes componentes principales que se muestran en la **Tabla 3-7**:

AUTOVECTORES																
	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	CP 6	CP 7	CP 8	CP 9	CP 10	CP 11	CP 12	CP 13	CP 14	CP 15	CP 16
V100	-0,263	-0,278	-0,357	-0,126	-0,026	-0,271	-0,086	-0,071	-0,180	-0,308	-0,455	-0,237	-0,311	-0,190	-0,281	-0,145
IV	-0,070	0,178	-0,526	-0,202	-0,237	0,254	0,197	0,364	-0,045	0,057	0,394	0,188	-0,376	0,005	-0,131	-0,023
PI	0,263	0,167	0,087	-0,552	-0,109	-0,086	-0,217	-0,020	0,131	0,082	-0,129	-0,326	-0,223	0,565	0,017	0,088
Fe	0,395	0,123	-0,025	0,218	-0,123	-0,061	0,112	0,154	-0,071	-0,222	-0,435	0,324	-0,318	-0,050	0,343	0,394
Ag	0,279	-0,250	-0,073	-0,118	0,261	0,174	0,077	-0,224	-0,439	0,618	-0,162	0,147	-0,177	-0,045	0,029	-0,171
Al	0,426	0,105	-0,192	0,250	0,054	-0,053	0,042	0,078	0,114	-0,218	-0,080	0,083	0,111	0,260	-0,054	-0,733
Cr	-0,057	-0,027	0,148	0,393	-0,209	0,340	-0,679	0,228	-0,293	0,033	0,016	-0,122	-0,178	0,091	-0,047	-0,059
Cu	0,446	-0,127	0,134	0,127	0,113	0,071	0,148	0,078	-0,028	-0,108	0,108	-0,127	0,008	-0,024	-0,750	0,319
Si	0,088	0,419	-0,313	-0,059	-0,065	-0,256	-0,198	-0,223	-0,563	-0,092	0,106	0,084	0,419	0,046	-0,069	0,175
Sn	0,183	0,007	-0,345	0,264	0,089	-0,475	-0,329	0,022	0,391	0,411	0,162	-0,123	-0,113	-0,205	0,027	0,127
Ni	0,179	-0,238	-0,184	-0,271	-0,286	0,329	-0,361	-0,308	0,347	-0,093	-0,107	0,386	0,229	-0,186	-0,102	0,041
Pb	0,314	-0,223	-0,166	-0,199	0,329	0,206	-0,100	0,146	-0,109	-0,338	0,261	-0,397	0,085	-0,268	0,411	0,043
Mo	0,189	0,409	0,397	-0,199	-0,204	-0,100	-0,045	-0,134	-0,040	-0,025	0,106	-0,054	-0,266	-0,593	-0,061	-0,291
TAN	-0,067	0,269	-0,174	0,291	0,174	0,331	0,075	-0,674	0,131	-0,145	0,090	-0,190	-0,323	0,111	0,026	0,087
H₂O	-0,149	0,170	0,106	-0,179	0,691	-0,057	-0,329	0,114	0,061	-0,179	0,042	0,457	-0,194	0,042	-0,133	0,003
TBN	-0,072	0,454	-0,166	-0,032	0,193	0,363	0,023	0,269	0,163	0,221	-0,499	-0,246	0,273	-0,215	-0,103	0,032

Capítulo 3: Resultados y discusión

El scree plot o diagrama de sedimentación sirve para visualizar la importancia de cada componente principal y puede utilizarse para determinar el número de componentes principales que es conveniente conservar.

Para el caso del aceite O-1178 y carro LEOPARD, se observa en la **Tabla 3-8** que para alcanzar el 80% de variabilidad recogida, sería necesario quedarnos con las primeras diez componentes principales. En cambio, si se siguiera el criterio de la media aritmética por el cual se conservan los que tienen autovalor mayor que 1, sería suficiente con las seis primeras componentes principales, que explican cerca de un 65% de variabilidad.

Tabla 3-8: Diagrama de sedimentación

Autovalor	%	% Acumulado
3,331	20,82%	20,82%
1,911	11,94%	32,76%
1,387	8,67%	41,43%
1,316	8,22%	49,65%
1,129	7,06%	56,71%
1,107	6,92%	63,63%
0,952	5,95%	69,58%
0,932	5,83%	75,40%
0,708	4,42%	79,83%
0,641	4,01%	83,83%
0,615	3,84%	87,67%
0,510	3,19%	90,86%
0,491	3,07%	93,93%
0,410	2,56%	96,49%
0,291	1,82%	98,31%
0,271	1,69%	100,00%

Dado que en el apartado del cálculo de los coeficientes de correlación de Pearson se vio que salvo la V40 y V100, el resto de las variables se correlacionaba de manera moderada o débil, se puede proseguir el estudio con las variables de las medidas fisicoquímicas originales (V100, IV, PI, Fe, ...). No obstante, en el siguiente estudio se prescindirá como variable independiente de la V40 por estar muy correlacionada con la variable V100.

3.2.1.6 Regresión logística binaria

Cuando los datos no se ajustan a la normalidad, la regresión logística binaria ofrece un modelo robusto para analizar los datos. Este modelo es adecuado cuando se quiere comprender la relación entre una variable dependiente cualitativa de dos categorías (0 o 1) y variables independientes cuantitativas. Los coeficientes de la ecuación logística se obtienen mediante el método de máxima verosimilitud, que mejora la predicción de la probabilidad de que ocurra un evento.

Aquí, el objetivo principal no es, como en la regresión lineal, estimar directamente el valor de una variable dependiente usando variables predictoras. En cambio, se trata de calcular la probabilidad de que ocurra un evento específico, dadas las variables independientes. La escala de estas probabilidades va de 0 a 1, donde un valor cercano a 0 señala que el evento es muy improbable, mientras que un valor próximo a 1 indica una alta probabilidad de que el evento efectivamente ocurra.

Tal y como se observa en la **Tabla 3-9**, el modelo tiene una buena capacidad predictiva, pero se observa que las muestras tienen pocos casos de "no conformidad", lo que hace que el modelo tenga más dificultades para predecir este escenario. Sería conveniente contar con una muestra con una distribución más equilibrada entre registros "conformes" y "no conformes".

Se elimina de la regresión la variable V40 como regresora pues está muy correlacionada con V100 como se comentó en el análisis de la correlación.

Los resultados que se obtienen haciendo uso de este método de regresión logística binaria se muestran en la siguiente **Tabla 3-9**:

Tabla 3-9: Resultados de la regresión logística binaria

	Coeficientes	Error estándar	estadístico de Wald	p-valor
Término independiente	13,360	10,780	1,556	0,215
V100	-1,874	0,620	9,145	0,002
IV	0,014	0,048	0,081	0,776
PI	0,002	0,019	0,011	0,917
Fe	-0,020	0,026	0,598	0,439
Ag	-0,568	0,258	4,845	0,028
Al	-0,035	0,077	0,213	0,645

Capítulo 3: Resultados y discusión

Cr	17,110	6234,648	0,000	0,998
Cu	-0,090	0,016	30,618	0,000
Si	-0,007	0,034	0,048	0,827
Sn	-4,832	4579,265	0,000	0,999
Ni	1,825	0,904	4,071	0,044
Pb	-0,055	0,014	15,063	0,000
Mo	0,002	0,011	0,028	0,867
TAN	1,757	1,059	2,754	0,097
H₂O	-15,259	10,559	2,088	0,148
TBN	0,782	0,285	7,530	0,006

Los resultados de acierto o fallo en la predicción del modelo propuesto, en cuanto a la clasificación de muestras como conformes o no conformes, se muestran en la **Tabla 3-10**.

Tabla 3-10: Porcentaje de éxito de la regresión logística binaria

Comprobación de resultados	
Número de fallos de predicción	26
Número de aciertos de predicción	298
Porcentaje de éxito en la predicción	91,98%

En este contexto, un acierto se refiere a la correcta clasificación de una muestra como conforme o no conforme, mientras que un fallo corresponde a una clasificación incorrecta de la muestra.

Y la matriz de confusión, **Tabla 3-11**, donde se muestran los tipos de escenarios que pueden ocurrir (pronosticar éxito cuando es fracaso o viceversa, así como pronosticar éxito cuando es éxito o fracaso cuando es fracaso), tiene los valores siguientes:

Tabla 3-11: Matriz de confusión

	Observación Conforme	Observación No Conforme	Total
Predicción: Conforme	246	17	263
Predicción: No Conforme	9	52	61
Total	255	69	324
Precisión	0,96	0,75	0,92

Capítulo 3: Resultados y discusión

La Hipótesis nula de que el coeficiente que acompaña a cada variable no sea significativo (sea nulo), se rechaza si el p-valor es mayor que 0,05 (**Tabla 3-9**), por lo que se obtiene que todas las variables marcadas en rojo no serían estadísticamente significativas.

Se repite el modelo descartando dichas variables y obteniendo las siguientes matrices de resultados:

Tabla 3-12: Resultados de la regresión logística binaria eliminando variables no significativas

	Coeficientes	Error estándar	Estadístico de Wald	p-valor
Término independiente	18,377	5,905	9,684	0,002
V100	-1,845	0,507	13,220	0,000
Ag	-0,626	0,238	6,940	0,008
Cu	-0,092	0,015	38,199	0,000
Ni	2,036	0,871	5,456	0,020
Pb	-0,056	0,013	17,880	0,000
TBN	0,775	0,247	9,838	0,002

Para la **Tabla 3-13**, un acierto se define como la correcta identificación de una muestra como conforme o no conforme, mientras que un fallo denota una errónea clasificación de esta.

Tabla 3-13: Porcentaje de éxito de la regresión logística binaria eliminando variables no significativas

Comprobación de resultados	
Número de fallos de predicción	24
Número de aciertos de predicción	300
Porcentaje de éxito en la predicción	92,59%

Y la matriz de confusión, **Tabla 3-14**, muestra los distintos escenarios posibles (predecir éxito cuando es fracaso y viceversa, así como predecir éxito cuando es éxito o fracaso cuando es fracaso), con los siguientes valores:

Tabla 3-14: Matriz de confusión eliminando variables no significativas

	Observación Conforme	Observación No Conforme	Total
Predicción conforme	248	17	265
Predicción no conforme	7	52	59
Total	255	69	324
Precisión	0,973	0,754	0,926

Capítulo 3: Resultados y discusión

Se puede apreciar que el modelo predictivo alcanza una precisión del 92,59%. Sin embargo, los errores predominan en las observaciones No Conformes (17 errores) en comparación con aquellos en las observaciones Conformes (7 errores). Por lo tanto, sería recomendable ajustar el modelo incluyendo más ejemplos de casos No Conformes en la muestra de origen.

3.2.2 Carro de combate Leopard y tipo de aceite: O-1236

En este apartado, se seguirá con el análisis estadístico del carro de combate Leopard, pero cambiando el tipo de aceite por el O-1236. Siguiendo el mismo procedimiento estadístico usado anteriormente, se estudiarán las medidas de centralización, dispersión y forma para entender cómo este tipo de aceite influye en el rendimiento y el desgaste de los componentes del vehículo.

El objetivo es obtener una visión comparativa entre los aceites O-1178 y O-1236, evaluando las diferencias y similitudes en las tendencias de los datos recogidos. Este análisis permitirá profundizar en el conocimiento de los efectos específicos de cada tipo de aceite, proporcionando información valiosa para el mantenimiento predictivo y la optimización operativa de los carros de combate Leopard.

3.2.3 Medidas de centralización, dispersión y forma

Siguiendo el mismo enfoque utilizado en el **apartado 3.2.1.1**, se procederá con el análisis descriptivo de las variables relacionadas con el aceite O-1236 (**Tabla 3-15**). Se calcularán las medidas de centralización como la media, la mediana y la moda para identificar el punto alrededor del cual se agrupan los datos. Además, se calcularán las medidas de dispersión, como el rango, la varianza y la desviación estándar, para evaluar la variabilidad de los datos y la consistencia de las medidas de centralización.

La siguiente **Tabla 3-15** refleja una variedad de comportamientos en las variables analizadas, desde distribuciones muy concentradas y asimétricas hasta otras más dispersas y equilibradas. A partir de los valores de **Q₁** (primer cuartil) y **Q₃** (tercer cuartil) que se presentan en la tabla, se puede observar lo siguiente, especialmente en cuanto a la dispersión y concentración de los datos:

- Concentración en el extremo inferior: Para el Cr, Ag, Sn y Ni, al igual que en el aceite O-1178, los valores de **Q₁** y **Q₃** son bajos, indicando una alta concentración de valores en

Capítulo 3: Resultados y discusión

el extremo inferior, lo que sugiere una prevalencia de valores cercanos a cero en estos elementos.

- Distribución más amplia de valores: Para el Cu, Si y Pb, los cuartiles Q_1 y Q_3 están significativamente separados, indicando una mayor dispersión y una distribución más amplia de los valores. Esto refleja la presencia de rangos más amplios y valores extremos en estas variables.
- Variabilidad significativa en el medio 50%: Para el Fe y Mo, el rango entre Q_1 y Q_3 es considerablemente amplio, mostrando una variabilidad significativa en el medio 50% de los datos, lo que indica fluctuaciones importantes en los valores de estas variables.
- Poca variabilidad: Para el TAN y H_2O , los cuartiles están muy cercanos entre sí, sugiriendo poca variabilidad entre el 25% y el 75% de los datos. Esto indica que los valores están bastante concentrados alrededor de la mediana.

Medidas de centralización			Medidas de dispersión							Medidas de forma		
Media	Mediana	Moda	Rango	Mín	Máx	Q ₁	Q ₃	Desviación Estándar	Varianza	Curtosis	Coef. de asimetría	
V40	91,7	93,3	100,1	63,3	109,8	46,5	88,5	97,0	8,8	77,1	6,5	-1,9
V100	12,6	12,7	12,9	6,7	14,8	8,2	12,2	13,1	0,9	0,7	5,0	-1,2
IV	134,7	135,0	134,0	46,0	160,0	114,0	132,0	138,0	6,3	39,2	2,6	0,6
PI	214,1	218,5	225,0	93,5	253,0	159,5	203,0	225,0	13,9	193,9	-0,1	-0,5
CARB	0,2	0,2	0,2	1,2	0,8	-0,4	0,1	0,3	0,2	0,0	0,3	0,5
Fe	19,1	16,0	12,0	86,0	87,0	1,0	10,0	25,0	13,4	178,3	3,5	1,6
Ag	1,2	1,0	1,0	6,0	6,0	0,0	0,0	2,0	1,2	1,4	1,5	1,2
Al	5,4	5,0	4,0	31,0	31,0	0,0	4,0	6,0	3,3	10,7	20,9	3,6
Cr	1,0	1,0	1,0	21,0	21,0	0,0	0,0	1,0	1,5	2,2	104,7	8,1
Cu	12,5	9,0	4,0	92,0	92,0	0,0	5,0	16,5	11,8	138,3	9,7	2,5
Si	17,2	16,0	9,0	73,0	75,0	2,0	10,0	21,0	10,4	107,9	6,8	1,9
Sn	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-
Ni	0,5	0,0	0,0	4,0	4,0	0,0	0,0	1,0	0,8	0,6	3,1	1,6
Pb	2,8	2,0	2,0	57,0	57,0	0,0	1,0	3,0	4,7	22,5	75,8	7,8
Mo	39,7	35,0	16,0	93,0	93,0	0,0	16,0	63,0	25,5	647,9	-1,3	0,2
TAN	2,6	2,7	2,8	2,6	4,3	1,7	2,3	2,9	0,5	0,2	0,0	0,1
H ₂ O	0,1	0,1	0,1	2,3	2,3	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	238,2	14,4

Capítulo 3: Resultados y discusión

A continuación, se presenta la **Tabla 3-16** que detalla el análisis estadístico y la aplicación práctica de cada variable. Estas variables incluyen propiedades físicas como la viscosidad y el punto de inflamación, así como la presencia de elementos químicos que pueden indicar desgaste o contaminación.

Tabla 3-16: *Análisis estadístico y aplicación práctica para las variables del O-1236*

Variable	Análisis Estadístico	Aplicación Práctica
V40	La media y mediana son cercanas, lo que indica una distribución relativamente simétrica. Sin embargo, el coeficiente de asimetría negativo y la alta curtosis indican una cola hacia valores menores y una mayor concentración de valores alrededor de la media.	La variabilidad en la viscosidad a 40 °C puede afectar el arranque del motor y la eficiencia del combustible, especialmente en climas fríos.
V100	Distribución simétrica y concentrada, con poca dispersión como lo indica la baja desviación estándar.	La estabilidad de la viscosidad a 100 °C asegura un rendimiento predecible del aceite a altas temperaturas, protegiendo el motor.
IV	Asimetría positiva y alta curtosis, indicando una cola hacia valores mayores y una aguda concentración de los valores.	Un índice de viscosidad alto y consistente indica que el aceite mantiene su viscosidad en un rango amplio de temperaturas, protegiendo el motor.
PI	Ligeramente asimétrica hacia valores menores con una curtosis baja, indicando una distribución menos pronunciada alrededor de la media.	Un punto de inflamación alto es crucial para la seguridad. Sensores que midan este punto pueden prevenir riesgos de incendio.
CARB	Media y mediana son cercanas, con una ligera asimetría positiva y baja curtosis.	La cantidad de carbonilla en el aceite puede indicar problemas de combustión. Monitorizar esta variable ayuda a mantener la eficiencia del motor.
Fe	Asimetría positiva y alta curtosis, mostrando una distribución con valores que se extienden más hacia los valores superiores.	La presencia de hierro indica desgaste del motor. Sensores que monitoreen los niveles de hierro pueden ayudar a detectar problemas de desgaste temprano.

Capítulo 3: Resultados y discusión

Ag	La media y mediana son cercanas, indicando una distribución relativamente simétrica. La curtosis y asimetría son moderadas.	La presencia de plata puede indicar desgaste de componentes recubiertos con plata. Monitorizar esta variable es crucial para la detección temprana de desgaste.
Al	La media y mediana son cercanas, pero con alta curtosis y asimetría positiva, sugiriendo una distribución con valores extremos.	Altos niveles de aluminio pueden indicar desgaste de componentes de aleaciones de aluminio, lo cual es crítico para prevenir fallos catastróficos.
Cr	La media es baja y la mediana es 1. La alta curtosis y asimetría positiva indican valores extremos.	El cromo en el aceite puede indicar desgaste de componentes cromados. Sensores que detecten incrementos pueden prevenir desgaste anormal.
Cu	La media es baja y la mediana es 0, con alta varianza y asimetría positiva indicando una dispersión significativa.	La alta varianza en los niveles de cobre sugiere monitoreo crítico para identificar contaminaciones y desgastes inusuales.
Si	La media y mediana son cercanas, con alta curtosis y asimetría positiva.	Altos niveles de silicio pueden indicar contaminación por polvo o arena. Monitorizar silicio ayuda a identificar la necesidad de mejorar la filtración de aire.
Sn	La media es 0, con valores todos iguales. No hay dispersión ni variabilidad.	La presencia de estaño puede indicar desgaste de componentes recubiertos con estaño. Monitorizar esta variable es crucial para la detección temprana de desgaste.
Ni	La media es baja y la mediana es 0. La alta curtosis y asimetría positiva indican una concentración hacia valores bajos.	El níquel puede provenir de componentes de aleación. Monitorizar los niveles de níquel puede ayudar a identificar desgaste en componentes específicos.
Pb	La media es baja y la mediana es 2, con alta varianza y asimetría positiva indicando una dispersión significativa.	La alta varianza en los niveles de plomo sugiere monitoreo crítico para identificar contaminaciones y desgastes inusuales.
Mo	La media y mediana son cercanas, con alta varianza y curtosis negativa, sugiriendo una dispersión significativa.	El molibdeno se usa como aditivo en aceites para mejorar la lubricación. Monitorizar niveles de molibdeno asegura la calidad del lubricante.

Capítulo 3: Resultados y discusión

TAN	La media y mediana son cercanas, con baja variabilidad y distribución simétrica.	El número de acidez total (TAN) es un indicador de la degradación del aceite y su capacidad para neutralizar ácidos.
H₂O	La media es baja, con alta curtosis y asimetría positiva indicando una concentración hacia valores bajos.	El número de basicidad total (TBN) es un indicador de la capacidad del aceite para neutralizar ácidos y asegurar la protección del motor.

La siguiente **Tabla 3-17** ofrece una interpretación de la curtosis para cada variable, categorizando la configuración de la distribución de datos y ofreciendo una explicación sobre la probabilidad de sucesos atípicos o la regularidad del rendimiento según los valores de curtosis presentados.

Tabla 3-17: Tipo de distribución en función de la Curtosis para el aceite O-1236

Variable	Curtosis	Tipo	Interpretación
V40	6,55	Leptocúrtica	Alta probabilidad de variabilidad en viscosidad, indicando posibles episodios de desgaste extremo o contaminantes.
V100	5,03	Leptocúrtica	Alta probabilidad de variabilidad en concentración de aditivos.
IV	2,61	Leptocúrtica	Variabilidad en la pureza del aceite.
PI	-0,15	Platicúrtica	Distribución más plana con colas delgadas, sin valores extremos significativos. Estabilidad en el rendimiento del aceite.
CARB	0,35	Mesocúrtica	Rendimiento esperado y consistente en la cantidad de la carbonilla.
Fe	3,53	Leptocúrtica	Probabilidad de eventos de desgaste anormal de metales.
Ag	1,47	Mesocúrtica	Ligera probabilidad de presencia de plata, sugiriendo posible contaminación o desgaste específico.
Al	20,89	Extremadamente Leptocúrtica	Valores similares de concentración de aluminio en casi todas las muestras, salvo algunas con alta probabilidad de desgaste extremo o contaminantes significativos de aluminio.

Capítulo 3: Resultados y discusión

Cr	104,67	Extremadamente Leptocúrtica	Valores similares de concentración de cromo en casi todas las muestras, salvo algunas con alta probabilidad de desgaste extremo o contaminantes significativos.
Cu	9,71	Leptocúrtica	Variabilidad en desgaste de componentes de cobre.
Si	6,83	Leptocúrtica	Alta probabilidad de contaminación por polvo o desgaste de sellos de silicona.
Sn	-	-	No hay suficientes datos para determinar la forma de la distribución.
Ni	3,10	Leptocúrtica	Variabilidad en desgaste de componentes de níquel.
Pb	75,79	Extremadamente Leptocúrtica	Valores similares de concentración de plomo en casi todas las muestras, salvo unas pocas con alta probabilidad de desgaste extremo o contaminantes significativos de plomo.
Mo	-1,31	Platicúrtica	Distribución más plana con colas delgadas, sin valores extremos significativos. Estabilidad en desgaste de componentes tratados con molibdeno.
TAN	0,04	Mesocúrtica	Rendimiento consistente en la acidez del aceite.
H₂O	238,18	Extremadamente Leptocúrtica	Valores similares de concentración de agua en casi todas las muestras, salvo unas pocas con alta probabilidad de contaminación por agua.

3.2.3.1 Análisis de correlación

El complemento RealStats de EXCEL permite estimar el coeficiente de correlación de Pearson, el cual mide la asociación lineal entre las variables explicativas. En la **Tabla 3-18** se muestran los resultados obtenidos para el aceite O-1236.

Capítulo 3: Resultados y discusión

Tabla 3-18: Matriz de correlación para el aceite O-1236

	V40	V100	IV	PI	CARB	Fe	Ag	Al	Cr	Cu	Si	Sn	Ni	Pb	Mo	TAN	H ₂ O	TBN
V40	1,00																	
V100	0,93	1,00																
IV	-0,46	-0,13	1,00															
PI	0,18	0,13	-0,13	1,00														
CARB	-0,06	-0,07	-0,01	0,29	1,00													
Fe	-0,07	-0,08	-0,03	0,21	0,48	1,00												
Ag	-0,08	-0,12	-0,12	0,18	0,41	0,56	1,00											
Al	-0,09	-0,07	0,09	0,18	0,32	0,67	0,33	1,00										
Cr	-0,04	-0,02	0,04	-0,03	0,25	0,53	0,24	0,37	1,00									
Cu	-0,20	-0,20	0,07	0,21	0,41	0,56	0,53	0,34	0,26	1,00								
Si	-0,04	0,02	0,16	0,18	0,13	0,41	0,23	0,49	0,40	0,12	1,00							
Sn	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,00						
Ni	-0,02	-0,04	-0,07	0,26	0,40	0,58	0,45	0,34	0,26	0,57	0,00	-	1,00					
Pb	-0,48	-0,42	0,33	0,15	0,17	0,17	0,12	0,28	0,04	0,30	0,11	-	0,11	1,00				
Mo	-0,18	-0,03	0,45	0,22	0,17	0,32	0,24	0,41	0,07	0,23	0,53	-	0,11	0,27	1,00			
TAN	-0,14	-0,13	0,03	-0,06	0,35	0,39	0,46	0,30	0,15	0,33	0,32	-	0,21	0,12	0,37	1,00		
H ₂ O	0,10	0,10	-0,01	0,05	0,08	0,01	0,03	0,01	-0,03	0,02	0,01	-	0,09	-0,01	0,02	-0,07	1,00	
TBN	-0,16	-0,27	-0,21	0,14	0,04	0,14	0,15	0,22	0,06	0,07	0,08	-	0,18	0,07	0,12	0,20	-0,02	1,00

A continuación, se presentan las conclusiones extraídas a partir de la matriz de correlación obtenida, **Tabla 3-18** y la **Tabla 3-5** donde se define el tipo de relación lineal que puede haber entre variables:

- **V40 y V100:** Existe una correlación muy fuerte y positiva (0,93) entre la viscosidad a 40°C (V40) y la viscosidad a 100°C (V100). Esto sugiere que las variaciones en la viscosidad a baja temperatura están fuertemente asociadas con las variaciones en la viscosidad a alta temperatura.
- **IV:** Presenta una correlación negativa moderada con V40 (-0,46) y una correlación negativa muy débil con V100 (-0,13). Esto indica que un aumento en la viscosidad a 40°C tiende a estar asociado con una disminución en el índice de viscosidad, pero este efecto es menos evidente a 100°C.
- **PI:** Muestra correlaciones positivas muy débiles con V40 (0,18) y V100 (0,13). Esto sugiere que el punto de inflamación no está fuertemente relacionado con la viscosidad del aceite.

Capítulo 3: Resultados y discusión

- **Metales (Fe, Ag, Al, Cr, Cu, Ni, Pb):**

- **Fe:** Tiene correlaciones positivas moderadas con otros metales como Ag (0,56), Al (0,67), Cu (0,56) y Ni (0,58). Esto indica que la presencia de hierro en el aceite tiende a estar asociada con la presencia de otros metales de desgaste.
- **Ag:** Está moderadamente correlacionada con Al (0,33), Cr (0,24), Cu (0,53), Ni (0,45) y Mo (0,24). La presencia de plata también parece asociarse con varios otros metales.
- **Al:** Presenta correlaciones positivas con Cr (0,37) y Si (0,49). Esto sugiere que el aluminio puede estar asociado con componentes que contienen estos elementos.
- **Cr:** Tiene correlaciones positivas con Ni (0,26) y Si (0,40).
- **Cu:** Muestra una fuerte correlación con Ni (0,57) y Ag (0,53), indicando posibles fuentes comunes de desgaste.
- **Pb:** Exhibe una correlación negativa moderada con V40 (-0,48) y V100 (-0,42), lo cual podría sugerir que niveles más altos de plomo están asociados con viscosidades más bajas del aceite.

- **TAN:** Presenta correlaciones positivas moderadas con Fe (0,39), Ag (0,46) y Cu (0,33). Esto sugiere que el aumento en la acidez del aceite puede estar relacionado con mayores niveles de desgaste de metales.

- **H₂O:** Aunque en teoría la presencia de agua puede afectar la viscosidad del aceite, en esta matriz de correlación, no se observan correlaciones significativas entre el contenido de agua y la viscosidad (V40: 0,10 y V100: 0,10). Esto puede deberse a la eficacia de los aditivos del aceite para mantener la viscosidad estable o a la variabilidad de las muestras analizadas.

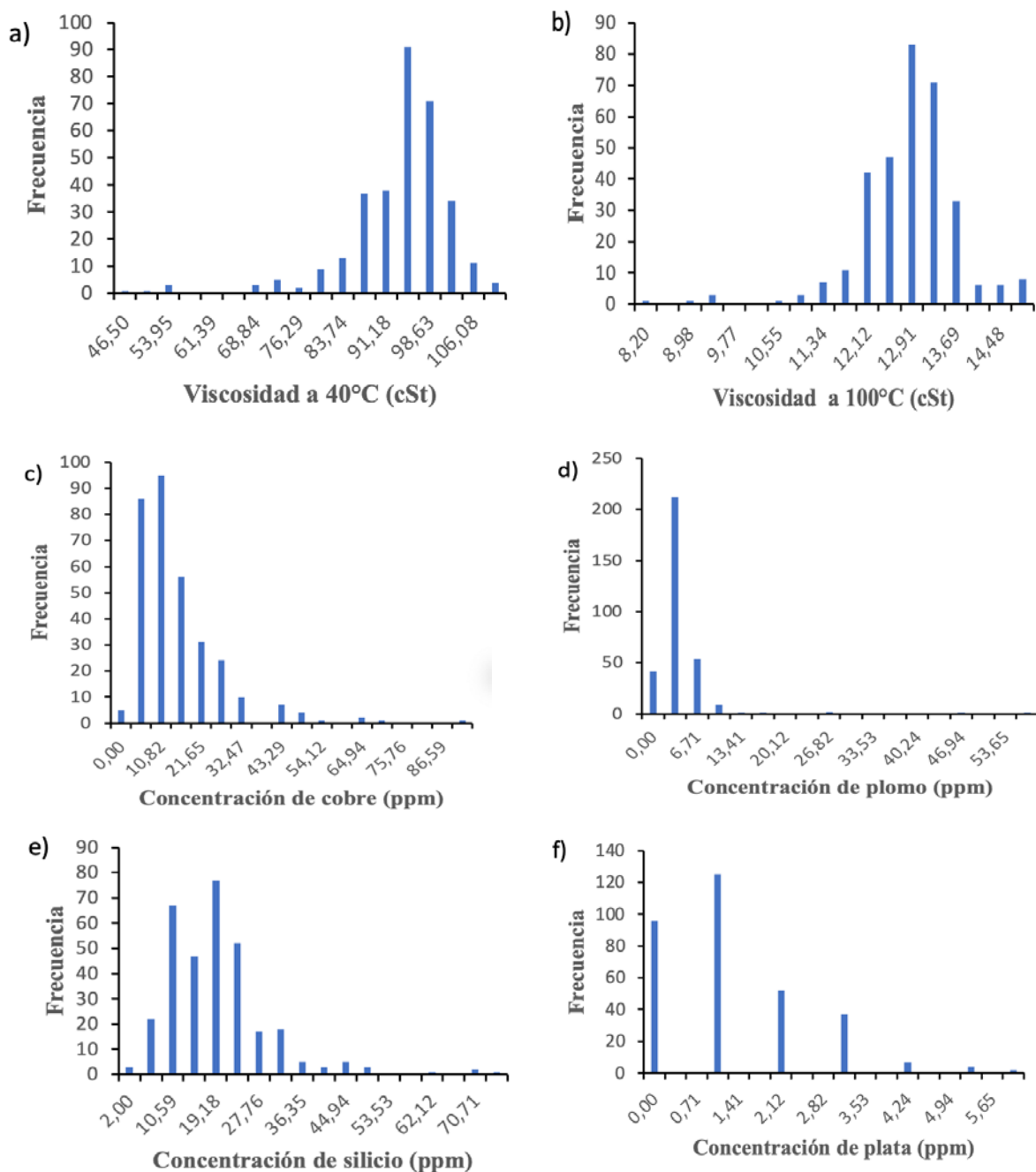
- **TBN:** Muestra una correlación negativa débil con V100 (-0,27) y V40 (-0,16), lo que sugiere que a medida que disminuye la alcalinidad del aceite, también puede disminuir ligeramente la viscosidad.

3.2.3.2 Análisis gráfico

Como se mencionó en el **apartado 3.2.1.3** de este documento, RealStats no solo proporciona robustez numérica, sino que también facilita capacidades de representación gráfica.

3.2.3.2.1 Histogramas de frecuencias para el aceite O-1236

Los histogramas de frecuencias son herramientas útiles para analizar las distribuciones de distintas propiedades fisicoquímicas y contaminantes en las muestras de aceite de motor O-1236. A continuación, se muestran los histogramas más relevantes para aceites de motor O-1236, cada uno con información valiosa sobre su desempeño y calidad. Estos histogramas ayudan a detectar tendencias, concentraciones habituales y valores anómalos que podrían señalar problemas específicos.



Capítulo 3: Resultados y discusión

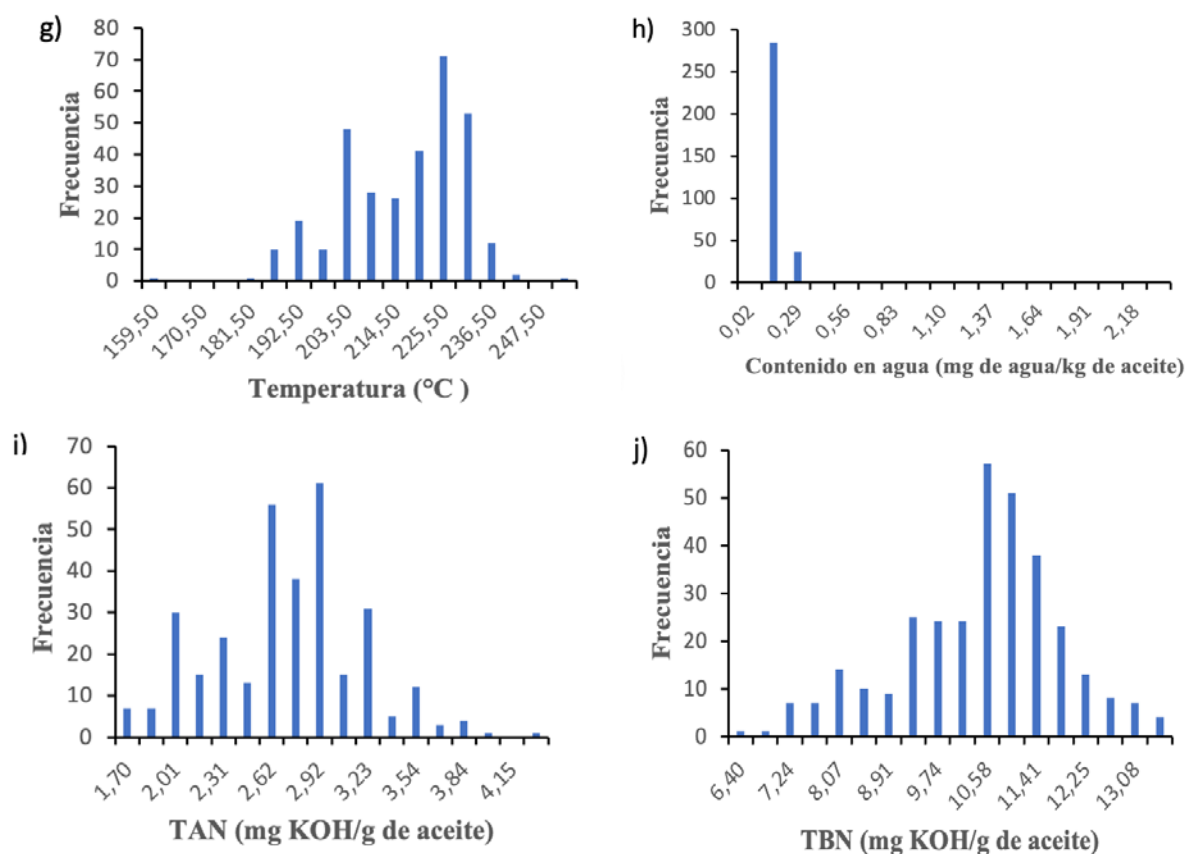


Figura 3-9: Histograma de frecuencias para propiedades fisicoquímicas y contaminantes del aceite O-1236: **a)** Viscosidad a 40°C; **b)** Viscosidad a 100°C; **c)** Concentración de cobre; **d)** Concentración de plomo; **e)** Concentración de silicio; **f)** Concentración de plata; **g)** Punto de inflamación; **h)** Contenido en agua; **i)** TAN; **j)** TBN

El histograma de viscosidad a 40 °C, mostrado en la **Figura 3-9-a**, revela que la mayor concentración de valores se encuentra en el rango de 94,91 a 98,63 cSt, con una frecuencia alta de 91 en el rango de 94,91 cSt y frecuencias significativas también en 87,46 y 91,18 cSt. Esta distribución indica que la mayoría de las muestras de aceite tienen una viscosidad que asegura una buena lubricación a temperaturas más bajas. La concentración en estos rangos sugiere una formulación común que se adapta a las condiciones de operación típicas. Los valores atípicos en los rangos superiores pueden ser indicativos de problemas de contaminación o variaciones en la formulación del aceite.

Por otro lado, en el histograma de viscosidad a 100 °C, **Figura 3-9-b**, se observa que la mayor concentración de valores se encuentra en el rango de 12,91 a 13,30 cSt con 83 y 71 muestras respectivamente, con un sesgo hacia la derecha. La mayoría de las muestras de aceite tienen viscosidades alrededor de estos valores, lo que indica que el aceite mantiene su fluidez bajo altas temperaturas, asegurando una lubricación eficiente. Los valores atípicos hacia el extremo superior podrían deberse a variaciones en la formulación del aceite o a contaminación.

Capítulo 3: Resultados y discusión

La **Figura 3-9-c**, que presenta el histograma de cobre, muestra que la mayor concentración de valores se encuentra en el rango de 0,00 a 10,82 ppm, con un pico en 10,82 ppm y una frecuencia máxima de casi 100. La frecuencia disminuye significativamente en los rangos superiores. Las concentraciones bajas de cobre indican un desgaste bajo de componentes de cobre, como cojinetes y bujes. Los valores más altos pueden indicar desgaste significativo o contaminación puntual y deben ser investigados para prevenir daños mayores.

El histograma de plomo, representado en la **Figura 3-9-d**, señala que la mayor concentración de valores se encuentra en el rango de 6,71 ppm, con una frecuencia máxima de 212 muestras. La frecuencia disminuye drásticamente en los rangos superiores. Las bajas concentraciones de plomo sugieren un desgaste mínimo de componentes que contienen plomo o poca contaminación externa. Los valores atípicos en concentraciones más altas deben ser investigados para determinar si hay problemas específicos de desgaste o contaminación.

Observando el histograma de sílice, **Figura 3-9-e**, se encuentra que la mayor concentración se halla en el rango de 14,88 a 19,18 ppm, con una distribución dispersa y algunos picos en concentraciones más altas. Las concentraciones de sílice pueden provenir de la contaminación por polvo o arena, indicando problemas en el sistema de filtración de aire o sellos defectuosos. Los valores extremos sugieren la necesidad de revisar el sistema de filtración.

La **Figura 3-9-f**, correspondiente al histograma del punto de inflamación, indica que la mayor frecuencia se encuentra en el rango de 231 a 236,50 °C, con una moda bien definida y algunos valores extremadamente altos. Un punto de inflamación alto indica buena estabilidad térmica del aceite. Los valores extremadamente altos podrían ser resultado de condiciones extremas de operación o cambios en la formulación del aceite.

En el histograma de plata, **Figura 3-9-g**, se observa que la mayor concentración de valores se encuentra en el rango de 1,06 a 1,41 ppm, con un pico en 1,06 ppm y una frecuencia máxima de 120. La frecuencia disminuye significativamente en los rangos superiores. Las concentraciones bajas de plata indican una contaminación mínima de este metal. Los valores más altos pueden ser indicativos de contaminación puntual y deben ser investigados para prevenir problemas mayores.

La **Figura 3-9-h**, correspondiente al histograma de agua, muestra que la mayor concentración de valores se encuentra en el rango de 0,15 ppm, con una frecuencia máxima de 300. La frecuencia disminuye drásticamente en los rangos superiores. Las concentraciones bajas de agua sugieren una buena capacidad del aceite para evitar la contaminación por

Capítulo 3: Resultados y discusión

humedad. Los valores atípicos en concentraciones más altas deben ser investigados para determinar si hay problemas específicos de contaminación por agua.

Según el histograma del número de acidez total, **Figura 3-9-i**, se aprecia que la moda se encuentra en el rango de 2,77 a 2,92, con una distribución más homogénea en comparación con los metales. La distribución homogénea de TAN indica una acidez regulada en las muestras, sugiriendo que el aceite está en buen estado y que la oxidación o contaminación es mínima. Los valores más altos pueden indicar degradación del aceite.

Finalmente, la **Figura 3-9-j**, que muestra el histograma del número básico total, revela que la mayor concentración está en el rango de 10,16 a 10,99, indicando una variabilidad en la capacidad de neutralización de ácidos. Un TBN adecuado sugiere que el aceite puede proteger eficazmente el motor contra la corrosión. Los valores extremos sugieren variaciones significativas en la capacidad del aceite para neutralizar ácidos, lo que podría afectar la protección del motor.

3.2.3.2.2 Gráficos de caja y bigotes

La teoría y explicación detallada de los gráficos de caja y bigotes ya se ha abordado anteriormente en el **apartado 3.2.1.3.2**. A continuación, se presenta un análisis detallado de las variables medidas en el aceite de motor O-1236, según la **Figura 3-10**.

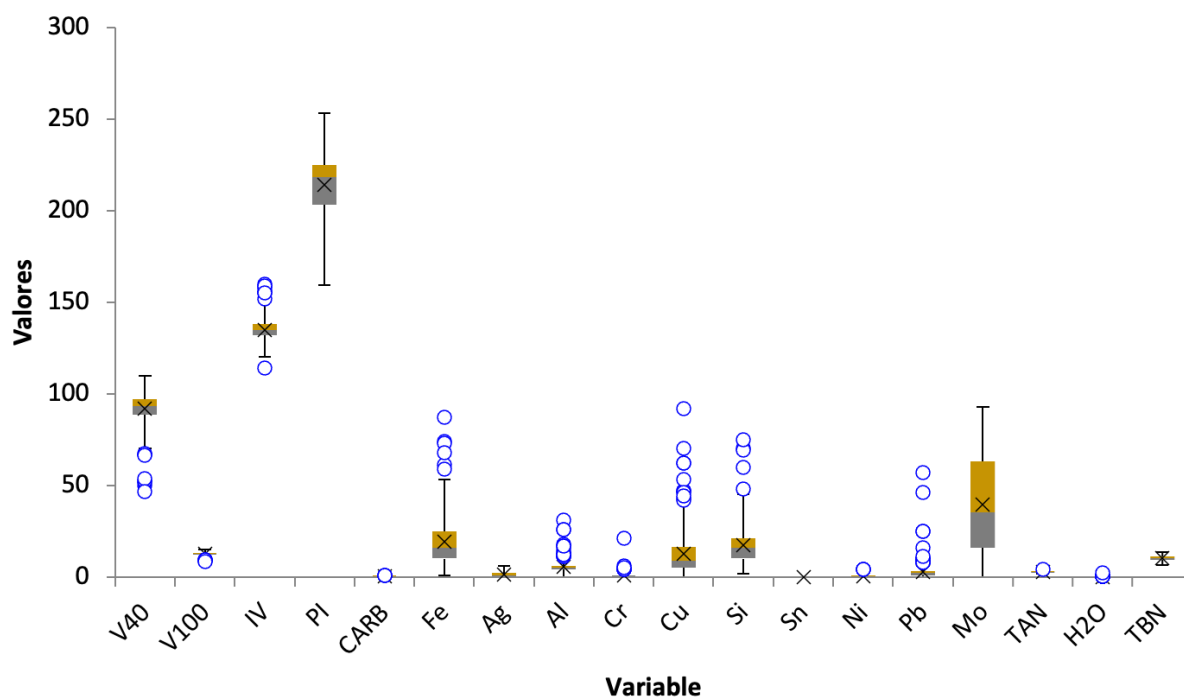


Figura 3-10: Gráfico de caja y bigotes del aceite O-1236

Capítulo 3: Resultados y discusión

Mediante el análisis del gráfico de caja y bigotes para el aceite O-1236, presentado en la **Figura 3-10**, se puede evaluar la distribución y variabilidad de diversas propiedades y componentes de dicho aceite. Este análisis es fundamental para comprender la estabilidad y calidad del aceite, además de permitir la identificación de posibles problemas relacionados con el desgaste, la contaminación o las variaciones en sus propiedades físicas y químicas.

En la **Figura 3-10**, cada elemento del gráfico tiene un propósito específico:

- **Caja:** Representa el rango intercuartílico (RIC), proporcionando una visión clara de la dispersión central de los datos.
- **Línea horizontal que divide las cajas:** Marca la mediana de la distribución, indicando el valor central de los datos.
- **Cruz negra (X):** Señala la media aritmética de los datos, reflejando el promedio de los valores.
- **Bigotes:** Se extienden desde la caja, mostrando la variabilidad de los datos dentro de un rango definido, excluyendo los valores atípicos.
- **Círculos azules:** Identifican los valores atípicos (outliers), que son puntos de datos significativamente alejados del resto de la distribución.

Este gráfico facilita la interpretación de los resultados obtenidos, permitiendo una comparación clara de la distribución y variabilidad de las diferentes variables analizadas en el aceite O-1236. A continuación, se presenta un análisis detallado de cada variable representada en la **Figura 3-10**:

- **V40:** La viscosidad a 40°C presenta una caja muy pequeña, indicando baja variabilidad en los datos. La mediana está cerca del valor más bajo del IQR, y hay algunos valores atípicos dispersos. Esto sugiere que la mayoría de las muestras tienen viscosidades similares con algunas variaciones extremas.
- **V100:** La viscosidad a 100°C muestra una tendencia similar a V40, con una caja pequeña y algunos valores atípicos. La concentración de datos cerca de la mediana indica una distribución equilibrada con algunas desviaciones.
- **IV:** El Índice de Viscosidad muestra una caja más amplia, indicando una variabilidad moderada en los datos. La mediana está alta en el rango intercuartílico, lo que sugiere que la mayoría de los valores son elevados, aunque existen algunos valores atípicos que indican variaciones extremas.

Capítulo 3: Resultados y discusión

- **PI:** La caja del punto de inflamación es estrecha con la mediana situada hacia el extremo superior del rango intercuartílico. Esto indica que los puntos de inflamación son consistentemente altos, con pocas variaciones y algunos valores atípicos que sugieren posibles inconsistencias o mediciones fuera de lo común.
- **CARB:** Los valores de la carbonilla son extremadamente bajos y están agrupados estrechamente, lo que indica una baja variabilidad y una consistencia en las muestras con respecto a la concentración de carbono.
- **Fe:** El hierro presenta una mediana baja con un rango intercuartílico más amplio. Hay varios valores atípicos por encima del bigote superior, sugiriendo episodios de desgaste en componentes de hierro o acero. La variabilidad indica fluctuaciones en las concentraciones de hierro en las muestras.
- **Ag:** La plata muestra una distribución con una mediana muy cercana al borde inferior de la caja, un rango intercuartílico estrecho y sin valores atípicos visibles. Esto indica una baja variabilidad y niveles de plata consistentemente bajos.
- **Al:** El aluminio tiene una mediana baja dentro de un rango intercuartílico más amplio con algunos valores atípicos por encima del bigote superior. Esto sugiere cierta variabilidad en la concentración de aluminio, posiblemente debido al desgaste de componentes que contienen aluminio.
- **Cr:** El cromo presenta una mediana baja y un rango intercuartílico estrecho sin valores atípicos evidentes. Los niveles de cromo son generalmente bajos y consistentes en las muestras.
- **Cu:** El cobre muestra una distribución con una mediana ligeramente elevada y un rango intercuartílico más amplio. Los valores atípicos por encima del bigote superior sugieren variaciones significativas en la concentración de cobre, posiblemente asociadas a desgaste o contaminación.
- **Si:** El silicio muestra una variabilidad moderada con varios valores atípicos bastante alejados de la mediana. La mediana no está centrada en la caja, lo que indica una distribución asimétrica con posibles variaciones significativas en las concentraciones de silicio.

Capítulo 3: Resultados y discusión

- **Sn:** El estaño presenta una mediana baja y un rango intercuartílico estrecho con algunos valores atípicos. La baja variabilidad indica que los niveles de estaño son generalmente consistentes con algunas excepciones.
- **Ni:** Similar al estaño, el níquel muestra una baja variabilidad con la mayoría de los valores agrupados cerca de la mediana y algunos valores atípicos, sugiriendo niveles generalmente bajos y consistentes.
- **Pb:** El plomo presenta una gran dispersión de datos con varios valores atípicos. La mediana está en el extremo inferior de la caja, sugiriendo que la mayoría de los valores son bajos, pero hay una cola larga de valores altos que indican posibles contaminaciones o desgastes significativos.
- **Mo:** El molibdeno tiene una concentración de datos cerca de la mediana sin valores atípicos significativos. Esto indica una variabilidad baja y niveles de molibdeno consistentes en las muestras.
- **TAN:** La caja del número de acidez total es más amplia comparada con otras variables, indicando una mayor variabilidad en los valores. Esto sugiere fluctuaciones en los niveles de acidez en las muestras de aceite.
- **H₂O:** El agua presenta una baja variabilidad con todos los valores muy cerca de cero, indicando niveles consistentemente bajos de agua en las muestras de aceite.
- **TBN:** Similar al agua, el número de basicidad total muestra una baja variabilidad con valores bajos y consistentes. Esto indica que el número base total es estable en las muestras analizadas.

El análisis del gráfico de caja y bigotes del aceite O-1236 (**Figura 3-10**) revela que la mayoría de las variables tienen valores bajos y consistentes, con algunas excepciones que presentan variabilidad y valores atípicos. Las propiedades relativas a la viscosidad muestran tendencias claras y consistentes, mientras que elementos como el cobre y el plomo indican posibles variaciones significativas que podrían estar asociadas a desgaste o contaminación.

3.2.3.2.3 Gráficos de dispersión

Las representaciones gráficas de dispersión constituyen una herramienta visual esencial para revelar patrones, tendencias y relaciones que pueden no ser evidentes en análisis puramente numéricos. Al colocar dos variables en eje de coordenadas, se puede ver claramente cómo interactúan entre sí observando si existen tendencias y patrones de su interacción. Estas

Capítulo 3: Resultados y discusión

representaciones son particularmente eficaces para reconocer correlaciones de moderadas a fuertes, o incluso para descartar asociaciones débiles o nulas en los datos.

La matriz de correlación, **Tabla 3-18**, revela algunas correlaciones moderadas entre elementos químicos, tales como: V40-V100, Fe-Al, Fe-Cu, Si-Mo y Fe-Cr. Estas correlaciones se pueden visualizar en los gráficos de dispersión y podrían indicar relaciones ocultas que merecen una mayor investigación. Las demás correlaciones son débiles o prácticamente inexistentes.

A continuación, se muestran las correlaciones moderadas detectadas durante el análisis visual de la relación entre dos variables. La distribución de estos puntos puede indicar la existencia de una correlación lineal, en la que un patrón claro indica una relación fuerte, y una distribución más aleatoria indica una relación más floja o ninguna relación.

La siguiente **Figura 3-11** muestra la dispersión de la viscosidad a 40 y 100°C indicando una relación fuerte entre estas dos variables. El valor de $R^2 = 0,8731$ indica una correlación significativa. La línea de tendencia, representada en rojo, muestra que a medida que aumenta la viscosidad a 40°C, también lo hace la viscosidad a 100°C. La mayoría de los puntos se alinean a lo largo de esta línea de tendencia, sugiriendo una relación lineal positiva fuerte entre las dos variables.

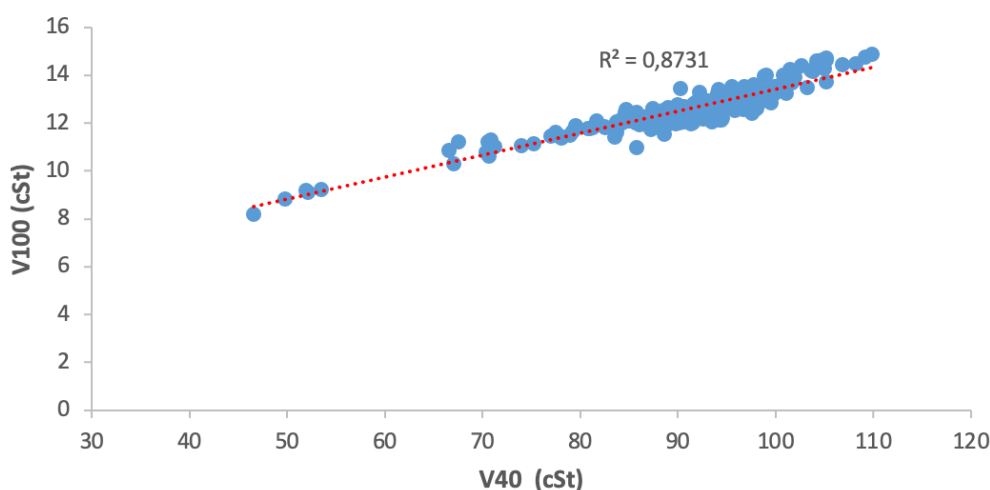


Figura 3-11: Gráfico de dispersión de la viscosidad a 40 y 100°C para el O-1236

La **Figura 3-12** representa la relación entre el hierro y el aluminio, con una correlación muy baja, reflejada en un valor de $R^2 = 0,0355$. Este valor indica que la variación en la concentración de hierro apenas explica la variación en la concentración de aluminio. La dispersión de los puntos alrededor de la línea de tendencia es significativa, lo que sugiere que

Capítulo 3: Resultados y discusión

no existe una correlación fuerte entre estas dos variables. Además, la tendencia lineal es casi horizontal, indicando que, en promedio, el aumento de la concentración de hierro no tiene un impacto considerable en la concentración de aluminio. Esto sugiere que otros factores distintos del hierro pueden ser los principales determinantes de las concentraciones de aluminio.

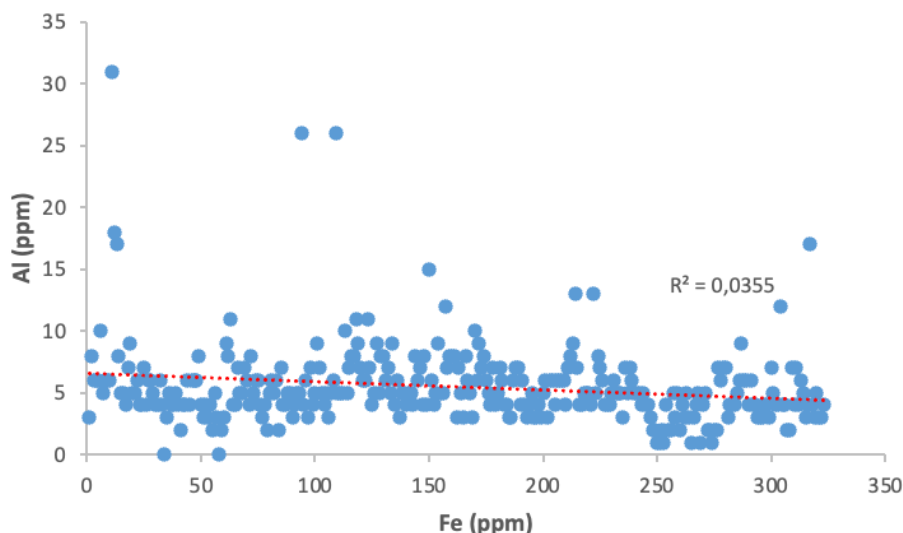


Figura 3-12: Gráfico de dispersión de la concentración de hierro y aluminio para el O-1236

La relación entre el hierro y el cobre se presenta con una correlación moderada, como lo indica el valor de $R^2 = 0.3134$ de la **Figura 3-13**. La tendencia general muestra que un incremento en Fe se asocia con un incremento en Cu. Sin embargo, los puntos están más dispersos en comparación con la gráfica de V40-V100, lo que sugiere que, aunque hay una correlación, la relación no es muy consistente.

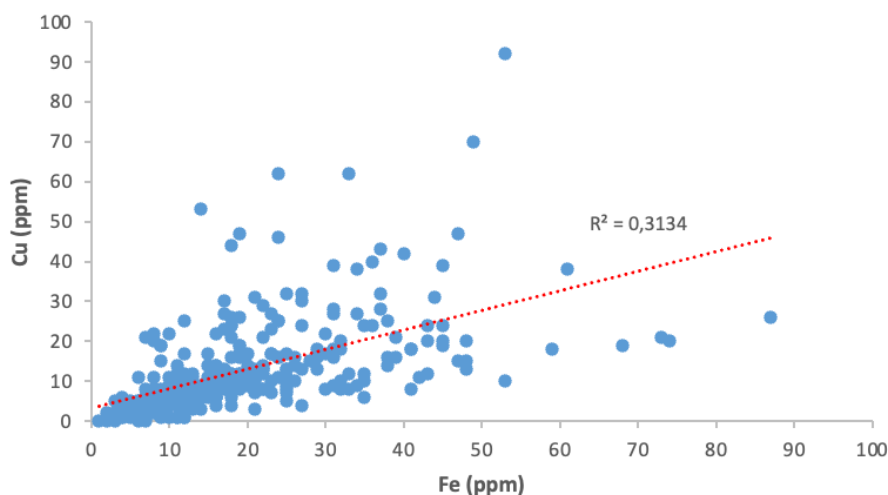


Figura 3-13: Gráfico de dispersión de la concentración de hierro y cobre para el O-1236

La **Figura 3-14** de correlación entre el Si y el Mo muestra una relación baja a moderada con un valor de $R^2 = 0,2854$. La tendencia general indica que, a mayor Si, mayor Mo. No obstante, la

Capítulo 3: Resultados y discusión

dispersión de puntos es alta, lo que sugiere que la relación entre Si y Mo no es fuerte y puede estar influenciada por otros factores que no se han considerado en esta gráfica.

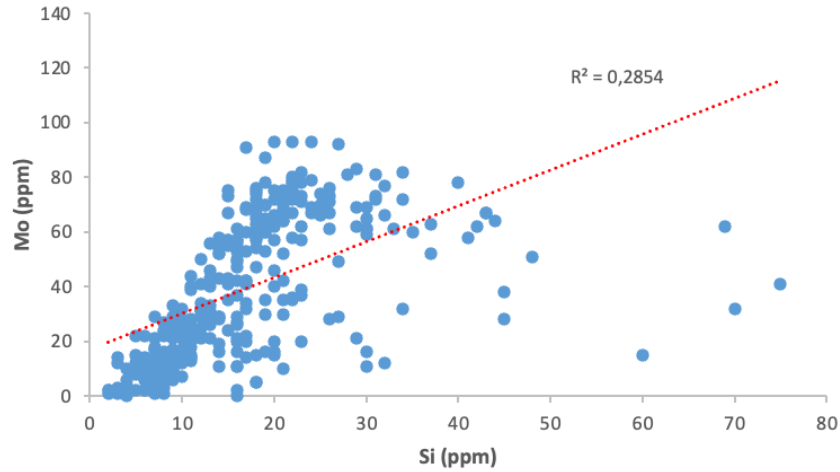


Figura 3-14: Gráfico de dispersión de la concentración de silicio y molibdeno para el O-1236

La **Figura 3-15** muestra la relación entre el hierro y el cromo, con un valor de $R^2 = 0,0061$, lo que indica una correlación extremadamente baja entre estas dos variables. Este valor sugiere que la concentración de hierro no tiene prácticamente ningún impacto en la concentración de cromo. La dispersión de los puntos es considerable y la línea de tendencia es casi plana, lo que refuerza la idea de que no existe una relación significativa entre estas dos variables. La concentración de cromo parece ser independiente de la de hierro, lo que sugiere que otros factores, más allá del hierro, son los principales determinantes de la concentración de cromo.

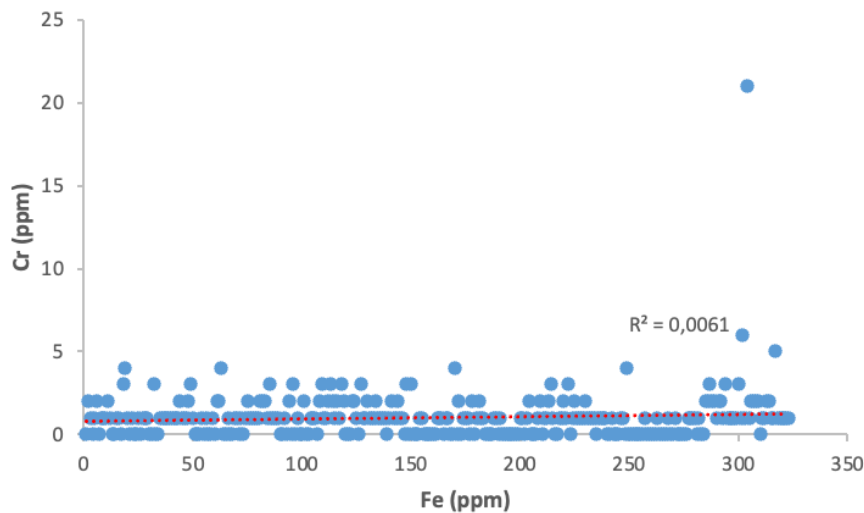


Figura 3-15: Gráfico de dispersión de la concentración de hierro y cromo para el O-1236

El valor atípico observado en la **Figura 3-15** probablemente representa una condición anómala que no es representativa de la relación general entre Fe y Cr en la mayoría de los datos

Capítulo 3: Resultados y discusión

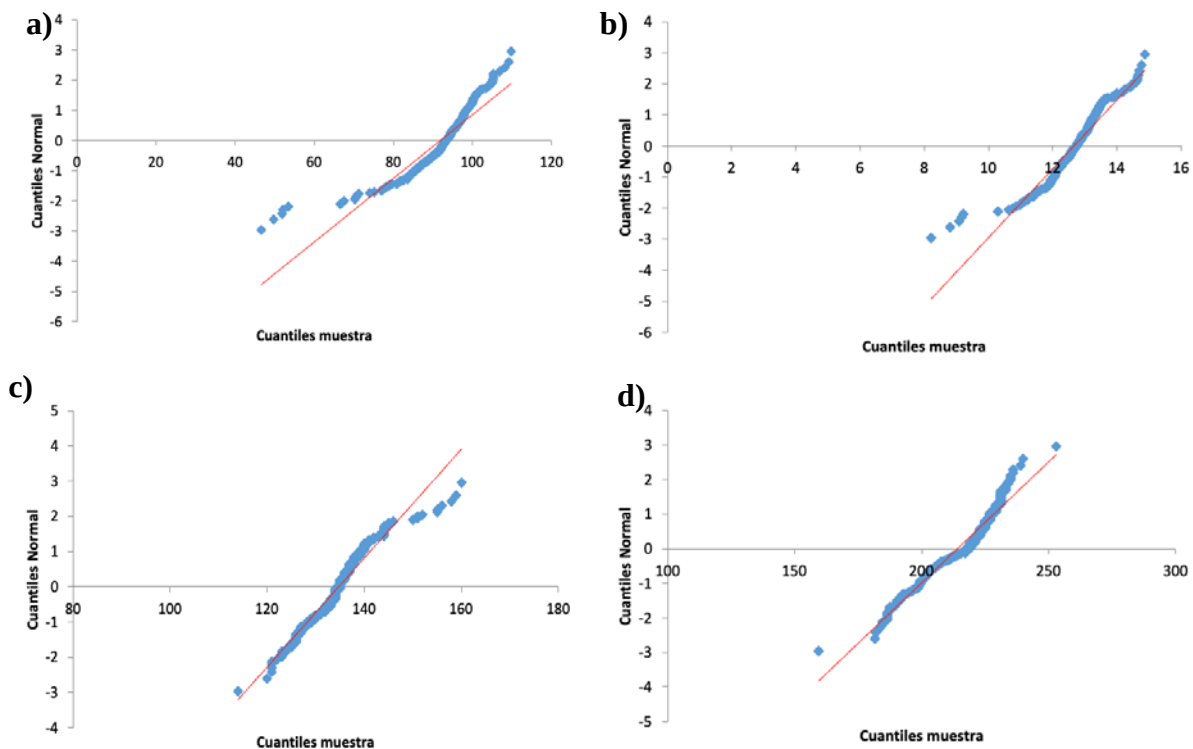
obtenidos. Es fundamental investigar la causa de este valor atípico para determinar si se trata de un error o si puede proporcionar información valiosa sobre un evento específico en el sistema monitoreado. En particular, para la muestra de aceite con estos valores anómalos también se registraron concentraciones elevadas de aluminio y silicio, lo que sugiere que el valor atípico podría estar relacionado con un desgaste prematuro debido a la abrasión generada por el silicio.

3.2.3.2.4 Diagramas QQ-Plot (Cuantil-Cuantil)

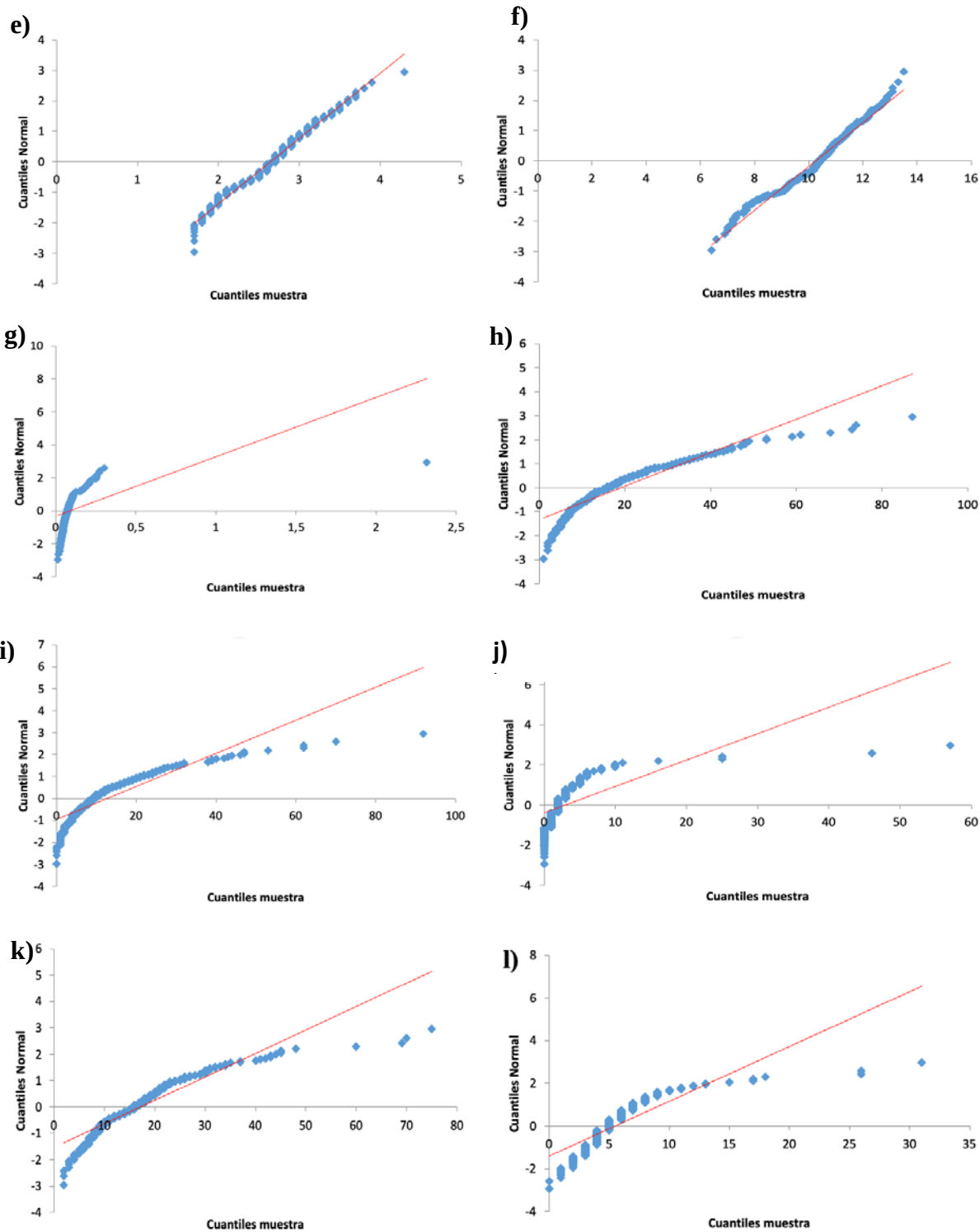
Para el análisis estadístico del aceite O-1236, se han utilizado las mismas herramientas a las descritas previamente para el aceite O-1178 en el **apartado 3.2.1.3.4** en relación con los diagramas QQ y su interpretación.

Al igual que con el aceite O-1178, se utiliza un gráfico cuantil-cuantil (QQ) para comparar los cuantiles de los datos del aceite O-1236 con los cuantiles teóricos de una distribución normal.

Tras analizar los gráficos Q-Q proporcionados en la **Figura 3-16**, se observa que los puntos no se alinean cerca de la línea recta central. En lugar de ello, presentan desviaciones significativas, lo cual indica que los datos no siguen una distribución normal. Estas desviaciones pueden verse como curvas o patrones sistemáticos que se apartan de la línea de referencia, sugiriendo que la hipótesis nula de que los datos provienen de una distribución normal debería ser rechazada. Aspecto que se tratara en detalle en el próximo apartado.



Capítulo 3: Resultados y discusión



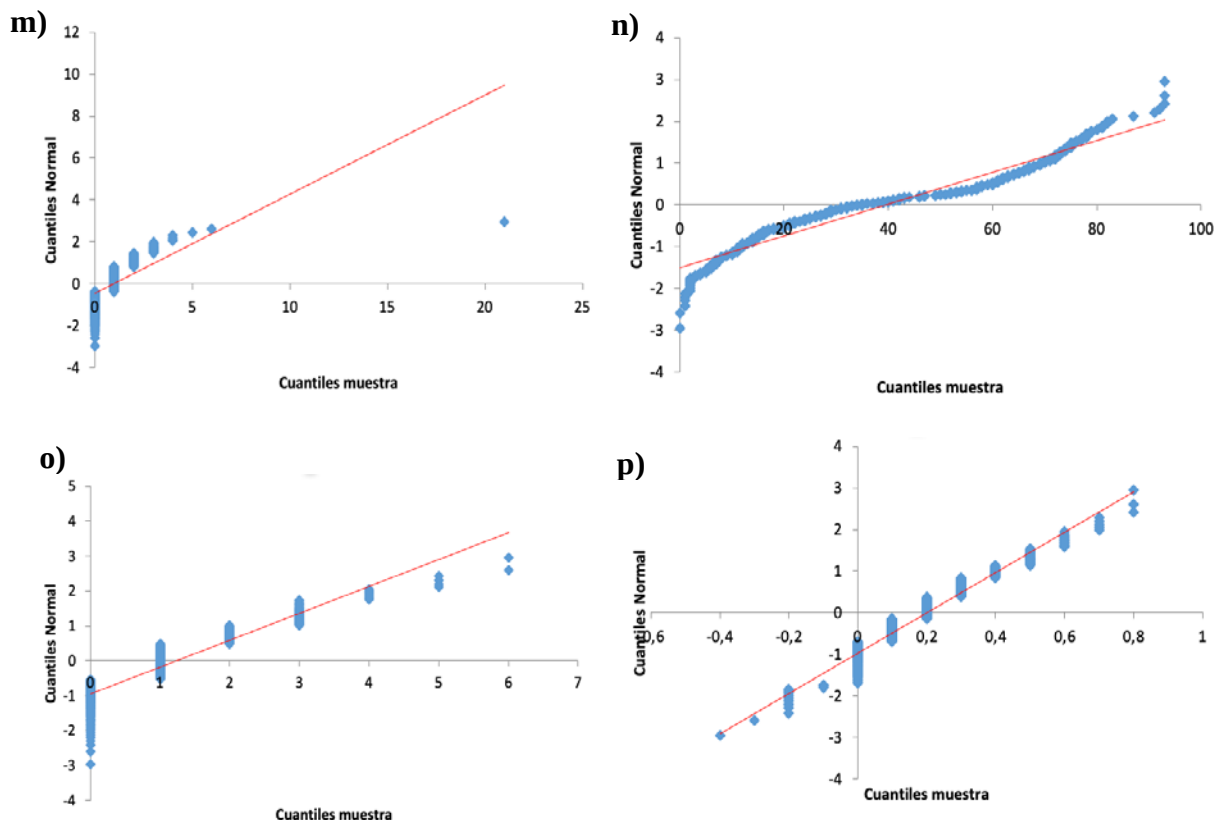


Figura 3-16: Diagramas QQ-Plot para el aceite O-1236: **a)** QQ-Plot Viscosidad a 40 °C; **b)** QQ-Plot Viscosidad a 100 °C; **c)** QQ-Plot Índice de viscosidad; **d)** QQ-Plot Punto de inflamación; **e)** QQ-Plot TAN; **f)** QQ-Plot TBN; **g)** QQ-Plot H₂O; **h)** QQ-Plot hierro; **i)** QQ-Plot cobre; **j)** QQ-Plot plomo; **k)** QQ-Plot silicio; **l)** QQ-Plot aluminio; **m)** QQ-Plot cromo; **n)** QQ-Plot molibdeno; **o)** QQ-Plot plata; **p)** QQ-Plot carbonilla

3.2.3.3 Evaluación de la normalidad

Usando el mismo método del **apartado 3.2.1.4** para el aceite O-1178, se ha aplicado el test de Shapiro-Wilk para comprobar la hipótesis de normalidad de las variables estudiadas en el aceite O-1236. Este test es un instrumento estadístico que evalúa el grado de concordancia de una muestra con una distribución normal. Un valor pequeño del estadístico W del test señala que la muestra no se asemeja bien a una distribución normal.

El test de Shapiro-Wilk propone como hipótesis nula que la variable analizada tiene una distribución normal. Si el p-valor resultante es menor a 0,05, se descarta la hipótesis nula, lo que implica que los datos no siguen una distribución normal.

La **Tabla 3-19** muestra los resultados de realizar el test de Shapiro-Wilk a las diferentes variables del aceite O-1236. En esta tabla, aparecen los valores del estadístico W, los p-valores asociados y la conclusión sobre la normalidad de cada variable usando un nivel de significancia (alpha) de 0,05.

Tabla 3-19: Test de Shapiro-Wilk para el aceite O-1236

	W-stat	p-valor	alpha	normal
V40	0,86	0,00 ^(**)	0,05	no
V100	0,91	0,00 ^(**)	0,05	no
IV	0,94	0,00 ^(**)	0,05	no
PI	0,96	0,00 ^(**)	0,05	no
CARB	0,95	0,00 ^(**)	0,05	no
Fe	0,87	0,00 ^(**)	0,05	no
Ag	0,84	0,00 ^(**)	0,05	no
Al	0,71	0,00 ^(**)	0,05	no
Cr	0,49	0,00 ^(**)	0,05	no
Cu	0,78	0,00 ^(**)	0,05	no
Si	0,86	0,00 ^(**)	0,05	no
Sn	_(*)	_(*)	0,05	_(*)
Ni	0,70	0,00 ^(**)	0,05	no
Pb	0,39	0,00 ^(**)	0,05	no
Mo	0,93	0,00 ^(**)	0,05	no
TAN	0,98	0,00 ^(**)	0,05	no
H ₂ O	0,24	0,00 ^(**)	0,05	no
TBN	0,98	0,00 ^(**)	0,05	no
(*) Los datos del estaño son nulos en toda la muestra				
(**) Los valores p son menores a 0,01 y se representan como 0,00 en la tabla				

Como se muestra en la **Tabla 3-19**, los p-valores de todas las variables son inferiores a 0,05, lo que señala que ninguna de las variables evaluadas se ajusta a una distribución normal.

3.2.3.4 Análisis de componentes principales

De manera análoga a lo expuesto en el **apartado 3.2.1.5**, se expone a continuación la tabla de componentes principales, **Tabla 3-20**, obtenida para la muestra de aceite O-1236 de los carros Leopard.

Cada componente se obtiene como una combinación lineal de las variables originales, calculando los coeficientes de manera que las componentes resultantes no estén correlacionadas entre sí y que la varianza sea máxima en la primera componente, disminuyendo progresivamente en las siguientes. Estos coeficientes se determinan utilizando el método de los

Capítulo 3: Resultados y discusión

multiplicadores de Lagrange, lo que implica la obtención de un conjunto de autovalores y autovectores. Se demuestra que cada autovalor corresponde a la varianza de la componente principal asociada.

Generalmente, solo se conservan aquellos componentes que capturan la mayor parte de la variabilidad de los datos. Es común recomendar que se retengan componentes hasta alcanzar al menos el 80% del total de la varianza explicada. No obstante, existen otros criterios, como el de la media aritmética, que sugieren conservar únicamente las componentes cuyos autovalores sean mayores que 1.

AUTOVECTORES																
	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	CP 6	CP 7	CP 8	CP 9	CP 10	CP 11	CP 12	CP 13	CP 14	CP 15	CP 16
V100	-0,123	-0,333	-0,030	-0,575	-0,083	-0,055	-0,125	-0,114	-0,228	-0,500	-0,013	-0,389	-0,200	-0,041	-0,066	-0,062
IV	0,076	0,246	0,528	-0,006	-0,295	-0,200	0,008	-0,012	-0,426	0,119	0,068	0,021	-0,031	-0,560	-0,095	-0,064
PI	0,146	-0,285	-0,060	-0,021	-0,329	0,519	-0,355	-0,397	0,145	0,043	-0,098	0,244	0,203	-0,286	-0,070	0,111
Fe	0,122	0,557	-0,158	-0,250	0,032	0,204	-0,017	-0,199	-0,077	-0,136	-0,061	0,075	0,217	0,092	0,129	-0,631
Ag	0,409	-0,127	-0,124	-0,117	0,010	-0,093	-0,062	0,341	0,046	0,055	0,058	0,133	0,043	0,046	-0,758	-0,232
Al	0,345	0,074	-0,259	-0,069	0,075	-0,163	0,064	-0,350	0,216	0,123	0,673	-0,154	-0,227	-0,209	0,088	0,058
Cr	0,358	-0,132	0,119	-0,077	0,077	0,145	-0,030	0,531	0,011	-0,284	0,256	-0,013	0,418	-0,142	0,420	0,080
Cu	0,174	0,512	-0,135	-0,338	0,127	0,185	-0,044	0,086	-0,083	0,017	-0,212	-0,060	-0,068	-0,021	-0,135	0,660
Si	0,347	-0,028	-0,180	0,145	-0,288	-0,285	-0,063	-0,059	0,037	0,224	-0,392	-0,601	0,269	0,034	0,115	-0,023
Sn	0,261	-0,146	0,356	-0,287	0,260	0,178	0,010	0,089	0,295	0,345	-0,300	-0,045	-0,442	-0,071	0,221	-0,215
Ni	0,301	-0,113	-0,353	0,044	-0,282	-0,115	-0,042	0,110	-0,438	0,007	-0,109	0,412	-0,409	0,150	0,318	0,002
Pb	0,207	0,246	0,234	0,388	-0,313	0,146	-0,048	0,043	0,320	-0,529	-0,016	-0,131	-0,378	0,135	-0,082	-0,002
Mo	0,282	-0,093	0,466	-0,080	-0,006	0,053	0,036	-0,321	-0,257	0,097	0,193	0,004	0,161	0,650	-0,037	0,139
TAN	0,280	-0,096	0,065	0,075	0,389	-0,384	0,202	-0,359	0,077	-0,395	-0,345	0,302	0,136	-0,189	-0,010	0,088
H2O	0,008	-0,087	-0,057	-0,188	-0,372	0,188	0,871	0,003	0,108	0,005	-0,045	0,032	0,061	-0,033	-0,040	0,032
TBN	0,138	-0,120	-0,122	0,405	0,390	0,471	0,199	-0,059	-0,467	-0,027	-0,020	-0,310	-0,112	-0,151	-0,121	-0,081

Capítulo 3: Resultados y discusión

El diagrama de sedimentación obtenido, **Tabla 3-21**, para evaluar el número de componentes principales que sería adecuado conservar en base a la varianza explicada por dichos componentes principales es el siguiente:

Tabla 3-21: Diagrama de sedimentación

Autovalor	%	% Acumulado
4,019	25,12%	25,12%
2,122	13,26%	38,38%
1,740	10,87%	49,25%
1,345	8,41%	57,66%
1,208	7,55%	65,21%
1,057	6,60%	71,81%
0,944	5,90%	77,71%
0,780	4,87%	82,59%
0,642	4,01%	86,60%
0,478	2,99%	89,59%
0,391	2,44%	92,03%
0,352	2,20%	94,23%
0,316	1,98%	96,21%
0,283	1,77%	97,97%
0,224	1,40%	99,37%
0,100	0,63%	100,00%

Para el caso del aceite O-1236 y carro LEOPARD, se observa que para alcanzar el 80% de variabilidad recogida sería necesario quedarnos con las primeras ocho componentes principales. En cambio, si se siguiera el criterio de la media aritmética, sería suficiente con las seis primeras componentes principales, que explican algo más de un 70% de variabilidad.

Al igual que se indicó en el **apartado 3.2.1.5**, si las variables originales no están correlacionadas de partida, no tiene sentido realizar un análisis de componentes principales.

Capítulo 3: Resultados y discusión

Dado que en el cálculo de los coeficientes de correlación de Pearson se ve que salvo la V40 y V100, el resto de las variables se correlacionan de manera moderada o débil, se puede proseguir el estudio con las variables de las medidas fisicoquímicas originales (V100, IV, PI, Fe, ...). No obstante, en el siguiente estudio se prescindirá como variable independiente de la V40 por estar muy correlacionada con la variable V100.

3.2.3.5 Regresión logística binaria

Se excluye la variable V40 como regresora en la regresión debido a su alta correlación con V100, tal como se mencionó previamente en el análisis de correlación.

Los resultados obtenidos mediante el método de regresión logística binaria se presentan en la **Tabla 3-22**. Esta tabla muestra los coeficientes estimados para cada variable, junto con sus errores estándar, el estadístico de Wald y el p-valor. La interpretación de estos resultados es crucial para evaluar la significancia estadística de las variables incluidas en el modelo.

Tabla 3-22: Resultados de la regresión logística binaria

	Coeficientes	Error estándar	estadístico de Wald	p-valor
Término independiente	-26,72	12,82	4,34	0,04
V100	1,12	0,36	9,75	0,00
IV	0,06	0,07	0,79	0,37
PI	0,05	0,02	7,95	0,00
CARB	0,56	0,63	0,78	0,38
Fe	0,01	0,03	0,18	0,67
Ag	-0,17	0,26	0,41	0,52
Al	0,17	0,20	0,76	0,38
Cr	-0,16	0,19	0,66	0,42
Cu	-0,04	0,03	2,27	0,13
Si	-0,10	0,03	10,97	0,00
Ni	-0,69	0,40	2,98	0,08

Capítulo 3: Resultados y discusión

Pb	-0,04	0,04	1,03	0,31
Mo	-0,01	0,02	0,73	0,39
TAN	-3,50	0,89	15,37	0,00
H₂O	-8,67	5,24	2,73	0,10
TBN	0,93	0,29	9,93	0,00

A continuación, la **Tabla 3-23** muestra la evaluación del desempeño del modelo a través de la precisión de las predicciones. Se presentan el número de aciertos y fallos en la clasificación de las muestras, junto con el porcentaje de éxito total.

Tabla 3-23: Porcentaje de éxito de la regresión logística binaria

Comprobación de resultados	
Número de fallos de predicción	20
Número de aciertos de predicción	304
Porcentaje de éxito en la predicción	93,83%

La **Tabla 3-24** muestra la matriz de confusión, que detalla los distintos escenarios de predicción del modelo: cuando se pronostica una muestra conforme y lo es, cuando se pronostica como conforme y no lo es, y viceversa. Esta matriz es crucial para entender los tipos de errores que puede cometer el modelo.

Tabla 3-24: Matriz de confusión del O-1236

	Observación Conforme	Observación No Conforme	Total
Predicción Conforme	282	14	296
Predicción No Conforme	6	22	28
Total	288	36	324
Precisión	0,98	0,61	0,94

Se realiza una evaluación adicional para determinar la significancia estadística de cada variable, basada en el p-valor (**Tabla 3-22**). Si el p-valor es mayor que 0,05, se acepta la hipótesis nula, indicando que el coeficiente no es significativo. Se obtiene que todas las variables marcadas en rojo no serían estadísticamente significativas.

La **Tabla 3-25** muestra los resultados obtenidos tras eliminar las variables no significativas, proporcionando nuevamente los coeficientes y los indicadores asociados.

Capítulo 3: Resultados y discusión

Tabla 3-25: Resultados de la regresión logística binaria eliminando variables no significativas

	Coeficientes	Error estándar	Estadístico de Wald	p-valor
Término independiente	-10,45	4,06	6,63	0,01
V100	0,74	0,21	12,66	0,00
PI	0,03	0,01	5,11	0,02
Si	-0,07	0,02	11,89	0,00
TAN	-2,86	0,57	25,35	0,00
TBN	0,61	0,20	9,63	0,00

La **Tabla 3-26** proporciona el porcentaje de éxito del modelo tras la eliminación de las variables no significativas:

Tabla 3-26: Porcentaje de éxito de la regresión logística binaria eliminando variables no significativas

Comprobación de resultados	
Número de fallos de predicción	30
Número de aciertos de predicción	294
Porcentaje de éxito en la predicción	90,74%

Finalmente, la **Tabla 3-27**, que muestra la matriz de confusión resultante de este modelo ajustado.

Tabla 3-27: Matriz de confusión eliminando variables no significativas

	Observación Conforme	Observación No Conforme	Total
Predicción Conforme	283	25	308
Predicción No Conforme	5	11	16
Total	288	36	324
Precisión	0,98	0,31	0,91

Se puede apreciar que el modelo predictivo alcanza una precisión del 90,74%. Sin embargo, los errores predominan en las observaciones clasificadas como No Conformes (25 errores) en comparación con aquellos en las observaciones Conformes (5 errores).

Por lo tanto, sería recomendable ajustar el modelo incluyendo más ejemplos de casos No Conformes en la muestra de origen.

3.2.4 Gestión y tratamiento de los datos

El desarrollo tecnológico requiere una gestión eficaz y sistemática de los datos, no sólo para optimizar los procesos de la investigación, sino también para potenciar la posibilidad de encontrar y validar nuevas hipótesis. La creación de una base de datos sólida es una herramienta clave para enfrentar la complejidad y el aumento del volumen de información producida. Este apartado se enfoca en explicar cómo el diseño y el uso de una base de datos apropiada han facilitado la organización, almacenamiento, y análisis de la información obtenida durante esta investigación.

Inicialmente, se tratará la elección de la base de datos adecuada para el proyecto, teniendo en cuenta factores como la cantidad de datos, la frecuencia de acceso y el tipo de información. Posteriormente, se explicará el proceso de creación y desarrollo de la base de datos, resaltando las técnicas usadas para asegurar la seguridad, la integridad de los datos y la eficacia en las consultas.

La base de datos utilizada en el estudio ha servido como un almacén de información que ha aportado mucho valor en el posterior análisis de datos obtenidos e imágenes capturadas.

Este apartado no solo destaca la importancia de una gestión de datos cuidadosa en la investigación, sino que también provee una guía práctica sobre cómo planificar, crear y administrar bases de datos científicas para mejorar el impacto y la eficiencia de sus investigaciones.

3.2.4.1 Descripción de la aplicación utilizada para la gestión de las muestras de aceite

La creación de una base de datos en Microsoft Access 2013 (versión 15.0) surge de la necesidad de contar con un sistema que, además de almacenar datos de manera segura, ofrezca opciones avanzadas de gestión. Entre estas, se incluyen la realización de búsquedas específicas, la modificación de registros existentes, la inclusión de nuevas muestras y la eliminación de datos obsoletos o innecesarios.

Capítulo 3: Resultados y discusión

Para el caso específico de las muestras de aceite, se ha establecido que la forma más adecuada de presentar los datos de las muestras de aceite es mediante una sola tabla. Esta elección se fundamenta en el tipo de información obtenida, que incluye variables que identifican y describen cada muestra, así como sus propiedades físicas y químicas.

El registro de cada entrada en la base de datos está asociado con un identificador único de texto llamado “OTMUESTRA”. Este identificador cumple una doble función: relaciona el número de orden de trabajo con el número de muestra específico, asegurando así que cada entrada en la base de datos sea única y rastreable.

La estructura actual se basa en una única tabla, pero se tiene en cuenta la posibilidad de ampliación. Si se produce un aumento de la información o una diversificación de los usos de la base de datos, se podría optar por crear tablas adicionales. Estas tablas servirían para dividir los datos identificativos, las propiedades fisicoquímicas y cualquier otro conjunto de datos emergentes, todos relacionados por el identificador “OTMUESTRA”.

La tabla principal, **Figura 3-17**, contiene una variedad de variables y tipos de datos que requieren una explicación detallada para entender bien su utilidad y aplicación:

- **Variables identificativas:** Estas variables son esenciales para rastrear la muestra a lo largo de su ciclo de vida. Incluyen datos como el origen de la muestra, la fecha de recolección y el identificador “OTMUESTRA”.
- **Propiedades fisicoquímicas:** Representan el conjunto de características cuantitativas y cualitativas del aceite, como la viscosidad, el punto de inflamación y la presencia de contaminantes.
- **Variables descriptivas:** Aportan información adicional que puede ser relevante para análisis específicos o para documentar observaciones particulares de la muestra.

Es esencial gestionar correctamente estas variables para lograr una buena implementación y uso de la base de datos.

Capítulo 3: Resultados y discusión

Principal	
Nombre del campo	Tipo de datos
OTMUESTRA	Texto corto
OT	Texto corto
MUESTRA	Texto corto
FECHA_INFORME	Fecha/Hora
TIPOdeACEITE	Texto corto
MATRICULA	Texto corto
DICTAMEN	Texto corto
RECOMENDACIONES	Texto largo
VEHICULO	Texto corto
V40	Número
V100	Número
IV	Número
PI	Número
CARB	Número
FE	Número
AG	Número
AL	Número
CR	Número
CU	Número
SI	Número
SN	Número
NI	Número
PB	Número
MO	Número
TAN	Número
H2O	Número
TBN	Número
KMTOMAMUESTRA	Número
FECHATOMA	Fecha/Hora
KMCAMBIO	Número
FECHACAMBIO	Fecha/Hora
MOTOR	Texto corto
FTIR	Texto corto

Figura 3-17: Variables utilizadas en el base de datos

El archivo ejecutable "MuestrasdeAceitesExe.accdb" se ha generado mediante un proceso de diseño manual de formularios. Este método permite personalizar cada pantalla a las tareas concretas que se van a realizar, garantizando que la distribución de los elementos y controles sea intuitiva y agilice el proceso de gestión de la base de datos.

La personalización también implica el uso de Visual Basic for Applications (VBA), un lenguaje de programación que permite añadir funciones especiales que Access no tiene por defecto. Con el código VBA, se incorporan funcionalidades a medida que se adaptan a los procesos específicos y requisitos únicos del manejo de muestras de aceite.

Cuando el usuario hace doble clic sobre el archivo, accede directamente al formulario inicial, llamado "FormPrincipal", **Figura 3-18**. Este formulario es el núcleo de la aplicación, desde el que se puede llegar a las diferentes funciones que se han identificado como esenciales para la gestión eficaz de la base de datos.

FormPrincipal

BASE DE DATOS DE MUESTRAS DE ACEITE

Buscador por Orden de Trabajo

Buscador por Matrícula

Añadir Registro

Eliminar Registro

Salir

Figura 3-18: Formulario inicial

La pantalla principal tiene un botón que te lleva al formulario "FormBuscaOT". Este formulario está diseñado para facilitar la búsqueda de órdenes de trabajo, mostrando un menú desplegable con las distintas opciones, **Figura 3-19**. Las órdenes se guardan en la tabla "Principal", que es la tabla central de la base de datos relacional creada para gestionar las muestras de aceite.

FormBuscaOT

BUSCADOR POR ORDEN DE TRABAJO

Orden de Trabajo

Tipo de Aceite

Muestra

OT10258

OT10210

OT10211

OT10214

OT10226

OT10227

OT10255

OT10257

OT10258

OT10267

OT10277

OT10279

OT10280

OT10286

OT10288

OT10296

OT10298

Ver muestra seleccionada

Ver todas las muestras

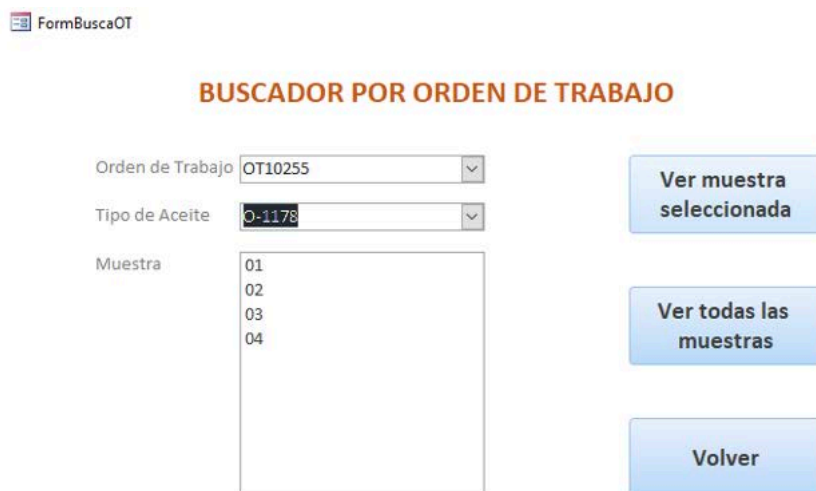
Volver

Figura 3-19: Búsqueda de órdenes de trabajo

Capítulo 3: Resultados y discusión

El control desplegable facilita mucho la interacción con la base de datos, permitiendo escoger de forma rápida la orden de trabajo que quieren consultar.

El formulario "FormBuscaOT" permite al usuario iniciar una búsqueda de datos seleccionando una orden de trabajo del primer control desplegable (**Figura 3-19**). Esta acción define un criterio de búsqueda específico, ofreciendo un inicio definido para la consulta de datos. Al elegir una orden de trabajo, se habilita el siguiente menú desplegable, que muestra los tipos de aceite disponibles vinculados con la orden elegida, **Figura 3-20**.



FormBuscaOT

BUSCADOR POR ORDEN DE TRABAJO

Orden de Trabajo OT10255

Tipo de Aceite O-1178

Muestra

- 01
- 02
- 03
- 04

Ver muestra seleccionada

Ver todas las muestras

Volver

Figura 3-20: Tipo de aceite asociado a cada orden de trabajo

Después de elegir un tipo de aceite, el usuario ve otro menú desplegable con las muestras específicas que se ajustan a los criterios previos, **Figura 3-20**. Este sistema de selección hace que el flujo de trabajo sea más eficiente y reduce la posibilidad de errores al seleccionar los datos, ya que el usuario sigue un camino de opciones lógico y limitado.

Esta aplicación de estos filtros en cascada muestra una buena práctica de diseño de bases de datos, donde la estructura de la información mejora la facilidad de acceso y el entendimiento por parte del usuario.

Después de usar los controles desplegables y elegir una muestra en el formulario "FormBuscaOT", se pueden ver los detalles completos de la muestra elegida. Para ello, solo tienen que realizar una acción esencial: hacer clic en el botón "Ver muestra seleccionada", **Figura 3-20**. Esto abre el siguiente formulario en la secuencia, llamado "FormMuestra", que muestra toda la información relevante de la muestra seleccionada, **Figura 3-21**.

Capítulo 3: Resultados y discusión

The screenshot displays the 'FormMuestra' interface. At the top, there are input fields for 'ORDEN DE TRABAJO' (OT10373), 'MUESTRA' (01), and 'TIPO DE ACEITE' (O-1178), with buttons for 'Ver informe' and 'Volver'. Below this is the 'DICTAMEN' section, containing 'CONFORMIDAD' (CONFORME), 'FECHA INFORME' (16/01/2023), and 'RECOMENDACIONES' (A1: Eviar nueva muestras a mitad del periodo previsto), with a 'Modificar' button. The 'ANÁLISIS QUÍMICO' section features a table of chemical parameters with their respective values. The 'RESULTADO DE OXIDACIÓN Y NITRACIÓN' section includes an 'FTIR' input field. At the bottom, there is a 'FOTOGRAFÍAS' section with a 'Ver fotografías' button.

V40	V100	IV	PI	CARB	FE	AG	AL	CR	CU	SI	SN	NI	PB	MO	TAN	H2O	TBN
51	9	157	231		17	1	15	0	58	14	0	1	46	40			

Figura 3-21: Información de la muestra seleccionada

La interfaz que se presenta en la **Figura 3-21** ofrece una vista detallada de los elementos más importantes de una muestra elegida. Esta pantalla es el enlace entre el almacenamiento de datos y el usuario final, exhibiendo variables esenciales como los resultados de conformidad, fechas relevantes, recomendaciones sugeridas y mediciones de análisis químico.

El resultado de la conformidad es un elemento clave en la gestión de muestras. Este dato, junto con la fecha en la que se validó dicho resultado, ofrece una cronología de la muestra que es fundamental para llevar un registro apropiado y una trazabilidad veraz.

El análisis no solo proporciona resultados y fechas, sino también recomendaciones para apoyar la toma de decisiones y las acciones correctivas posteriores. Estas sugerencias permiten a los usuarios actuar basándose en información precisa y fiable.

Otro aspecto clave de la base de datos utilizada es la flexibilidad. En cualquier momento, se pueden editar los valores que se muestran para incorporar cambios o correcciones, usando la funcionalidad de edición que ofrece el botón "Modificar" (**Figura 3-21**). Esta capacidad de ajuste es esencial en entornos donde los datos están siempre sujetos a revisión.

Otra opción disponible es "Ver informe" (**Figura 3-21**). Esta función crea un informe detallado, llamado "InformeMuestras", que contiene toda la información sobre la muestra y está diseñado para ser impreso, lo que permite compartirlo y analizarlo (**Figura 3-22**).

InformeMuestras

Informe

ORDEN DE TRABAJO		MUESTRA		TIPO DE ACEITE		DICTAMEN		FECHA DEL INFORME		RECOMENDACIONES								
V40	V100	IV	PI	CARB	FE	AG	AL	CR	CU	SI	SN	NI	PB	MO	TAN	H2O	TBN	FTIR
OT10373		01		O-1178		CONFORME		16/01/2023		A1: Eviar nueva muestras a mitad del periodo previsto								
51	9	157	231		17	1	15	0	58	14	0	1	46	40				

miércoles, 10 de abril de 2024

Página 1 de 1

Figura 3-22: Informe de las muestras

Las imágenes son un elemento esencial en el presente estudio ya que proporcionan una dimensión adicional en el análisis de datos. Mediante el botón "Ver fotografías" (Figura 3-21), el usuario puede ingresar a un visualizador integrado que muestra las fotografías relacionadas con la muestra en estudio. Este enfoque multimedia va más allá del ámbito tradicional de las bases de datos, agregando profundidad y contexto al conjunto de datos.

El diseño de la base de datos puede soportar una variedad de tipologías fotográficas, pero en el presente trabajo han sido tres técnicas fotográficas, desarrolladas en el apartado 3.4.5 del presente capítulo, que proporcionan perspectivas únicas y esenciales para una comprensión integral de las muestras (Figura 3-23):

- **Fotos en plato:** Muestran la muestra en un entorno controlado, destacando características físicas visibles.
- **Fotos en cubeta:** Permiten apreciar el estado del líquido y sus propiedades en un recipiente transparente.
- **Fotos mediante endoscopia:** Revelan detalles internos que no son visibles a simple vista utilizando una cámara fotográfica de peores características técnicas.

Capítulo 3: Resultados y discusión

FormFotos

ORDEN DE TRABAJO

OT10372

MUESTRA

01

TIPO DE ACEITE

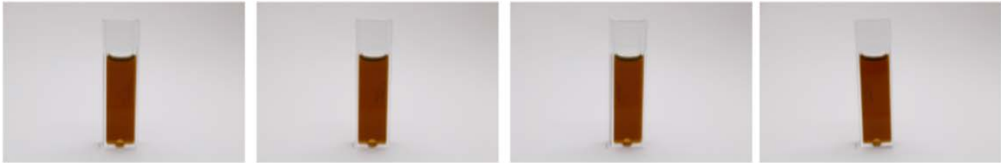
O-1178

Volver

PLATO



CUBETA



ENDOSCOPIA



Figura 3-23: Fotografías de una muestra en la base de datos

La base de datos facilita una navegación sencilla por la galería fotográfica. Cuando hay varias categorías de imágenes, los usuarios pueden desplazarse verticalmente para ver todos los tipos de fotografías que hay (**Figura 3-23**).

Cada muestra tiene una carpeta asignada en el sistema de archivos, según su tipología fotográfica, para asegurar que las imágenes estén ordenadas y se puedan acceder a ellas fácilmente. Si no hay archivos en esas carpetas, no habrá imágenes disponibles, por lo que es importante gestionar bien los archivos.

En la pantalla donde se muestran todas las muestras disponibles según la Orden de trabajo y el Tipo de aceite elegidos, se puede ver también todas las muestras que cumplan con estos criterios, una tras otra, cambiar cualquier dato que pueda estar equivocado, o enviar esta información a un informe preparado para imprimir, con botones parecidos a los que ya se han explicado para otras pantallas (**Figura 3-24**).

Capítulo 3: Resultados y discusión

FormMuestra

ORDEN DE TRABAJO

OT10373

Ver informe

TIPO DE ACEITE

O-1178

Volver

MUESTRA

17

Modificar

DICTAMEN

CONFORMIDAD

NO CONFORME

FECHA INFORME

16/01/2023

RECOMENDACIONES

B2: Proceder al cambio del aceite

ANÁLISIS QUÍMICO

V40	V100	IV	PI	CARB	FE	AG	AL	CR	CU	SI	SN	NI	PB	MO	TAN	H2O	TBN
52	9	168	233		21	3	12	0	80	16	0	1	168	54			

FTIR

FTIR

InformeMuestras

Informe

ORDEN DE TRABAJO	MUESTRA	TIPO DE ACEITE	DICTAMEN	FECHA DEL INFORME	RECOMENDACIONES													
V40	V100	IV	PI	CARB	FE	AG	AL	CR	CU	SI	SN	NI	PB	MO	TAN	H2O	TBN	FTIR
OT10373	01	O-1178	CONFORME	16/01/2023	A1: Eviar nueva muestras a mitad del periodo previsto													
51	9	157	231	17	1	15	0	58	14	0	1	46	40					
OT10373	02	O-1178	CONFORME	16/01/2023	A1: Eviar nueva muestras a mitad del periodo previsto													
50	9	159	227	20	0	11	0	35	15	0	1	37	64					
OT10373	03	O-1178	NO CONFORME	16/01/2023	B2: Proceder al cambio del aceite.													
55	9	158	227	11	3	10	0	56	9	0	1	94	22					
OT10373	04	O-1178	CONFORME	16/01/2023	A1: Eviar nueva muestras a mitad del periodo previsto													
51	9	159	231	22	1	9	0	34	18	0	1	28	66					
OT10373	05	O-1178	CONFORME	16/01/2023	A1: Eviar nueva muestras a mitad del periodo previsto													
52	9	157	231	20	1	16	0	40	13	0	1	41	62					
OT10373	06	O-1178	CONFORME	16/01/2023	A1: Eviar nueva muestras a mitad del periodo previsto													
52	9	154	231	24	1	14	0	60	11	0	1	66	76					
OT10373	07	O-1178	CONFORME	16/01/2023	A1: Eviar nueva muestras a mitad del periodo previsto													
51	9	159	235	25	0	11	0	66	18	0	1	52	80					
OT10373	08	O-1178	NO CONFORME	16/01/2023	B2: Proceder al cambio del aceite.													
51	9	159	227	19	1	15	0	88	8	0	1	61	23					
OT10373	09	O-1178	CONFORME	16/01/2023	A1: Eviar nueva muestras a mitad del periodo previsto													
52	9	156	235	10	1	7	0	31	12	0	1	68	60					
OT10373	10	O-1178	CONFORME	16/01/2023	A1: Eviar nueva muestras a mitad del periodo previsto													
50	9	152	235	15	2	9	0	65	16	0	1	50	80					
OT10373	11	O-1178	CONFORME	16/01/2023	A1: Eviar nueva muestras a mitad del periodo previsto													
50	9	159	231	14	1	12	0	41	18	0	1	20	66					

Figura 3-24: Visualización de las muestras de una orden de trabajo

El segundo botón de la pantalla principal (**Figura 3-18**) es otro buscador, “FormBuscaMT” que permite buscar registros por el número de matrícula del vehículo en estudio. Al igual que el caso anterior, tiene un desplegable para escoger el número de matrícula que se quiere consultar (**Figura 3-25**). Una vez elegido, en el siguiente desplegable se mostrarán los Tipos de Aceite posibles para esa matrícula. Después de seleccionar el que se desee, se mostrarán en las listas inferiores, las Órdenes de trabajo

Capítulo 3: Resultados y discusión

que coinciden con estos criterios. Al escoger una de ellas, en la lista adyacente, aparecerán todas las muestras posibles.

The figure consists of three screenshots of a web application titled 'FormBuscaMT'. The main heading is 'BUSCADOR POR MATRÍCULA'. The interface includes three input fields on the left: 'Número de Matrícula', 'Tipo de Aceite', and 'Orden de Trabajo'. To the right of these fields are three buttons: 'Ver muestra seleccionada', 'Ver todas las muestras', and 'Volver'.

Screenshot 1 (Top): The search fields are empty. The 'Orden de Trabajo' field is a list box with no items visible.

Screenshot 2 (Middle): The 'Número de Matrícula' field is active, showing a dropdown list of numbers. The number '103086' is highlighted. The 'Tipo de Aceite' field is empty. The 'Orden de Trabajo' field is empty.

Screenshot 3 (Bottom): The 'Número de Matrícula' field contains the value '103090'. The 'Tipo de Aceite' field contains the value 'O-1178'. The 'Orden de Trabajo' field contains the value 'OT10420'. The 'Muestra' field, which was empty in the previous screenshots, now contains the value '01'.

Figura 3-25: Buscador de registros por número de matrícula

Capítulo 3: Resultados y discusión

De manera similar, se pueden ver y listar en un informe todas las muestras correspondientes a una orden de trabajo mediante el botón “Ver todas las muestras”, que llevará a la misma pantalla ya descrita anteriormente, o se puede ver y listar una única muestra, de manera exacta a la explicada en el buscador previo.

De manera similar, se puede acceder al informe con todas las muestras de una orden de trabajo usando el botón "Ver todas las muestras" (**Figura 3-20**), que conducirá a la misma pantalla que ya descrita anteriormente, o se puede acceder a una sola muestra, del mismo modo que se explicó en el buscador anterior.

El tercer botón de la pantalla principal es el de “Añadir registro” (**Figura 3-18**). Al pulsarlo, se accede al formulario “FrmNew”, que muestra todos los campos que hay que completar para añadir un nuevo registro a la tabla “Principal” (**Figura 3-21**). Tras introducir los datos de la nueva muestra que se quiere añadir, se debe pulsar el botón Guardar, que confirmará si la inserción se ha realizado correctamente. Si se quiere volver a insertar otra muestra, se debe pulsar el botón de “Limpiar” para que todos los campos se vacíen y se puedan grabar nuevos datos.

The screenshot shows a web application window titled "FrmNew" with a close button (X) in the top right corner. The main heading is "Nueva Muestra" in orange. The form contains the following fields:

Field Name	Field Type	Field Name	Field Type
OT	Dropdown	V40	Text (0)
MUESTRA	Text	V100	Text (0)
FECHA INFORME	Text	IV	Text (0)
TIPO DE ACEITE	Text	PI	Text (0)
MATRICULA	Text	CARB	Text (0)
DICTAMEN	Text	FE	Text (0)
RECOMENDACIONES	Text Area	AG	Text (0)
VEHICULO	Text	AL	Text (0)
MOTOR	Text	CR	Text (0)
KM CAMBIO	Text (0)	CU	Text (0)
FECHA CAMBIO	Text	SI	Text (0)
KM TOMA MUESTRA	Text (0)	SN	Text (0)
FECHA TOMA	Text	NI	Text (0)
		PB	Text (0)
		MO	Text (0)
		TAN	Text (0)
		H2O	Text (0)
		TBN	Text (0)
		FTIR	Text

On the right side of the form, there are three buttons: "Guardar", "Limpiar", and "Cerrar".

Figura 3-26: Añadir registros en la base de datos

Capítulo 3: Resultados y discusión

El botón “Eliminar registro” del formulario principal de la aplicación (**Figura 3-18**) permite borrar una muestra de la tabla “Principal”. Para ello, hay que seleccionar en un desplegable la Orden de trabajo a la que pertenece la muestra, y luego elegir el tipo de aceite correspondiente en otro desplegable (**Figura 3-27**). Así se mostrarán todas las muestras que coinciden con esos criterios en una lista a la derecha. Hay que seleccionar una muestra y pulsar el botón “Filtrar”. Esto cargará los valores de la muestra filtrada en las variables. Al pulsar el botón “Eliminar” se borrará ese registro de la tabla “Principal”.

FrmNew

Eliminar Muestra

Orden de Trabajo Muestra

Tipo de Aceite

OT	OT10373	V40	51	Eliminar
MUESTRA	01	V100	9	Cerrar
		IV	157	
		PI	231	
FECHA INFORME	16/01/2023	CARB		
TIPO DE ACEITE	O-1178	FE	17	
MATRICULA		AG	1	
DICTAMEN	CONFORME	AL	15	
RECOMENDACIONES	A1: Eviar nueva muestras a mitad del periodo previsto	CR	0	
		CU	58	
		SI	14	
		SN	0	
		NI	1	
VEHICULO		PB	46	
MOTOR	TRANSMISIÓN	MO	40	
KM CAMBIO	4010	TAN		
FECHA CAMBIO	28/04/2021	H2O		
KM TOMA MUESTRA	5217	TBN		
FECHA TOMA	28/11/2022	FTIR		

Figura 3-27: Eliminar muestra

La última opción de la pantalla principal es la de “Salir”, **Figura 3-18**, que cierra directamente la aplicación.

3.3 Propiedades fisicoquímicas del aceite

Los ensayos fisicoquímicos son procedimientos estandarizados que evalúan las propiedades de los aceites para determinar su conformidad con las especificaciones técnicas para su uso en vehículos militares. Estos procedimientos son cruciales para garantizar la calidad y el rendimiento del lubricante en su aplicación específica.

3.3.1 Línea de referencia

Es importante conocer el lubricante utilizado en el equipo (motor o caja de cambios) que se está analizando, ya que esto permite identificar la degradación de sus aditivos y la presencia de elementos extraños que puedan indicar su estado de salud. Además de conocer la marca, tipo y viscosidad del lubricante, es necesario tener información sobre su acidez o basicidad total (TAN o TBN, respectivamente), los aditivos metálicos presentes y sus concentraciones, así como su resistencia a la oxidación. Por ejemplo, para llevar a cabo pruebas como la espectrometría infrarroja por transformadas de Fourier (FT-IR), es fundamental que el laboratorio tenga una muestra de referencia para comparar sus resultados con los del aceite usado [107]. Por lo tanto, es recomendable enviar una muestra de aceite nuevo, preferiblemente del mismo lote que se está analizando, para establecer una línea de base y utilizarla como referencia. Este análisis proporciona información precisa sobre el lubricante, evitando depender únicamente de los valores de especificaciones que suelen variar en comparación con el aceite en uso. Para determinar esta línea de referencia, se ha utilizado el análisis de muestras de los aceites nuevos O-1178 y O-1236. Los resultados del análisis de estos aceites nuevos que sirven como línea de referencia son los siguientes:

Tabla 3-28: Línea base del aceite multigrado O-1178 (lubricante de la caja de cambios) y O-1236 (lubricante del motor diésel)

Propiedad (Norma)	O-1178 (5W30)	O-1236 (15W40)
Viscosidad a 40 °C (cSt) (ASTM D445)	56,98	106,2
Viscosidad a 100 °C (cSt) (ASTM D445)	9,87	14,2
Punto de inflamación (°C) (ASTM D7094)	196,5	221,5

Capítulo 3: Resultados y discusión

TAN (mg KOH/g) (ASTM D664)	2,1	1,4
TBN (mg KOH/g) (ASTM D2896)	11,1	12,7
Agua (ppm) (ASTM D6304)	903	696
Fe (ppm) (ASTM D6595)	2	2
Ag (ppm) (ASTM D6595)	0	0
Al (ppm) (ASTM D6595)	4	2
Cu (ppm) (ASTM D6595)	0	0
Si (ppm) (ASTM D6595)	0	2
Sn (ppm) (ASTM D6595)	10	0
Ni (ppm) (ASTM D6595)	0	0
Pb (ppm) (ASTM D6595)	0	0
Mo (ppm) (ASTM D6595)	42	0

Se observa que los dos aceites nuevos estudiados para establecer la línea base de ambos aceites, el O-1178 y el O-1236, presentan unas propiedades fisicoquímicas diferentes. Esto es porque lubrican equipos distintos. El aceite multigrado O-1178 (5W30) lubrica la caja de cambios y el aceite multigrado O-1236 (15W40) lubrica el motor diésel de los respectivos vehículos en estudio.

Analizando los resultados obtenidos y mostrados en la **Tabla 3-28** se observa que la diferencia entre ellos se atribuye a varios factores:

- **Diferencias en las aplicaciones:** La caja de cambios y el motor tienen requerimientos de funcionamiento distintos. La caja de cambios necesita un aceite que pueda fluir fácilmente a bajas temperaturas para permitir cambios de engranajes suaves, mientras que el motor diésel requiere un aceite que mantenga su película lubricante a altas temperaturas para proteger las piezas móviles.
- **Viscosidad a 40 °C y 100 °C:** La viscosidad es una propiedad fundamental de los aceites lubricantes que indica la resistencia de un fluido a fluir. En los aceites de

Capítulo 3: Resultados y discusión

motor y de transmisión (caja de cambio), las diferencias en viscosidad se deben principalmente a los requisitos específicos de funcionamiento y protección de los componentes a los que están destinados a lubricar. Los valores de viscosidad a 40 °C y 100 °C reflejan cómo se comportan estos aceites a diferentes temperaturas. El aceite O-1178 (5W30) tiene una viscosidad más baja tanto a 40 °C como a 100 °C en comparación con el O-1236 (15W40), lo que indica que el 5W30 es más fluido. En el contexto del motor, esta menor viscosidad es beneficiosa para facilitar el arranque en frío, ya que reduce la resistencia al flujo a temperaturas bajas, mejorando la eficiencia durante el arranque. En cuanto a la transmisión, aunque no afecta directamente el arranque en frío del motor, una menor viscosidad como la del 5W30 también facilita la operación a bajas temperaturas, reduciendo la resistencia interna y mejorando la eficiencia operativa. Por otro lado, el aceite 15W40, con su mayor viscosidad, ofrece una mejor protección a las partes del motor que operan a mayores temperaturas, asegurando una lubricación adecuada bajo cargas pesadas y altas temperaturas.

Los valores de viscosidad a 40 °C y 100 °C reflejan cómo se comportan estos aceites a diferentes temperaturas. El aceite O-1178 (5W30) tiene una viscosidad más baja tanto a 40 °C como a 100 °C en comparación con el O-1236 (15W40), lo que indica que el 5W30 es más fluido. En el contexto del motor, esta menor viscosidad es beneficiosa para facilitar el arranque en frío, ya que reduce la resistencia al flujo a temperaturas bajas, mejorando la eficiencia durante el arranque. En cuanto a la transmisión, aunque no afecta directamente el arranque en frío del motor, una menor viscosidad como la del 5W30 también facilita la operación a bajas temperaturas, reduciendo la resistencia interna y mejorando la eficiencia operativa.

- **Punto de inflamación:** El punto de inflamación es la temperatura más baja a la que un líquido emite suficientes vapores para formar una mezcla inflamable con el aire cerca de la superficie del líquido. Un punto de inflamación más alto en el O-1236 (15W40) sugiere que este aceite puede operar a temperaturas más altas antes de que el riesgo de ignición de vapores se convierta en una preocupación. Esto es particularmente importante en aplicaciones de motor, donde las temperaturas pueden ser significativamente más altas que en otras partes del vehículo, como la caja de cambios. Esto ayuda a prevenir la formación de vapores que podrían inflamarse dentro del motor.

- **El número de acidez total (TAN) y el número de basicidad total (TBN):** El TAN y el TBN son indicadores de la capacidad del aceite para neutralizar ácidos y bases, respectivamente. Aunque estos valores varían ligeramente entre los dos aceites, no influyen directamente en la viscosidad, pero sí en la capacidad del aceite para proteger contra la corrosión y neutralizar ácidos, lo cual es importante para la durabilidad del lubricante y la protección del motor. El TAN mide la cantidad de ácidos presentes en el aceite, lo que puede indicar la oxidación o degradación del aceite a lo largo del tiempo. Un TAN más alto en el O-1178 (5W30) sugiere que este aceite puede contener más ácidos, posiblemente debido a la naturaleza de su uso en la caja de cambios, donde las condiciones de operación pueden promover la formación de ácidos. Sin embargo, el TAN también puede aumentar a medida que el aceite envejece, por lo que este valor debe monitorizarse para evitar la corrosión de componentes internos. El TBN es una medida de la capacidad de un aceite para neutralizar ácidos, lo que es crucial para proteger contra la corrosión del equipo a lubricar. Un TBN más alto en el O-1236 (15W40) indica que este aceite tiene una mayor capacidad de neutralizar ácidos, lo cual es especialmente importante para aplicaciones de motor donde los subproductos de la combustión pueden formar ácidos. Esto sugiere que el 15W40 está mejor equipado para manejar las condiciones ácidas y ofrecer una protección más prolongada frente a la corrosión en el motor.
- **Contenido de agua:** El contenido de agua en aceite puede provenir de la condensación o de la entrada de agua al sistema. El agua en el aceite puede causar corrosión, reducir la eficacia de los aditivos, y en casos extremos, provocar la formación de emulsiones que afectan negativamente la lubricación. El menor contenido de agua en el O-1236 (15W40) sugiere que este aceite es menos susceptible a la absorción de agua o que está mejor protegido contra la entrada de agua, lo cual es crucial en el entorno de alta temperatura del motor. Aunque el contenido de agua en el aceite puede afectar sus propiedades lubricantes y su viscosidad, las diferencias indicadas en la **Tabla 3-28** no son suficientes para explicar las variaciones en la viscosidad. Sin embargo, es importante mantener el contenido de agua bajo para evitar la formación de óxidos y la degradación del aceite.

- **Elementos metálicos:** La presencia de elementos metálicos en aceites lubricantes puede deberse a varios factores, incluyendo aditivos intencionalmente añadidos en la formulación del aceite, contaminación durante la producción o almacenamiento, y desgaste de componentes metálicos en el sistema lubricados. Se observa en la **Tabla 3-28** que las muestras O-1178 (5W30) y O-1236 (15W40) apenas tienen la presencia de elementos metálicos procedentes del desgaste (Fe, Cu, Pb, Sn, Al, Ni, Cr) ni procedentes del ambiente como contaminación (Al, Si) debido fundamentalmente a que son nuevos y no contienen impurezas. Sin embargo, se observa la presencia de molibdeno en el aceite O-1178 con una concentración de 42 ppm. El molibdeno es un elemento que generalmente se añade intencionalmente a los aceites lubricantes como parte de aditivos orgánicos de molibdeno o como disulfuro de molibdeno (MoS_2). Estos aditivos se utilizan por varias razones [24]:
 - Reducir la fricción y el desgaste: El molibdeno forma una película sobre las superficies metálicas que puede soportar altas presiones, reduciendo la fricción y, por tanto, el desgaste entre las partes móviles del motor o la caja de cambios. Esto es especialmente útil en condiciones de carga pesada y altas temperaturas.
 - Mejorar la estabilidad a la oxidación: Los compuestos de molibdeno pueden mejorar la resistencia del aceite a la oxidación, prolongando su vida útil y permitiendo intervalos más largos entre cambios de aceite.
 - Proteger contra la corrosión: Al formar una capa protectora sobre los componentes, los aditivos que contienen molibdeno pueden ayudar a prevenir la corrosión, especialmente en ambientes húmedos o ácidos.
 - Actuar en condiciones extremas: Los aditivos de molibdeno son particularmente efectivos en condiciones extremas, donde otros aditivos pueden descomponerse o volverse menos efectivos.

La ausencia de molibdeno en el aceite O-1236 (15W40) sugiere que este aceite utiliza una formulación diferente de aditivos, posiblemente enfocada en otros métodos para lograr propiedades deseadas como protección contra el desgaste, estabilidad térmica y protección contra la corrosión. La selección de aditivos en un aceite lubricante depende de los objetivos específicos de rendimiento y protección requeridos por la aplicación a la que está destinado el aceite.

Capítulo 3: Resultados y discusión

Por tanto, las diferencias reflejadas en la **Tabla 3-28** debido a las formulaciones específicas de cada tipo de aceite para cumplir con los requisitos operativos y de protección de los diferentes sistemas del vehículo, asegura que tanto la caja de cambios como el motor funcionen de manera óptima bajo sus respectivas condiciones de trabajo. Las diferencias en viscosidad entre el aceite 5W30 para cajas de cambio y el 15W40 para motores están diseñadas para cumplir con las necesidades específicas de cada aplicación. El 5W30 ofrece un flujo fácil y protección a bajas temperaturas, ideal para cajas de cambio, mientras que el 15W40 proporciona una mayor protección a altas temperaturas, esencial para el funcionamiento óptimo del motor.

3.3.2 Análisis de los resultados

Se ha realizado un análisis del aceite lubricante de motores y cajas de cambio de 264 vehículos pesados del Ejército de Tierra para evaluar su correspondiente aceite lubricante. Este proceso ha permitido conocer el estado actual del lubricante (diagnóstico) y predecir su estado futuro (pronóstico) [108].

Para ello, de estos 264 vehículos, se analizaron 344 muestras de aceite multigrado de caja de cambio 5W30 (O-1178), de las cuales 257 fueron clasificadas como "Conformes" y 87 como "No Conformes" y 429 muestras de aceite multigrado de motor 15W40 (O-1236) de las que 337 fueron clasificadas con "Conforme" y 92 como "No Conformes", **Figura 3-28**.

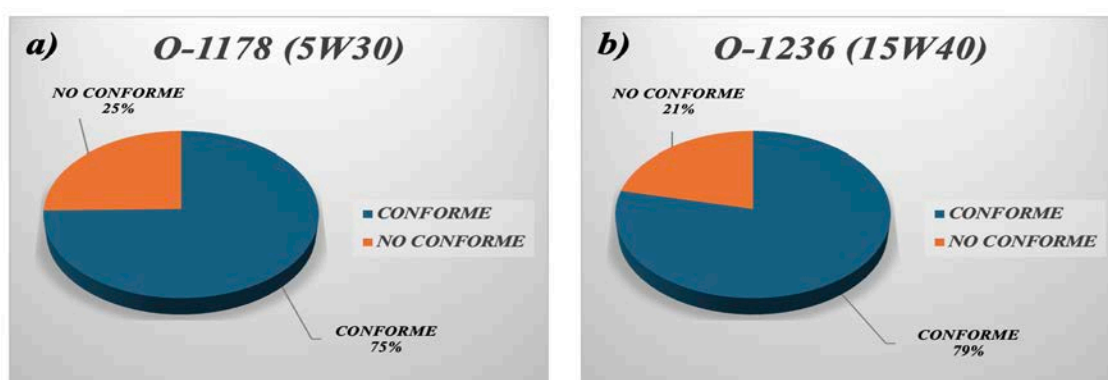


Figura 3-28: Porcentaje de Conforme vs No Conforme para **a)** aceite de caja de cambios O-1178; **b)** aceite de motor O-1236

La clasificación se basa en el resultado de uno o varios de todos los parámetros analizados. Un aceite puede ser clasificado como No Conforme si no cumple con las especificaciones establecidas reglamentariamente (*vide supra*), es decir, si ha modificado

Capítulo 3: Resultados y discusión

sus propiedades fisicoquímicas, se ha contaminado con elementos externos o presenta elementos metálicos que indican desgaste.

Algunas de las propiedades fisicoquímicas que pueden alterarse en el aceite son la viscosidad, el índice de acidez, el contenido de agua, el punto de inflamación y el contenido de cenizas. Estos cambios pueden afectar la capacidad del aceite para lubricar y proteger correctamente las piezas del motor.

La **Figura 3-29** muestran el tipo de “no conformidades” que se hallaron en el análisis de los aceites. Es posible que una “no conformidad” del aceite analizado tenga más de una causa, es decir, que se deba tanto a la contaminación por elementos ambientales como a la presencia de elementos de desgaste.

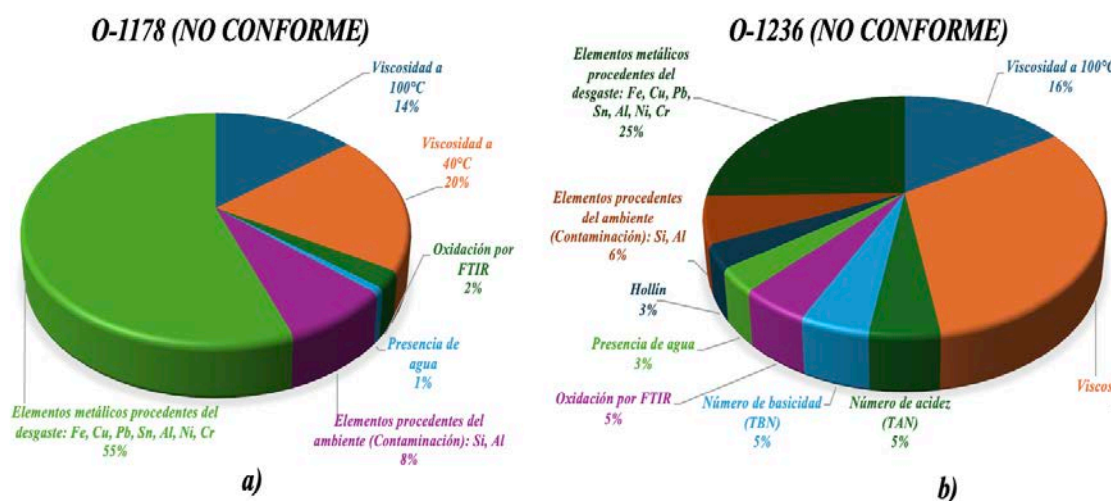


Figura 3-29: No Conformidades para el aceite multigrado: **a)** O-1178 (5W30) y **b)** O-1236 (15W40)

La **Figura 3-29-a** muestra que la presencia de elementos metálicos es la causa principal de las no conformidades en el aceite de la caja de cambios (O-1178).

Por otro lado, en la **Figura 3-29-b)** se muestra que la viscosidad a 40 °C es la causa principal de las no conformidades en el aceite del motor (O-1236). Aunque las especificaciones de los aceites analizados no definen un intervalo de valores para la viscosidad a 40 °C, se ha realizado un estudio de este parámetro estableciendo unos límites para determinar su conformidad o no conformidad. Dicho estudio se desarrolla en el siguiente **apartado 3.3.2.1**. El resto de las variables se han caracterizado según las características definidas por la especificación correspondiente.

3.3.2.1 Límites de precaución y alarma para la viscosidad a 40 °C de los aceites O-1178 y O-1236

Las especificaciones de los aceites analizados: TL-9150-0080 Iss4 [109] para el O-1178 y la MIL-PRF 2104 N[110] para el O-1236 no establecen unos límites para la viscosidad a 40 °C para el aceite de motor y de caja de cambios. Tan solo indican que hay que informar/anotar el resultado de la viscosidad a 40 °C.

La determinación de la viscosidad a 40 °C no forma parte de las especificaciones de los aceites, porque se cree que es una temperatura poco significativa para el funcionamiento de los vehículos, ya que el motor y la caja de cambios suelen alcanzar temperaturas más elevadas. Sin embargo, el cálculo de la viscosidad a 40 °C es necesario para conocer el índice de viscosidad y, así conocer, cómo varía el comportamiento del aceite con los cambios de temperatura. Por ello, siempre se determina la viscosidad a 40 °C junto con la viscosidad a 100 °C, valor que sí establecen las correspondientes especificaciones y las SAE J300 y J306 [18,19].

La ausencia de límites específicamente definidos para la viscosidad a 40 °C en las especificaciones de aceites lubricantes para motores y cajas de cambios, a diferencia de los límites establecidos para la viscosidad a 100 °C, se debe principalmente a las diferencias en las prioridades de rendimiento y protección en diversas condiciones operativas. A continuación, se detallan algunas razones que se consideran clave:

- Los límites de viscosidad a 100 °C se enfocan en asegurar un buen rendimiento y protección tanto del motor como de la caja de cambios en el rango de temperatura normal de uso. Esa temperatura es precisamente en donde ambos aceites trabajan la mayor parte del tiempo y donde es más importante mantener una viscosidad adecuada para la lubricación eficaz. Las condiciones a 100 °C son más representativas de las situaciones de estrés para el aceite.
- La viscosidad a 40°C es más relevante para las condiciones de arranque en frío y temperaturas ambiente más bajas. Sin embargo, la necesidad de límites estrictos a esta temperatura es menos crítica porque los aceites están diseñados para funcionar dentro de un amplio rango de temperaturas bajas y los motores modernos están diseñados para arrancar eficientemente en una variedad de condiciones climáticas. Además, los fabricantes ajustan las formulaciones de los aceites para mejorar el

Capítulo 3: Resultados y discusión

rendimiento a bajas temperaturas sin comprometer la protección a temperaturas operativas más altas.

- Los aceites multigrado estudiados: O-1178 (5W30) y O-1236 (15W40), tienen especificaciones en donde la "W" (que significa Winter, invierno en inglés) indica la viscosidad del aceite a bajas temperaturas y su capacidad de arranque en frío. Estos grados proporcionan una guía sobre el comportamiento del aceite a bajas temperaturas, sin necesidad de establecer límites estrictos para la viscosidad a 40°C.
- Los vehículos operan en una amplia gama de condiciones ambientales y de carga, lo que hace que sea práctico establecer especificaciones que aseguren el rendimiento del aceite en las condiciones más demandantes (temperaturas altas en concreto a 100°C) donde la protección contra el desgaste y la estabilidad térmica son críticas.
- Los aceites modernos, gracias a sus tecnologías aditivas y sus formulaciones avanzadas, pueden mantener una viscosidad adecuada y propiedades de protección en un rango más amplio de temperaturas, que incluye tanto las bajas como las altas temperaturas de funcionamiento. Esto puede hacer que no sea necesario fijar límites estrictos a 40°C, ya que el enfoque está en asegurar el rendimiento donde es más crítico.

Por todo ello, se considera que no aparecen límites de la viscosidad a 40°C para ninguno de los dos aceites analizados en las especificaciones que caracterizan a ambos. Sin embargo, a partir de los resultados obtenidos se van a establecer unos límites de precaución y de alarma estadísticos, ya que se considera que se tienen suficientes datos para ello.

Los valores individuales de una muestra se comparan posteriormente con la media poblacional para determinar su posición y evaluar su normalidad.

Se determina la viscosidad a 40°C según ASTM D 445 de cada uno de los aceites, y los valores que se muestran en la **Tabla 3-29** corresponden a la media y la desviación estándar de los dos tipos de aceite estudiado: O-1236 y O-1178.

Capítulo 3: Resultados y discusión

Tabla 3-29: Media y desviación estándar de la viscosidad a 40°C de los aceites O-1178 y O-1236

Límite	O-1236 (aceite de motor)	O-1178 (aceite caja de cambios)
Viscosidad media (cSt)	91,75	52,89
Desviación estándar	8,78	4,25

El rango de una desviación estándar respecto a la media se considera el intervalo de normalidad operativa [24]. Cuando un valor se encuentra fuera de la media más una desviación estándar, pero dentro de dos desviaciones estándar, se interpreta como un aviso de precaución. Este umbral indica un comportamiento atípico que, si bien no es crítico, requiere atención.

Por otro lado, un resultado que excede las dos desviaciones estándar se considera una alarma crítica, señalando que el valor es más extremo que el 95% de la población y podría ser indicativo de una anomalía significativa o un cambio sustancial en el proceso (Tabla 3-30).

Tabla 3-30: Límites de precaución y alarma para la viscosidad a 40°C del O-1236 y O-1178

Límite	O-1236 (aceite de motor)	O-1178 (aceite caja de cambios)
Alarma (superior) (cSt)	109,31	58,18
Precaución (superior) (cSt)	100,53	57,14
Media(cSt)	91,75	52,89
Precaución (inferior) (cSt)	82,97	48,64
Alarma (inferior) (cSt)	74,19	44,39

Una situación aún más grave se presenta cuando el valor excede las tres desviaciones estándar. Esta condición excepcional implica que el valor observado excede el 99% de los datos poblacionales, situándose en un rango de extremo riesgo que requiere una respuesta inmediata.

Como se ha mencionado anteriormente, los aceites analizados no tienen especificados los valores de la viscosidad a 40°C. Sin embargo, en la **Tabla 3-30** se han calculado los valores de la viscosidad media a 40°C, así como los valores de precaución

y alarma siguiendo los criterios del párrafo anterior. Estos valores de precaución y alarma se han fijado a partir de los resultados obtenidos tras realizar múltiples ensayos.

3.3.2.2 Identificación de los equipos lubricados

Conocer los componentes lubricados de los equipos analizados y su composición metalúrgica no solo facilita la comprensión de los mecanismos de desgaste, sino que también es muy útil para la detección temprana de patrones de desgaste anormales en la maquinaria.

La identificación exhaustiva de los elementos lubricados dentro de una máquina (motor o caja de cambios), así como de su composición metalúrgica, constituye la piedra angular para el análisis efectivo del desgaste. Entender la variedad, tipo de componentes, su configuración específica y el modo en que son lubricados permite establecer una relación directa entre ellos. Este conocimiento es indispensable para formular las hipótesis acertadas sobre el comportamiento anormal del desgaste que veremos en cada uno de los casos estudiados más adelante, marcando el camino hacia un diagnóstico certero y la implementación de medidas correctivas adecuadas.

En la **Tabla 3-31** se muestra los elementos metálicos que se han detectado en el análisis del desgaste de las partes lubricadas (motor diésel y caja de cambios respectivamente) en los dos aceites estudiados, señalando cuál podría ser su procedencia.

Tabla 3-31: Elementos de un motor diésel y transmisiones Posible origen[107]

Metal	Posible origen de metal	
	Motor diésel	Transmisiones
Hierro	Camisa, anillos, engrane	Engranes, rodamientos, separadores
Cromo	Anillos, levas, empujadores	Rodamientos
Plomo	Rodamientos, arandelas	Arandelas, discos de fricción
Cobre	Cojinetes, bujes, arandelas	Arandelas, discos de fricción
Estaño	Rodamientos	Arandelas de empuje
Aluminio	Pistones, cojinetes, tierra	Tierra, convertidor, estátor/impulsor
Silicio	Tierra, antiespumante	Tierra, antiespumante

Sodio	Refrigerante, sal, posible aditivo	Sal, posible aditivo

La **Figura 3-30** muestra las diversas secciones de un motor, destacando los principales elementos metálicos utilizados en su fabricación. Esta representación detallada es esencial para comprender cómo cada componente contribuye al funcionamiento del motor y los tipos de metales empleados para optimizar su rendimiento y durabilidad. A continuación, se describen las partes más relevantes y los elementos metálicos asociados a cada una de ellas:

- **Cilindro:** Se fabrica con hierro para proporcionar resistencia y durabilidad.
- **Bielas:** Elaboradas con plomo y cobre para mejorar la resistencia y la conductividad.
- **Cigüeñal:** Compuesto de hierro para soportar grandes esfuerzos mecánicos.
- **Pistones:** Generalmente de hierro y aluminio para reducir el peso y aumentar la eficiencia.
- **Camisas del cilindro:** Fabricadas con hierro para proporcionar una superficie duradera y resistente al desgaste.
- **Guías de válvula:** Hierro para asegurar una alineación precisa y durabilidad.
- **Sellos del turbocompresor:** Utilizan hierro debido a su resistencia al calor y durabilidad.
- **Junta de la culata:** Elemento esencial para mantener la estanqueidad entre el bloque del motor y la culata.
- **Juntas del agua y aceite:** Estos elementos son fundamentales para garantizar un sellado efectivo que impida las fugas de fluidos

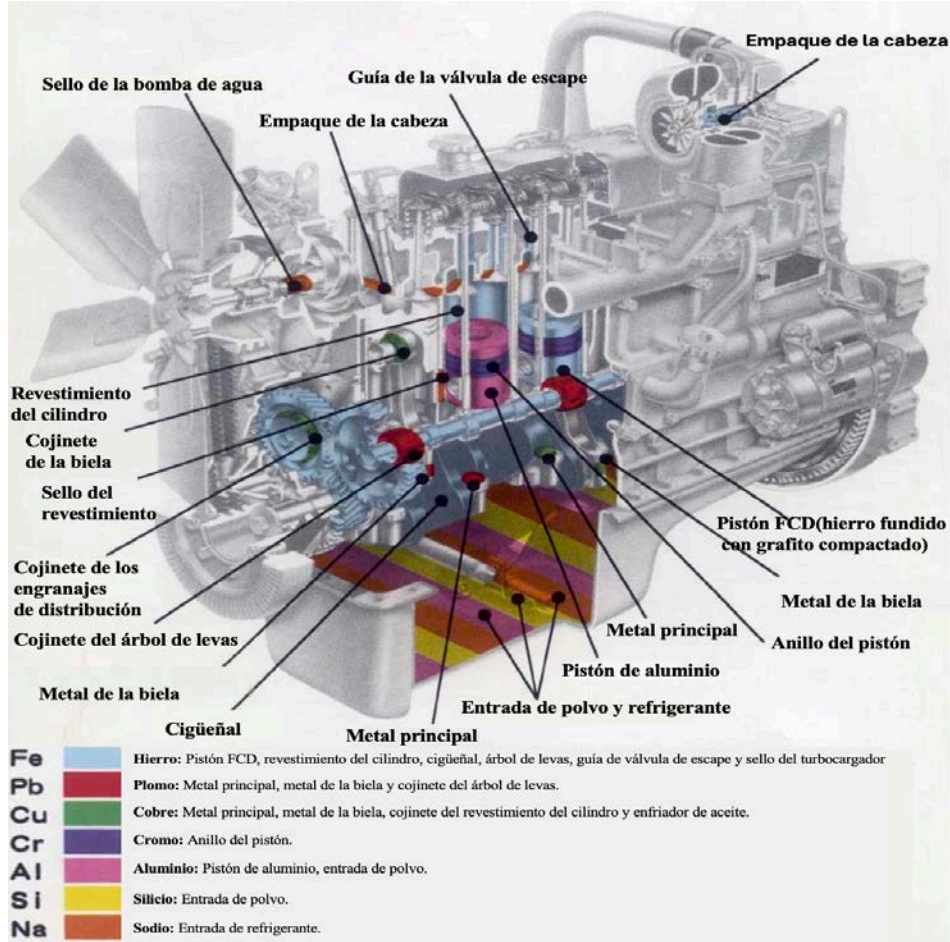


Figura 3-30: Principales elementos metálicos de un motor de combustión

Esta **Figura 3-30** también destaca el uso de otros elementos metálicos, como el cromo (Cr) en los anillos de pistón para resistencia al desgaste y el aluminio (Al) para la fabricación de pistones, que contribuyen a una mayor eficiencia y menor peso del motor. Comprender la función y composición de cada uno de estos componentes es fundamental para el diseño, mantenimiento y reparación de motores de combustión interna.

Del mismo modo, la **Figura 3-31** muestra las diversas secciones de un sistema de transmisión, destacando los principales elementos metálicos utilizados en su fabricación. Esta representación es fundamental para comprender el papel que desempeña cada componente en el funcionamiento del sistema de transmisión, así como los materiales seleccionados para maximizar su rendimiento y durabilidad.

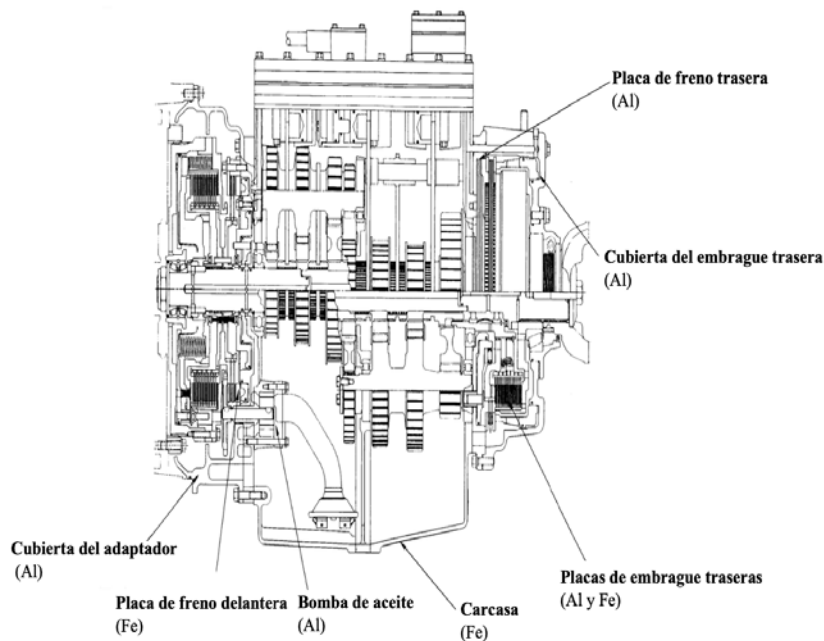


Figura 3-31: Elementos metálicos de una caja de cambios (Caterpillar 7155)[15]

A continuación, se describen las partes más relevantes y los elementos metálicos asociados a cada una de ellas:

- **Placa de freno trasera:** Fabricada principalmente de aluminio, este componente es esencial para proporcionar una adecuada disipación del calor generado durante el frenado, lo que asegura un rendimiento consistente y duradero del sistema de frenado.
- **Cubierta del embrague trasera:** Compuesta también de aluminio, esta pieza ofrece ligereza al conjunto, mejorando la eficiencia del sistema de embrague al reducir el peso total sin comprometer la resistencia estructural.
- **Cubierta del adaptador:** Este elemento, fabricado con aluminio, sirve como un componente de conexión clave que asegura la correcta integración de diversos subsistemas, aportando además rigidez y resistencia a la estructura.
- **Placa de freno delantera:** Al igual que su contraparte trasera, esta placa está compuesta de hierro, lo que le otorga la capacidad de soportar elevadas cargas mecánicas y térmicas durante el proceso de frenado.
- **Bomba de aceite:** Confeccionada en aluminio, esta bomba es fundamental para mantener una adecuada lubricación en el sistema, garantizando un flujo constante de aceite que reduce la fricción y el desgaste de los componentes móviles.

Capítulo 3: Resultados y discusión

- **Carcasa:** La carcasa está construida con hierro para proporcionar una estructura robusta que resiste las tensiones y cargas que se generan durante el funcionamiento del sistema.
- **Placas de embrague traseras:** Compuestas por una combinación de aluminio y hierro, estas placas aseguran un equilibrio óptimo entre peso y durabilidad, permitiendo un acoplamiento eficiente y una transmisión de potencia fiable.

Por tanto, la identificación detallada de los componentes lubricados en una máquina (ya sea un motor o una caja de cambios), y el conocimiento de su composición metalúrgica son cruciales para el análisis efectivo del desgaste. Comprender la diversidad, los tipos de componentes, su disposición específica y la forma en que son lubricados nos permite establecer una conexión directa con los pares de contacto, es decir, con aquellas superficies o puntos en una máquina donde dos componentes entran en contacto directo entre sí durante su funcionamiento [49]. Este conocimiento es esencial para poder formular hipótesis precisas sobre el desgaste anormal, lo que nos lleva al camino de un diagnóstico acertado y la implementación de medidas correctivas apropiadas.

El desgaste de materiales metálicos, pérdida progresiva de material de la superficie de un componente metálico, es un fenómeno que puede ser influenciado por una variedad de factores, que van desde las características intrínsecas del material hasta las condiciones ambientales en las que se encuentra. A continuación, se presenta la **Tabla 3-32** en donde concentraciones elevadas y por encima de lo normal de ciertos elementos metálicos muestran tanto su posible procedencia como un conjunto de posibles causas que pueden originar los distintos mecanismos de desgaste.

Capítulo 3: Resultados y discusión

Tabla 3-32: Familias de elementos en motores diésel [107,111]

Combinación de elementos	Probable localización del problema	Causas de desgaste excesivo				
		Entrada de tierra	Entrada de agua	Entrada de combustible	Lubricante inadecuado	Mantenimiento inadecuado
Fe	Engranajes de tiempo, árbol de levas, balancín		X		X	X
Fe, Cr, Al	Camisa, anillos del pistón	X			X	
Cu, Pb	Cojinetes, árbol de levas, bujes	X	X	X		X
Fe, Cu, Pb	Cojinetes, árbol de levas, bujes	X	X	X		
Fe, Cr	Camisa, anillos	X	X			X
Fe, Cu, Cr, Al, Pb	Cojinete, camisa, anillos, pistón	X	X	X	X	
Cu	Enfriador de aceite		X			
Al	Pistón de aluminio, rodamientos de turbo	X			X	
Al, Si	Contaminación del aceite por tierra. filtro roto, sellos defectuosos	X				X

Como ya se comentó en apartados anteriores, si un análisis de aceite revela altos niveles de silicio y aluminio, esto podría indicar contaminación por tierra o polvo. El

Capítulo 3: Resultados y discusión

silicio es común en la tierra y la arena, por lo que su presencia en el aceite sugiere la entrada de suciedad al sistema de lubricación. Cuando estos elementos se encuentran juntos en cantidades significativas en el análisis de aceite, probablemente la fuente sea contaminación externa. Este tipo de contaminación suele ser resultado de filtraciones inadecuadas debido a filtros de aire o aceite dañados o mal instalados, sellos defectuosos en el motor o la caja de cambios, o un manejo inapropiado de componentes y fluidos durante el mantenimiento del vehículo. La presencia de estas partículas abrasivas no solo acelera el desgaste de los componentes internos, sino que también puede obstruir los conductos de aceite, disminuyendo la eficiencia del sistema de lubricación y, potencialmente, causando daños graves y costosas reparaciones. Este será uno de los casos estudiados más adelante.

3.3.2.3 Análisis de la concentración de elementos metálicos en aceites lubricantes

Los resultados obtenidos indican que, de acuerdo con la **Figura 3-29**, el predominio de No Conformidades en el aceite multigrado O-1178 se debe a una elevada concentración de elementos de desgaste, representando el 55% del total. Sin embargo, en el aceite multigrado O-1236, las No Conformidades atribuibles a altas concentraciones de elementos de desgaste constituyen el 25% del total.

Para evaluar los resultados obtenidos de los elementos sometidos a desgaste, se implementa un método de diagnóstico y monitoreo del estado fundamentado en la tribología. Esto implica la identificación de variaciones en las propiedades tribológicas de los sistemas lubricados: motor y caja de cambios de los vehículos en estudio, con el fin de establecer su condición presente (diagnóstico) y anticipar su situación futura (pronóstico) [108].

La tribología entendida como el estudio de la fricción, el desgaste y la lubricación, juega un papel crucial en el análisis de sistemas mecánicos complejos como las cajas de cambios y los motores de los vehículos estudiados. Los componentes de estos sistemas, aunque están diseñados para soportar condiciones extremas, inevitablemente sufren desgaste. En este estudio, se analizaron varios elementos metálicos presentes en los aceites lubricantes, entre ellos cobre, plomo, hierro, y aluminio.

El cobre y el plomo fueron los elementos que se encontraron en mayor concentración de todos los que se analizaron, y por lo tanto, son los responsables de la mayoría de las

Capítulo 3: Resultados y discusión

no conformidades. Al analizar las concentraciones de cobre y plomo en los aceites lubricantes, se puede obtener un indicador del estado y el comportamiento tribológico de los sistemas estudiados.

Se utilizó la espectrometría de emisión atómica para analizar las muestras de aceite, una técnica que permite medir con precisión los metales traza en los lubricantes [112]. Asimismo, se examinaron en detalle los componentes de ambos sistemas: motor y caja de cambios de los vehículos pesados de cadena estudiados, determinando las zonas de mayor desgaste y las condiciones operativas a las que están expuestas.

Tal y como se observa en la **Tabla 3-33**, las concentraciones de cobre y plomo para el aceite multigrado O-1178 (5W30) utilizado en las cajas de cambio supera los límites de precaución y alarma establecidos para dicho aceite.

Tabla 3-33: Muestras con altas concentraciones de cobre y plomo en muestras de O-1178 para los vehículos en estudio

Nº muestra	V40 (cSt)	V100 (cSt)	PI (°C)	Fe (ppm)	Al (ppm)	Cu (ppm)	Si (ppm)	Pb (ppm)	Mo (ppm)	TAN (mg KOH/g de aceite)	H ₂ O (mg/kg de aceite)	TBN (mg KOH/g de aceite)
96-12	49,16	8,57	233	26	15	164	11	123	55	2	0,023	8,5
73-25	48,74	8,59	235	22	16	168	15	128	59	2,2	0,022	8,5
21-06	47,66	8,21	238	23	11	205	25	70	113	1,9	0,035	8,4
21-08	49,81	8,79	236	21	19	159	22	173	60	2,3	0,039	10,5

Los mecanismos de adhesión y abrasión que intervienen en el desgaste de los componentes de la caja de cambios podrían explicar por qué la presencia de cobre y plomo es más elevada que la de otros metales en el análisis del aceite. Durante el funcionamiento de la caja de cambios, los dientes de los engranajes y los cojinetes están sometidos a altas presiones y velocidades. Esta combinación promueve la adhesión, un proceso en el cual las superficies metálicas en contacto experimentan una fusión microscópica. Como resultado, se produce la transferencia de material de una superficie a otra [113]. Los materiales como el cobre y el plomo, comúnmente utilizados en la fabricación de cojinetes y ciertas aleaciones de engranajes, son propensos a este tipo de desgaste debido a sus propiedades físicas, lo que explica su mayor concentración en el aceite de la caja de cambios tras el análisis.

En relación con la abrasión, este mecanismo de desgaste ocurre cuando hay interacción entre superficies rugosas o la presencia de partículas duras entre ellas como

Capítulo 3: Resultados y discusión

se explicó en la primera parte del presente trabajo. En las cajas de cambios de los vehículos estudiados, los discos de embrague de la caja de cambios (4 discos por cada una de las 6 velocidades que tienen) pueden contener cobre y plomo en su composición. Por tanto, la abrasión de estas partes puede contribuir directamente a la elevada concentración de estos metales en el aceite.

Los discos de embrague son una pieza fundamental de los sistemas de embrague. Estos discos funcionan por la fricción que se produce entre el disco y el volante, lo que permite la transferencia de la potencia del motor a la transmisión. Los discos de embrague para vehículos en estudio están diseñados para resistir cargas altas y asegurar una transmisión eficiente de la potencia incluso en condiciones de trabajo muy exigentes.

3.3.2.3.1 Propiedades físicas del cobre y plomo

Con el paso del tiempo, incluso con un buen mantenimiento, se produce un desgaste natural entre las superficies de contacto del cojinete y el eje. Este desgaste suelta pequeñas cantidades de metal al aceite del motor. Como los cojinetes contienen plomo y cobre, estos serían los metales que más se liberarían, elevando así sus concentraciones en el aceite.

Las propiedades físicas del cobre y el plomo son relevantes para comprender la presencia de ambos elementos metálicos en los aceites analizados en el presente estudio. El cobre se caracteriza por su buena capacidad para conducir el calor y la electricidad. No obstante, a nivel mecánico, el cobre es bastante blando y dúctil [114], lo que lo hace vulnerable a la deformación bajo cargas altas, favoreciendo el mecanismo de adhesión.

El cobre es un metal que se caracteriza por su alta capacidad de conducir el calor y la electricidad, así como por su durabilidad ante la corrosión. En los discos de embrague, el cobre puede formar parte de los materiales de fricción, que están diseñados para soportar altas temperaturas y asegurar una transmisión de potencia efectiva y uniforme. El cobre, al incrementar la conductividad térmica, ayuda a evacuar el calor producido por la fricción, lo que es esencial para evitar el sobrecalentamiento y el deterioro prematuro del disco.

El plomo, por otro lado, más blando aún que el cobre, tiene una resistencia al desgaste muy baja y es especialmente propenso a la deformación y adhesión en condiciones de alta temperatura y carga [115]. Su empleo en aleaciones busca mejorar la maquinabilidad y la resistencia a la corrosión, pero perjudica la resistencia al desgaste. El plomo se ha usado

Capítulo 3: Resultados y discusión

tradicionalmente en aleaciones metálicas para mejorar la maquinabilidad y la resistencia a la vibración. No obstante, su impacto negativo sobre la salud y el medio ambiente está limitando su uso en muchas aplicaciones, entre ellas las del sector automotriz. Cuando todavía se usa en componentes de transmisión, suele estar en forma de aleaciones específicas que necesitan sus propiedades anti-fricción y su habilidad para amortiguar el ruido y las vibraciones. En realidad, su existencia se debe a que los vehículos analizados son de hace 20 años y sus piezas no se han cambiado por razones logísticas, técnicas y estratégicas.

Los procesos de desgaste de las cajas de cambios dependen en gran medida de la temperatura. Si la temperatura se eleva, los materiales pueden perder resistencia mecánica y ser más propensos a sufrir adhesión y abrasión anteriormente comentada. Este efecto es más notable en materiales blandos como el cobre y el plomo tal y como se comprueba a raíz de los resultados. Asimismo, altas temperaturas pueden modificar la viscosidad del aceite lubricante, disminuyendo su habilidad de crear una capa protectora entre las superficies metálicas, lo que aumenta el contacto metal-metal y, por tanto, el desgaste.

La fabricación de componentes críticos con materiales más resistentes al desgaste puede reducir la velocidad de deterioro. Se pueden sustituir o complementar las aleaciones de cobre y plomo por otras más duraderas según las condiciones de operación. De hecho, hay una tendencia hacia la sustitución de los discos de embrague tradicionales, que suelen estar compuestos de materiales como el cobre y el plomo como los que se están analizando, por discos fabricados con materiales alternativos como los producidos por Innovation in motion, Miba AG. Este cambio se debe principalmente a preocupaciones medioambientales y de salud, así como a la búsqueda de mejor rendimiento y durabilidad. Los discos de embrague que fabrica Miba AG suelen estar hechos con materiales compuestos avanzados que tienen varias ventajas sobre los materiales convencionales, como una mayor resistencia, un mejor comportamiento bajo condiciones extremas y un menor peso del componente, lo que puede ayudar a mejorar la eficiencia del combustible. Estos materiales compuestos pueden contener fibras de carbono, cerámicas y otros polímeros avanzados, que están diseñados para resistir altas temperaturas y presiones sin deteriorarse tan rápido como los materiales convencionales. Además, al no tener metales pesados tóxicos como el plomo, estos materiales son más respetuosos con el medio ambiente.

Capítulo 3: Resultados y discusión

Por tanto, la detección de cobre y plomo en el análisis de aceite de transmisión O-1178 utilizado, puede sugerir desgaste en los discos de embrague, además de los engranajes y cojinetes mencionados previamente. El análisis regular del aceite permite identificar estos metales y otros indicadores de desgaste como alta concentración de hierro no detectada en los aceites analizados. Esto es crucial para el mantenimiento preventivo y la detección temprana de posibles fallos en la transmisión.

Como se aprecia en la **Tabla 3-34**, otros vehículos que no están incluidos en el estudio presentan concentraciones de cobre mucho más elevadas a los aceites analizados procedentes de los vehículos pesados en estudio. Las razones pueden ser diversas, pero probablemente una de ellas sea el retraso en el cambio del aceite acumulándose el cobre generado por desgaste.

Tabla 3-34: Concentraciones de cobre en muestras de O-1178 para otros vehículos que no forman parte del estudio

Nº muestra	V40 (cSt)	V100 (cSt)	PI (°C)	Fe (ppm)	Al (ppm)	Cu (ppm)	Si (ppm)	Pb (ppm)	Mo (ppm)	TAN (mg KOH/g de aceite)	H ₂ O (mg/kg de aceite)	TBN (mg KOH/g de aceite)
33-03	118,9	13,61	247	34	3	620	22	70	2	2,3	0,099	9,9
24-04	47,12	8,54	248	47	34	846	23	4	2	2,2	0,046	10,2
41-02	50,77	9,08	194	29	14	368	15	3	17	2,2	0,075	9,9
41-03	44,27	7,90	220,5	64	38	496	20	5	59	2	0,06	8,9

En la **Tabla 3-35** se representa algunos de los resultados de todos los aceites O-1236 analizados y se aprecia que los niveles de cobre y plomo del aceite multigrado O-1236 son relativamente bajos en comparación con los del aceite multigrado O-1178 usado en las cajas de cambio de los vehículos analizados en este estudio, especialmente la concentración de plomo.

Tabla 3-35: Resultados de los análisis de aceite usado multigrado O-1236 (15W40)

Nº muestra	V40 (cSt)	V100 (cSt)	PI (°C)	Fe (ppm)	Al (ppm)	Cu (ppm)	Si (ppm)	Pb (ppm)	Mo (ppm)	TAN (mg KOH/g de aceite)	H ₂ O (mg/kg de aceite)	TBN (mg KOH/g de aceite)
73-52	90,25	12,55	233	53	8	92	19	6	62	2,7	0,274	9,6
96-24	91,89	12,66	227	49	7	70	18	4	54	2,6	0,107	9,2
67-06	89,65	12,15	221	24	6	62	11	6	20	3,4	0,105	10,4
92-10	81,58	11,92	189,5	18	7	26	10	1	25	3,4	0,048	11,4

Capítulo 3: Resultados y discusión

Los factores que más influyen en la diferente cantidad de cobre y plomo en los aceites de motor en comparación con el aceite que se usa en la caja de cambios de la flota de vehículos analizados son las diferentes condiciones operativas, los materiales usados en cada sistema y los procesos de desgaste asociados.

Como se indicó previamente, el posible origen de los elementos metálicos que se encuentran en los distintos aceites analizados, tanto en el motor como en la caja de cambios, se muestran en la **Tabla 3-31**.

Los motores de los vehículos analizados están diseñados con una variedad de materiales metálicos y aleaciones para cada uno de los diferentes componentes. Cada uno de ellos es seleccionado por sus propiedades específicas tales como resistencia al desgaste, conductividad térmica, y durabilidad tal y como se muestra en la **Tabla 3-31**. El cobre y el plomo se han empleado tradicionalmente en algunas aleaciones, pero los progresos en el diseño de motores y en los materiales de ingeniería han disminuido su aplicación. No obstante, los motores de la flota de vehículos de cadenas que se analizaron en el presente estudio tienen una antigüedad de en torno a 20 años, por lo que están compuestos por aleaciones que contienen cobre y plomo tal y como se puede observar en los resultados obtenidos tras su análisis.

Los cojinetes tienen una función esencial en el diseño de motores de estos vehículos pesados de cadenas, ya que fundamentalmente, sostienen las bielas y los ejes de levas, disminuyen la fricción y facilitan un movimiento fluido de las partes móviles del motor. Estos cojinetes se suelen fabricar con aleaciones de plomo y cobre por diversos motivos:

- La conformabilidad es la propiedad del cojinete de acomodarse a pequeños defectos en la superficie del eje o a cambios en la alineación sin dañarse. Las aleaciones de plomo y cobre son relativamente blandas y pueden amortiguar impactos y repartir uniformemente la carga, lo cual es esencial para evitar el fallo del cojinete y del eje bajo condiciones de operación extremas [108].
- Capacidad de incrustación: Esta propiedad permite que el material del cojinete aloje y mantenga partículas contaminantes que podrían generar arañazos en las superficies metálicas móviles. Al alojar estas partículas dentro del propio material del cojinete, se evita el desgaste abrasivo en las superficies del eje. Las aleaciones de plomo y cobre, por su ductilidad, son idóneas para esta función [116].

Capítulo 3: Resultados y discusión

- Conductividad térmica: El cobre posee una elevada conductividad térmica, una propiedad beneficiosa para liberar el calor que se produce por la fricción en el motor. Esto contribuye a que las temperaturas de funcionamiento del cojinete y del eje se mantengan bajas, prolongando su durabilidad.

3.3.2.3.2 Mecanismos de desgaste afectando la composición del aceite

El uso de aleaciones mejora el funcionamiento del motor por sus características fisicoquímicas, pero al mismo tiempo, afectan a la composición del aceite de motor por el desgaste mecánico que se produce:

- Desgaste de partículas por fricción: Entre las superficies de contacto del cojinete y el eje se produce un desgaste natural con el paso del tiempo, aunque se realice un mantenimiento correcto. Este desgaste genera pequeñas partículas de metal que se mezclan con el aceite de motor. Como los cojinetes contienen plomo y cobre, estos serían los metales principales que se liberarían, aumentando así sus concentraciones en el aceite.
- Además del deterioro mecánico, los cojinetes sufren el efecto de la corrosión y la erosión por los contaminantes y la química del aceite, sobre todo si el aceite se deteriora y se acidifica. Esto puede favorecer la disolución de plomo y cobre en el aceite.

En otros vehículos que no forman parte del estudio se observan concentraciones de cobre más altas en O-1236 pero no tan altas como en el O-1178 tal y como se muestra en la **Tabla 3-36**:

Tabla 3-36: *Análisis de aceites de otros vehículos a los estudiados*

Nº muestra	V40 (cSt)	V100 (cSt)	PI (°C)	Fe (ppm)	Al (ppm)	Cu (ppm)	Si (ppm)	Pb (ppm)	Mo (ppm)	TAN (mg KOH/g de aceite)	H ₂ O (mg/kg de aceite)	TBN (mg KOH/g de aceite)
54-07	87,88	12,58	227	46	17	166	24	4	80	3,2	0,121	11,9
51-01	85,82	11,97	189,5	8	4	218	18	4	63	2,5	0,098	10,8
58-33	90,07	12,53	195,5	79	6	488	14	2	14	4,3	0,109	8,8
58-37	73,45	10,82	185,5	65	6	559	18	13	40	4,5	0,149	9,8

3.3.2.4 Análisis gráfico de los elementos de desgaste en los aceites lubricantes

Los aceites lubricantes pueden sufrir variaciones en su calidad y rendimiento debido a múltiples factores, como la presencia de polvo y partículas metálicas procedentes del exterior, o el empleo de aceites inadecuados. El análisis gráfico de las concentraciones de metales en el aceite es fundamental para detectar posibles problemas y facilitar un mantenimiento predictivo, previniendo averías graves en los componentes mecánicos. Es imprescindible realizar un seguimiento regular y minucioso de los aceites para mantener la eficiencia y alargar la vida útil de los motores y sistemas de transmisión.

En este apartado, se analizarán distintos escenarios o casos basados en los resultados de los aceites de la flota de vehículos de cadenas que han participado en este estudio. Se considerarán tanto el aceite de la caja de cambios (O-1178) como el del motor (O-1236).

Para comprender de manera efectiva los resultados de los análisis de aceite lubricante realizados, se representarán gráficamente varias situaciones observadas durante el estudio. Estas representaciones gráficas ayudarán y facilitarán la interpretación de los resultados, permitiendo identificar los posibles factores y causas que originan el desgaste de los elementos mecánicos o la degradación del aceite.

Los diagramas más representativos de los aceites evaluados en este estudio se presentan a continuación. Cabe señalar que no se pudo realizar un seguimiento más individualizado a todos los vehículos de la flota durante el desarrollo de esta investigación, debido a limitaciones logísticas de las Unidades que disponen de los vehículos y no enviaron muestras de aceite en los periodos solicitados. Sin embargo, dado que este trabajo ha ido generando un beneficio a las unidades, éstas han empezado a enviar muestras de aceite de forma más periódica y frecuente, lo que ha posibilitado la realización de un seguimiento más completo y detallado a muchos de los vehículos del Ejército de Tierra.

3.3.2.4.1 Análisis de casos para el aceite lubricante O-1178

En este apartado se presentan los análisis de diferentes casos relacionados con el aceite lubricante O-1178. Cada caso examina el origen potencial de metales encontrados en el aceite, lo cual es crucial para diagnosticar problemas en componentes de motores diésel y transmisiones. Estos análisis ayudan a identificar el desgaste y la posible

Capítulo 3: Resultados y discusión

contaminación de los componentes, permitiendo así tomar decisiones informadas para el mantenimiento y la operación eficiente de los equipos.

- **Caso 1: Cambio de aceite**

El primer análisis reveló una elevada concentración de cobre, por lo que se aconseja cambiar el aceite. Tras el cambio de aceite, los niveles de plomo y cobre se reducen a valores aceptables, tal como se observa en la **Figura 3-32**.

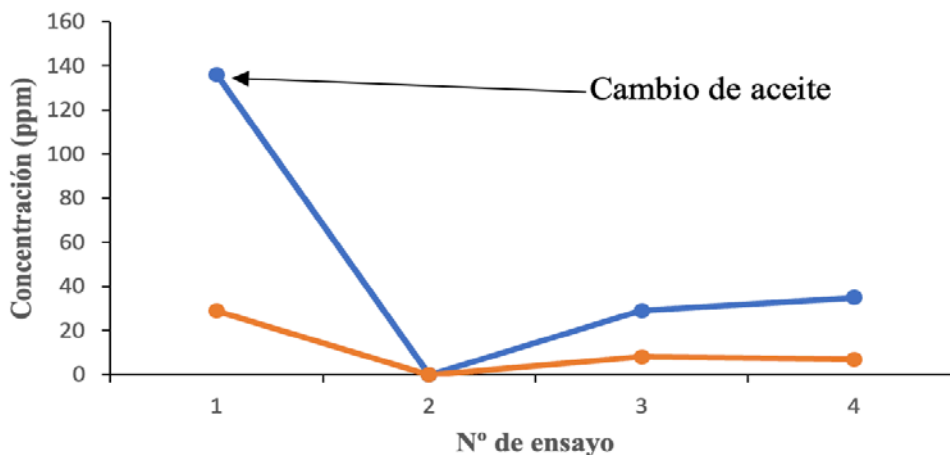


Figura 3-32: Disminución de las concentraciones de metales en las muestras tras el cambio de aceite (en azul se muestra el cobre y en naranja el plomo)

- **Caso 2: Posible avería en la caja de cambios**

El primer análisis muestra altas concentraciones de cobre y plomo, lo que indica la necesidad de cambiar el aceite.

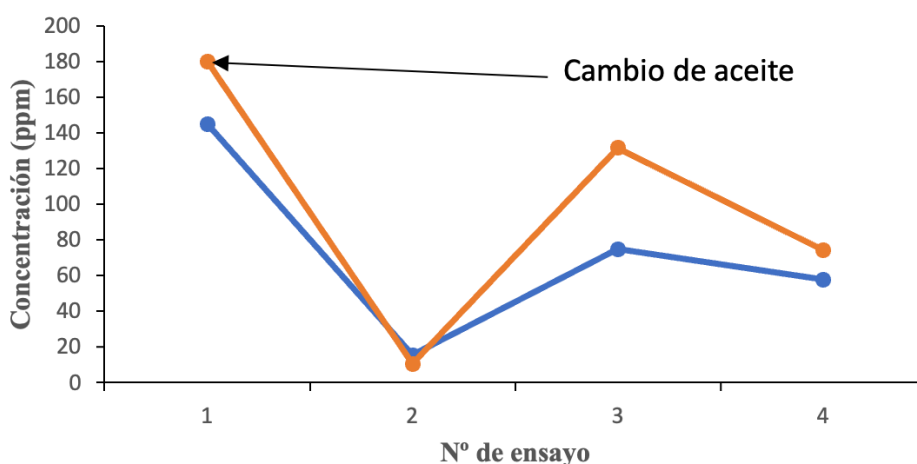


Figura 3-33: Aumento de la concentración de elementos metálicos tras el cambio de aceite. Posible avería en la caja de cambios (en azul se muestra el cobre y en naranja el plomo)

Después de cambiar el aceite, la siguiente medición (n° de ensayo 2 en la gráfica) indica que las concentraciones de plomo y cobre son aceptables. No obstante, en la

Capítulo 3: Resultados y discusión

siguiente medición (N.º de ensayo 3) se vuelve a detectar una alta concentración de cobre y plomo indicando la existencia de una posible avería que podría ser debida a:

- Desgaste acelerado de los discos de embrague: Los discos de embrague, pueden contener cobre en su aleación y se está produciendo un desgaste acelerado no deseado y anormal de estos componentes.
- Desgaste acelerado de cojinetes y bujes: Al igual que en el motor, cojinetes y bujes dentro de la caja de cambios pueden contener plomo y cobre. El desgaste de estos componentes puede aumentar los niveles de estos metales en el aceite y a raíz de los resultados se podría estar produciendo un desgaste acelerado y no deseado de los mismos.
- Fuga de refrigerante: Una fuga de refrigerante podría contaminar el aceite de la caja de cambios, provocando corrosión y desgaste de componentes internos.
- Uso de un aceite incorrecto o deteriorado: El uso de un tipo de aceite no recomendado por el fabricante puede no proteger adecuadamente las partes internas, resultando en un desgaste prematuro. Para comprobarlo en la **Figura 3-34** se representa el resultado de la viscosidad para comprobar si se ha producido un cambio de viscosidad no deseado.

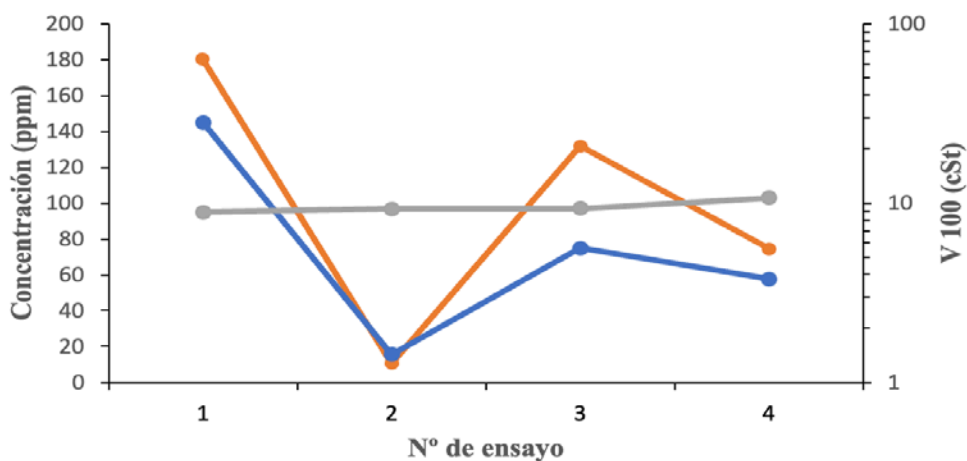


Figura 3-34: Aumento de la concentración de elementos metálicos tras el cambio de aceite incluyendo la viscosidad a 100 °C (en azul se muestra el cobre, en naranja el plomo y en gris la viscosidad a 100 °C)

Los resultados indican que la viscosidad del aceite está bien, por lo que se elimina como posible causa de la avería.

Capítulo 3: Resultados y discusión

- Contaminación externa: La entrada de agua o partículas metálicas externas debido a sellos dañados o a un mantenimiento inadecuado puede contribuir al aumento de estos metales en el aceite. Para comprobarlo en la **Figura 3-35** se representa el contenido en silicio y aluminio para comprobar si hay contaminación de arena y agua.

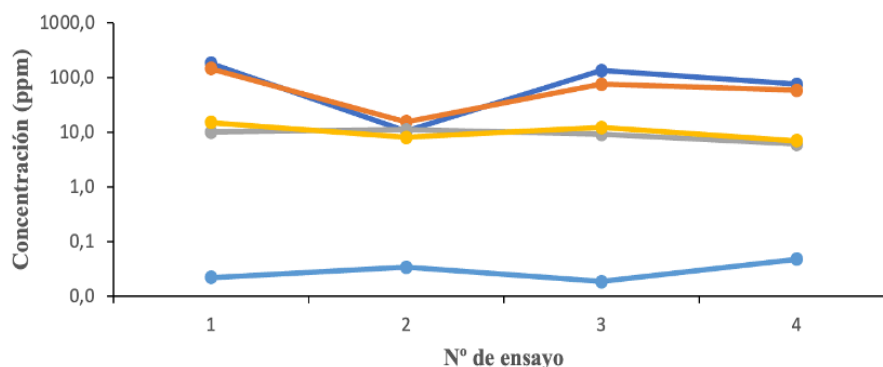


Figura 3-35: Aumento de la concentración de elementos metálicos tras el cambio de aceite incluyendo silicio, aluminio y agua como posible contaminación externa (en azul oscuro se muestra el cobre, en naranja el plomo, en gris el silicio, en amarillo el aluminio y en azul claro el agua)

La calidad y el rendimiento de los aceites lubricantes pueden verse afectados por la presencia de silicio, que suele entrar en los sistemas a través del polvo (compuestos como Al_2O_3 , SiO_2 , etc.). Aunque los aceites nuevos suelen contener alrededor de 10 ppm de un antiespumante basado en Si, este silicio orgánico no provoca directamente un mayor desgaste de las piezas y su concentración se reduce con el uso prolongado del lubricante [117].

Hay que tener en cuenta que el silicio que contienen los lubricantes, especialmente en los aceites de motor y sistemas hidráulicos, no afecta de la misma manera a todos los componentes mecánicos. Mientras que el silicio procedente de los agentes antiespumantes es generalmente inofensivo para las piezas mecánicas, el silicio inorgánico que entra por contaminantes externos como el polvo puede ser abrasivo y perjudicial [117].

Los lubricantes tienen una dinámica específica con respecto al silicio. Los aceites nuevos contienen compuestos de silicio debido a aditivos antiespumantes que evitan la formación de espuma. El aceite empleado como aceite de referencia o base (**Tabla 3-28**) para el aceite motor O-1236 presenta una concentración de silicio de 2 ppm. Este silicio proviene de los aditivos antiespumantes que se añaden al aceite. Su concentración en el

Capítulo 3: Resultados y discusión

lubricante disminuye con el uso y el tiempo, debido a la evaporación o a la descomposición de estos compuestos. No obstante, es importante vigilar los niveles de silicio, ya que un incremento puede señalar contaminación y necesitar de atención inmediata [24]. Los contaminantes como el polvo pueden introducir silicio en el sistema, lo que puede aumentar la abrasión y el deterioro de los componentes como se verá más adelante. Para detectar y medir la concentración total de silicio en el lubricante, incluyendo tanto el proveniente de aditivos como el introducido por contaminantes, se emplea el espectrómetro de emisión atómica de electrodo de disco giratorio, un equipo especializado en la detección de elementos de desgaste.

En la **Figura 3-35**, se observa que los niveles de silicio y aluminio son aceptables y no son la causa de las altas concentraciones de plomo y cobre. Por lo que sería uno de los casos en los que se enviaría la caja de cambios al taller a reparar. En este caso habría que dedicar personal y tiempo en sacar la caja de cambios del vehículo para analizar la posible avería y vehículo estaría parado e inoperativo un tiempo indeterminado. Para prevenir daños más graves, es importante detectar estos problemas lo antes posible y hacer un mantenimiento adecuado. Las reparaciones pueden depender de la causa, y pueden ir desde el cambio de piezas concretas hasta la reconstrucción o sustitución total de la caja de cambios.

- **Caso 3: No cambio de aceite**

En este caso se muestra las consecuencias de no hacer el cambio de aceite a tiempo, **Figura 3-36**. En el segundo análisis (N.º de ensayo 2 en la **Figura 3-36**) se detecta una alta concentración de cobre y plomo y se recomienda a la Unidad que cambie el aceite. Los resultados indican que en el tercer análisis (N.º de ensayo 3 en la **Figura 3-36**) la concentración de cobre y plomo es aún mayor, lo que sugiere que no se hizo el cambio de aceite cuando se pidió, ya que la concentración de cobre y plomo siguió aumentando. Sin embargo, en el análisis 4 (N.º de ensayo 4 en la **Figura 3-36**) se aprecia como disminuyeron las concentraciones de estos metales (Cu y Pb) ya que se realizó el cambio de aceite preceptivo.

Capítulo 3: Resultados y discusión

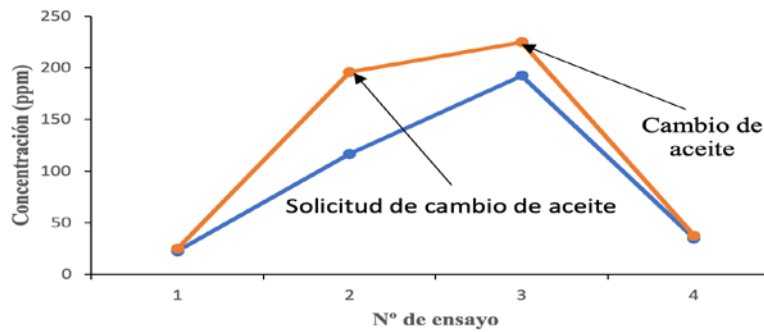


Figura 3-36: Impacto del cambio de aceite en la concentración de metales (Cu y Pb) en el aceite lubricante O-1178 (en azul se muestra el cobre, en naranja el plomo)

La **Figura 3-37** muestra otro caso en el que la unidad no realiza el cambio de aceite recomendado. Los ensayos posteriores sugieren que el vehículo ha permanecido estático y no ha realizado ninguna actividad que provoque un mayor desgaste, ya que las concentraciones de los elementos metálicos se mantienen prácticamente iguales.

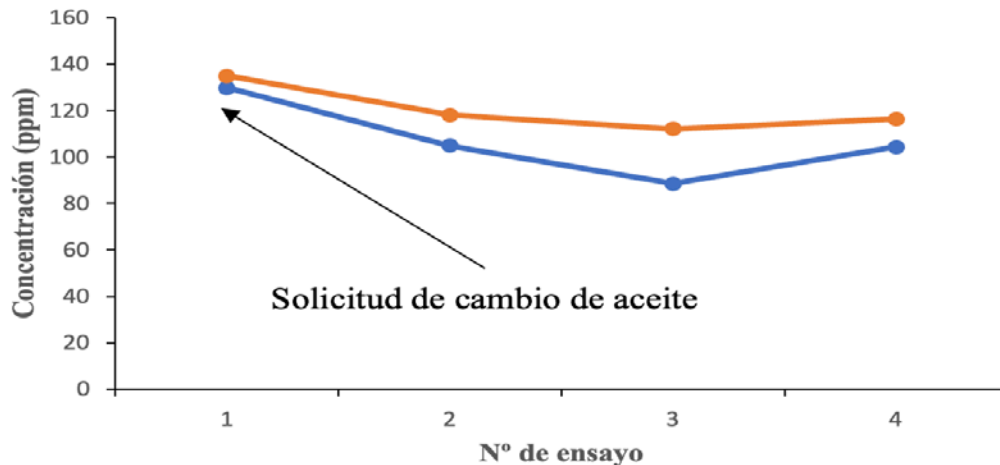


Figura 3-37: Impacto de no cambiar el aceite en la concentración de metales (Cu y Pb) en el aceite lubricante O-1178 (en azul se muestra el cobre, en naranja el plomo)

- **Caso 4: Desgaste anormal**

Como se muestra en la **Figura 3-38**, el primer análisis de aceite usado (N.º de ensayo 1 en la **Figura 3-38**) revela que las concentraciones de cobre y plomo están en niveles de precaución, por lo que el vehículo se mantiene bajo vigilancia. En el segundo análisis (N.º de ensayo 2 en la **Figura 3-38**), se aprecia un aumento brusco de las concentraciones de cobre, plomo y hierro, lo que indica un desgaste anormal e indeseado. Por tanto, la primera medida a tomar es reemplazar el aceite. Se observa que después del cambio de aceite, las concentraciones de los elementos metálicos se estabilizan.

Capítulo 3: Resultados y discusión

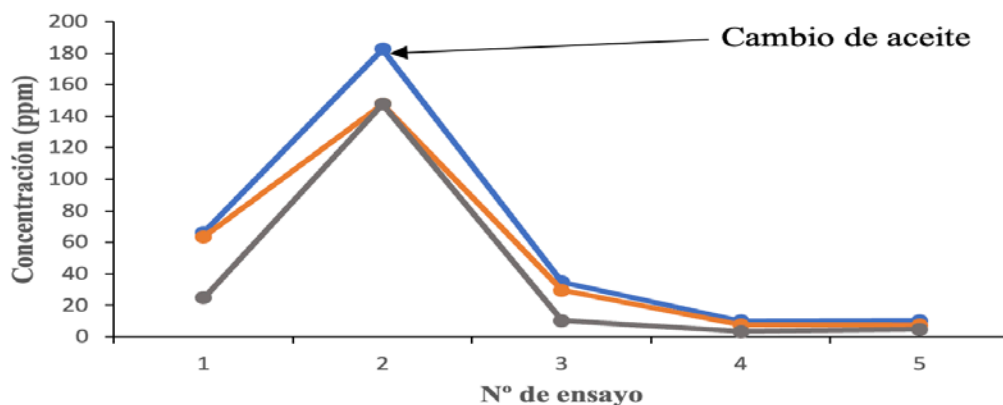


Figura 3-38: Aumento en la concentración de elementos metálicos. Desgaste anormal en el aceite O-1178 (en azul se muestra el cobre, en naranja el plomo y en gris el hierro)

En la siguiente **Figura 3-39** se muestra si algún tipo de contaminación externa por tierra puede haber afectado a ese desgaste anormal. Para ello se representa la concentración de silicio (Si) y aluminio (Al) en dicha gráfica.

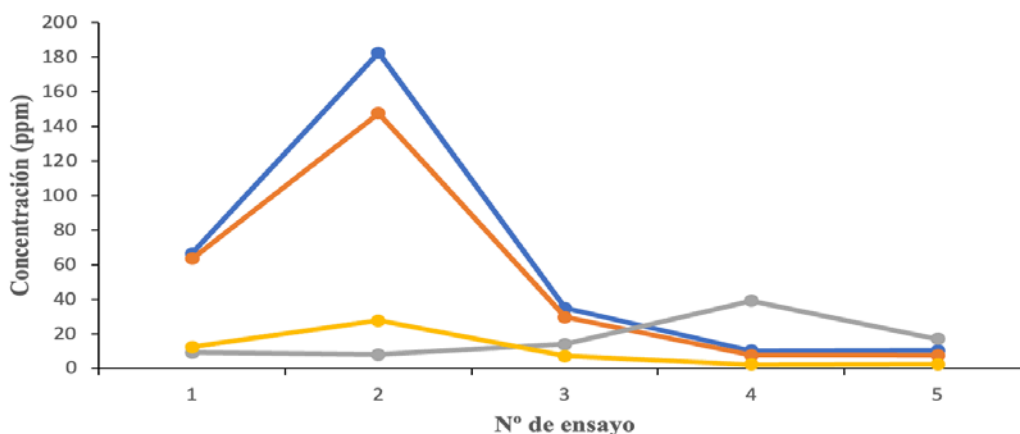


Figura 3-39: Aumento en la concentración de elementos metálicos. Desgaste anormal en el aceite O-1178. Comprobación de contaminación externa (en azul se muestra el cobre, en naranja el plomo, en gris el silicio y en amarillo, el aluminio)

Tal y como se muestra en la **Figura 3-39**, no se observa contaminación externa por tierra que pudiera producir el desgaste anormal detectado en el ensayo N.º 2.

A continuación, en la **Figura 3-40**, se representa el contenido en agua y la acidez y basicidad total del aceite por si fueran la causa de esa concentración de cobre y plomo.

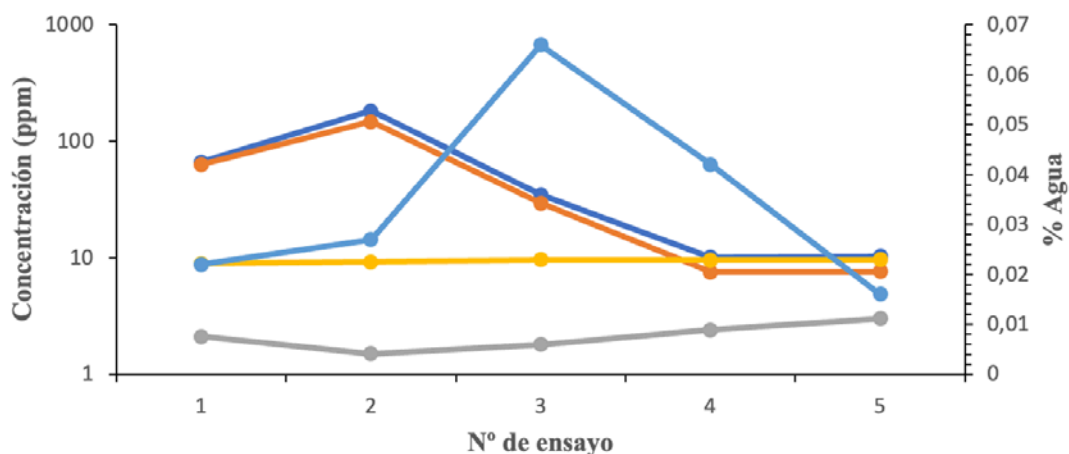


Figura 3-40: Aumento en la concentración de elementos metálicos. Desgaste anormal en el aceite O-1178. Comprobación de contaminación por agua e influencia de la acidez o basicidad (en azul oscuro se muestra el cobre, en naranja el plomo, en gris el TAN, en amarillo el TBN y en azul claro el agua)

Tal y como se muestra en la **Figura 3-40**, no se observa contaminación por agua o influencia de la acidez o basicidad que pudiera producir el desgaste anormal detectado en el ensayo 2. Sin embargo, en dicho gráfico se puede observar que hay un repunte en el contenido de agua durante el tercer ensayo. Este aumento en el agua, aunque pequeño, podría indicar la entrada de humedad en el sistema, lo que podría ser causado por condiciones ambientales adversas, fallos en los sellos, o incluso por condensación. Aunque el agua en el aceite tiene el potencial de acelerar el desgaste de los componentes, especialmente si se combina con otras partículas o contaminantes, y esto podría, en teoría, causar un aumento en los niveles de metales de desgaste como el cobre y el plomo, en el ensayo 3 no se observa esta correlación. A pesar de que hay un ligero incremento en el contenido de agua durante este ensayo, este no parece haber sido el factor que provocó el aumento en los niveles de cobre y plomo.

- **Caso 5: Aumento brusco de elementos de desgaste**

La **Figura 3-41** representa otro caso de un aumento muy brusco de los elementos de desgaste, ante lo cual se recomienda a la unidad realizar un cambio de aceite como primera acción (3 en la **Figura 3-41**). En este caso, al enviar una nueva muestra al laboratorio para su análisis, se comprueba que las concentraciones de los elementos metálicos han bajado (4 en la **Figura 3-41**).

Capítulo 3: Resultados y discusión

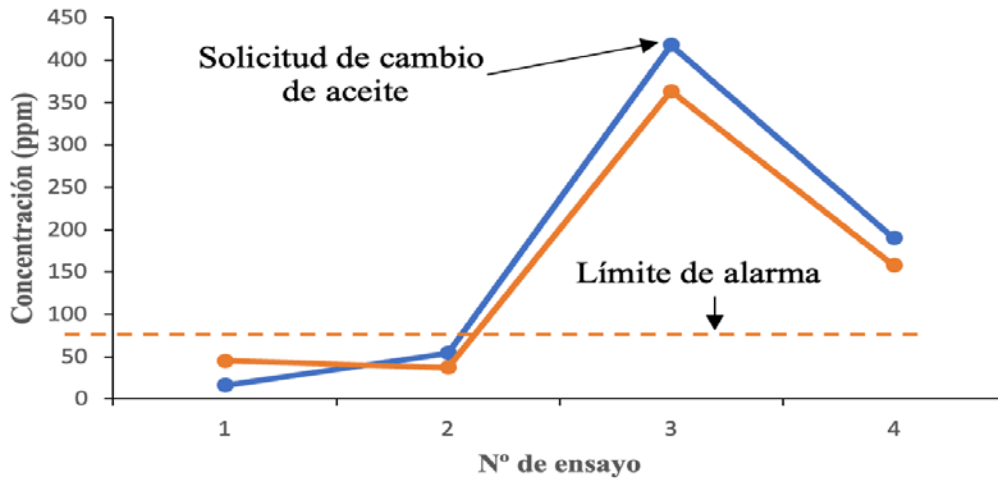


Figura 3-41: Caso 5 (O-1178): Relleno de aceite (en azul se muestra el cobre, en naranja el plomo)

Sin embargo, siguen siendo elevadas y superan los límites de alarma. Por eso se considera que se puede haber dado dos posibles situaciones:

1. Posible no sustitución total del aceite de la caja de cambios y se repusiera parcialmente con aceite nuevo. La **Figura 3-42** muestra que las propiedades fisicoquímicas del aceite no presentan cambios que sugieran que se haya rellenado parcialmente de aceite la caja de cambios.

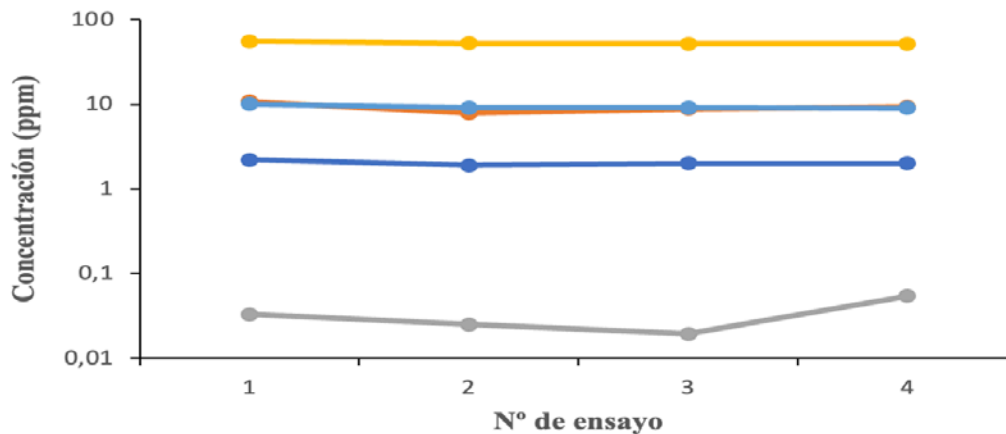


Figura 3-42: Caso 5 (O-1178): Comprobación de relleno de aceite (en azul oscuro se muestra el TAN, en naranja el TBN, en gris el agua, en amarillo la viscosidad a 40° C y en azul claro la viscosidad a 100° C)

2. Posible avería en la caja de cambios. Este caso 5 muestra cómo el mantenimiento predictivo puede ayudar a identificar signos de fallo incipiente en la caja de cambios, mediante la detección de patrones anormales y señales de alerta temprana. En este contexto, se puede aceptar un cierto nivel de desgaste, ya que los engranajes están en una fase inicial de fallo. No obstante, es esencial hacer un seguimiento continuo para

Capítulo 3: Resultados y discusión

observar cualquier cambio en el ritmo de desgaste y, si ocurre, aplicar las acciones correctivas necesarias [17].

El análisis detallado de los cinco casos presentados pone de manifiesto la importancia crucial de la monitorización continua del estado del aceite lubricante en motores diésel y transmisiones de los vehículos estudiados. La evidencia recopilada subraya que la detección temprana de anomalías en los niveles de metales presentes en el aceite es esencial para diagnosticar problemas potenciales y prevenir fallos mecánicos graves.

Cada caso analizado refuerza la relación directa entre la calidad del aceite y la salud de los componentes mecánicos lubricados. Se demuestra que la implementación de cambios de aceite en los intervalos adecuados, junto con la atención inmediata a las señales de alerta, como el aumento de concentraciones de metales, es fundamental para evitar el desgaste excesivo y asegurar la longevidad de los equipos.

Además, los resultados obtenidos destacan la necesidad de aplicar un mantenimiento predictivo riguroso, que permita no solo responder a problemas ya presentes, sino también anticipar y mitigar posibles fallos antes de que se conviertan en averías costosas. Esto implica la adopción de protocolos de mantenimiento basados en datos empíricos, que optimicen la operación de los sistemas y minimicen el tiempo de inactividad.

En resumen, este estudio subraya la importancia de un enfoque proactivo en el mantenimiento de sistemas mecánicos complejos, donde la calidad y el estado del aceite lubricante juegan un papel central en la prevención de daños y en la mejora de la eficiencia operativa.

3.3.2.4.2 Análisis de casos para el aceite lubricante O-1236

A continuación, se van a analizar varios casos para el aceite multigrado O-1236 (15W40) empleado para lubricar motores diésel.

- **Caso 1: Nivel estable de metales**

En la mayoría de los resultados obtenidos, se observa que en ningún caso se superan los límites de alarma establecidos para los elementos metálicos presentes en el aceite motor. Con lo que el aceite está en buenas condiciones para poder continuar lubricando el motor.

Capítulo 3: Resultados y discusión

La **Figura 3-43** ilustra el caso más frecuente que se ha detectado en el estudio de los aceites multigrado O-1236 correspondiente a la flota de automóviles de cadenas analizada.

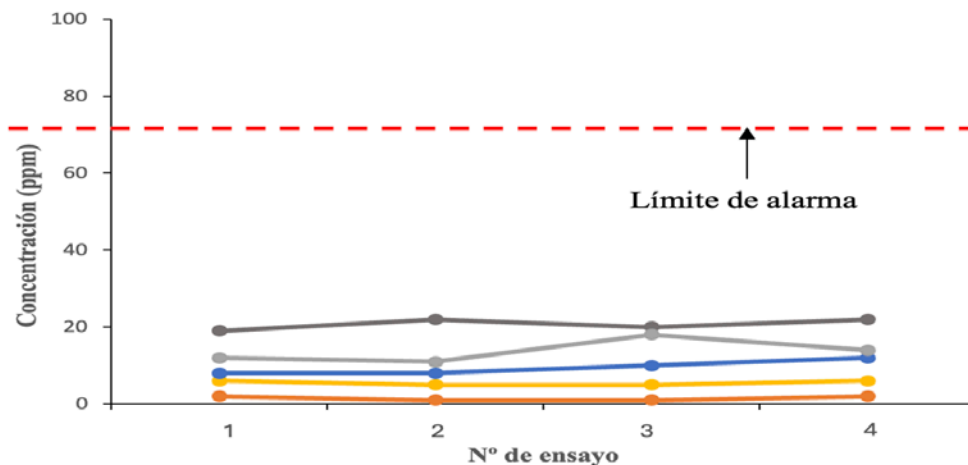


Figura 3-43: Caso 1 (O-1236): Elementos metálicos (en azul se muestra el cobre, en naranja el plomo, en gris claro el silicio, en amarillo el aluminio y en gris oscuro el hierro)

- **Caso 2: Posible contaminación por polvo atmosférico**

En la **Figura 3-44** se presentan los resultados de otro aceite lubricante O-1236 y se observa que en el ensayo 2 de ese gráfico hay un aumento de los elementos metálicos hierro (Fe) y cobre (Cu) que coincide con un aumento de silicio (Si) y aluminio (Al). A pesar de que no se alcanzan los umbrales de alerta establecidos, se aprecia esa tendencia que podría señalar una posible contaminación de polvo atmosférico, el cual contiene silicio y aluminio.

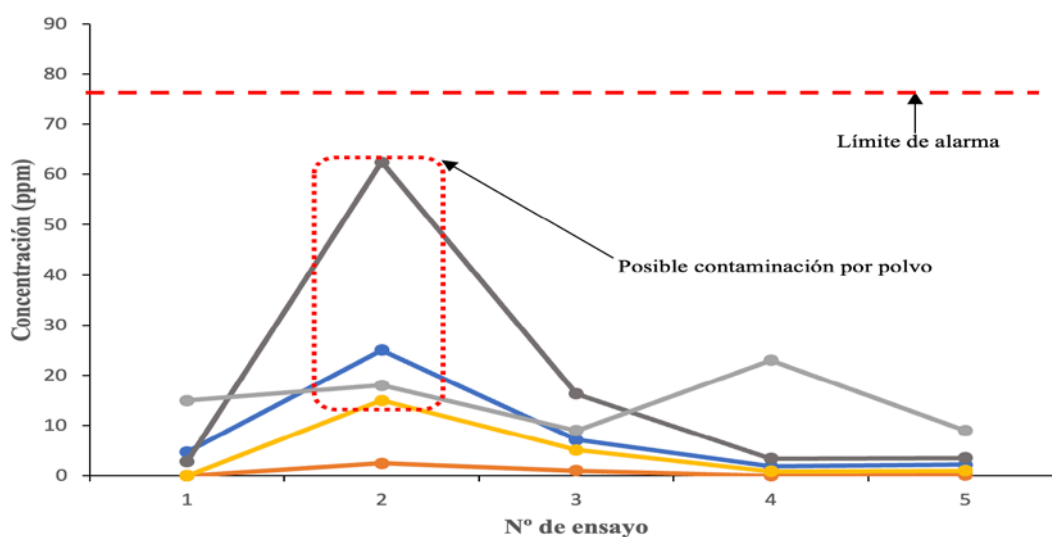


Figura 3-44: Caso 2 (O-1236): Elementos metálicos y posible influencia del polvo atmosférico (en azul se muestra el cobre, en naranja el plomo, en gris claro el silicio, en amarillo el aluminio y en gris oscuro el hierro)

Capítulo 3: Resultados y discusión

El polvo y la suciedad que se acumulan en los sistemas de lubricación son una de las principales causas de daño y deterioro del rendimiento del motor del vehículo. Estos contaminantes, al mezclarse con el aceite, alteran sus propiedades fundamentales, afectando a la lubricación correcta y aumentando el desgaste de piezas importantes como rodamientos, cilindros y pistones. Este fenómeno no sólo reduce la eficiencia mecánica, sino que también disminuye la vida útil de sistemas lubricados (motor y caja de cambios estudiados en el presente trabajo) sino que también eleva los gastos relacionados con mantenimiento y reparación. Por ello, es fundamental identificar lo antes posible la contaminación por suciedad y reaccionar con medidas correctivas inmediatas.

El ensayo 2 de la **Figura 3-44** muestra un aumento de hierro, que podría relacionarse con el aumento de silicio y aluminio en el mismo ensayo. Este fenómeno podría deberse a la entrada de polvo o arena al sistema. El efecto abrasivo de los granos de arena contenidos en el aceite de motor de los vehículos de cadena en estudio puede ser significativo además de tener una relación directa con el aumento de elementos metálicos en un análisis de aceite [14]. A continuación, se ofrece una explicación de este fenómeno y su relevancia:

- **Entrada de arena al motor:** Los filtros de aire defectuosos o de mala calidad pueden permitir el paso de granos de arena al motor, así como la contaminación durante las operaciones de mantenimiento o cambio de aceite. Cuando la arena entra al motor, se combina con el aceite.
- **Desgaste por abrasión:** La arena está formada por partículas pequeñas y duras que, al estar en el aceite, funcionan como un material abrasivo. Este material puede desgastar las superficies metálicas con las que tiene contacto, sobre todo en las zonas de más fricción como los cojinetes, los cilindros, los pistones y las superficies de los árboles de levas.
- **Aumento de elementos metálicos en el análisis de aceite:** La arena provoca la abrasión de las superficies metálicas del motor y hace que se desprenda partículas de metal. Estas partículas de metal se incorporan al aceite y pueden ser identificadas en un análisis de aceite. La existencia de niveles altos de elementos metálicos en el aceite, como hierro, aluminio, cobre, plomo y otros, señala que hay deterioro en los componentes internos del motor [24].

Capítulo 3: Resultados y discusión

- **Consecuencias para el funcionamiento del motor:** La arena que entra en el aceite no solo acelera el desgaste, sino que también puede obstruir los filtros y los conductos de aceite, disminuyendo la calidad de la lubricación. Esto puede provocar una subida de la temperatura del motor, pérdida de rendimiento y, finalmente, averías mecánicas serias.

Por todo ello, para evitar que la arena y otras impurezas entren en el motor, es esencial usar filtros de aire de buena calidad y verificar que estén bien ajustados y en buen estado. También es importante limpiar correctamente la zona alrededor de los tapones de llenado y las varillas medidoras antes de abrirlos, y mantener el área de trabajo limpia durante el mantenimiento del vehículo [14].

Los ensayos 3,4 y 5 de la **Figura 3-44** muestran una reducción de la concentración de hierro (Fe), lo que sugiere que el sistema no tiene arena y esa subida de hierro en el ensayo 2 fue un hecho aislado. Si la concentración de hierro hubiera continuado aumentando, se podría considerar la contaminación por arena.

Por lo tanto, aunque el aumento de hierro observado en el ensayo 2 sugiere la presencia de arena o polvo en el sistema, la reducción en los ensayos posteriores indica que esta contaminación no persistió, lo que refuerza la importancia de mantener un entorno controlado durante el mantenimiento para prevenir este tipo de contaminaciones.

- **Caso 3: Variación de la concentración de molibdeno**

En la **Figura 3-45** se puede ver cómo el contenido de molibdeno del aceite de motor multigrado O-1236 se va reduciendo a lo largo de los cinco análisis que se llevaron a cabo para examinarlo.

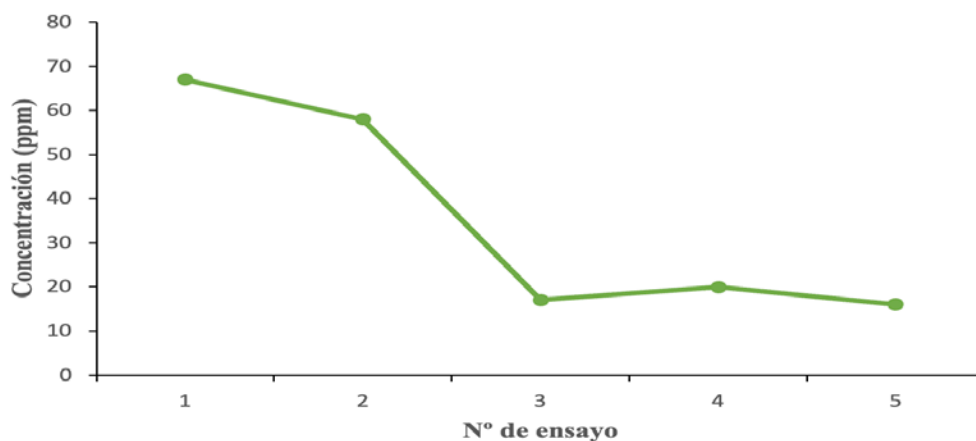


Figura 3-45: Caso 2 (O-1236): Disminución de Molibdeno

Capítulo 3: Resultados y discusión

El molibdeno se utiliza en aceites de motor sintéticos y semisintéticos de alta gama como un aditivo antifricción. Este elemento químico, cuando se añade a los lubricantes, forma compuestos que tienen excelentes propiedades para reducir la fricción entre las partes metálicas del motor [32]. Esto se traduce en varios beneficios para el motor y su funcionamiento, tales como:

- Reducción del desgaste: El molibdeno disminuye la fricción entre las piezas del motor, lo que contribuye a que estas piezas se deterioren menos, alargando la duración del motor.
- Mayor eficiencia del combustible: Al reducir la fricción, el molibdeno hace que el motor trabaje con menor esfuerzo para mover las partes internas, lo que puede resultar en una mayor eficiencia del combustible.
- Estabilidad del aceite: El molibdeno, además de tener propiedades que reducen la fricción, puede ayudar a mantener el aceite en buen estado, evitando que se deteriore cuando el funcionamiento es intenso.

La disminución de molibdeno que se muestra en la **Figura 3-45** podría afectar al rendimiento del motor, por lo que se debería considerar en los análisis posteriores.

- **Caso 4: Elementos metálicos por encima del límite de alarma**

A continuación, se muestra el caso donde elementos metálicos se sitúan por encima de los límites de alarma para el aceite multigrado O-1236 en el que se observa en el ensayo 2 de la **Figura 3-46**, un aumento de la concentración de los elementos metálicos hierro y cobre. Dado que las concentraciones de ambos elementos metálicos están muy por encima del límite de alarma se solicita el cambio de aceite tal y como se muestra en la gráfica. Se observa que después del cambio, las concentraciones de los elementos metálicos vuelven a ser normales.

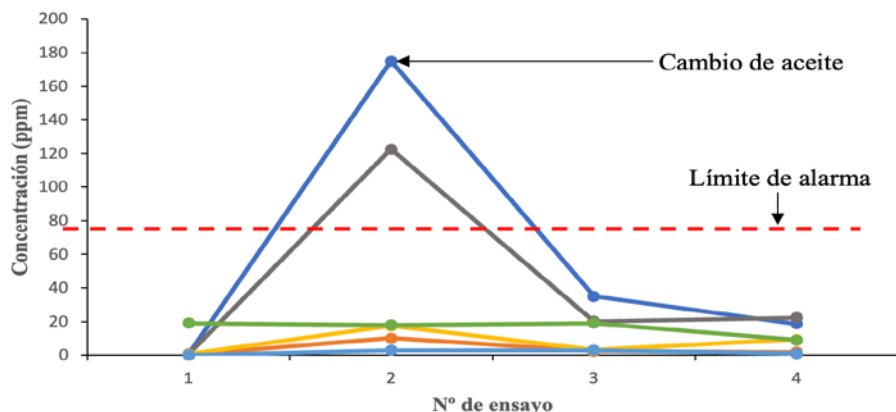


Figura 3-46: Caso 3 (O-1236): Elementos metálicos por encima del límite de alarma (en azul oscuro se muestra el cobre, en naranja el plomo, en gris el hierro, en amarillo el aluminio, en azul claro el cromo y en verde el silicio)

Sería necesario mantener el aceite del vehículo en observación y comprobar analítica del siguiente ensayo. A la vista de los siguientes análisis, se puede establecer que fue una problemática puntual y que el vehículo está en condiciones adecuada para su uso.

- **Caso 5: Incremento persistente de hierro y cobre**

La **Figura 3-47** muestra el caso 4 (O-1236), donde se aprecia que en el ensayo 2 representado en el gráfico, el nivel de hierro y cobre es alto. El ensayo 3 revela que ambos metales siguen aumentando, sobre todo el cobre, que supera el límite de alarma. En ese momento, se aconseja el cambio de aceite y se verifica que los niveles de los metales vuelven a la normalidad. Sería conveniente seguir observando el aceite de este vehículo y verificar si en el próximo ensayo se repite el incremento de los niveles de hierro y cobre.

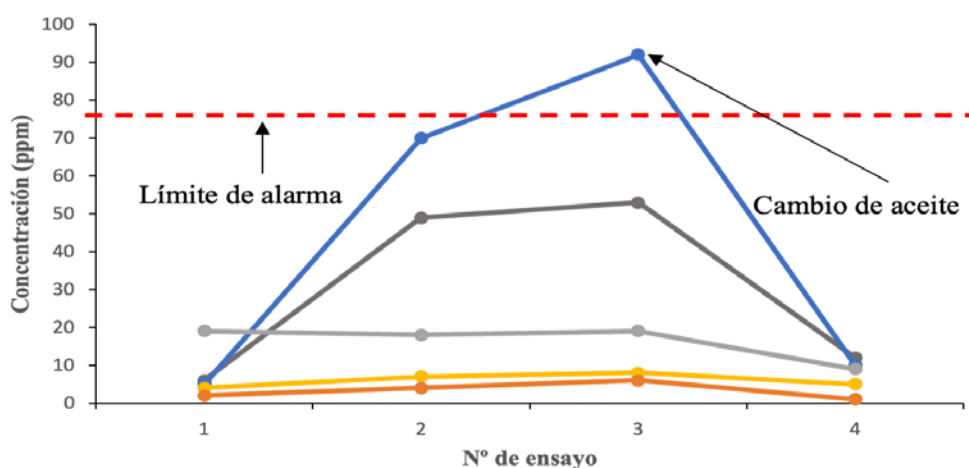


Figura 3-47: Caso 4 (O-1236): Elementos metálicos por encima del límite de alarma y cambio de aceite (en azul oscuro se muestra el cobre, en naranja el plomo, en gris oscuro el hierro, en amarillo el aluminio y en gris claro el silicio)

Capítulo 3: Resultados y discusión

Los análisis de aceite revelan mucha información de lo que puede estar pasando en el interior del motor. En la **Figura 3-47**, se observa que después de un cambio inicial en el que los niveles de los elementos metálicos fueron aceptables, se detectaron repetidamente altos niveles de hierro, cobre y plomo en el aceite motor, lo que puede indicar varias causas relacionadas con fallos en el motor o en los componentes asociados:

- **Desgaste de componentes del motor:** La presencia de cobre y plomo puede deberse al desgaste de las piezas que contienen estos metales como cojinetes, bujes, o de otras partes que contienen estos metales. Y el hierro de camisas y anillos. Si el desgaste persiste como se muestra tras el ensayo 2 y 3 de la **Figura 3-47**, puede señalar un problema más grave, como una lubricación deficiente, una suciedad del aceite, o unas condiciones de funcionamiento inapropiadas [107].
- **Problemas con el sistema de lubricación:** Si el sistema de lubricación no funciona correctamente, podría no estar protegiendo adecuadamente las piezas metálicas, lo que provocaría un desgaste más rápido. Esto incluye problemas como un filtro de aceite obstruido, uso de un tipo incorrecto de aceite, o defectos en la bomba de aceite. La **Figura 3-48** muestra que el aceite utilizado después de cambiarlo en el ensayo 3, tiene una viscosidad más baja que el aceite que se usaba antes del cambio. Sin embargo, eso no explica el elevado contenido de cobre y hierro que se observa en los ensayos 2 y 3 de la **Figura 3-47**.

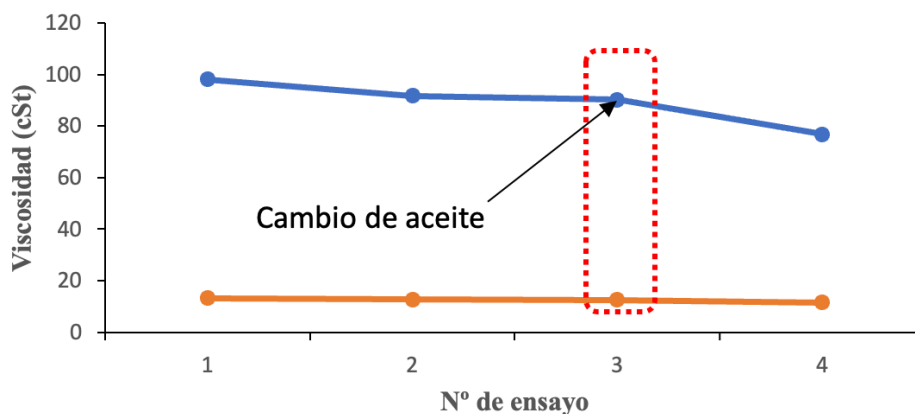


Figura 3-48: Caso 4 (O-1236): Viscosidad a 40 y 100 °C (en azul se muestra la viscosidad a 40 °C y en naranja la viscosidad a 100 °C)

- **Corrosión:** La presencia de hierro y cobre en el aceite motor puede indicar que se está produciendo corrosión dentro del motor. La corrosión en los motores puede estar influenciada por factores como la acidez y la basicidad de los medios en que

Capítulo 3: Resultados y discusión

se encuentran estos metales. Estos factores químicos juegan un papel importante en la degradación y el deterioro de componentes metálicos, especialmente de hierro y cobre, que son frecuentemente usados en la construcción de motores. La corrosión es un proceso electroquímico que sucede cuando un metal se oxida, lo que produce la formación de productos de corrosión como óxidos y sulfatos, que pueden afectar la estructura y la funcionalidad del motor [49]. Sin embargo, según los resultados mostrados en la **Figura 3-49** de la acidez total (TAN) y la basicidad total (TBN) el aceite no tiene unos valores que expliquen el alto contenido de hierro y cobre. La capacidad de un aceite para neutralizar ácidos, representada por su TBN, es esencial para evitar la corrosión interna del motor y el desgaste prematuro de sus componentes y los valores obtenidos están dentro de un rango aceptable. Si se detectan niveles de cobre y plomo, puede ser una señal de que el motor o los sistemas asociados tienen corrosión. Esta puede deberse a que el aceite contenga impurezas o a que haya condensación y humedad en el interior del motor.

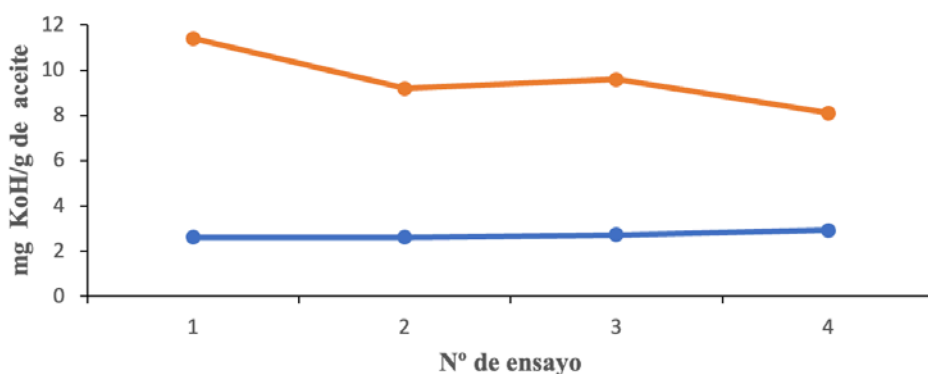


Figura 3-49: Caso 4 (O-1236): Acidez total (TAN) y Basicidad total (TBN) (en azul se muestra el TAN y en naranja el TBN)

- **Filtración de partículas externas:** Si se produce una entrada de partículas externas que contienen cobre y plomo en el motor, esto podría influir en las mediciones. Es crucial asegurarse de que el sistema de admisión y los filtros se encuentren en óptimas condiciones para evitar esta contaminación.

Capítulo 3: Resultados y discusión

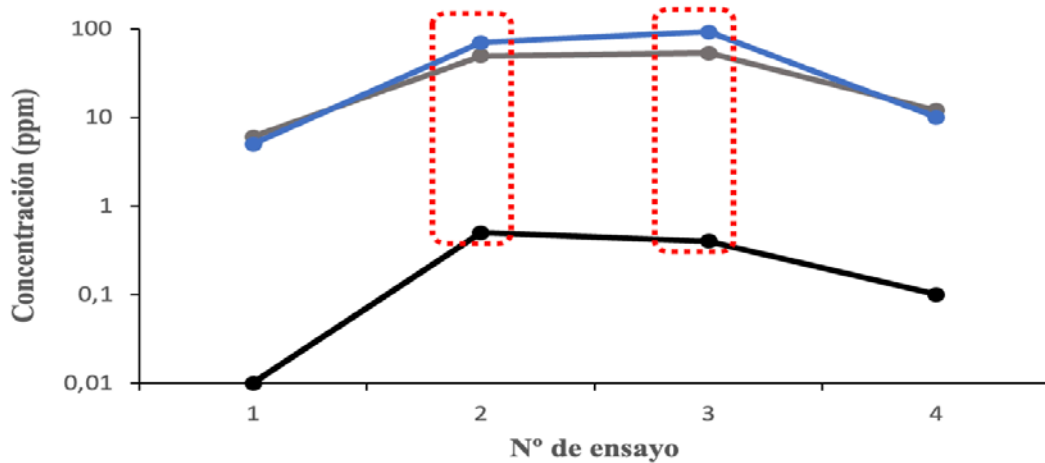


Figura 3-50: Caso 4 (O-1236): Influencia de la carbonilla (en azul se muestra el cobre, en gris el hierro y en negro la carbonilla)

A raíz de los resultados, se puede observar en la **Figura 3-50** que el aumento de la concentración de hierro y cobre en el aceite del motor podría estar relacionado con un incremento en la carbonilla generada durante la combustión. Sin embargo, es importante destacar que entre los ensayos 2 y 3 se produce una ligera disminución en la concentración de carbonilla mientras la concentración de cobre continúa aumentando, lo que sugiere que otros factores pueden estar influyendo en la concentración de metales en puntos específicos del proceso.

Entre estos factores se incluyen el desgaste mecánico de los componentes internos del motor, como cojinetes y superficies de fricción, que libera partículas metálicas directamente al aceite. Además, la calidad y viscosidad del aceite lubricante juegan un papel crucial, ya que un aceite degradado o de baja calidad puede reducir la eficacia de la lubricación y aumentar el desgaste metálico. La presencia de contaminantes externos, como polvo o partículas ambientales, también puede contribuir a la concentración de metales en el aceite. Asimismo, condiciones operativas como cargas elevadas, ciclos frecuentes de arranque y parada, y temperaturas extremas pueden exacerbar el estrés en los componentes del motor, incrementando la liberación de metales al sistema de lubricación. Finalmente, posibles fugas de refrigerante hacia el sistema de aceite pueden introducir compuestos corrosivos que aceleran el desgaste y la liberación de metales.

Los resultados obtenidos en todos los casos estudiados muestran que es necesario hacer un diagnóstico detallado de los aceites lubricantes de los vehículos para determinar la causa exacta del problema y de ese modo poder realizar las correcciones pertinentes.

Capítulo 3: Resultados y discusión

La persistencia de elevados niveles de estos metales puede señalar un fallo grave que, de no ser solucionado, podría ocasionar mayores perjuicios al motor. Por lo tanto, es esencial adoptar medidas correctivas como el reemplazo de filtros y sellos defectuosos, verificar una correcta instalación y sellado de componentes, y realizar un cambio completo de aceite para remover las partículas contaminantes, así como limpiar o reparar cualquier componente interno afectado.

Como se comentó anteriormente, se han encontrado patrones que indican que cuando dos metales se liberan al aceite a partir de la misma fuente de desgaste, se pueden observar patrones similares en sus niveles en el análisis de aceite. Por ejemplo, si un cojinete plomo-cobre se desgasta, ambos metales podrían entrar en el aceite en proporciones semejantes, mostrando un patrón paralelo de incremento o disminución.

No obstante, se desprende de los resultados que del cobre y el plomo no tienen por qué estar correlacionados como se verá más adelante, ya que pueden proceder de diferentes partes de la maquinaria y desgastarse a distintas velocidades o por razones distintas. Si el cobre proviene de un radiador o una junta y el plomo de un cojinete, es posible que no muestren una correlación directa en los niveles de aceite.

Para interpretar correctamente la presencia y evolución de estos metales en el aceite, se necesita un enfoque contextual, que tenga en cuenta el diseño particular de la maquinaria y las condiciones de operación. Es fundamental tener un conocimiento profundo del equipo y el mantenimiento, así como un análisis exhaustivo de tendencias y comparaciones con datos históricos para sacar conclusiones válidas.

3.4 Principales dificultades encontradas para fotografiar aceites

La fotografía de aceites usados presentó varios desafíos, principalmente debido a sus propiedades físicas intrínsecas. Estas propiedades afectan la calidad y precisión de las imágenes, dificultando la obtención de representaciones visuales fieles. Entre los principales obstáculos se encuentran la reflectividad, la viscosidad y la translucidez del aceite, que complican tanto la captura de imágenes como la preparación de las muestras.

Para abordar estas dificultades, se implementaron tres modalidades de fotografía:

Capítulo 3: Resultados y discusión

- Fotografías del aceite usado en un crisol.
- Fotografías del aceite usado en una cubeta espectroscópica.
- Fotografías del aceite usado en una cubeta espectroscópica utilizando una cámara endoscópica.

Además, fue necesario ajustar parámetros clave como la iluminación, el ángulo de captura y la distancia focal, con el fin de lograr imágenes consistentes y comparables entre diferentes muestras. La correcta manipulación de estos factores permitió capturar características críticas como la textura, el color y la transparencia del aceite.

Estos desafíos serán explorados en mayor detalle en los apartados que siguen, donde se examinarán específicamente los problemas relacionados con la reflectividad del aceite (**apartado 3.4.1**), la viscosidad y su efecto en el movimiento de la muestra (**apartado 3.4.2**), la interacción del aceite con el fondo fotográfico (**apartado 3.4.3**), la saturación del color (**apartado 3.4.4**) y el enfoque de la imagen (**apartado 3.4.5**).

Superar estas dificultades fue fundamental para asegurar que las imágenes obtenidas sean lo suficientemente claras y precisas, tanto para el análisis visual como para el tratamiento de los datos mediante inteligencia artificial.

3.4.1 Reflectividad del aceite

La reflectividad se refiere al grado en que la superficie del aceite refleja la luz incidente. En el caso de aceites lubricantes, como los utilizados en motores y cajas de cambios, el índice de refracción típicamente oscila entre 1,4625 y 1,4707, según se ha observado en estudios sobre aceites específicos como el Rheinol PRIMUS PX 5W-40 [118]. Este rango de índices de refracción indica que los aceites reflejan una cantidad significativa de luz, lo que puede causar problemas de reflexión y brillo durante la captura de imágenes. Aunque estos valores son menores que los índices de refracción de superficies altamente reflectantes, como los espejos de plata (aproximadamente 0,17, lo que permite reflejar cerca del 95% de la luz incidente), siguen siendo lo suficientemente altos como para distorsionar detalles importantes en la visualización de la textura y la presencia de partículas en el aceite.

La alta reflectividad de las superficies oleosas es uno de los principales problemas para fotografiar muestras de aceite. Los deslumbramientos y reflejos pueden distorsionar

la imagen deseada, dificultando la apreciación de la verdadera textura y color del aceite. Para mitigar este efecto, es clave una iluminación controlada y difusa, que reduzca los brillos intensos y permita que los detalles emerjan sin distracciones visuales. Efectos que impedirían captar las principales características de las muestras y con ello la posible clasificación de las muestras en “Conformes” o “No Conformes”.

3.4.2 Viscosidad y movimiento

La viscosidad es una propiedad que indica cuánto le cuesta a un fluido moverse. Esta propiedad afecta de manera importante a cómo se distribuye el aceite y cómo refleja la luz durante el proceso de fotografía. Una viscosidad alta puede presentar algunos problemas:

- **Imágenes poco nítidas:** El aceite con viscosidad alta se mueve despacio, lo que puede provocar que no se extienda de forma homogénea sobre una superficie. Si el aceite continúa desplazándose o formando ondas mientras se toma la fotografía, esto puede ocasionar imágenes poco nítidas o con menos detalle.
- **Ondas en la superficie:** Al poner la muestra de aceite en el área destinada para la fotografía, pueden surgir ondas en la superficie. Estas ondas crean distorsiones y reflejos no deseados, dificultando la obtención de una imagen limpia.

La solución radica en el empleo de velocidades de obturación altas para detener el movimiento, así como el uso de un trípode firme que minimice las vibraciones de la cámara y se evite así que la fotografía no tenga la suficiente calidad como para darle el tratamiento adecuado para las aplicaciones que se describirán posteriormente.

3.4.3 Translucidez y fondo fotográfico

La translucidez de algunas muestras de aceite es otra de las dificultades que añaden para fotografiar una muestra de aceite. La translucidez de un aceite se refiere a la capacidad que tiene un aceite de permitir que la luz pase a través de él, pero no de manera completamente clara, sino difuminando y dispersando la luz en el proceso. Esta característica impacta tanto en la apariencia visual del aceite como en su percepción de calidad. Los factores que contribuyen a la translucidez del aceite incluyen su composición química, el grado de refinamiento y la presencia de impurezas o aditivos.

Capítulo 3: Resultados y discusión

La luz que atraviesa estas muestras puede alterar la percepción de claridad y detalle. Una solución efectiva es la selección cuidadosa de fondos que proporcionen el contraste necesario sin competir con la muestra. Dadas las características de los aceites fotografiados al ser oscuros y densos, se eligió un fondo claro en las tres modalidades de fotografías.

3.4.4 Saturación del color

La captura fidedigna del color del aceite representa otros de los desafíos significativos para fotografiar una muestra de aceite, principalmente debido a la variabilidad de su saturación bajo diferentes condiciones lumínicas. Este fenómeno provoca que el aceite exhiba apariencias divergentes en función de la fuente de luz utilizada, complicando la consecución de una consistencia en la representación fotográfica del mismo.

Debido a las propiedades reflectantes y translúcidas del aceite, el aceite sufre variabilidad en la apariencia de su color, influenciada por el tipo y la intensidad de la luz. Por ello, para capturar la esencia del aceite de manera precisa, es fundamental una cuidadosa selección de la iluminación y del fondo para evitar reflejos indeseados y asegurar que los brillos naturales del aceite se destaquen sin sobrepasar.

La saturación del color del aceite puede alterarse significativamente bajo diferentes condiciones de iluminación, variando desde luz natural hasta iluminación artificial. Esta variabilidad se debe a la forma en que las ondas luminosas interactúan con las propiedades físicas del aceite. Por ese motivo, cada una de las tres modalidades de fotografía se realizaron con la misma iluminación ya que las características intrínsecas del aceite, como su viscosidad y composición química, afectan cómo este refleja y absorbe la luz, alterando su color percibido.

3.4.5 Enfoque de la imagen

El enfoque adecuado de una muestra de aceite lubricante usado presentó importantes retos, debido principalmente a la naturaleza homogénea del aceite, que carece de variaciones visibles que sirvan como puntos de referencia para las cámaras. Como se detalló en la sección de Materiales y Métodos, el autoenfoco de las cámaras, que

Capítulo 3: Resultados y discusión

generalmente se basa en la detección de contrastes, fallaba al intentar enfocar el aceite, ya que la superficie uniforme del líquido no proporcionaba elementos que permitieran al sistema identificar un punto claro de enfoque.

Este problema generaba imágenes borrosas o desenfocadas, lo que interfería con la precisión necesaria para el análisis de las propiedades visuales del aceite. Esta dificultad no solo afectaba la calidad estética de las fotografías, sino también la posibilidad de realizar un análisis detallado basado en las imágenes obtenidas.

Para resolver estas dificultades, se implementaron dos enfoques principales. El primero fue el uso del enfoque manual, el cual permitió un control más preciso sobre el punto de enfoque. A diferencia del autoenfoque, que se basaba en algoritmos que fallaban ante la homogeneidad del aceite, el enfoque manual ofrecía la posibilidad de ajustar gradualmente el enfoque hasta que la muestra apareciera clara y definida. Esta técnica, aunque más laboriosa, resultó esencial para obtener imágenes nítidas y evitar los errores típicos del enfoque automático en estas condiciones.

El segundo enfoque consistió en la incorporación de una trama sobre la superficie del aceite, como se explicó también en Materiales y Métodos. Esta trama, que estaba compuesta por líneas que creaban un patrón de cuadrados, actuaba como un elemento de contraste sobre la superficie del aceite. De este modo, proporcionaba un punto de referencia claro que facilitaba el enfoque, tanto para el sistema automático como para el ajuste manual de la cámara. La trama permitía centrar el enfoque en un área específica, mejorando significativamente la claridad de la imagen y, al mismo tiempo, minimizando la interferencia de reflejos indeseados o distorsiones causadas por la superficie lisa del aceite.

En la práctica, fue crucial posicionar la trama de manera cuidadosa sobre el aceite para evitar que se hundiera o causara ondulaciones que podrían alterar la calidad de la imagen. Esta técnica, combinada con el enfoque manual, ofreció una solución eficaz a los problemas asociados con la falta de contraste en la superficie homogénea del aceite.

El uso de estas estrategias no solo permitió superar las limitaciones técnicas en el enfoque de las muestras de aceite, sino que también resultó fundamental para garantizar que las imágenes obtenidas reflejaran fielmente las propiedades del aceite. Las imágenes enfocadas con precisión mejoraron notablemente la calidad del análisis posterior en la evaluación a través de técnicas de inteligencia artificial.

3.5 Ventajas de la utilización del maletín rugerizado

Finalmente, se presentan las ventajas clave de utilizar el maletín rugerizado en el análisis fotográfico de aceites lubricantes. Estas ventajas subrayan la importancia de este equipo en aplicaciones de campo y en entornos operativos exigentes.

3.5.1 Efectos sobre la calidad de las imágenes

El uso del maletín rugerizado en el análisis fotográfico de aceites lubricantes presenta ciertas consideraciones respecto a la calidad de las imágenes obtenidas. Si bien las fotografías capturadas con la cámara endoscópica integrada no alcanzan la resolución y nitidez de las imágenes obtenidas en los otros tres escenarios previos, especialmente aquellos que utilizan equipos de laboratorio de alta gama, se ha demostrado que la calidad es suficiente para llevar a cabo el estudio y obtener resultados significativos.

La disposición interna del maletín, diseñada para posicionar consistentemente la muestra de aceite en una cubeta especializada, y el sistema de iluminación optimizado, contribuyen a minimizar las variaciones y garantizar condiciones controladas durante la captura de imágenes. Al cerrar el maletín, se crea un entorno aislado que reduce la influencia de variables externas como la luz ambiental y las vibraciones, lo cual es esencial para obtener imágenes reproducibles.

Aunque la cámara endoscópica utilizada tiene limitaciones en términos de resolución y detalle comparada con cámaras de mayor calidad, es posible mejorar los resultados mediante la captura de un mayor número de fotografías. Esto amplía el conjunto de datos disponibles para el análisis y puede compensar parcialmente la menor calidad individual de cada imagen. Además, la sustitución de la cámara endoscópica por un modelo de mejor calidad podría incrementar significativamente la resolución y claridad de las imágenes, potenciando la precisión en la detección de partículas y contaminantes presentes en el aceite.

Es importante destacar que el sistema actual representa un equilibrio entre calidad de imagen y portabilidad. La capacidad de realizar análisis in situ es una ventaja operativa clave, especialmente en entornos donde el acceso a equipos de alta resolución es limitado

o impracticable. Por lo tanto, aunque la calidad de las fotografías no sea equiparable a la obtenida en entornos de laboratorio, el maletín ruggedizado ofrece una solución práctica y eficaz que satisface las necesidades del análisis en campo.

3.5.2 Portabilidad y eficiencia en el análisis de campo

La utilización del maletín ruggedizado ha supuesto una mejora sustancial en la portabilidad y eficiencia del análisis de aceites lubricantes en campo. Su diseño robusto y compacto facilita su transporte y uso en una amplia variedad de entornos, incluyendo aquellos con condiciones ambientales adversas o de difícil acceso, como zonas de operaciones militares, campos de maniobras, regiones montañosas y entornos desérticos.

Esta portabilidad permite realizar análisis in situ, eliminando la necesidad de transportar muestras a laboratorios especializados. Como resultado, se logra una evaluación rápida del estado del aceite, lo que permite tomar decisiones informadas de manera inmediata. Este aspecto es crucial en entornos donde el tiempo es un recurso limitado y los retrasos en la toma de decisiones pueden tener consecuencias significativas en términos operativos y de seguridad.

Además, el maletín reduce la dependencia de infraestructura fija y de personal altamente especializado. Su diseño intuitivo permite que el personal de campo realice las pruebas con una formación mínima, optimizando los recursos humanos y disminuyendo los costes asociados al entrenamiento y a la contratación de técnicos especializados. Esto contribuye a una mayor autonomía operativa y a la optimización general de los procesos logísticos y de mantenimiento.

La capacidad de desplazarse fácilmente entre diferentes unidades y analizar el aceite de múltiples vehículos sin necesidad de infraestructura fija es una ventaja significativa. Aunque la calidad de las fotografías obtenidas con la cámara endoscópica integrada en el maletín no es tan alta como la de otros escenarios fotográficos más avanzados, es suficiente para llevar a cabo estudios efectivos. Además, existe la posibilidad de mejorar los resultados capturando más imágenes o sustituyendo la cámara por una de mayor calidad, lo que incrementaría la resolución y claridad de las fotografías sin sacrificar la portabilidad del sistema.

Capítulo 3: Resultados y discusión

De este modo, el maletín ruggedizado proporciona una excelente combinación de portabilidad y eficiencia, permitiendo llevar a cabo análisis de alta calidad en entornos operativos exigentes donde la rapidez y la capacidad de respuesta son cruciales.

3.5.3 Comparación con otros métodos

Al comparar el método de fotografía utilizando el maletín ruggedizado con otros escenarios fotográficos llevados a cabo previamente, se observan diferencias significativas en términos de calidad de imagen y portabilidad. Los otros escenarios, desarrollados en entornos de laboratorio con equipos especializados y una cámara de alta resolución como la Canon EOS 100D utilizada, proporcionan fotografías de mayor calidad que facilitan un análisis más detallado y preciso. Sin embargo, estos métodos carecen de la movilidad y versatilidad que ofrece el maletín ruggedizado.

El maletín permite realizar análisis en tiempo real y en ubicaciones remotas o de difícil acceso, donde el transporte de muestras a un laboratorio no es viable o resulta costoso y lento. Aunque la calidad de las imágenes obtenidas es inferior en comparación con los métodos de laboratorio, es suficiente para detectar anomalías y realizar un diagnóstico efectivo del estado del aceite lubricante.

Además, el diseño robusto y portátil del maletín lo hace apto para su uso en condiciones ambientales adversas, tanto civiles como militares. Esta portabilidad ofrece una ventaja operativa significativa, permitiendo al personal desplazarse fácilmente entre diferentes unidades militares y realizar análisis sin necesidad de infraestructura fija o apoyo logístico extenso.

Es cierto que los resultados podrían mejorarse mediante el uso de cámaras de mayor calidad o aumentando el número de fotografías tomadas. Sin embargo, esto debe equilibrarse con la necesidad de mantener la portabilidad y simplicidad del sistema. Incrementar la calidad de la cámara podría implicar un aumento en el tamaño, peso y complejidad del equipo, contrarrestando las ventajas que ofrece el maletín en términos de movilidad y facilidad de uso.

En conclusión, aunque con los otros métodos fotográficos utilizados en el estudio se generan imágenes de calidad superior, la utilización del maletín ruggedizado representa un equilibrio ideal entre calidad y funcionalidad. Su capacidad para realizar análisis in situ,

disminuir gastos y agilizar la toma de decisiones lo hacen una herramienta muy útil en escenarios operativos demandantes donde la portabilidad y la rapidez son esenciales.

3.6 Aplicación de algoritmos inteligentes en el control de calidad de los aceites lubricantes

El desarrollo de técnicas avanzadas de inteligencia artificial ha permitido la implementación de modelos capaces de realizar predicciones precisas basadas en imágenes, incluso cuando estas son capturadas en condiciones variables. Este apartado aborda la aplicación de modelos inteligentes en la evaluación de la calidad del aceite lubricante utilizado en los carros de combate del Ejército Español. A lo largo del estudio, se analizará cómo la variabilidad en los entornos de captura de imágenes afecta la capacidad del modelo para predecir con exactitud el estado del aceite. La metodología incluye la comparación de resultados obtenidos en diversos escenarios experimentales y la optimización del modelo para maximizar su precisión y utilidad operativa.

3.6.1 Técnicas inteligentes y su aplicación en la predicción de la calidad del aceite lubricante a partir de imágenes capturadas

La finalidad principal de esta investigación es determinar la efectividad de un sistema de inteligencia artificial en la predicción de la condición del aceite lubricante usado en los carros de combate del Ejército Español, mediante el análisis de imágenes tomadas bajo diferentes situaciones experimentales. Se han establecido cuatro escenarios esenciales (*vide supra*) para la toma de imágenes: utilizando crisoles y una cámara réflex digital; cubeta espectroscópica y una cámara réflex digital; cubeta espectroscópica y una cámara endoscópica; un porta muestras dentro de un maletín y una cámara endoscópica.

La variabilidad en las condiciones de captura, incluyendo factores como la iluminación, continente y el contexto de la imagen, presenta un desafío significativo para la precisión del modelo inteligente utilizado. Este análisis se centra en cómo dichas condiciones influyen en las predicciones del modelo y en qué medida las técnicas de optimización, como las aplicadas al modelo inteligente ResNet-34, pueden mejorar la

Capítulo 3: Resultados y discusión

capacidad de los modelos presentados para generalizar y mantener un rendimiento consistente en estos diversos escenarios.

El objetivo general que se persigue es el desarrollo de un prototipo constituido por un modelo que permita la evaluación precisa del aceite directamente desde las imágenes tomadas en el maletín (formado por una porta muestra y un equipo endoscópico de tomas de imágenes), sin necesidad de enviar muestras al Laboratorio Central del Ejército. Este enfoque reducirá los tiempos de análisis y aumentar la eficiencia en la evaluación de la calidad del aceite en zona de operaciones, donde la evaluación rápida y precisa de la calidad del aceite es crítica para el mantenimiento y la operatividad de los carros de combate.

3.6.2 Metodología

En este apartado, se detalla el enfoque metodológico empleado para evaluar la eficacia de la ResNet-34 en la clasificación de los dos tipos de aceites lubricantes estudiados. El objetivo es proporcionar una comprensión clara y precisa de los procedimientos seguidos para diseñar y ejecutar los experimentos (*vide supra*), así como para preparar los datos y optimizar el modelo.

La metodología se divide en varios apartados clave: primero, se ofrece una descripción del modelo ResNet-34 utilizado en el estudio, seguido de la configuración específica de los experimentos. Posteriormente, se expone el proceso de preparación de los datos, un paso crítico para garantizar la validez y relevancia de los resultados. Finalmente, se describen los resultados obtenidos a partir de las técnicas de optimización implementadas, que juegan un papel fundamental en la mejora del rendimiento del modelo y su capacidad para generalizar los resultados.

3.6.2.1 Descripción del Modelo Utilizado (ResNet-34)

Para este estudio, se ha elegido el modelo ResNet-34 (*vide supra*) debido a su eficacia comprobada en tareas de clasificación de imágenes. Se elige utilizar redes ResNet frente a otros tipos de redes debido a su capacidad para entrenar modelos muy profundos. Las capas residuales permiten que las redes aprendan de manera más eficiente al facilitar el flujo de la información, lo que mejora el rendimiento y la precisión. Además, las redes ResNet, ganadoras del premio en la competencia ILSVRC 2015 (ImageNet Large Scale

Capítulo 3: Resultados y discusión

Visual Recognition Challenge), han demostrado ser más efectivas en tareas de reconocimiento de imágenes y clasificación, superando a redes menos profundas y tradicionales en importantes competencias de visión por computadora. Este tipo de modelo ha sido descrito en el apartado “Materiales y métodos”. Este modelo se configura y entrena en los diferentes escenarios de captura para evaluar su rendimiento y capacidad de generalización para los dos tipos de aceite en estudio: el aceite de la caja de cambios, el O-1178, y el aceite motor, el O-1236.

3.6.2.2 Configuración de los Experimentos

La configuración de los diferentes ensayos establecidos para los dos tipos de aceites (O-1178 y O-1236) son los siguientes:

- **Grupo 1:** Fotografías en crisol usando cámara réflex
 - Optimización de la última capa del modelo ResNet-34 para el aceite O-1178.
 - Optimización de todas las capas del modelo ResNet-34 para el aceite O-1178.
 - Optimización de la última capa del modelo ResNet-34 para el aceite O-1236.
 - Optimización de todas las capas del modelo ResNet-34 para el aceite O-1236.
- **Grupo 2:** Fotografías en cubeta espectroscópica usando cámara réflex
 - Optimización de la última capa del modelo ResNet-34 para el aceite O-1178.
 - Optimización de todas las capas del modelo ResNet-34 para el aceite O-1178.
 - Optimización de la última capa del modelo ResNet-34 para el aceite O-1236.
 - Optimización de todas las capas del modelo ResNet-34 para el aceite O-1236.
- **Grupo 3:** Fotografías en cubeta espectroscópica usando cámara endoscópica
 - Optimización de la última capa del modelo ResNet-34 para el aceite O-1178.
 - Optimización de todas las capas del modelo ResNet-34 para el aceite O-1178.
 - Optimización de la última del modelo ResNet-34 capa para el aceite O-1236.
 - Optimización de todas las del modelo ResNet-34 capas para el aceite O-1236.
- **Grupo 4:** Fotografías con cubeta espectroscópica en maletín y usando cámara endoscópica

Capítulo 3: Resultados y discusión

- Optimización de la última capa del modelo ResNet-34 para el aceite O-1178.
- Optimización de todas las capas del modelo ResNet-34 para el aceite O-1178.
- Optimización de la última capa del modelo ResNet-34 para el aceite O-1236.
- Optimización de todas las capas del modelo ResNet-34 para el aceite O-1236.

3.6.2.3 Preparación de Datos

Teniendo en cuenta las condiciones mencionadas anteriormente, las imágenes utilizadas en este estudio fueron capturadas en cuatro condiciones diferentes: Grupo 1, Grupo 2, Grupo 3 y Grupo 4. Para analizar y discutir los resultados del modelo, el conjunto de datos se dividió de la siguiente manera: el 70 % de las imágenes se utilizó para el proceso de aprendizaje, el 20 % se destinó a la validación y el 10 % restante se empleó en la validación ciega. Esta distribución asegura un equilibrio adecuado entre el entrenamiento del modelo, la optimización de hiperparámetros y la evaluación de su capacidad de generalización. Los grupos fueron los siguientes:

- **Grupo 1:** Fotografías en plato usando cámara réflex (Canon EOS 100D). Imágenes capturadas en un entorno plano y controlado, que ofrecen condiciones ideales para la predicción, **Figura 3-51**.

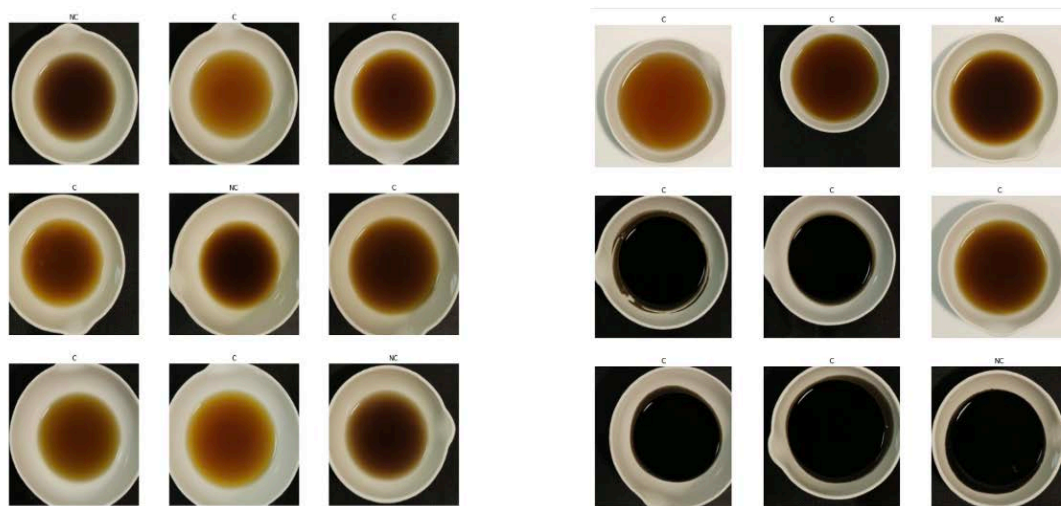


Figura 3-51: Fotografías del Grupo 1 en plato y con cámara réflex (Canon EOS 100D) (Fotografía Izq.: O-1178, Fotografía Der.: O-1236) (NC: No conforme; C: Conforme)

Para el desarrollo y posterior verificación del modelo inteligente, se ha efectuado una partición aleatoria de 534 imágenes correspondientes a O-1178 y 876 de O-1236, cuya distribución específica se detalla en la **Tabla 3-37**. Algunas fotografías de este conjunto se muestran en la **Figura 3-51**.

Capítulo 3: Resultados y discusión

Tabla 3-37: Separación de las imágenes del Grupo 1 en crisol y con cámara réflex (Canon EOS 100D)

Distribución de imágenes		Imágenes (O-1178)	Imágenes (O-1236)
Totales		534	876
Entrenamiento		374	614
Validación interna		107	175
Ciclos de aprendizaje	última capa	9	10
	todas las capas	6	10
	Validación a ciegas	53	87

- **Grupo 2:** Fotografías en cubeta espectroscópica usando cámara Canon EOS 100D. Según se ha mencionado, estas imágenes fueron obtenidas por medio de una cámara réflex en un entorno de luz controlado y utilizando un menor volumen de muestra de aceite a analizar (*vide supra*).

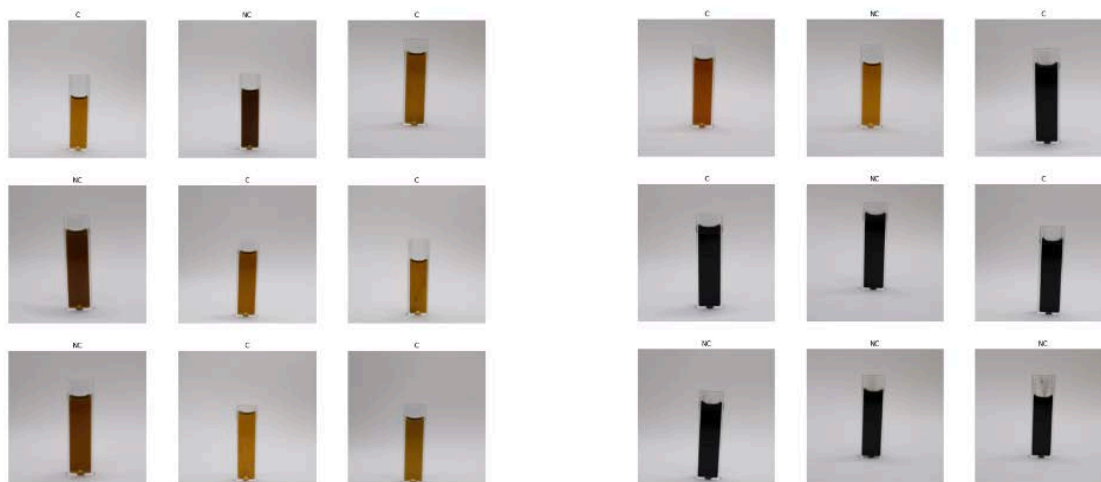


Figura 3-52: Fotografías del Grupo 2 en cubeta y con cámara réflex (Canon EOS 100D) (Fotografía Izq.: O-1178, Fotografía Der.: O-1236) (NC: No conforme; C: Conforme)

Para el diseño y posterior validación del modelo inteligente, se ha llevado a cabo una división aleatoria de 423 imágenes de O-1178 y 241 de O-1236 cuya repartición real se muestra en la **Tabla 3-38**. Algunas fotografías pertenecientes a este conjunto se pueden ver en la **Figura 3-52**.

Capítulo 3: Resultados y discusión

Tabla 3-38: Separación de las imágenes del Grupo 2 en cubeta y con cámara réflex (Canon EOS 100D)

Distribución de imágenes		Imágenes (O-1178)	Imágenes (O-1236)
Totales		423	241
Entrenamiento		296	169
Validación interna		85	48
Ciclos de aprendizaje	última capa	6	9
	todas las capas	6	6
Validación a ciegas		42	24

- **Grupo 3:** Fotografías en cubeta espectroscópica usando la cámara endoscópica (modelo Zealtron Industrial Endoscope 3.9mm). Imágenes capturadas con una cámara endoscópica en un entorno similar al anterior, para comparar cómo diferentes equipos afectan la calidad de la estimación.

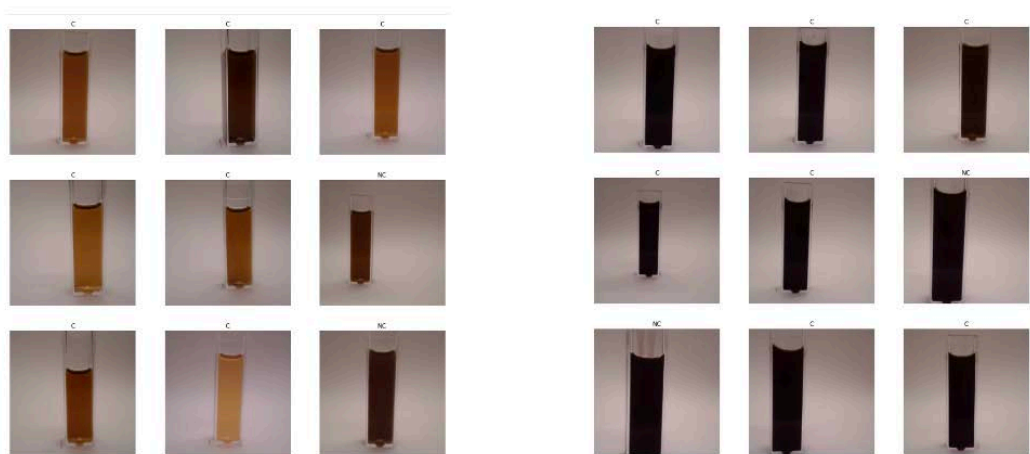


Figura 3-53: Fotografías del Grupo 3 en cubeta y con cámara endoscópica (modelo Zealtron Industrial Endoscope 3.9mm) (Fotografía Izq.: O-1178, Fotografía Der.: O-1236) (NC: No conforme; C: Conforme)

Para llevar a cabo la optimización y validación del modelo inteligente, se ha realizado una división aleatoria de 392 imágenes de O-1178 y 247 de O-1236 cuya repartición real se muestra en la **Tabla 3-39**. En la **Figura 3-53** se muestra un ejemplo de estas fotografías.

Capítulo 3: Resultados y discusión

Tabla 3-39: Separación de las imágenes del Grupo 3 en cubeta y con cámara endoscópica

Distribución de imágenes		Imágenes (O-1178)	Imágenes (O-1236)
Totales		392	274
Entrenamiento		275	192
Validación interna		78	55
Ciclos de aprendizaje	última capa	12	12
	todas las capas	6	12
Validación a ciegas		39	27

- **Grupo 4:** Fotografías de los aceites en estudio hechas dentro de un maletín y usando una cámara endoscópica y una porta muestra para la colocación de la cubeta espectroscópica (modelo Zealtron Industrial Endoscope 3.9mm). Se capturaron imágenes en el interior del maletín, descrito anteriormente, cerrado y por medio de la misma cámara endoscópica que se empleó en el ensayo del Grupo 3.

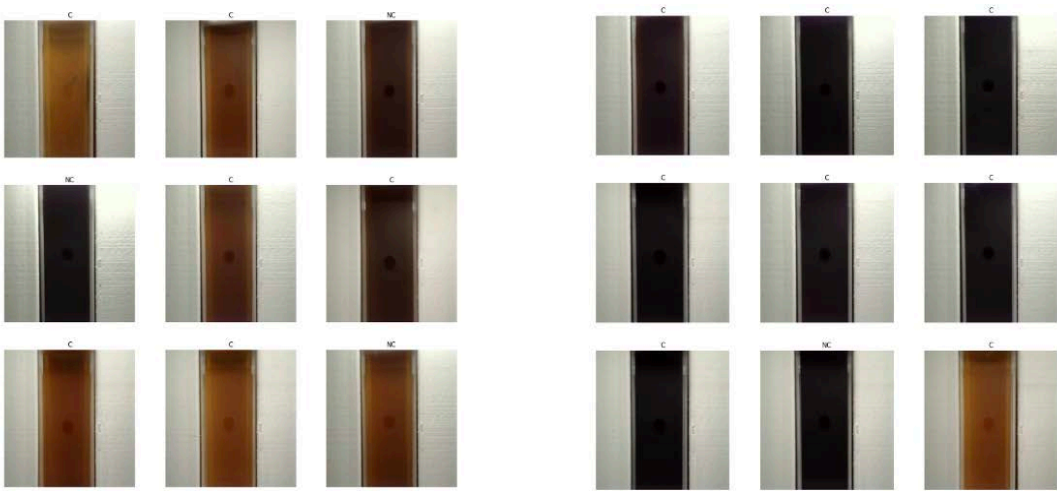


Figura 3-54: Fotografías del Grupo 4 en maletín y con cámara endoscópica (Fotografía Izq.: O-1178, Fotografía Der.: O-1236) (NC: No conforme; C: Conforme)

Para realizar la validación y optimización del modelo inteligente, se ha efectuado una partición aleatoria de 1025 imágenes correspondientes a O-1178 y 1709 de O-1236, cuya distribución específica se detalla en la **Tabla 3-40**. Algunas fotografías pertenecientes a este grupo se muestran en la **Figura 3-54**.

Tabla 3-40: Separación de las imágenes del Grupo 4 en maletín y con cámara endoscópica

Distribución de imágenes		Imágenes (O-1178)	Imágenes (O-1236)
Totales		1025	1709
Entrenamiento		718	1197
Validación interna		205	342
Ciclos de aprendizaje	última capa	6	6
	todas las capas	6	6
Validación a ciegas		102	170

3.6.3 Diseño y validación de los modelos Resnet-34

Para interpretar adecuadamente los resultados obtenidos en los experimentos, es fundamental comprender las diferencias entre la optimización de solo la última capa y la optimización de todas las capas en el modelo ResNet-34.

- La optimización de la última capa se centró exclusivamente en ajustar los parámetros de la capa final del modelo, permitiendo evaluar la rapidez de convergencia y la precisión alcanzada en un tiempo reducido. Este enfoque es particularmente útil cuando se requiere un ajuste rápido con recursos computacionales limitados. En este caso, los parámetros que no han sido optimizados se obtienen de bases de datos generales, sin una vinculación directa con las muestras de aceite. Estos parámetros preentrenados provienen de modelos estándar y se reutilizan para facilitar el proceso, mientras que solo la última capa de la ResNet-34 ha sido ajustada específicamente para adaptarse a las particularidades del conjunto de datos de aceite, permitiendo una mayor precisión en la clasificación final.
- Por otro lado, la optimización de todas las capas involucró el ajuste de los parámetros de todas las capas del modelo, lo que permitió un ajuste más detallado y preciso. Aunque este método es más costoso en términos de tiempo y recursos, puede mejorar significativamente la capacidad del modelo para generalizar a diversas condiciones. En este caso, todos los parámetros de la ResNet-34 han sido optimizados específicamente para el conjunto de datos de aceite. Esto implica un

Capítulo 3: Resultados y discusión

ajuste completo del modelo, adaptando cada capa para mejorar su capacidad de extracción de características y garantizar que las predicciones se basen en los patrones únicos presentes en las muestras de aceite, lo que ofrece una mayor precisión en comparación con el uso de parámetros preentrenados.

A continuación, se presentan y comparan los resultados de ambos enfoques en los conjuntos de experimentos para los aceites lubricantes: 0-1178 y 0-1236. En el primer enfoque, se emplearon los parámetros preentrenados para todas las capas, optimando únicamente la última capa, mientras que en el segundo enfoque se realizó una optimización completa de todas las capas del modelo. La comparación entre ambos métodos permitirá evaluar el impacto del ajuste parcial frente a la optimización total en términos de precisión, capacidad de generalización y rendimiento del modelo al identificar patrones únicos en las muestras de aceite analizadas.

3.6.3.1 Análisis del Grupo 1: Fotografías en crisol y cámara réflex

En el Grupo 1, se estudiaron las imágenes de los aceites O-1178 y O-1236 con el propósito de evaluar cómo distintas estrategias de optimización del modelo afectan su rendimiento en la clasificación de estos aceites. Específicamente, se investigaron los efectos de optimizar solo la última capa del modelo frente a la optimización de todas las capas. Este análisis inicial es fundamental para establecer una base comparativa sobre la eficacia de cada enfoque en la captura de las características específicas de cada tipo de aceite.

El enfoque para estos análisis se presentará en varias etapas. Primero, se ofrecerá un resumen de los resultados preliminares del proceso de aprendizaje con el fin de identificar los valores óptimos. Posteriormente, se detallarán los resultados relacionados con la pérdida durante el aprendizaje, la validación y la precisión del modelo en cada fase. Finalmente, se llevará a cabo un análisis exhaustivo de los resultados obtenidos durante la validación para evaluar el desempeño global del modelo.

3.6.3.1.1 Optimización de la última capa para el aceite O-1178

En este apartado se presenta la optimización de la última capa de la red ResNet34 para la clasificación de imágenes asociadas al control de calidad del aceite lubricante O-1178, perteneciente al Grupo 1. Se modificó la última capa de la red para adecuarla a

Capítulo 3: Resultados y discusión

las necesidades específicas del problema y se entrenó utilizando un conjunto de datos con un 80% destinado a la validación.

La **Figura 3-55** muestra la relación entre la tasa de aprendizaje (en el eje horizontal) y la pérdida (en el eje vertical) durante el entrenamiento preliminar de un modelo ResNet-34. En este proceso inicial, se busca encontrar una tasa de aprendizaje adecuada que permita al modelo ajustarse de manera eficiente a los datos. A medida que se incrementa la tasa de aprendizaje, la pérdida disminuye inicialmente, alcanzando un punto de valle (marcado con un punto naranja), que representa la combinación óptima de tasa de aprendizaje y la menor pérdida posible. Sin embargo, al sobrepasar este punto, la pérdida comienza a aumentar rápidamente, lo que indica que tasas de aprendizaje demasiado altas pueden generar inestabilidad en el proceso de entrenamiento. Este gráfico es crucial en esta fase preliminar, ya que ayuda a seleccionar una tasa de aprendizaje óptima que garantice un equilibrio entre la rapidez de la convergencia y la estabilidad del modelo, con el coeficiente de aprendizaje ideal ubicado en la abscisa del punto naranja ($1 \cdot 10^{-3}$).

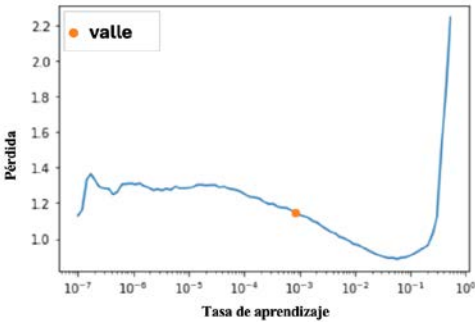


Figura 3-55: La curva de aprendizaje de la ResNet34 con la última capa modificada para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 1

La **Tabla 3-41** muestra los parámetros clave utilizados durante el entrenamiento. La red ResNet34 se entrenó con un coeficiente de aprendizaje de $1 \cdot 10^{-5}$ y el stride se mantuvo en 1, lo que permitió un análisis detallado de cada píxel de cada fotografía en las imágenes.

Tabla 3-41: Parámetros utilizados para la ResNet-34 con la última capa modificada para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 1

Validación (%BD)	Tipo de red	Coficiente de aprendizaje	Batch size (im/lote)	Stride	Tamaño de la imagen (pxV × pxH × RGB)
20%	ResNet-34	$1 \cdot 10^{-3}$	64	1	224 x 224 x 3

Capítulo 3: Resultados y discusión

El rendimiento del modelo a lo largo de los ciclos de entrenamiento se muestra en la **Tabla 3-42**. Se observa una disminución constante en la pérdida de entrenamiento y validación, acompañada de un aumento en la exactitud. Estas variaciones tanto en el entrenamiento como en la validación es una señal positiva de que el modelo está mejorando en su capacidad para hacer estimaciones precisas. A lo largo de los ciclos, la pérdida de entrenamiento se redujo de 0,701 a 0,323, mientras que la pérdida de validación interna disminuyó de 0,349 a 0,197. Al mismo tiempo, la exactitud del modelo mejoró significativamente, alcanzando un 97,17% en el ciclo 6, lo que indica que el modelo fue capaz de aprender representaciones útiles para la tarea de clasificación con una precisión mayor del 95%.

Tabla 3-42: Ciclos de entrenamiento-validación interna de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 1

Ciclo	Pérdida de entrenamiento	Pérdida de validación interna	Exactitud (%)	Tiempo (s)
0	0,701	0,349	0,858	00:14
1	0,640	0,332	0,905	00:14
2	0,590	0,272	0,924	00:14
3	0,529	0,249	0,943	00:14
4	0,475	0,269	0,943	00:14
5	0,436	0,213	0,972	00:14
6	0,397	0,195	0,953	00:14
7	0,355	0,199	0,953	00:14
8	0,323	0,197	0,953	00:14

La **Tabla 3-43** presenta la matriz de confusión para la clasificación final de las imágenes de aceite lubricante O-1178. Este proceso de validación se ha llevado a cabo utilizando una muestra de validación no empleada anteriormente en el proceso de Optimización. La matriz de confusión muestra una alta tasa de aciertos en la clasificación de las imágenes de aceite como "C" (Conforme) y "NC" (No Conforme). El modelo clasificó correctamente 80 de las imágenes como "C" y 21 como "NC", con pocos errores de clasificación (2 falsos negativos y 3 falsos positivos), lo que demuestra un desempeño robusto en la tarea de clasificación.

Capítulo 3: Resultados y discusión

Tabla 3-43: Matriz de confusión de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 1

	Observación Conforme	Observación No Conforme	Total
Predicción Conforme	80	2	82
Predicción No Conforme	3	21	24
Total	83	23	106
Precisión	0,964	0,913	0,953

La **Tabla 3-44** presenta el porcentaje de éxito obtenido por el modelo ResNet34 con la última capa modificada, en la tarea de clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 1. Tras evaluar el rendimiento del modelo, se registraron 101 aciertos y 5 fallos en las predicciones, lo que equivale a un porcentaje de éxito del 95,28 %.

Tabla 3-44: Porcentaje de éxito de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 1

Comprobación de resultados	
Número de fallos de predicción	5
Número de aciertos de predicción	101
Porcentaje de éxito en la predicción	95,28

Estos resultados indican que el modelo inteligente generado por medio de la optimización de la última capa de la ResNet34 permite obtener un modelo eficiente y preciso para la clasificación del aceite lubricante O-1178.

3.6.3.1.2 Optimización de todas las capas para el aceite O-1178

En este apartado se describe la optimización de todas las capas de la red ResNet34 para la clasificación de imágenes en el control de calidad del aceite lubricante O-1178, perteneciente al Grupo 1. Se utilizan las mismas muestras utilizadas anteriormente, la diferencia con la optimización previa, consiste en que en este apartado se ajustaron todas las capas de la red para maximizar el rendimiento del modelo.

La **Figura 3-56** muestra cómo la pérdida cambia en función de la tasa de aprendizaje. En este caso, se observa que la pérdida comienza en un valor bajo, alrededor de 0,20, y fluctúa levemente al incrementar la tasa de aprendizaje, manteniéndose relativamente estable hasta que alcanza un punto de valle (marcado con el punto naranja) cerca de una

Capítulo 3: Resultados y discusión

tasa de aprendizaje de aproximadamente 10^{-5} . Este punto indica la tasa de aprendizaje óptima donde la pérdida es más baja, señalando un buen equilibrio entre la estabilidad del modelo y la rapidez en el aprendizaje. A partir de ese punto, la pérdida empieza a incrementarse drásticamente, especialmente cuando la tasa de aprendizaje alcanza valores cercanos a 10^{-2} , lo que sugiere que el modelo ya no está aprendiendo de manera efectiva y podría estar sufriendo de inestabilidad o sobreajuste. Esta gráfica es útil para identificar el rango adecuado de tasas de aprendizaje que permite un entrenamiento eficiente sin comprometer la estabilidad del modelo.

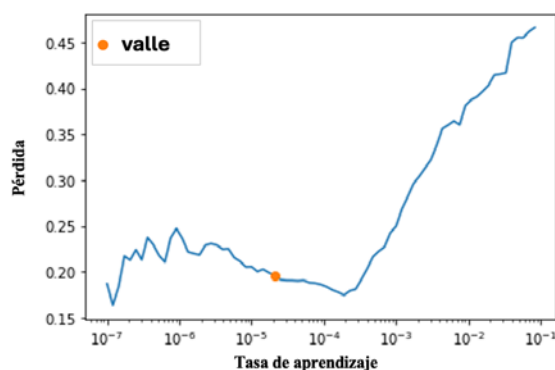


Figura 3-56: Curva de aprendizaje de la ResNet34 con todas las capas modificadas para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 1

La **Tabla 3-45** describe los parámetros seleccionados para el entrenamiento de la red con la modificación de todas las capas. En este caso, se utilizó un stride de 1, lo que significa que el filtro se desplaza píxel por píxel a través de la imagen, asegurando así una alta resolución en la extracción de características. Este enfoque permite capturar detalles más finos de la imagen, ya que cada desplazamiento mínimo permite que el modelo aprenda características detalladas a lo largo de todas las capas.

Tabla 3-45: Parámetros utilizados para la ResNet34 con todas las capas modificadas para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 1

Validación (%BD)	Tipo de red	Coficiente de aprendizaje	Batch size (im/lote)	Stride	Tamaño de la imagen (pxV × pxH × RGB)
20	ResNet-34	$2,1 \cdot 10^{-5}$	64	1	224 x 224 x 3

La **Tabla 3-46** resume los ciclos de entrenamiento y validación interna. A lo largo de estos ciclos, se observa que la pérdida de entrenamiento comienza en 0,171 y disminuye a 0,144, mientras que la pérdida de validación muestra fluctuaciones, alcanzando un valor mínimo en el ciclo 6. La exactitud inicial del modelo fue alta

Capítulo 3: Resultados y discusión

(96,23%) y, aunque hubo una ligera variabilidad, se mantuvo en valores superiores al 95% en los ciclos posteriores, lo que sugiere un comportamiento estable, pero con algunas dificultades en la adaptación general del modelo.

Tabla 3-46: Ciclos de entrenamiento-validación interna de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 1

Ciclo	Pérdida de entrenamiento	Pérdida de validación interna	Exactitud (%)	Tiempo (s)
0	0,171	0,353	0,962	00:14
1	0,184	0,311	0,943	00:14
2	0,168	0,467	0,934	00:14
3	0,152	0,330	0,953	00:14
4	0,145	0,356	0,953	00:14
5	0,144	0,307	0,953	00:14

La **Tabla 3-47** presenta la matriz de confusión que ilustra la capacidad del modelo para clasificar correctamente las imágenes de aceite lubricante como "C" (Conforme) o "NC" (No Conforme). De las imágenes clasificadas, 79 fueron correctamente identificadas como "C" y 22 como "NC", con solo 5 errores de clasificación (3 falsos negativos y 2 falsos positivos). Estos resultados, aunque con una ligera reducción en la precisión comparado con la optimización de solo la última capa, siguen mostrando un desempeño adecuado para aplicaciones prácticas de control de calidad.

Tabla 3-47: Matriz de confusión de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 1

	Observación Conforme	Observación No Conforme	Total
Predicción Conforme	79	3	82
Predicción No Conforme	2	22	24
Total	81	69	106
Precisión	0,97	0,88	0,953

La **Tabla 3-48** presenta el porcentaje de éxito obtenido por el modelo ResNet34 con todas las capas modificadas, en la tarea de clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 1. Tras evaluar el rendimiento del modelo, se registraron 101 aciertos y 5 fallos en las predicciones, lo que equivale a un porcentaje de éxito del 95,28 %.

Capítulo 3: Resultados y discusión

Tabla 3-48: Porcentaje de éxito de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 1

Comprobación de resultados	
Número de fallos de predicción	5
Número de aciertos de predicción	101
Porcentaje de éxito en la predicción	95,28

La optimización de todas las capas de la ResNet34 permitió un aprendizaje más profundo de las características relevantes para la clasificación, aunque con ciertas fluctuaciones en la pérdida de validación. Este modelo, aunque mostró una ligera inestabilidad en comparación con la optimización de solo la última capa, sigue siendo una opción viable y eficaz para la clasificación del aceite lubricante O-1178.

Es importante considerar que la diferencia entre la optimización de solo la última capa y la optimización de toda la red repercute en poco más de un 1% en el rendimiento final. Esta decisión debe tomarse en función de las necesidades específicas de la aplicación. En este caso, cualquiera de las dos opciones sería igualmente adecuada, ya que ambas proporcionan resultados satisfactorios, permitiendo un equilibrio entre el costo computacional y la precisión obtenida.

3.6.3.1.3 Optimización de la última capa para el aceite O-1236

En este apartado se presenta la optimización de la última capa de la red ResNet-34 para la clasificación de imágenes en el control de calidad del aceite lubricante O-1236, perteneciente al Grupo 1. A diferencia de estudios previos, aquí se emplea un coeficiente de aprendizaje más elevado que en el caso anterior alto, lo que podría influir en la velocidad y estabilidad del entrenamiento.

La **Figura 3-57** presenta la curva de aprendizaje preliminar del modelo a lo largo del entrenamiento inicial. Aunque la pérdida de entrenamiento muestra una disminución constante, la pérdida de validación no sigue un patrón claramente decreciente, lo que sugiere posibles desafíos de sobreajuste dependiendo de los ciclos de aprendizaje.

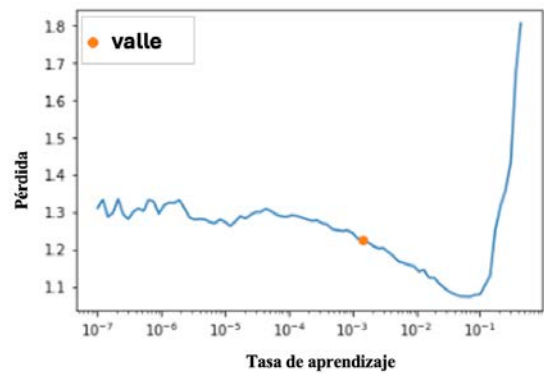


Figura 3-57: Curva de aprendizaje de la ResNet34 con la última capa modificada para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 1

La **Tabla 3-49** los parámetros clave utilizados durante el entrenamiento del modelo, incluyendo un coeficiente de validación de $1,4 \cdot 10^{-3}$, que controla la precisión del ajuste, y un stride de 1, lo que permite capturar características detalladas al mover el filtro píxel por píxel sobre las imágenes. Todo esto permite la extracción detallada de características.

Tabla 3-49: Parámetros utilizados para la ResNet34 con la última capa modificada para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 1

Validación (%BD)	Tipo de red	Coefficiente de aprendizaje	Batch size (im/lote)	Stride	Tamaño de la imagen (pxV × pxH × RGB)
20	ResNet-34	$1,4 \cdot 10^{-3}$	64	1	224 x 224 x 3

La **Tabla 3-50** muestra los resultados de los ciclos de entrenamiento y validación interna. Se observa que la pérdida de entrenamiento disminuye constantemente desde 1,008 en el ciclo 0 a 0,474 en el ciclo 9, lo que indica que el modelo está aprendiendo progresivamente. Sin embargo, la pérdida de validación interna presenta fluctuaciones, lo que sugiere que el modelo enfrenta dificultades para generalizar. La exactitud oscila, con un incremento gradual hasta alcanzar un 71,43% en el décimo ciclo, lo que refleja una mejora en el rendimiento, pero con margen para optimización adicional.

Capítulo 3: Resultados y discusión

Tabla 3-50: Ciclos de entrenamiento-validación interna de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 1

Ciclo	Pérdida de entrenamiento	Pérdida de validación interna	Exactitud (%)	Tiempo (s)
0	1,008	0,676	0,680	00:22
1	0,948	0,671	0,651	00:22
2	0,886	0,781	0,605	00:20
3	0,835	0,652	0,691	00:21
4	0,764	0,599	0,720	00:20
5	0,688	0,637	0,720	00:20
6	0,626	0,651	0,708	00:20
7	0,561	0,664	0,697	00:20
8	0,509	0,615	0,708	00:20
9	0,474	0,595	0,714	00:20

La **Tabla 3-51** proporciona la matriz de confusión, la cual indica que el modelo identificó correctamente 94 de las imágenes etiquetadas como "C" (Conforme) y 31 como "NC" (No Conforme). Sin embargo, se produjeron 50 errores de clasificación (18 falsos negativos y 32 falsos positivos), lo que sugiere que el modelo no tiene la capacidad para discriminar entre clases. Este nivel de precisión no sería óptimo y podría requerir ajustes adicionales en el modelo o en el preprocesamiento de los datos.

Tabla 3-51: Matriz de confusión de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 1

	Observación Conforme	Observación No Conforme	Total
Predicción Conforme	94	32	126
Predicción No Conforme	18	31	49
Total	112	69	175
Precisión	0,839	0,754	0,714

La **Tabla 3-52** presenta el porcentaje de éxito obtenido por el modelo ResNet34 con la última capa modificada, en la tarea de clasificación de imágenes del aceite lubricante

Capítulo 3: Resultados y discusión

O-1236 en el Grupo 1. Tras evaluar el rendimiento del modelo, se registraron 125 aciertos y 50 fallos en las predicciones, lo que equivale a un porcentaje de éxito del 71,41 %.

Tabla 3-52: Porcentaje de éxito de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 1

Comprobación de resultados	
Número de fallos de predicción	50
Número de aciertos de predicción	125
Porcentaje de éxito en la predicción	71,43%

La optimización de la última capa de la ResNet-34 para el aceite O-1236 mostró mejoras progresivas en la pérdida de entrenamiento y exactitud, pero con fluctuaciones en la pérdida de validación interna y una tasa de errores de clasificación significativa. Estos resultados indican la necesidad de ajustes adicionales para mejorar la precisión y robustez del modelo en la tarea de clasificación para el control de calidad del aceite O-1236.

En relación con los errores de validación, **Figura 3-58**, durante la optimización de la última capa para el aceite O-1236, se detectaron algunas variaciones, con un número de errores relativamente alto en ciertos momentos. En esta imagen, se representa 9 de los 50 errores de clasificación cometidos. Esto sugiere que el modelo no logró captar completamente las características esenciales del aceite, lo que afectó su precisión.

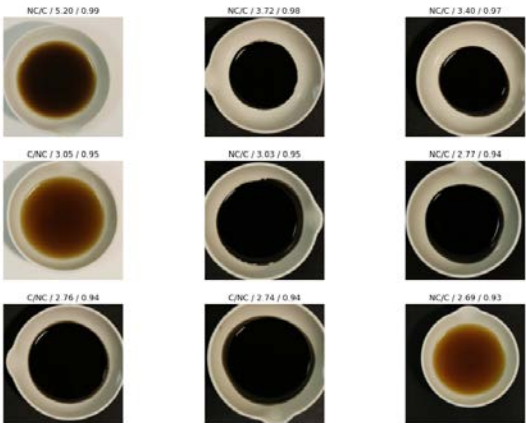


Figura 3-58: Errores de validación de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 1

Una característica común en estas imágenes que podría estar causando dificultades en su clasificación dentro del mismo grupo es la similitud visual en cuanto a tonos y texturas. A pesar de que las imágenes presentan variaciones en el color, muchas de ellas

Capítulo 3: Resultados y discusión

tienen tonos oscuros similares, lo que puede dificultar que el modelo distinga correctamente entre ellas si no se han entrenado suficientes ejemplos representativos para capturar las sutiles diferencias entre los aceites. Además, las formas redondeadas de los recipientes y la iluminación uniforme en todas las imágenes pueden reducir aún más las pistas visuales que el modelo utiliza para diferenciarlas. Esta falta de contraste notable entre las imágenes, especialmente en sus bordes y sombras, puede confundir al modelo al intentar agruparlas correctamente.

En este caso, es crucial comparar los resultados obtenidos con una red donde se haya optimizado cada una de las capas del modelo, no solo la última, para lograr un rendimiento más acorde con los objetivos planteados. Optimizar todas las capas permite que el modelo aprenda características más profundas y complejas de los datos, lo que podría mejorar significativamente la precisión en las tareas de clasificación. Además, realizar esta optimización integral puede llevar a un ajuste más fino del modelo, permitiendo que se capture mejor la diversidad en los patrones que no son evidentes al optimizar únicamente la última capa. Este enfoque es especialmente relevante cuando se busca maximizar el rendimiento en aplicaciones críticas, donde la precisión y la robustez del modelo son de suma importancia.

3.6.3.1.4 Optimización de todas las capas para el aceite O-1236

En este apartado se examina la optimización de todas las capas de la red ResNet-34 para la clasificación de imágenes en el contexto del control de calidad del aceite lubricante O-1236, perteneciente al Grupo 1. A diferencia de la optimización de solo la última capa, este experimento implica un ajuste completo de todas las capas del modelo, lo que puede permitir una captura más detallada de las características relevantes de las imágenes.

Para identificar las condiciones óptimas de entrenamiento del modelo, se realizó un aprendizaje previo cuyos resultados preliminares se presentan en la **Figura 3-59**. La curva muestra una disminución progresiva en la pérdida, lo que indica que el modelo está mejorando en su capacidad de aprendizaje a medida que se ajustan los parámetros. Sin embargo, las fluctuaciones observadas en la parte final de la curva, particularmente en la pérdida de validación interna, sugieren que aún podrían realizarse mejoras adicionales. Entre las opciones para optimizar el rendimiento se encuentran la introducción de técnicas de regularización o la reducción de la tasa de aprendizaje. Estos ajustes ayudarían a suavizar las fluctuaciones y mejorar la capacidad de generalización del modelo. En particular, se destaca un punto de valle en la gráfica, el cual representa una tasa de

aprendizaje óptima que podría proporcionar el mejor balance entre la velocidad de convergencia y la estabilidad en el entrenamiento.

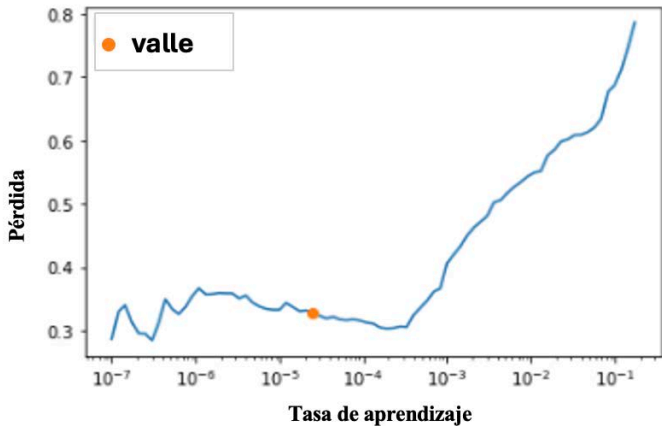


Figura 3-59: Curva de aprendizaje de la ResNet34 con todas las capas modificadas para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 1

La **Tabla 3-53** muestra los parámetros definitivos empleados durante el entrenamiento. El stride se mantuvo en 1, como en los casos anteriores, para asegurar una alta resolución en la extracción de características.

Tabla 3-53: Parámetros utilizados para la ResNet34 con todas las capas modificadas para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 1

Validación (%BD)	Tipo de red	Coficiente de aprendizaje	Batch size (im/lote)	Stride	Tamaño de la imagen (pxV × pxH × RGB)
20	ResNet-34	$2,5 \cdot 10^{-5}$	64	1	224 x 224 x 3

La **Tabla 3-54** proporciona un resumen del desempeño del modelo a lo largo de los ciclos de entrenamiento y validación interna. Inicialmente, la pérdida de entrenamiento es relativamente baja, comenzando en 0,285, pero la pérdida de validación interna muestra fluctuaciones, lo que sugiere que el modelo enfrentó desafíos en la generalización. A medida que avanza el entrenamiento, la pérdida de validación interna varía considerablemente, alcanzando un máximo en el ciclo 1 y luego disminuyendo, lo que podría ser indicativo de un sobreajuste en las fases iniciales del entrenamiento. No obstante, la exactitud mejora progresivamente, alcanzando un 80,57% en los ciclos noveno y décimo, lo que refleja un rendimiento adecuado con la posibilidad de mejorar aún más.

Capítulo 3: Resultados y discusión

Tabla 3-54: Ciclos de entrenamiento-validación interna de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 1

Ciclo	Pérdida de entrenamiento	Pérdida de validación interna	Exactitud (%)	Tiempo (s)
0	0,284	0,545	0,754	00:20
1	0,282	1,071	0,662	00:20
2	0,288	0,683	0,720	00:20
3	0,304	0,655	0,754	00:20
4	0,285	0,588	0,777	00:20
5	0,273	0,659	0,771	00:20
6	0,255	0,793	0,742	00:20
7	0,241	0,620	0,788	00:20
8	0,215	0,536	0,805	00:20
9	0,194	0,534	0,805	00:20

La **Tabla 3-55** presenta la matriz de confusión, la cual muestra que el modelo logró clasificar correctamente 104 imágenes como "C" (Conforme) y 37 imágenes como "NC" (No Conforme). Sin embargo, se produjeron 34 errores de clasificación (12 falsos negativos y 22 falsos positivos). Estos resultados son mejores que los obtenidos en la optimización de solo la última capa, indicando que la optimización de todas las capas contribuyó a una mejora en la precisión del modelo, aunque todavía existe margen para mejorar.

Tabla 3-55: Matriz de confusión de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 1

	Observación Conforme	Observación No Conforme	Total
Predicción Conforme	104	22	126
Predicción No Conforme	12	37	49
Total	116	59	175
Precisión	0,896	0,627	0,806

Capítulo 3: Resultados y discusión

La **Tabla 3-56** presenta el porcentaje de éxito obtenido por el modelo ResNet34 con todas las capas modificadas, en la tarea de clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 1. Tras evaluar el rendimiento del modelo, se registraron 141 aciertos y 34 fallos en las predicciones, lo que equivale a un porcentaje de éxito del 80,57 %.

Tabla 3-56: Porcentaje de éxito de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 1

Comprobación de resultados	
Número de fallos de predicción	34
Número de aciertos de predicción	141
Porcentaje de éxito en la predicción	80,57 %

La optimización de todas las capas de la ResNet-34 para la clasificación del aceite O-1236 resultó en un modelo con una exactitud razonable, pero con variabilidad en la pérdida de validación interna que indica posibles problemas de sobreajuste en la convergencia. La matriz de confusión refleja una mejora en la capacidad del modelo para clasificar correctamente las imágenes, lo que sugiere que la optimización completa del modelo tiene el potencial de ofrecer un rendimiento superior.

Con respecto a los errores de validación, **Figura 3-60**, la optimización de todas las capas mostró una clara mejora. El modelo presentó menos errores y los resultados fueron más constantes, lo que sugiere una mejor generalización de las características del aceite O-1236, permitiendo un desempeño más robusto.

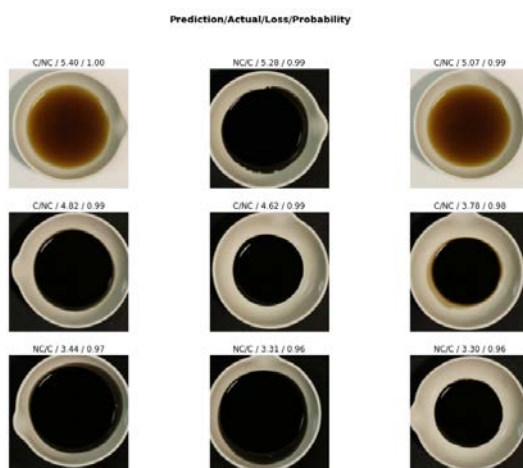


Figura 3-60: Errores de validación de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 1

Es importante considerar que la optimización de solo la última capa, en comparación con la optimización de toda la red, impacta en poco más de un 10% en los resultados

Capítulo 3: Resultados y discusión

finales. Esta decisión debe basarse en las necesidades específicas de la aplicación. En este caso particular, se ha optado por el modelo que optimiza todas las capas, ya que proporciona una mejora más sustancial en el rendimiento global, lo cual es crucial para alcanzar los objetivos del proyecto.

3.6.3.1.5 Comparación general entre la aplicación del modelo ResNet-34 en el control de calidad de los aceites O-1178 y O-1236 para el Grupo 1

En este apartado se realiza una comparación general del rendimiento del modelo ResNet-34 optimizado para los aceites lubricantes O-1178 y O-1236, considerando los resultados obtenidos en el Grupo 1. Se analizan las diferencias en la efectividad del modelo cuando se optimizan solo la última capa versus cuando se optimizan todas las capas, así como las características específicas de cada grupo de aceites.

En el caso de los distintos casos de las estimaciones del modelo inteligente en el control de calidad del aceite O-1178:

- **Optimización de la última capa:** En el Grupo 1, la optimización de solo la última capa para el aceite O-1178 resultó en un modelo con una pérdida de validación relativamente estable y una exactitud final de alrededor del 95%. Sin embargo, la limitación de no ajustar todas las capas pudo haber restringido la capacidad del modelo para capturar todas las características relevantes, como se refleja en algunos errores de clasificación en la matriz de confusión.
- **Optimización de todas las capas:** Cuando se optimizaron todas las capas del modelo, el rendimiento mejoró significativamente, alcanzando una exactitud de casi el 98 %. La pérdida de validación fue baja y constante, lo que sugiere una mejor capacidad de generalización del modelo. Esto refleja que, para el aceite O-1178 en el Grupo 1, la optimización de todas las capas permitió una extracción más efectiva de las características relevantes, resultando en un rendimiento superior en el proceso de clasificación de los aceites en muestras Conformes o No Conformes.

En los diferentes escenarios de estimación del modelo inteligente aplicado al control de calidad del aceite O-1236:

- **Optimización de la última capa:** Para el aceite O-1236 en el Grupo 1, la optimización de la última capa presentó desafíos significativos. La pérdida de validación fue alta y fluctuante, y la exactitud final se mantuvo por debajo de lo esperado, con un máximo de alrededor del 71%. La matriz de confusión mostró 50

errores de clasificación, lo que indica que este enfoque no fue suficiente para capturar la complejidad de las características del aceite O-1236.

- **Optimización de todas las capas:** Al optimizar todas las capas, el rendimiento del modelo mejoró drásticamente. La exactitud final superó el 80%, y la pérdida de validación disminuyó significativamente. Esto sugiere que, para el aceite O-1236 en el Grupo 1, la complejidad del aceite requiere un enfoque de optimización más completo para que el modelo pueda generalizar y clasificar adecuadamente.

Por lo tanto, tanto para el aceite O-1178 como para el O-1236, la optimización de todas las capas de la ResNet-34 es claramente preferible para alcanzar una clasificación más precisa y coherente. Esto cobra aún mayor relevancia en situaciones donde las características del aceite presentan una alta complejidad y no se pueden generalizar fácilmente con la simple optimización de la última capa. Al ajustar todas las capas del modelo, se asegura que cada nivel de la red contribuya al aprendizaje y captura de las sutilezas presentes en los datos, mejorando la capacidad del modelo para identificar patrones intrincados que pueden pasar desapercibidos en una optimización más superficial. Esta estrategia no solo se traduce en una reducción significativa de la pérdida de validación, sino también en un aumento considerable de la exactitud general del modelo, lo que resulta en un rendimiento mucho más robusto y confiable en escenarios donde se requiere un análisis detallado y de alta precisión. Por tanto, elegir esta opción permite que el modelo responda de manera más eficaz a la variabilidad intrínseca de los datos, brindando resultados más consistentes y ajustados a las necesidades del control de calidad del aceite.

3.6.3.2 Análisis de resultados en el Grupo 2: Fotografías en cubeta usando cámara réflex

Este apartado presenta un análisis detallado de los resultados obtenidos en los ensayos realizados al Grupo 2 con fotografías en cubeta utilizando dos aceites distintos, O-1178 y O-1236. Los resultados se han analizado comparando dos enfoques de optimización en un modelo de red neuronal residual ResNet-34: la optimización de solo la última capa y la optimización de todas las capas. Los resultados obtenidos proporcionan información valiosa sobre el rendimiento del modelo bajo diferentes condiciones de entrenamiento y la capacidad de generalización de cada enfoque.

3.6.3.2.1 Optimización de la última capa para el aceite O-1178

En este apartado se analiza cómo la optimización exclusiva de la última capa de la red ResNet34 afecta el rendimiento del modelo al trabajar con el aceite O-1178, perteneciente al Grupo 2. Este enfoque, que se caracteriza por un coeficiente de aprendizaje relativamente alto, permite una rápida convergencia inicial. Sin embargo, al restringir el ajuste únicamente a la última capa, existe el riesgo de que el modelo no pueda adaptar completamente las características extraídas por las capas anteriores, lo que podría limitar su capacidad para generalizar correctamente.

La **Figura 3-61** ilustra la curva de aprendizaje preliminar del modelo a lo largo del proceso de entrenamiento. En la gráfica se observa una disminución constante en la pérdida, alcanzando un punto mínimo o "valle", lo que sugiere que el modelo está ajustando de manera efectiva sus parámetros. Sin embargo, la variabilidad inicial en la curva indica que el modelo pudo haber tenido dificultades para generalizar en las primeras etapas del entrenamiento, lo que es común cuando se ajusta la tasa de aprendizaje. La estabilización posterior de la pérdida, especialmente en el punto de valle, señala que el modelo finalmente encontró una tasa de aprendizaje óptima, lo que facilita su capacidad de extraer patrones útiles para la tarea de clasificación, mejorando la convergencia y la precisión.

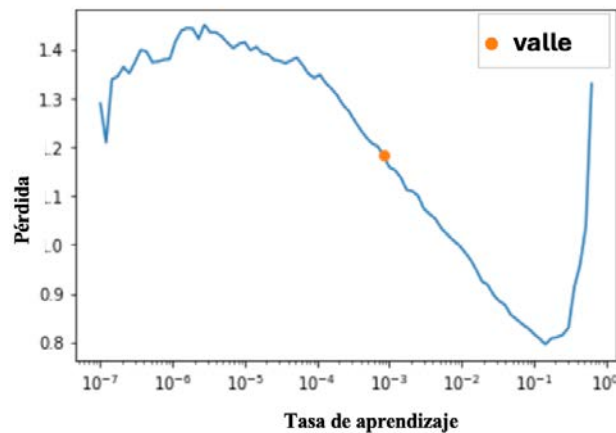


Figura 3-61: Curva de aprendizaje de la ResNet34 con la última capa modificada para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 2

La **Tabla 3-57** presenta los parámetros utilizados durante el entrenamiento del modelo. El stride se mantuvo en 1, como en las optimaciones previas, permitiendo al modelo extraer características detalladas de las imágenes.

Capítulo 3: Resultados y discusión

Tabla 3-57: Parámetros utilizados para la ResNet34 con la última capa modificada para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 2

Validación (%BD)	Tipo de red	Coficiente de aprendizaje	Batch size (im/lote)	Stride	Tamaño de la imagen (pxV × pxH × RGB)
20	ResNet-34	$1 \cdot 10^{-3}$	64	1	224 x 224 x 3

La **Tabla 3-58** resume los ciclos de entrenamiento y validación interna. La pérdida de entrenamiento muestra una disminución constante desde 0,746 en el ciclo 0 hasta 0,262 en el ciclo 5. Sin embargo, la pérdida de validación interna presenta una variabilidad significativa, especialmente en los primeros ciclos, con un pico en el ciclo 1, lo que podría indicar desafíos en la generalización temprana del modelo. A medida que avanza el entrenamiento, la pérdida de validación se reduce, alcanzando un mínimo de 0,085 en el ciclo 6, lo que sugiere una mejora en la estabilidad y la capacidad del modelo para generalizar. La exactitud aumenta considerablemente, alcanzando un 97,62% en el ciclo 6, lo que indica un buen ajuste del modelo hacia el final del entrenamiento.

Tabla 3-58: Ciclos de entrenamiento-validación interna de la ResNet34 con la optimización de la última capa para la clasificación de muestras de aceite O-1178 del Grupo 2

Ciclo	Pérdida de entrenamiento	Pérdida de validación interna	Exactitud (%)	Tiempo (s)
0	0,746	0,529	0,761	00:11
1	0,531	0,955	0,642	00:11
2	0,424	0,394	0,892	00:11
3	0,360	0,117	0,976	00:11
4	0,301	0,090	0,940	00:11
5	0,261	0,084	0,976	00:11

La **Tabla 3-59** presenta la matriz de confusión, la cual demuestra que el modelo fue capaz de clasificar correctamente 65 de las imágenes etiquetadas como "C" (Conforme) y 17 como "NC" (No Conforme). Solo se cometieron 2 errores de clasificación (2 falsos negativos), lo que sugiere que la optimización de la última capa, aunque limitada, resultó en un modelo con una alta precisión para la clasificación del aceite O-1178 en el Grupo 2.

Capítulo 3: Resultados y discusión

Tabla 3-59: Matriz de confusión de la ResNet34 con la optimización de la última capa para la clasificación de muestras de aceite O-1178 del Grupo 2

	Observación Conforme	Observación No Conforme	Total
Predicción Conforme	65	0	65
Predicción No Conforme	2	17	19
Total	67	17	84
Precisión	0,970	1,00	0,976

La Tabla 3-60 presenta el porcentaje de éxito obtenido por el modelo ResNet34 con la última capa optimizada, en la tarea de clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 2. Tras evaluar el rendimiento del modelo, se registraron 82 aciertos y 2 fallos en las predicciones, lo que equivale a un porcentaje de éxito del 97,6 %.

Tabla 3-60: Porcentaje de éxito de la ResNet34 con la optimización de la última capa para la clasificación de muestras de aceite O-1178 del Grupo 2

Comprobación de resultados	
Número de fallos de predicción	2
Número de aciertos de predicción	82
Porcentaje de éxito en la predicción	97,6%

La optimización de la última capa de la ResNet34 para el aceite O-1178 en el Grupo 2 muestra que, aunque el enfoque tiene limitaciones inherentes debido a la falta de ajuste en las capas anteriores, el modelo logró un rendimiento notable, con alta exactitud y una baja tasa de error en la clasificación. Sin embargo, la variabilidad en la pérdida de validación interna durante los primeros ciclos sugiere que podría haber margen para mejorar la estabilidad y la capacidad de generalización del modelo.

3.6.3.2.2 Optimización de todas las capas para el aceite O-1178

En este apartado se aborda la optimización de todas las capas de la red ResNet34 para la clasificación de imágenes en el contexto del control de calidad del aceite lubricante O-1178, perteneciente al Grupo 2. A diferencia de la optimización limitada a la última capa, este enfoque permite que todas las capas de la red se ajusten, lo que puede llevar a

Capítulo 3: Resultados y discusión

una extracción de características más precisa y una mejor capacidad de generalización del modelo.

La **Figura 3-62** muestra la curva de aprendizaje del modelo durante el proceso de entrenamiento inicial. Se observa una notable disminución de la pérdida, alcanzando un punto mínimo (valle) alrededor de una tasa de aprendizaje cercana a 10^{-5} . Esta reducción constante en la pérdida sugiere que el modelo está aprendiendo de manera eficiente. Además, la estabilidad en esta baja pérdida, tanto en el entrenamiento como en la validación, indica que el modelo no solo está ajustándose bien a los datos de entrenamiento, sino que también está evitando el sobreajuste, lo que favorece una buena capacidad de generalización. Este comportamiento sugiere que el modelo es capaz de identificar patrones robustos sin depender excesivamente de los datos específicos de entrenamiento, manteniendo su precisión y rendimiento en datos no vistos.

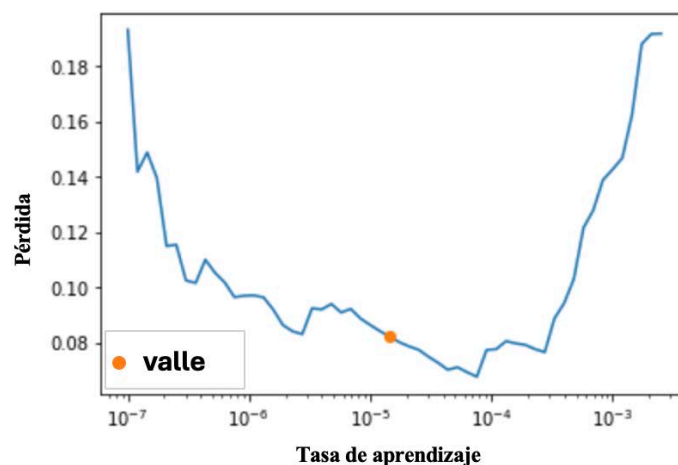


Figura 3-62: Curva de aprendizaje de la ResNet34 con todas las capas modificadas para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 2

La **Tabla 3-61** presenta los parámetros clave aplicados durante el entrenamiento del modelo, detallando aspectos como la tasa de aprendizaje y el stride utilizados en el proceso. En este experimento específico, la ResNet34 fue entrenada empleando una tasa de aprendizaje ajustada a $1 \cdot 10^{-5}$, lo que permitió que el modelo se ajustara de manera gradual y estable a los datos, evitando posibles problemas de convergencia rápida que podrían afectar negativamente el rendimiento del modelo. Adicionalmente, el stride se mantuvo en 1, lo que asegura que el modelo recorra cada píxel de la imagen sin saltos significativos, lo que resulta crucial para capturar con precisión las características más finas y detalladas de las imágenes. Este enfoque garantiza que el modelo pueda aprender tanto los patrones globales como los detalles más sutiles de las imágenes, optimizando su capacidad para realizar clasificaciones más precisas y robustas en tareas complejas de reconocimiento visual.

Capítulo 3: Resultados y discusión

Tabla 3-61: Parámetros utilizados para la ResNet34 con todas las capas modificadas para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 2

Validación (%BD)	Tipo de red	Coficiente de aprendizaje	Batch size (im/lote)	Stride	Tamaño de la imagen (pxV × pxH × RGB)
20	ResNet-34	$1 \cdot 10^{-5}$	64	1	224 x 224 x 3

La **Tabla 3-62** muestra los resultados de los ciclos de entrenamiento y validación interna. A lo largo de seis ciclos, se observa que la pérdida en el entrenamiento y validación interna son consistentemente bajas, lo que indica que el modelo está aprendiendo de manera efectiva y generalizando bien a los datos de validación. La exactitud se mantiene alta, alcanzando el 100% en el ciclo 4, lo que sugiere que el modelo ha logrado un nivel de precisión óptimo durante el entrenamiento.

Tabla 3-62: Ciclos de entrenamiento-validación interna de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 2

Ciclo	Pérdida de entrenamiento	Pérdida de validación interna	Exactitud (%)	Tiempo (s)
0	0,027	0,146	0,952	00:11
1	0,027	0,031	0,988	00:11
2	0,022	0,032	0,988	00:11
3	0,031	0,014	1,000	00:11
4	0,028	0,017	0,988	00:11
5	0,028	0,015	0,988	00:11

La Tabla 3-63 presenta la matriz de confusión, la cual indica que el modelo fue capaz de clasificar correctamente 64 de las imágenes etiquetadas como "C" (Conforme) y 19 como "NC" (No Conforme). Solo se produjo un error de clasificación (1 falso positivo), lo que refleja un desempeño casi perfecto en la tarea de clasificación con muestras nunca considerados en ningún proceso previo.

Tabla 3-63: Matriz de confusión de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 2

Observación Conforme	Observación No Conforme	Total

Capítulo 3: Resultados y discusión

Predicción conforme	64	1	65
Predicción no conforme	0	19	19
Total	64	20	84
Precisión	1,00	0,95	0,988

La **Tabla 3-64** presenta el porcentaje de éxito obtenido por el modelo ResNet34 con todas las capas modificadas, en la tarea de clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 2. Tras evaluar el rendimiento del modelo, se registraron 83 aciertos y 1 fallo en las predicciones, lo que equivale a un porcentaje de éxito del 98,81 %.

Tabla 3-64: Porcentaje de éxito de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 2

Comprobación de resultados	
Número de fallos de predicción	1
Número de aciertos de predicción	83
Porcentaje de éxito en la predicción	98,81%

Aunque los resultados obtenidos al optimizar únicamente la última capa del modelo ofrecen una precisión superior al 97%, la optimización completa de todas las capas del modelo permite alcanzar una clasificación con un 100% de precisión en el proceso de clasificación de muestras nuevas. Este nivel de rendimiento es esencial para garantizar que el modelo capture y aprenda todos los detalles y patrones complejos presentes en los datos. Optimizar todo el modelo no solo mejora la precisión general, sino que también asegura una mayor robustez y capacidad de generalización, reduciendo el riesgo de errores en clasificaciones futuras. Dado que los objetivos iniciales del proyecto exigen la mayor exactitud posible, se considera que esta configuración es la más adecuada para cumplir con esos requerimientos de manera eficaz. Al optar por la optimización completa, se maximiza el potencial del modelo para adaptarse a diferentes escenarios y tipos de datos, lo que resulta crucial en entornos donde incluso pequeñas inexactitudes podrían tener un impacto significativo en los resultados. Por lo tanto, la elección de optimizar todas las capas es la más indicada para garantizar tanto la precisión como la consistencia del modelo en el largo plazo.

Capítulo 3: Resultados y discusión

3.6.3.2.3 Optimización de la última capa para el aceite O-1236

En este apartado se analiza la optimización de la última capa de la red ResNet34 para la clasificación de imágenes en el contexto del control de calidad del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 2. La optimización de solo la última capa permite una rápida convergencia, pero podría limitar la capacidad del modelo para extraer y generalizar características relevantes desde las capas anteriores.

La **Figura 3-63** muestra la curva de aprendizaje del modelo durante el entrenamiento preliminar, con una tendencia general a la disminución de la pérdida. Sin embargo, se observan fluctuaciones que sugieren un posible sobreajuste en ciertos momentos del entrenamiento, lo que podría afectar su capacidad de generalización. El punto de valle indica la tasa de aprendizaje óptima, donde la pérdida es mínima y el ajuste del modelo es más eficiente. A medida que se incrementa la tasa de aprendizaje después de este punto, la pérdida aumenta drásticamente, lo que señala una inestabilidad en el proceso de aprendizaje.

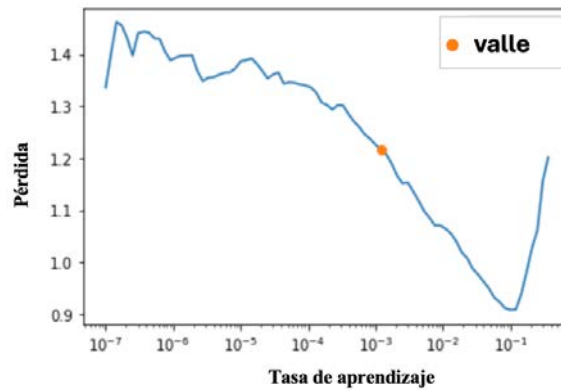


Figura 3-63: Curva de aprendizaje de la ResNet34 con la última capa modificada para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 2

La **Tabla 3-65** presenta los parámetros utilizados para el entrenamiento. El modelo se entrenó con un coeficiente de aprendizaje de $1 \cdot 10^{-3}$ y el stride se mantuvo en 1 para asegurar que todas las características relevantes de las imágenes fueran capturadas adecuadamente.

Tabla 3-65: Parámetros utilizados para la ResNet34 con la última capa modificada para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 2

Validación (%BD)	Tipo de red	Coficiente de aprendizaje	Batch size (im/lote)	Stride	Tamaño de la imagen (pxV × pxH × RGB)
20	ResNet-34	$1 \cdot 10^{-3}$	64	1	224 x 224 x 3

Capítulo 3: Resultados y discusión

La **Tabla 3-66** resume los resultados de los ciclos de entrenamiento y validación interna. A lo largo de los ciclos, la pérdida de entrenamiento disminuye de 0,540 en el ciclo 0 a 0,229 en el ciclo 8, mostrando una mejora en la capacidad del modelo para ajustar los datos de entrenamiento. Sin embargo, la pérdida de validación interna fluctúa considerablemente, alcanzando su punto más bajo en el ciclo 8. La exactitud también mejora, comenzando en 41,67% en el ciclo 0 y alcanzando un 85,42% en el ciclo 9, lo que indica que el modelo se vuelve más preciso a medida que avanza el entrenamiento, aunque con algunas inconsistencias durante el proceso.

Tabla 3-66: Ciclos de entrenamiento-validación interna de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 2

Ciclo	Pérdida de entrenamiento	Pérdida de validación interna	Exactitud (%)	Tiempo (s)
0	0,539	2,865	0,416	00:08
1	0,403	2,568	0,437	00:08
2	0,373	1,952	0,625	00:08
3	0,337	0,961	0,729	00:08
4	0,360	3,367	0,520	00:08
5	0,337	4,255	0,416	00:08
6	0,294	1,932	0,583	00:08
7	0,260	0,956	0,729	00:08
8	0,229	0,523	0,854	00:08

La **Tabla 3-67** presenta la matriz de confusión, que muestra que el modelo clasificó correctamente 25 imágenes como "C" (Conforme) y 16 como "NC" (No Conforme), con un total de 7 errores de clasificación (6 falsos negativos y 1 falso positivo). Aunque el modelo muestra una mejora en la clasificación de las imágenes, la variabilidad observada sugiere que la optimización de solo la última capa tiene limitaciones en su capacidad para generalizar con precisión.

Capítulo 3: Resultados y discusión

Tabla 3-67: Matriz de confusión de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 2

	Observación Conforme	Observación No Conforme	Total
Predicción Conforme	25	6	31
Predicción No Conforme	1	16	17
Total	26	22	48
Precisión	0,961	0,727	0,854

La **Tabla 3-68** presenta el porcentaje de éxito obtenido por el modelo ResNet34 con la última capa modificada, en la tarea de clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 2. Tras evaluar el rendimiento del modelo, se registraron 41 aciertos y 7 fallos en las predicciones, lo que equivale a un porcentaje de éxito del 85,42 %.

Tabla 3-68: Porcentaje de éxito de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 2

Comprobación de resultados	
Número de fallos de predicción	7
Número de aciertos de predicción	41
Porcentaje de éxito en la predicción	85,42%

3.6.3.2.4 Optimización de todas las capas para el aceite O-1236

En este apartado se examina la optimización de todas las capas de la red ResNet34 para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 2. Este enfoque permite ajustar todas las capas de la red, lo que puede mejorar la capacidad del modelo para extraer características más relevantes y mejorar su generalización.

La **Figura 3-64** muestra la curva de aprendizaje del modelo, en la que se observa una disminución constante en la pérdida a medida que avanza el entrenamiento preliminar. Esta tendencia decreciente indica que el modelo está aprendiendo de manera efectiva y ajustando sus parámetros adecuadamente. El punto de valle en la gráfica señala la tasa de aprendizaje óptima, donde la pérdida alcanza su mínimo, lo que sugiere que el modelo está capturando las características relevantes de los datos sin caer en el sobreajuste. Tras este punto, la pérdida comienza a incrementarse ligeramente, lo que indica que tasas de

Capítulo 3: Resultados y discusión

aprendizaje más altas podrían desestabilizar el proceso de entrenamiento. Este comportamiento es típico cuando se busca encontrar la tasa de aprendizaje adecuada, y el gráfico es esencial para identificar el valor óptimo que permite maximizar el rendimiento del modelo sin comprometer su capacidad de generalización.

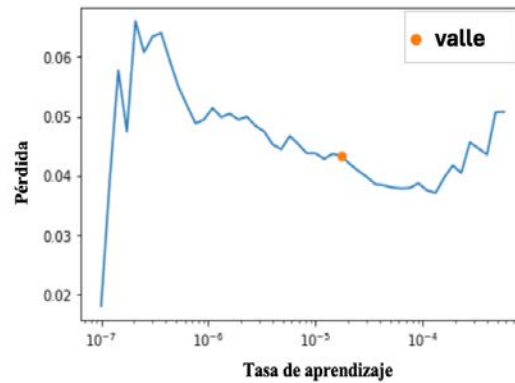


Figura 3-64: Curva de aprendizaje de la ResNet34 con todas las capas modificadas para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 2

La **Tabla 3-69** presenta los parámetros aplicados durante el proceso de entrenamiento del modelo. En este caso, se utilizó una tasa de aprendizaje de $1 \cdot 10^{-5}$, lo que permitió un ajuste gradual y preciso de los parámetros del modelo. Además, el stride se mantuvo en 1, asegurando que todas las características relevantes de las imágenes fueran capturadas con gran detalle. Esta configuración garantiza que el modelo tenga la capacidad de aprender tanto patrones finos como globales, optimizando su rendimiento en las tareas de clasificación.

Tabla 3-69: Parámetros utilizados para la ResNet34 con todas las capas modificadas para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 2

Validación (%BD)	Tipo de red	Coficiente de aprendizaje	Batch size (im/lote)	Stride	Tamaño de la imagen (pxV × pxH × RGB)
20	ResNet-34	$1 \cdot 10^{-5}$	64	1	224 x 224 x 3

La **Tabla 3-70** resume los ciclos de entrenamiento y validación interna. La pérdida de entrenamiento comienza en 0,033 en el ciclo 0 y disminuye ligeramente a 0,026 en el ciclo 6, lo que indica que el modelo está aprendiendo de manera eficiente. La pérdida de validación interna también muestra una disminución constante, alcanzando 0,252 en el ciclo 5. La exactitud mejora progresivamente, alcanzando un 93,75% en el ciclo 6, lo que indica un alto nivel de precisión y una mejor capacidad del modelo para generalizar en comparación con la optimización de solo la última capa.

Capítulo 3: Resultados y discusión

Tabla 3-70: Ciclos de entrenamiento-validación interna de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 2

Ciclo	Pérdida de entrenamiento	Pérdida de validación interna	Exactitud (%)	Tiempo (s)
0	0,033	0,375	0,854	00:08
1	0,024	0,373	0,875	00:08
2	0,026	0,353	0,875	00:08
3	0,026	0,272	0,937	00:08
4	0,028	0,253	0,937	00:08
5	0,026	0,251	0,937	00:08

La **Tabla 3-71** presenta la matriz de confusión, que indica que el modelo clasificó correctamente 30 imágenes como "C" (Conforme) y 15 como "NC" (No Conforme), con solo 3 errores de clasificación (2 falsos positivos y 1 falso negativo). Estos resultados destacan la mejora en la capacidad de clasificación del modelo cuando se optimizan todas las capas, lo que sugiere que este enfoque es más eficaz que la optimización de solo la última capa.

Tabla 3-71: Matriz de confusión de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 2

	Observación Conforme	Observación No Conforme	Total
Predicción Conforme	30	1	31
Predicción No Conforme	2	15	17
Total	32	16	48
Precisión	0,973	0,973	0,937

La **Tabla 3-72** presenta el porcentaje de éxito obtenido por el modelo ResNet34 con todas las capas modificadas, en la tarea de clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 2. Tras evaluar el rendimiento del modelo, se registraron 45 aciertos y 3 fallos en las predicciones, lo que equivale a un porcentaje de éxito del 93,75 %.

Capítulo 3: Resultados y discusión

Tabla 3-72: Porcentaje de éxito de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 2

Comprobación de resultados	
Número de fallos de predicción	3
Número de aciertos de predicción	45
Porcentaje de éxito en la predicción	93,75 %

Considerando que las precisiones mejoran del 85% al 94% al comparar la optimización de solo la última capa frente a la optimización de todas las capas de la red, se concluye que la optimización completa del modelo tiene un impacto significativo en el cumplimiento de los objetivos establecidos en la memoria del proyecto. Este aumento en precisión refleja que la optimización de todas las capas permite una mejor captura de las características relevantes, mejorando la capacidad del modelo para generalizar de manera efectiva. Por esta razón, en este caso, se ha optado por aplicar la optimización de todas las capas del modelo, ya que esta estrategia proporciona un rendimiento más robusto y ajustado a los requisitos del proyecto.

3.6.3.2.5 Comparación general entre la aplicación del modelo ResNet-34 en el control de calidad de los aceites O-1178 y O-1236 para el Grupo 2

En este apartado se lleva a cabo una evaluación comparativa del rendimiento del modelo ResNet34 optimizado para la clasificación de los aceites lubricantes O-1178 y O-1236 en el Grupo 2. Se examinan las variaciones en la precisión del modelo al comparar dos enfoques: la optimización exclusiva de la última capa y la optimización completa de todas las capas. El análisis se centra en cómo cada estrategia influye en la capacidad del modelo para clasificar correctamente ambos tipos de aceites y qué impacto tienen estos enfoques en la mejora del rendimiento global del sistema.

Para el aceite O-1178:

- **Optimización de la última capa:** En el Grupo 2, la optimización de la última capa para el aceite O-1178 mostró un rendimiento adecuado, con una exactitud final de aproximadamente 97,62%. Sin embargo, similar a los resultados en el Grupo 1, este enfoque mostró limitaciones en la capacidad del modelo para capturar todas las características relevantes, lo que podría afectar la generalización.
- **Optimización de todas las capas:** Cuando se optimizaron todas las capas para el aceite O-1178 en el Grupo 2, se alcanzó una precisión del 100% para las imágenes

Capítulo 3: Resultados y discusión

testadas, con la pérdida de validación reducida a niveles mínimos y una matriz de confusión con apenas un error. Esto indica que la optimización completa es crucial para maximizar el rendimiento del modelo en este segundo grupo.

Para el aceite O-1236:

- **Optimización de la última capa:** Para el aceite O-1236 en el Grupo 2, la optimización de la última capa mostró un rendimiento inconsistente, con fluctuaciones significativas en la pérdida de validación y una exactitud final de alrededor del 85,4%. La matriz de confusión también reflejó varios errores de clasificación, lo que indica que este enfoque no fue suficiente para una clasificación precisa.
- **Optimización de todas las capas:** La optimización de todas las capas mejoró notablemente el rendimiento del modelo para el aceite O-1236 en el Grupo 2. La exactitud final alcanzó el 93,7%, con una pérdida de validación baja y consistente. La matriz de confusión mostró una reducción significativa en los errores de clasificación, indicando que este enfoque es más adecuado para manejar la complejidad de las características del aceite O-1236.

Así, para los aceites O-1178 y O-1236, resulta más beneficioso optimizar todas las capas de la ResNet34 para garantizar una clasificación exacta y fiable, en particular cuando las propiedades del aceite son complejas y no se pueden categorizar adecuadamente con solo ajustar la última capa. Esta técnica permite que el modelo reconozca con precisión las finas diferencias entre las características de los aceites, lo que mejora el desempeño del sistema reflejado en una menor pérdida de validación y una mayor precisión.

3.6.3.3 Análisis de resultados en el grupo 3: Fotografías en cubeta usando cámara endoscópica

El Grupo 3 ofrece una nueva oportunidad para analizar cómo las distintas estrategias de optimización impactan en la clasificación de los aceites O-1178 y O-1236. En esta fase, se evalúa cómo el modelo responde a la optimización de la última capa frente a la optimización de todas las capas, con el objetivo de identificar la mejor estrategia para capturar las características específicas de cada aceite. Este análisis proporciona información valiosa para afinar la precisión del modelo.

3.6.3.3.1 Optimización de la última capa para el aceite O-1178

En este apartado se analiza el rendimiento del modelo ResNet-34 con la optimización exclusiva de la última capa para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 3. Esta estrategia, que utiliza un coeficiente de aprendizaje relativamente alto, se enfoca en ajustar solo la última capa de la red, lo que puede permitir una rápida convergencia, pero podría limitar la capacidad del modelo para extraer características profundas y relevantes de las capas anteriores.

La **Figura 3-65** muestra la relación entre la tasa de aprendizaje con la pérdida durante el proceso de entrenamiento preliminar del modelo. En el gráfico destaca cómo, al aumentar la tasa de aprendizaje, la pérdida sigue una tendencia general descendente, alcanzando un punto de valle (marcado con un punto naranja), que representa el valor óptimo de la tasa de aprendizaje en torno a 10^{-3} . En el punto de valle, la pérdida es mínima (aproximadamente 0,85), lo que indica que el modelo está aprendiendo de manera eficiente con esta tasa de aprendizaje, logrando un equilibrio entre la rapidez de la convergencia y la estabilidad en la actualización de los pesos. A partir de este punto, un incremento en la tasa de aprendizaje provoca un aumento rápido de la pérdida, lo que sugiere que una tasa mayor lleva a inestabilidad en el proceso de ajuste de los parámetros, perjudicando la capacidad del modelo para aprender correctamente de los datos. En las primeras fases, cuando la tasa de aprendizaje es muy baja (en torno a 10^{-7}), la pérdida es más alta, lo que es típico al inicio del entrenamiento cuando el modelo aún no ha ajustado bien sus parámetros. Este gráfico es fundamental para seleccionar una tasa de aprendizaje adecuada, ya que identifica el rango en el que el modelo aprende de manera eficiente antes de que el proceso se vuelva inestable debido a un incremento excesivo de la tasa de aprendizaje.

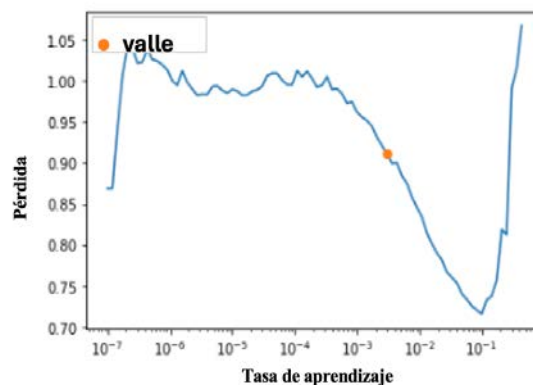


Figura 3-65: Curva de aprendizaje de la ResNet34 con la última capa modificada para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 3

Capítulo 3: Resultados y discusión

La **Tabla 3-73** detalla los parámetros utilizados en el proceso de entrenamiento. En este experimento, se aplicó una tasa de aprendizaje de $3 \cdot 10^{-3}$ y se mantuvo un stride de 1, lo que permitió garantizar una resolución óptima para la extracción precisa de características durante el aprendizaje del modelo.

Tabla 3-73: Parámetros utilizados para la ResNet34 con la última capa modificada para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 3

Validación (%BD)	Tipo de red	Coefficiente de aprendizaje	Batch size (im/lote)	Stride	Tamaño de la imagen (pxV × pxH × RGB)
20	ResNet-34	$3 \cdot 10^{-3}$	64	1	224 x 224 x 3

La **Tabla 3-74** resume los ciclos de entrenamiento y validación interna. La pérdida de entrenamiento y la pérdida de validación interna fluctúan a lo largo de los ciclos, con la pérdida de validación alcanzando valores relativamente altos en algunos puntos, lo que podría indicar dificultades para generalizar. Sin embargo, la exactitud se mantiene en niveles razonablemente altos, oscilando entre el 80% y el 95%, con una tendencia a estabilizarse alrededor del 93% hacia los últimos ciclos.

Tabla 3-74: Ciclos de entrenamiento-validación interna de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 3

Ciclo	Pérdida de entrenamiento	Pérdida de validación interna	Exactitud (%)	Tiempo (s)
0	0,153	0,726	0,946	00:03
1	0,174	0,554	0,897	00:03
2	0,157	0,684	0,807	00:03
3	0,150	0,365	0,923	00:03
4	0,142	0,257	0,935	00:03
5	0,126	0,458	0,935	00:03
6	0,126	0,371	0,948	00:03
7	0,113	0,494	0,923	00:03
8	0,109	0,396	0,910	00:03

Capítulo 3: Resultados y discusión

9	0,116	0,257	0,935	00:03
10	0,101	0,218	0,923	00:03
11	0,106	0,208	0,923	00:03

La **Tabla 3-75** presenta la matriz de confusión, donde se observa que el modelo clasificó correctamente 55 imágenes como "C" (Conforme) y 17 como "NC" (No Conforme), con un total de 6 errores de clasificación (3 falsos negativos y 3 falsos positivos). Aunque el modelo logra un rendimiento aceptable, la presencia de estos errores sugiere que su capacidad para generalizar a nuevos datos tiene ciertas limitaciones. La variabilidad en los resultados destaca la necesidad de mejorar el enfoque para aumentar la precisión y reducir los errores en clasificaciones futuras.

Tabla 3-75: Matriz de confusión de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 3

	Observación Conforme	Observación No Conforme	Total
Predicción Conforme	55	3	58
Predicción No Conforme	3	17	20
Total	58	20	78
Precisión	0,948	0,85	0,923

La **Tabla 3-76** presenta el porcentaje de éxito obtenido por el modelo ResNet34 con la última capa optimizada, en la tarea de clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 3. Tras evaluar el rendimiento del modelo, se registraron 72 aciertos y 6 fallos en las predicciones, lo que equivale a un porcentaje de éxito del 92,3 %.

Tabla 3-76: Porcentaje de éxito de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 3

Comprobación de resultados	
Número de fallos de predicción	6
Número de aciertos de predicción	72
Porcentaje de éxito en la predicción	92,3%

3.6.3.3.2 Optimización de todas las capas para el aceite O-1178

En este apartado se evalúa el rendimiento del modelo ResNet-34 con la optimización de todas las capas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 3. A diferencia de la optimización de solo la última capa, este enfoque permite un ajuste más completo del modelo, lo que puede llevar a una mejor extracción de características y una mayor capacidad de generalización.

La **Figura 3-66** muestra la relación entre la tasa de aprendizaje y la pérdida a lo largo del entrenamiento preliminar del modelo. Inicialmente, la pérdida es algo elevada, pero comienza a disminuir conforme aumenta la tasa de aprendizaje, hasta alcanzar un punto mínimo o "valle", alrededor de 10^{-4} , que representa el valor óptimo de la tasa de aprendizaje. En este punto, el modelo logra minimizar la pérdida de manera efectiva. A partir de ahí, cualquier incremento adicional en la tasa de aprendizaje provoca un aumento abrupto en la pérdida, lo que indica que el modelo comienza a perder estabilidad y su capacidad de aprender se ve afectada. Esto resalta la importancia de identificar una tasa de aprendizaje adecuada para garantizar un rendimiento óptimo del modelo.

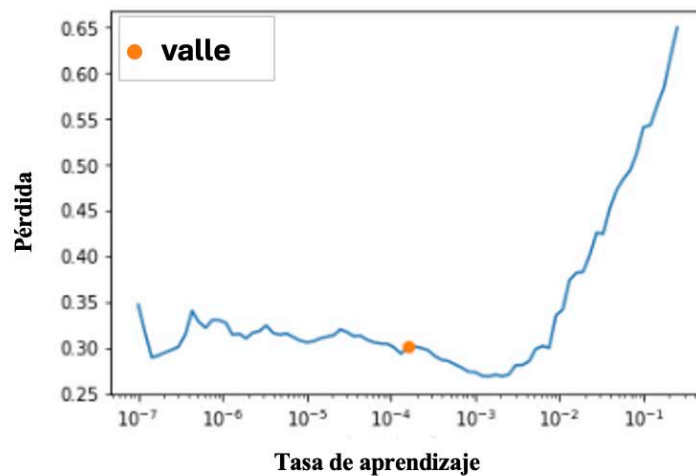


Figura 3-66: Curva de aprendizaje de la ResNet34 con todas las capas modificadas para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 3

La **Tabla 3-77** presenta los parámetros utilizados durante este entrenamiento. Aquí, se empleó un coeficiente de aprendizaje más bajo de $1 \cdot 10^{-4}$ y el stride se mantuvo en 1.

Capítulo 3: Resultados y discusión

Tabla 3-77: Parámetros utilizados para la ResNet34 con todas las capas modificadas para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 3

Validación (%BD)	Tipo de red	Coficiente de aprendizaje	Batch size (im/lote)	Stride	Tamaño de la imagen (pxV × pxH × RGB)
80%	ResNet-34	$1 \cdot 10^{-4}$	64	1	224 x 224 x 3

La **Tabla 3-78** muestra los ciclos de entrenamiento y validación interna. La pérdida de entrenamiento y la pérdida de validación interna se mantienen bajas y estables a lo largo de los ciclos, lo que sugiere una mejora en la capacidad del modelo para generalizar. La exactitud también se mantiene alta, alcanzando un máximo de 96,15% en los ciclos finales, lo que refleja una mejora en comparación con la optimización de solo la última capa.

Tabla 3-78: Ciclos de entrenamiento-validación interna de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 3

Ciclo	Pérdida de entrenamiento	Pérdida de validación interna	Exactitud (%)	Tiempo (s)
0	0,026	0,170	0,935	00:03
1	0,056	0,279	0,923	00:03
2	0,044	0,255	0,948	00:03
3	0,041	0,275	0,935	00:03
4	0,065	0,230	0,961	00:03
5	0,061	0,220	0,961	00:03

La **Tabla 3-79** presenta la matriz de confusión, en la que se observa que el modelo clasificó correctamente 57 imágenes como "C" (Conforme) y 18 como "NC" (No Conforme), con solo 3 errores de clasificación (2 falsos negativos y 1 falso positivo). Esto refleja un desempeño superior en comparación con la optimización de solo la última capa, destacando la efectividad de la optimización completa para este grupo.

Capítulo 3: Resultados y discusión

Tabla 3-79: Matriz de confusión de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 3

	Observación Conforme	Observación No Conforme	Total
Predicción Conforme	57	1	58
Predicción No Conforme	2	18	20
Total	59	19	78
Precisión	0,966	0,947	0,961

La **Tabla 3-80** presenta el porcentaje de éxito obtenido por el modelo ResNet34 con todas las capas modificadas, en la tarea de clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 3. Tras evaluar el rendimiento del modelo, se registraron 75 aciertos y 3 fallos en las predicciones, lo que equivale a un porcentaje de éxito del 96,15 %.

Tabla 3-80: Porcentaje de éxito de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 3

Comprobación de resultados	
Número de fallos de predicción	3
Número de aciertos de predicción	75
Porcentaje de éxito en la predicción	96,15%

La diferencia en precisión entre los modelos que optimizan solo la última capa y aquellos que optimizan todas las capas se sitúa en torno al 2%. Aunque ambos enfoques proporcionan resultados adecuados para cumplir con los objetivos planteados, la estabilidad y capacidad de adaptación que ofrece la optimización de todas las capas hacen que esta opción sea la más recomendable. Este enfoque permite al modelo ajustar de manera más precisa sus parámetros, mejorando su desempeño en situaciones más complejas y asegurando una mayor robustez en la clasificación.

3.6.3.3 Optimización de la última capa para el aceite O-1236

En este apartado se analiza el rendimiento del modelo ResNet-34 optimizado solo en la última capa para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 3. Este enfoque se caracteriza por un coeficiente de aprendizaje relativamente moderado, lo que permite ajustar rápidamente la última capa del modelo, pero puede

Capítulo 3: Resultados y discusión

limitar la capacidad del modelo para extraer características más profundas y relevantes desde las capas anteriores.

La **Figura 3-67** ilustra cómo la pérdida del modelo varía en función de la tasa de aprendizaje a lo largo del entrenamiento. Inicialmente, la pérdida es alta, alrededor de 1,4, y disminuye conforme aumenta la tasa de aprendizaje. Se puede observar una tendencia decreciente sostenida que alcanza su punto más bajo o valle cerca de una tasa de aprendizaje de 10^{-3} , lo que indica que en este rango el modelo se ajusta de manera eficiente a los datos. A medida que se incrementa aún más la tasa de aprendizaje después del valle, la pérdida comienza a aumentar de nuevo rápidamente, lo que refleja inestabilidad en el proceso de ajuste. Esta curva permite identificar la tasa de aprendizaje óptima que minimiza la pérdida y maximiza la capacidad del modelo para aprender de manera estable y precisa.

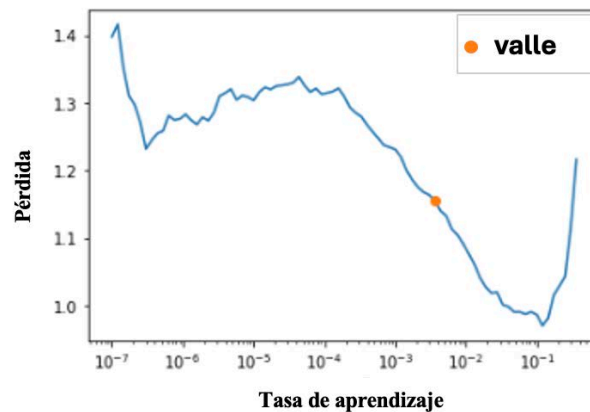


Figura 3-67: Curva de aprendizaje de la ResNet34 con la última capa modificada para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 3

La **Tabla 3-81** describe los parámetros aplicados durante el entrenamiento del modelo. En este experimento, se utilizó una tasa de aprendizaje de $4 \cdot 10^{-2}$, lo que permitió un ajuste preciso de los pesos del modelo a lo largo del proceso. Además, se mantuvo un stride de 1, garantizando una resolución fina en la extracción de características, lo que es fundamental para captar detalles relevantes en los datos de entrada y mejorar el rendimiento del modelo en tareas de clasificación.

Tabla 3-81: Parámetros utilizados para la ResNet34 con la última capa modificada para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 3

Validación (%BD)	Tipo de red	Coficiente de aprendizaje	Batch size (im/lote)	Stride	Tamaño de la imagen (pxV × pxH × RGB)
20	ResNet-34	$4 \cdot 10^{-2}$	64	1	224 x 224 x 3

Capítulo 3: Resultados y discusión

La **Tabla 3-82** resume los ciclos de entrenamiento y validación interna. A lo largo de los ciclos, se observa una disminución gradual en la pérdida de entrenamiento, desde 1,206 en el ciclo 0 hasta 0,484 en el ciclo 12. Sin embargo, la pérdida de validación interna es más variable, lo que sugiere posibles dificultades en la capacidad del modelo para generalizar. La exactitud aumenta a medida que avanza el entrenamiento, alcanzando un 77,55% en los últimos ciclos, lo que indica una mejora, aunque con margen para la optimización adicional.

Tabla 3-82: Ciclos de entrenamiento-validación interna de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 3

Ciclo	Pérdida de entrenamiento	Pérdida de validación interna	Exactitud (%)	Tiempo (s)
0	1,206	0,643	0,612	00:02
1	1,054	0,592	0,612	00:02
2	0,947	0,738	0,673	00:02
3	0,896	0,782	0,714	00:02
4	0,811	0,940	0,612	00:02
5	0,758	0,933	0,653	00:02
6	0,691	0,754	0,653	00:02
7	0,640	0,794	0,689	00:02
8	0,665	0,755	0,714	00:02
9	0,560	0,719	0,775	00:02
10	0,516	0,704	0,775	00:02
11	0,483	0,690	0,775	00:02

La **Tabla 3-83** muestra la matriz de confusión, en la que el modelo logró clasificar correctamente 28 imágenes como "C" (Conforme) y 9 como "NC" (No Conforme), pero cometió 12 errores de clasificación, divididos en 8 falsos negativos y 4 falsos positivos. Si bien estos resultados indican un rendimiento moderadamente bueno del modelo, los errores de clasificación y la variabilidad observada en la pérdida de validación sugieren que el modelo presenta dificultades para generalizar correctamente a nuevos datos. Estos resultados subrayan la necesidad de ajustes adicionales para mejorar su capacidad de predicción y reducir las limitaciones observadas.

Capítulo 3: Resultados y discusión

Tabla 3-83: Matriz de confusión de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 3

	Observación Conforme	Observación No Conforme	Total
Predicción Conforme	28	4	32
Predicción No Conforme	8	9	17
Total	36	13	49
Precisión	0,777	0,692	0,755

La **Tabla 3-84** presenta el porcentaje de éxito obtenido por el modelo ResNet34 con la última capa optimizada, en la tarea de clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 3. Tras evaluar el rendimiento del modelo, se registraron 37 aciertos y 12 fallos en las predicciones, lo que equivale a un porcentaje de éxito del 75,51 %.

Tabla 3-84: Porcentaje de éxito de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 3

Comprobación de resultados	
Número de fallos de predicción	12
Número de aciertos de predicción	37
Porcentaje de éxito en la predicción	75,51%

En relación con los errores de validación, **Figura 3-68**, durante la optimización de la última capa para el aceite O-1236, se observaron algunos problemas, con variaciones en los resultados y un número de errores relativamente alto. Esto indica que el modelo no fue capaz de aprender completamente las características necesarias, lo que afectó su rendimiento.

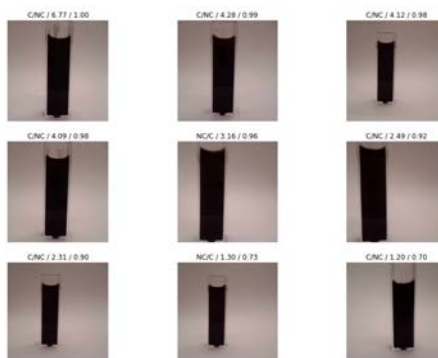


Figura 3-68: Errores de validación de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 3

Capítulo 3: Resultados y discusión

El modelo neuronal podría haber fallado en reconocer correctamente estas imágenes debido a una serie de factores. Uno de ellos es la posible iluminación no uniforme o no adecuada, que puede causar sombras o reflejos que alteran las características visuales de las imágenes. Las redes neuronales suelen ser muy sensibles a este tipo de variaciones en las condiciones de luz, lo que puede afectar su capacidad de diferenciación entre imágenes "Conforme" y "No Conforme". Además, las imágenes muestran muy poca variación visual en cuanto a forma, color y fondo, lo que hace que el modelo tenga dificultades para distinguir patrones relevantes. Si las diferencias entre las clases no son evidentes o el conjunto de datos de entrenamiento no tiene suficientes variaciones, es probable que el modelo no generalice correctamente.

Otro aspecto por considerar es el ruido en los datos, ya que pequeños elementos no perceptibles a simple vista, como imperfecciones en las imágenes, pueden interferir con la clasificación. También, el modelo podría haber sido entrenado con un conjunto de datos desbalanceado, en el que una clase está sobrerrepresentada, haciendo que la red esté más inclinada a clasificar incorrectamente las imágenes de la clase menos representada. Además, es posible que la arquitectura del modelo no sea lo suficientemente compleja para extraer las características distintivas necesarias, lo que sugiere que una red más profunda o técnicas de preprocesamiento avanzadas podrían mejorar su rendimiento en este tipo de imágenes.

3.6.3.3.4 Optimización de todas las capas para el aceite O-1236

En este apartado se examina el rendimiento del modelo ResNet34 con la optimización de todas las capas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 3. A diferencia de la optimización de solo la última capa, este enfoque permite un ajuste completo del modelo, lo que puede mejorar la capacidad del modelo para extraer y generalizar características relevantes.

La **Figura 3-69** muestra la relación entre la tasa de aprendizaje y la pérdida del modelo durante el entrenamiento preliminar. A medida que la tasa de aprendizaje incrementa, se observa una disminución inicial en la pérdida, que alcanza su valor más bajo en un punto de valle marcado alrededor de 10^{-4} . En este valle, el modelo presenta su mejor rendimiento en términos de ajuste, con una pérdida mínima cercana a 0,20. Sin embargo, tras este punto, a medida que la tasa de aprendizaje sigue aumentando, la pérdida comienza a incrementarse rápidamente, alcanzando valores cercanos a 0,45 en la parte final del gráfico. Esto indica que tasas de aprendizaje más altas llevan a una

Capítulo 3: Resultados y discusión

inestabilidad en el ajuste del modelo, afectando negativamente su capacidad para aprender de manera efectiva. Este tipo de gráfica ayuda a determinar la tasa de aprendizaje óptima para maximizar la eficiencia del entrenamiento y evitar que el modelo pierda precisión debido a un exceso de ajuste o inestabilidad.

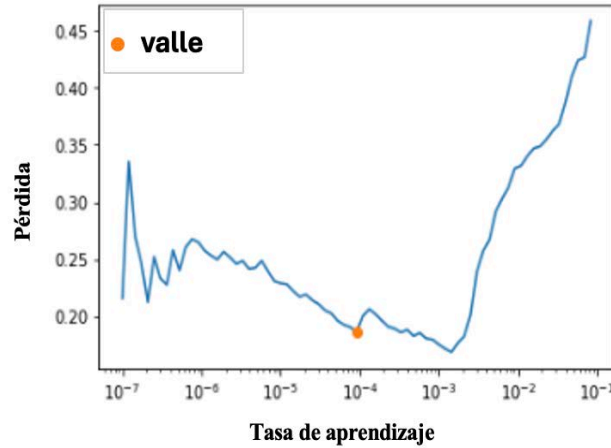


Figura 3-69: Curva de aprendizaje de la ResNet34 con todas las capas modificadas para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 3

La **Tabla 3-85** muestra los parámetros utilizados durante el entrenamiento. En este caso, se empleó un coeficiente de aprendizaje más bajo de $9 \cdot 10^{-5}$ y el stride se mantuvo en 1.

Tabla 3-85: Parámetros utilizados para la ResNet34 con todas las capas modificadas para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 3

Validación (%BD)	Tipo de red	Coeficiente de aprendizaje	Batch size (im/lote)	Stride	Tamaño de la imagen (pxV × pxH × RGB)
20	ResNet-34	$9 \cdot 10^{-5}$	64	1	224 x 224 x 3

La **Tabla 3-86** resume los ciclos de entrenamiento y validación interna. La pérdida de entrenamiento disminuye consistentemente desde 0,287 en el ciclo 0 hasta 0,130 en el ciclo 9, indicando que el modelo está aprendiendo de manera efectiva. Sin embargo, la pérdida de validación interna sigue siendo alta en algunos ciclos, lo que sugiere desafíos en la capacidad del modelo para generalizar completamente. La exactitud mejora a lo largo de los ciclos, alcanzando un máximo de 81,63% en los ciclos 7 y 8, lo que sugiere una mejora respecto a la optimización de solo la última capa.

Capítulo 3: Resultados y discusión

Tabla 3-86: Ciclos de entrenamiento-validación interna de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 3

Ciclo	Pérdida de entrenamiento	Pérdida de validación interna	Exactitud (%)	Tiempo (s)
0	0,287	0,673	0,795	00:02
1	0,254	1,492	0,591	00:02
2	0,212	1,399	0,632	00:02
3	0,183	1,330	0,734	00:02
4	0,169	1,310	0,734	00:02
5	0,156	1,102	0,714	00:02
6	0,153	1,060	0,755	00:02
7	0,150	0,976	0,816	00:02
8	0,139	0,959	0,816	00:02
9	0,129	0,931	0,795	00:02

La **Tabla 3-87** muestra la matriz de confusión, que indica que el modelo clasificó correctamente 29 imágenes como "C" (Conforme) y 10 como "NC" (No Conforme), con un total de 10 errores de clasificación (7 falsos negativos y 3 falsos positivos). Estos resultados muestran una mejora en la capacidad de clasificación del modelo en comparación con la optimización de solo la última capa, aunque la alta pérdida de validación interna en algunos ciclos indica que aún hay margen para la mejora.

Tabla 3-87: Matriz de confusión de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 3

	Observación Conforme	Observación No Conforme	Total
Predicción Conforme	29	3	32
Predicción No Conforme	7	10	17
Total	36	13	49
Precisión	0,805	0,769	0,756

La **Tabla 3-88** presenta el porcentaje de éxito obtenido por el modelo ResNet34 con todas las capas modificadas, en la tarea de clasificación de imágenes del aceite lubricante

Capítulo 3: Resultados y discusión

O-1236 en el Grupo 3. Tras evaluar el rendimiento del modelo, se registraron 39 aciertos y 10 fallos en las predicciones, lo que equivale a un porcentaje de éxito del 75,59 %.

Tabla 3-88: *Porcentaje de éxito de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 3*

Comprobación de resultados	
Número de fallos de predicción	10
Número de aciertos de predicción	39
Porcentaje de éxito en la predicción	75,59 %

Respecto a los errores de validación, **Figura 3-70**, la optimización de todas las capas mostró una clara reducción de errores y resultados más consistentes, lo que sugiere que el modelo pudo captar y generalizar mejor las características del aceite O-1236, logrando un rendimiento más estable.

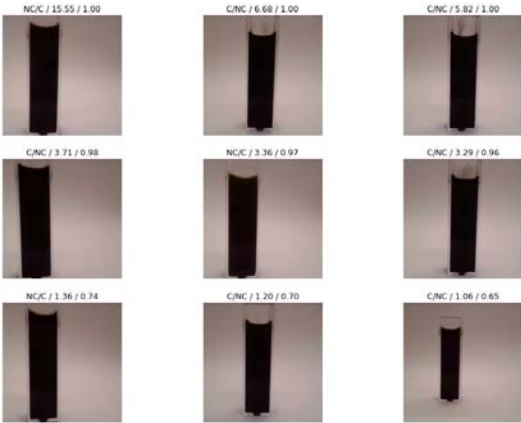


Figura 3-70: *Errores de validación de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 3*

La clasificación inadecuada de estas muestras puede deberse a varios factores combinados. En primer lugar, una falta de diversidad en el conjunto de entrenamiento puede haber limitado la capacidad del modelo para identificar variaciones sutiles. Además, la resolución insuficiente de las imágenes podría estar impidiendo al modelo captar detalles clave. También existe la posibilidad de que el modelo esté sobre ajustado a características irrelevantes, como el fondo o sombras, en lugar de centrarse en las partes más importantes. El procesamiento inadecuado de las imágenes, como una normalización incorrecta, puede haber afectado el aprendizaje de características críticas, y posibles errores en la segmentación pueden estar haciendo que el modelo analice partes no relevantes de la imagen, lo que afecta la precisión de la clasificación.

Capítulo 3: Resultados y discusión

La precisión entre los modelos que solo optimizan la última capa y aquellos que optimizan todas las capas presenta una diferencia aproximada del 4%. Aunque ambos métodos logran cumplir los objetivos propuestos, la optimización completa del modelo ofrece una mayor robustez y flexibilidad en su capacidad de aprendizaje. Esta ventaja se refleja en una mejor adaptación a nuevas muestras y una mayor consistencia en los resultados, lo que hace que optimizar todas las capas sea la opción más adecuada para maximizar el rendimiento y garantizar una mayor estabilidad en situaciones complejas.

3.6.3.3.5 Comparación general entre la aplicación del modelo ResNet-34 en el control de calidad de los aceites O-1178 y O-1236 para el Grupo 3

En este apartado se lleva a cabo una comparación global del rendimiento del modelo ResNet34 aplicado a la clasificación de los aceites lubricantes O-1178 y O-1236 en el Grupo 3. Se examinan las diferencias en la eficiencia del modelo al contrastar dos enfoques: la optimización únicamente de la última capa y la optimización completa de todas las capas. Además, se evalúa cómo cada estrategia influye en la capacidad del modelo para clasificar con precisión ambos aceites, destacando el impacto de cada método en el rendimiento general.

Para el aceite O-1178, se realizó una comparación entre el rendimiento del modelo ResNet-34 optimizando únicamente la última capa y optimizando todas las capas, evaluando cómo cada enfoque influye en la precisión de la clasificación del aceite en cuestión.

- **Optimización de la última capa:** Para el aceite O-1178 en el Grupo 3, la optimización de solo la última capa mostró un rendimiento aceptable, con una exactitud que varió entre el 80% y el 95% a lo largo de los ciclos de entrenamiento. Sin embargo, la pérdida de validación interna fue variable, lo que sugiere que el modelo tuvo dificultades para generalizar de manera consistente. La matriz de confusión reflejó algunos errores de clasificación, con un total de 6 errores (3 falsos negativos y 3 falsos positivos). Este enfoque fue efectivo hasta cierto punto, pero mostró limitaciones en su capacidad para capturar las características más complejas del aceite.
- **Optimización de todas las capas:** Al optimizar todas las capas, el rendimiento del modelo mejoró significativamente. La exactitud se mantuvo alta, alcanzando hasta un 96,15%, y la pérdida de validación fue más estable y baja en comparación con la optimización de solo la última capa. La matriz de confusión mostró una reducción

Capítulo 3: Resultados y discusión

en los errores de clasificación, con solo 3 errores en total (2 falsos negativos y 1 falso positivo). Estos resultados indican que la optimización completa de todas las capas permitió al modelo generalizar mejor y clasificar de manera más precisa las muestras del aceite O-1178 en el Grupo 3.

Para el aceite O-1236, se comparó el rendimiento del modelo ResNet-34 al optimizar solo la última capa frente a la optimización de todas las capas, evaluando cómo estas estrategias afectan la precisión de la clasificación y el desempeño general.

- **Optimización de la última capa:** Para el aceite O-1236 en el Grupo 3, la optimización de la última capa presentó desafíos significativos. La pérdida de validación interna fue variable y alta en algunos ciclos, lo que sugiere problemas de generalización. La exactitud final alcanzó el 77,55%, pero la matriz de confusión mostró 12 errores de clasificación (8 falsos negativos y 4 falsos positivos). Estos resultados reflejan que, si bien el modelo pudo aprender algunas características, la optimización de solo la última capa fue insuficiente para capturar completamente la complejidad de las muestras del aceite O-1236.
- **Optimización de todas las capas:** Con la optimización de todas las capas, el rendimiento del modelo para el aceite O-1236 mejoró en comparación con la optimización de solo la última capa. Aunque la pérdida de validación interna seguía siendo alta en algunos ciclos, la exactitud alcanzó un máximo de 81,63%. La matriz de confusión mostró una mejora, con 10 errores de clasificación (7 falsos negativos y 3 falsos positivos), lo que indica una mejor capacidad del modelo para capturar las características relevantes del aceite O-1236 cuando todas las capas son optimizadas. Sin embargo, los resultados también sugieren que aún hay margen para mejorar la estabilidad del modelo y su capacidad de generalización.

En el Grupo 3, tanto para el aceite O-1178 como para el O-1236, la optimización de todas las capas de la ResNet34 demostró ser superior en comparación con la optimización de solo la última capa. La optimización completa permitió una mejor extracción de características, lo que resultó en una mayor estabilidad del modelo, mejor capacidad de generalización y una mayor precisión en la clasificación. Sin embargo, se observaron algunas variabilidades en la pérdida de validación interna, especialmente para el aceite O-1236, lo que sugiere que podrían explorarse estrategias adicionales para mejorar aún más el rendimiento del modelo.

3.6.3.4 Análisis de resultados en el grupo 4: Fotografías con cubeta en maletín y usando cámara endoscópica

El análisis en el Grupo 4 se centra en completar la evaluación del modelo mediante la comparación final entre la optimización de la última capa y la optimización de todas las capas en la clasificación de los aceites O-1178 y O-1236. Esta fase final del estudio es crucial para consolidar los hallazgos y proporcionar una visión definitiva sobre la eficacia de cada estrategia de optimización.

3.6.3.4.1 Optimización de la última capa para el aceite O-1178

En este apartado se evalúa el rendimiento del modelo ResNet34 optimizado exclusivamente en la última capa para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 4. Este enfoque, que utiliza un coeficiente de aprendizaje moderado, se centra en ajustar la última capa del modelo, lo que permite una rápida convergencia, pero puede limitar la capacidad del modelo para extraer características más complejas desde las capas anteriores.

La **Figura 3-71** presenta la evolución de la pérdida en función de la tasa de aprendizaje durante el entrenamiento preliminar del modelo. A medida que la tasa de aprendizaje incrementa desde 10^{-7} , la pérdida muestra inicialmente una ligera reducción, seguida de un periodo de fluctuación alrededor de 1,2 y 1,4. Este comportamiento sugiere que el modelo experimenta dificultades para estabilizarse en las primeras fases del ajuste. Posteriormente, a medida que la tasa de aprendizaje se aproxima a 10^{-3} , se observa una caída más clara, alcanzando un punto de valle, lo que indica que esta tasa optimiza el proceso de ajuste, minimizando la pérdida en torno a 1,2. Más allá de este punto, la pérdida comienza a aumentar rápidamente, evidenciando que tasas de aprendizaje más altas desestabilizan el modelo y reducen su capacidad de aprender de manera eficiente. Este gráfico es crucial para identificar la tasa óptima de aprendizaje que logra el mejor equilibrio entre la precisión y la estabilidad del modelo a lo largo del proceso de entrenamiento.

Capítulo 3: Resultados y discusión

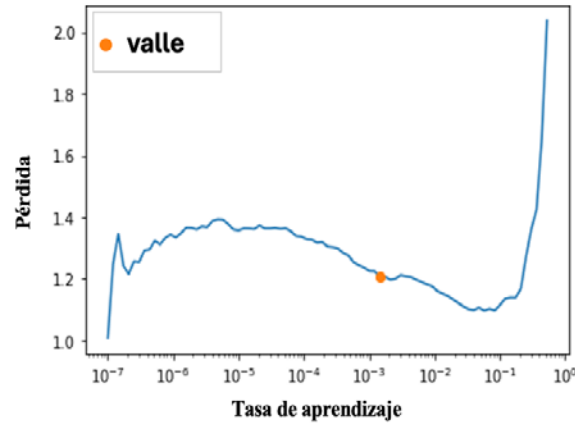


Figura 3-71: Curva de aprendizaje de la ResNet34 con la última capa modificada para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 4

La **Tabla 3-89** describe los parámetros utilizados para entrenar el modelo. En este caso, se estableció una tasa de aprendizaje de $1 \cdot 10^{-3}$, lo que permitió un ajuste preciso y eficiente de los pesos del modelo durante el entrenamiento. Además, se mantuvo un stride de 1, lo cual asegura que el modelo pueda capturar con gran resolución todas las características relevantes presentes en los datos, optimizando así su capacidad de análisis y clasificación.

Tabla 3-89: Parámetros utilizados para la ResNet34 con la última capa modificada para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 4

Validación (%BD)	Tipo de red	Coficiente de aprendizaje	Batch size (im/lote)	Stride	Tamaño de la imagen (pxV × pxH × RGB)
20	ResNet-34	$1 \cdot 10^{-3}$	64	1	224 x 224 x 3

La **Tabla 3-90** resume los ciclos de entrenamiento y validación interna. La pérdida de entrenamiento disminuye progresivamente desde 0,967 en el ciclo 0 hasta 0,455 en el ciclo 6. Sin embargo, la pérdida de validación interna es variable, alcanzando un mínimo de 0,195 en el ciclo 6, lo que sugiere que el modelo mejora su capacidad para generalizar con el tiempo. La exactitud aumenta de manera notable, alcanzando un 92,20% en el ciclo final, lo que indica que el modelo es capaz de capturar adecuadamente las características relevantes en las últimas etapas del entrenamiento.

Capítulo 3: Resultados y discusión

Tabla 3-90: Ciclos de entrenamiento-validación interna de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 4

Ciclo	Pérdida de entrenamiento	Pérdida de validación interna	Exactitud (%)	Tiempo (s)
0	0,966	0,819	0,668	00:07
1	0,841	0,939	0,639	00:06
2	0,709	1,545	0,614	00:07
3	0,608	0,480	0,873	00:07
4	0,534	0,216	0,902	00:07
5	0,455	0,194	0,921	00:07

La **Tabla 3-91** presenta la matriz de confusión, en la que se observa que el modelo clasificó correctamente 145 imágenes como "C" (Conforme) y 43 imágenes como "NC" (No Conforme), con un total de 17 errores de clasificación (12 falsos negativos y 5 falsos positivos). Estos resultados indican que, aunque el modelo tiene un rendimiento aceptable, la variabilidad en la pérdida de validación sugiere limitaciones en su capacidad para generalizar de manera efectiva.

Tabla 3-91: Matriz de confusión de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 4

	Observación Conforme	Observación No Conforme	Total
Predicción Conforme	145	12	157
Predicción No Conforme	5	43	48
Total	150	55	205
Precisión	0,973	0,754	0,917

La **Tabla 3-92** presenta el porcentaje de éxito obtenido por el modelo ResNet34 con la última capa modificada, en la tarea de clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 4. Tras evaluar el rendimiento del modelo, se registraron 188 aciertos y 17 fallos en las predicciones, lo que equivale a un porcentaje de éxito del 91,7 %.

Capítulo 3: Resultados y discusión

Tabla 3-92: Porcentaje de éxito de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 4

Comprobación de resultados	
Número de fallos de predicción	17
Número de aciertos de predicción	188
Porcentaje de éxito en la predicción	91,7 %

En cuanto a los errores de validación, **Figura 3-72**, la optimización de la última capa para el aceite O-1178 mostró algunas inconsistencias, con un número significativo de errores en ciertos ciclos. Esto refleja que el modelo tuvo dificultades para generalizar adecuadamente, lo que afectó su capacidad para hacer predicciones precisas con datos nuevos.



Figura 3-72: Errores de validación de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 4

La clasificación incorrecta de estas muestras puede deberse a varios factores. Primero, variaciones en la opacidad o el color del líquido en las imágenes, que podrían haber confundido al modelo si este no ha sido entrenado adecuadamente para identificar las diferencias sutiles. La uniformidad del fondo y el entorno también puede haber hecho que el modelo no pueda distinguir con precisión las características clave, ya que los colores oscuros y homogéneos dominan las imágenes. Además, es posible que el ángulo de captura de las imágenes no sea óptimo, lo que impide que el modelo detecte correctamente detalles que serían importantes para la clasificación. Otro factor por considerar es la falta de contraste claro entre las muestras "Conforme" y "No Conforme", lo que puede haber dificultado al modelo diferenciar entre las dos clases, particularmente si las diferencias son sutiles y no han sido bien representadas en los datos de entrenamiento. Finalmente, la similitud visual entre las muestras puede estar

Capítulo 3: Resultados y discusión

contribuyendo a la confusión del modelo, que quizás esté utilizando características no tan relevantes para determinar la clasificación, lo que resulta en errores en la asignación de las categorías correctas.

3.6.3.4.2 Optimización de todas las capas para el aceite O-1178

En este apartado se analiza el rendimiento del modelo ResNet34 con la optimización de todas las capas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 4. A diferencia de la optimización de solo la última capa, este enfoque permite un ajuste completo del modelo, lo que puede mejorar la capacidad del modelo para extraer y generalizar características complejas.

La **Figura 3-73** muestra cómo la pérdida del modelo preliminar varía en función de la tasa de aprendizaje a lo largo del proceso de entrenamiento. Inicialmente, la pérdida se mantiene relativamente baja y estable, con fluctuaciones menores alrededor de 0,2 a medida que la tasa de aprendizaje aumenta. Se alcanza un valle en torno a una tasa de aprendizaje cercana a 10^{-5} , donde la pérdida es mínima, lo que indica que en este punto el modelo está entrenándose de manera óptima. A partir de este valle, conforme la tasa de aprendizaje sigue aumentando, la pérdida comienza a incrementarse de manera pronunciada, alcanzando valores superiores a 0,5 a tasas de aprendizaje mayores, lo que señala una pérdida de estabilidad en el modelo. Esto sugiere que tasas de aprendizaje muy elevadas no solo no mejoran el rendimiento, sino que provocan que el modelo empeore significativamente su capacidad para ajustar los datos. El gráfico es útil para identificar la tasa de aprendizaje ideal que minimiza la pérdida y maximiza la eficiencia del entrenamiento del modelo.

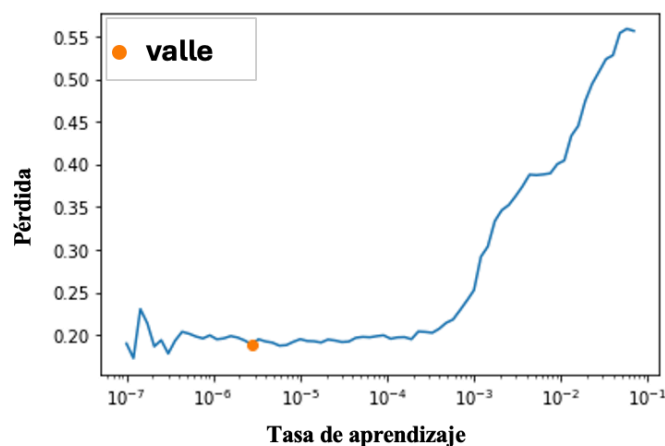


Figura 3-73: Curva de aprendizaje de la ResNet34 con todas las capas modificadas para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 4

Capítulo 3: Resultados y discusión

La **Tabla 3-93** detalla los parámetros utilizados durante el entrenamiento. Se utilizó un coeficiente de aprendizaje más bajo de $2 \cdot 10^{-6}$ y el stride se mantuvo en 1.

Tabla 3-93: Parámetros utilizados para la ResNet34 con todas las capas modificadas para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 4

Validación (%BD)	Tipo de red	Coeficiente de aprendizaje	Batch size (im/lote)	Stride	Tamaño de la imagen (pxV × pxH × RGB)
20	ResNet-34	$2 \cdot 10^{-6}$	64	1	224 x 224 x 3

La **Tabla 3-94** muestra los ciclos de entrenamiento y validación interna. La pérdida de entrenamiento disminuye de manera constante desde 0,223 en el ciclo 0 hasta 0,137 en el ciclo 6. La pérdida de validación interna también es baja y estable, lo que sugiere una mejor capacidad del modelo para generalizar. La exactitud final alcanzó el 94,15%, reflejando una mejora significativa en comparación con la optimización de solo la última capa.

Tabla 3-94: Ciclos de entrenamiento-validación interna de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 4

Ciclo	Pérdida de entrenamiento	Pérdida de validación interna	Exactitud (%)	Tiempo (s)
0	0,222	0,192	0,926	00:07
1	0,209	0,224	0,912	00:07
2	0,199	0,150	0,946	00:07
3	0,177	0,165	0,936	00:07
4	0,155	0,146	0,936	00:06
5	0,137	0,146	0,941	00:06

La **Tabla 3-95** presenta la matriz de confusión, que muestra que el modelo clasificó correctamente 147 imágenes como "C" (Conforme) y 42 como "NC" (No Conforme), con solo 16 errores de clasificación (10 falsos negativos y 6 falsos positivos). Estos resultados destacan la superioridad de la optimización de todas las capas en comparación con la optimización de solo la última capa, reflejando una mejor capacidad de generalización y mayor precisión en la clasificación.

Capítulo 3: Resultados y discusión

Tabla 3-95: Matriz de confusión de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 4

	Observación Conforme	Observación No Conforme	Total
Predicción Conforme	147	10	157
Predicción No Conforme	6	42	48
Total	153	52	205
Precisión	0,961	0,807	0,922

La **Tabla 3-96** presenta el porcentaje de éxito obtenido por el modelo ResNet34 con todas las capas modificadas, en la tarea de clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 4. Tras evaluar el rendimiento del modelo, se registraron 189 aciertos y 16 fallos en las predicciones, lo que equivale a un porcentaje de éxito del 92,19 %.

Tabla 3-96: Porcentaje de éxito de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 4

Comprobación de resultados	
Número de fallos de predicción	16
Número de aciertos de predicción	189
Porcentaje de éxito en la predicción	92,19%

Con relación a los errores de validación, **Figura 3-74**, la optimización de todas las capas resultó en una disminución significativa de errores y una mayor consistencia en los resultados, lo que sugiere que el modelo pudo aprender mejor las características del aceite O-1178 y generalizar con mayor precisión.



Figura 3-74: Errores de validación de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1178 en el Grupo 4

Capítulo 3: Resultados y discusión

Las nueve muestras que fallaron en la clasificación podrían haber sido afectadas por diversos factores. Primero, se puede notar cierta uniformidad en el color y la textura, lo que podría haber llevado al modelo a no identificar correctamente las diferencias clave entre las categorías "Conforme" y "No Conforme". Dado que las imágenes muestran tonalidades similares, el modelo podría haber tenido dificultades para detectar las características distintivas. Otro posible motivo del fallo podría ser la baja variabilidad en las características visuales entre las muestras. Si el modelo no fue entrenado con suficientes ejemplos que representen una mayor gama de variaciones en las muestras, es posible que haya tenido problemas para generalizar correctamente a nuevas imágenes. Además, la iluminación uniforme y el entorno controlado podrían haber impedido que el modelo se basara en diferencias relevantes, haciendo que pequeños errores en las predicciones generaran confusión en la clasificación. Finalmente, puede que el modelo esté sobre ajustado a ciertas características no relevantes como sombras, reflejos o imperfecciones mínimas en el vidrio o el líquido, lo que pudo haber causado clasificaciones incorrectas al basarse en patrones que no son indicativos de las clases reales. Esto sugiere que mejorar la calidad del entrenamiento y las técnicas de preprocesamiento de las imágenes podría ayudar a corregir estos fallos.

En resumen, la diferencia en precisión entre los modelos que optimizan únicamente la última capa y aquellos que optimizan todas las capas ronda el 2%. Si bien ambos enfoques cumplen con los objetivos establecidos, optimizar todas las capas proporciona al modelo una mayor capacidad para aprender de manera eficiente y robusta. Esta optimización completa permite al modelo ajustarse mejor a diferentes tipos de datos y manejar de forma más efectiva variaciones en nuevas muestras, resultando en una mayor coherencia en los resultados. Por lo tanto, la opción de optimizar todas las capas se considera superior, ya que maximiza el rendimiento y garantiza una mayor estabilidad en escenarios más complejos y desafiantes.

3.6.3.4.3 Optimización de la última capa para el aceite O-1236

En este apartado se analiza el rendimiento del modelo ResNet34 optimizado exclusivamente en la última capa para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 4. Este enfoque, que utiliza un coeficiente de aprendizaje moderado, se centra en ajustar solo la última capa del modelo, lo que permite una rápida convergencia, pero puede limitar la capacidad del modelo para extraer y generalizar características desde las capas anteriores.

Capítulo 3: Resultados y discusión

La **Figura 3-75** muestra la relación entre la tasa de aprendizaje (en el eje horizontal) y la pérdida (en el eje vertical) a lo largo del entrenamiento del modelo. A medida que la tasa de aprendizaje aumenta, la pérdida descende gradualmente, alcanzando un punto mínimo o "valle", marcado con un punto naranja, cerca de 10^{-3} . Este valle representa el valor óptimo de la tasa de aprendizaje, donde el modelo consigue minimizar la pérdida, en torno a 1,2, lo que indica un buen ajuste del modelo a los datos. A partir de este punto óptimo, si la tasa de aprendizaje sigue incrementándose, la pérdida aumenta rápidamente, lo que refleja una falta de estabilidad en el entrenamiento y un peor ajuste a los datos. Este comportamiento sugiere que, mientras el modelo es capaz de aprender eficientemente con una tasa de aprendizaje moderada, tasas demasiado altas lo desestabilizan, haciendo que la pérdida se incremente notablemente, lo que podría conducir a un sobreajuste o a un entrenamiento errático.

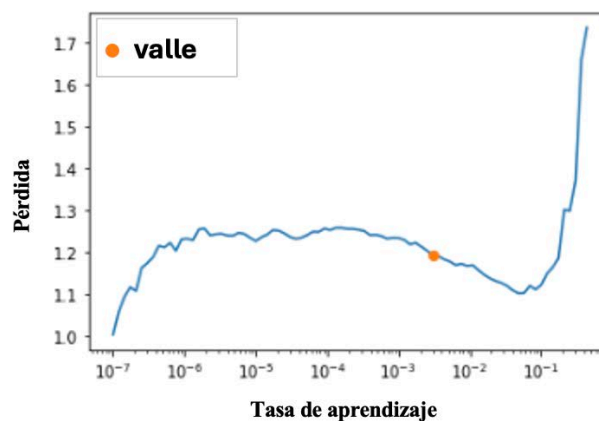


Figura 3-75: Curva de aprendizaje de la ResNet34 con la última capa modificada para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 4

La **Tabla 3-97** muestra los parámetros utilizados durante el entrenamiento. Se empleó un coeficiente de aprendizaje de $1 \cdot 10^{-3}$ y el stride se mantuvo en 1, asegurando que el modelo capture las características relevantes con alta resolución.

Tabla 3-97: Parámetros utilizados para la ResNet34 con la última capa modificada para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 4

Validación (%BD)	Tipo de red	Coeficiente de aprendizaje	Batch size (im/lote)	Stride	Tamaño de la imagen (pxV × pxH × RGB)
20	ResNet-34	$1 \cdot 10^{-3}$	64	1	224 x 224 x 3

La **Tabla 3-98** resume los ciclos de entrenamiento y validación interna. La pérdida de entrenamiento disminuye progresivamente desde 0,839 en el ciclo 0 hasta 0,421 en el

Capítulo 3: Resultados y discusión

ciclo 6. La pérdida de validación interna muestra fluctuaciones, alcanzando un mínimo de 0,289 en el ciclo 6. La exactitud, sin embargo, mejora consistentemente, alcanzando un 86,51% en el ciclo final, lo que indica que el modelo logra capturar las características más relevantes en las últimas etapas del entrenamiento.

Tabla 3-98: Ciclos de entrenamiento-validación interna de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 4

Ciclo	Pérdida de entrenamiento	Pérdida de validación interna	Exactitud (%)	Tiempo (s)
0	0,838	0,676	0,648	00:09
1	0,741	0,434	0,800	00:09
2	0,672	0,766	0,604	00:10
3	0,576	0,335	0,859	00:10
4	0,495	0,300	0,862	00:09
5	0,421	0,288	0,865	00:10

La **Tabla 3-99** presenta la matriz de confusión, en la que se observa que el modelo clasificó correctamente 219 imágenes como "C" (Conforme) y 32 imágenes como "NC" (No Conforme), con un total de 90 errores de clasificación (64 falsos negativos y 26 falsos positivos). Estos resultados indican que, aunque el modelo logra un rendimiento decente, la variabilidad en la pérdida de validación interna sugiere que aún hay margen para mejorar su capacidad de generalización.

Tabla 3-99: Matriz de confusión de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 4

	Observación Conforme	Observación No Conforme	Total
Predicción conforme	219	64	283
Predicción no conforme	26	32	58
Total	245	96	341
Precisión	0,894	0,333	0,736

La **Tabla 3-100** presenta el porcentaje de éxito obtenido por el modelo ResNet34 con la última capa optimizada, en la tarea de clasificación de imágenes del aceite lubricante

Capítulo 3: Resultados y discusión

O-1236 en el Grupo 4. Tras evaluar el rendimiento del modelo, se registraron 251 aciertos y 90 fallos en las predicciones, lo que equivale a un porcentaje de éxito del 73,6 %.

Tabla 3-100: Porcentaje de éxito de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 4

Comprobación de resultados	
Número de fallos de predicción	90
Número de aciertos de predicción	251
Porcentaje de éxito en la predicción	73,6 %

En lo que respecta a los errores de validación, **Figura 3-76**, se observó que la optimización de la última capa para el aceite O-1236 mostró algunas variaciones, con errores en ciertos ciclos de validación. Esto indica que el modelo no logró captar completamente las características necesarias para hacer buenas predicciones.

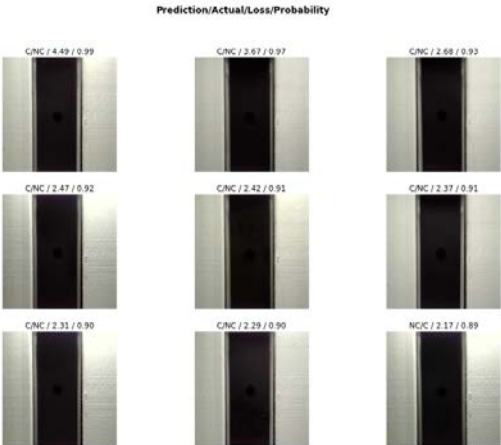


Figura 3-76: Errores de validación de la ResNet34 con la última capa modificada para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 4

Estas muestras no fueron clasificadas adecuadamente debido a varios factores. En primer lugar, la uniformidad en el color y las características visuales de las imágenes puede haber causado confusión en el modelo, ya que no hay suficientes diferencias visibles entre las muestras para que el modelo distinga correctamente entre las clases "Conforme" y "No Conforme". Además, el bajo contraste y la similitud en el entorno pueden haber contribuido a que el modelo no capture las variaciones sutiles necesarias para una clasificación precisa. Otro factor importante es que el modelo puede estar sobre ajustado a características no relevantes, como sombras o reflejos, en lugar de centrarse en las verdaderas diferencias entre las muestras. Esto sugiere que el conjunto de datos de entrenamiento puede no haber sido lo suficientemente diverso, o que el modelo no fue

Capítulo 3: Resultados y discusión

diseñado para identificar las características correctas, lo que llevó a errores de clasificación. Por último, la iluminación homogénea en todas las imágenes puede haber limitado la capacidad del modelo para distinguir detalles relevantes, haciendo que confunda las muestras y clasifique incorrectamente algunas de ellas.

3.6.3.4.4 Optimización de todas las capas para el aceite O-1236

En este apartado se evalúa el rendimiento del modelo ResNet-34 con la optimización de todas las capas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 4. A diferencia de la optimización de solo la última capa, este enfoque permite un ajuste completo del modelo, lo que puede mejorar la capacidad del modelo para extraer y generalizar características complejas.

La **Figura 3-77** muestra cómo la pérdida varía en función de la tasa de aprendizaje durante el entrenamiento de un modelo. A medida que la tasa de aprendizaje aumenta desde 10^{-7} , la pérdida disminuye inicialmente, lo que indica una mejora en el rendimiento del modelo. Este descenso continúa hasta alcanzar un punto mínimo o valle alrededor de 10^{-3} , marcado con un punto naranja, donde la pérdida es más baja (aproximadamente 1,1). Este punto de valle representa la tasa de aprendizaje óptima, donde el modelo logra un buen equilibrio entre la rapidez de la convergencia y la estabilidad en el ajuste de los parámetros. Sin embargo, después de este punto, al aumentar la tasa de aprendizaje más allá de 10^{-2} , la pérdida comienza a incrementarse rápidamente, lo que sugiere que el modelo se desestabiliza y pierde capacidad para ajustar correctamente los parámetros. Este comportamiento indica que una tasa de aprendizaje demasiado alta conduce a un mal ajuste y a un rendimiento deficiente del modelo. Por tanto, el gráfico ayuda a identificar la tasa de aprendizaje adecuada para maximizar el rendimiento del modelo y evitar el sobreajuste o un entrenamiento ineficiente.

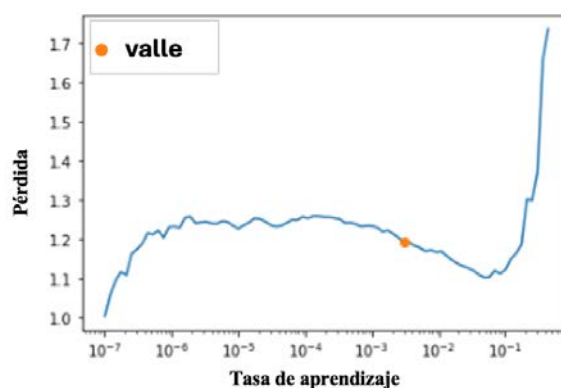


Figura 3-77: Curva de aprendizaje de la ResNet34 con todas las capas modificadas para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 4

Capítulo 3: Resultados y discusión

La **Tabla 3-101** describe los parámetros empleados durante el entrenamiento. En este caso, se aplicó una tasa de aprendizaje reducida de $2 \cdot 10^{-3}$ para asegurar un ajuste más preciso de los parámetros, mientras que el stride se mantuvo en 1, permitiendo capturar los detalles más relevantes de las imágenes con alta resolución.

Tabla 3-101: Parámetros utilizados para la ResNet34 con todas las capas modificadas para el estudio del control de calidad del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 4

Validación (%BD)	Tipo de red	Coeficiente de aprendizaje	Batch size (im/lote)	Stride	Tamaño de la imagen (pxV × pxH × RGB)
20	ResNet-34	$2 \cdot 10^{-3}$	64	1	224 x 224 x 3

En la **Tabla 3-102** se observa cómo el modelo va mejorando su rendimiento a lo largo de los ciclos de entrenamiento. En los primeros ciclos, la pérdida de entrenamiento y la pérdida de validación interna varían, mostrando que el modelo aún está ajustando sus parámetros. Estos cambios reflejan la fase inicial de aprendizaje, donde el modelo aún está encontrando el equilibrio entre entrenar con los datos y generalizar correctamente. En los últimos ciclos, el modelo muestra una clara tendencia hacia la mejora. A medida que la pérdida de validación interna disminuye, la exactitud sube, alcanzando un 94% en los últimos ciclos. Esto indica que el modelo ha mejorado su capacidad para reconocer patrones y hacer predicciones más precisas, estabilizando su rendimiento tanto en los datos de entrenamiento como en los de validación. La disminución en el tiempo por ciclo también sugiere una optimización del proceso de aprendizaje, consolidando la eficacia del entrenamiento.

Tabla 3-102: Ciclos de entrenamiento-validación interna de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 4

Ciclo	Pérdida de entrenamiento	Pérdida de validación interna	Exactitud (%)	Tiempo (s)
0	0,222	0,192	0,926	00:07
1	0,209	0,224	0,912	00:07
2	0,199	0,150	0,946	00:07
3	0,177	0,165	0,936	00:07
4	0,155	0,146	0,936	00:06
5	0,137	0,146	0,941	00:06

Capítulo 3: Resultados y discusión

La **Tabla 3-103** presenta la matriz de confusión, que muestra que el modelo clasificó correctamente 267 imágenes como "C" (Conforme) y 28 como "NC" (No Conforme), con solo 46 errores de clasificación (16 falsos negativos y 30 falsos positivos). Estos resultados destacan la superioridad de la optimización de todas las capas en comparación con la optimización de solo la última capa, reflejando una mejor capacidad de generalización y mayor precisión en la clasificación.

Tabla 3-103: Matriz de confusión de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 4

	Observación Conforme	Observación No Conforme	Total
Predicción Conforme	267	16	313
Predicción No Conforme	30	28	58
Total	327	44	371
Precisión	0,908	0,636	0,865

La **Tabla 3-104** presenta el porcentaje de éxito obtenido por el modelo ResNet34 con todas las capas modificadas, en la tarea de clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 4. Tras evaluar el rendimiento del modelo, se registraron 295 aciertos y 46 fallos en las predicciones, lo que equivale a un porcentaje de éxito del 86,51 %.

Tabla 3-104: Porcentaje de éxito de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 4

Comprobación de resultados	
Número de fallos de predicción	46
Número de aciertos de predicción	295
Porcentaje de éxito en la predicción	86,51%

En cuanto a los errores de validación, **Figura 3-78**, la optimización de todas las capas mostró una reducción significativa de errores y una mayor estabilidad en los resultados, lo que sugiere que el modelo fue capaz de aprender y generalizar mejor las características del aceite O-1236, logrando un mejor rendimiento en la validación.

Capítulo 3: Resultados y discusión

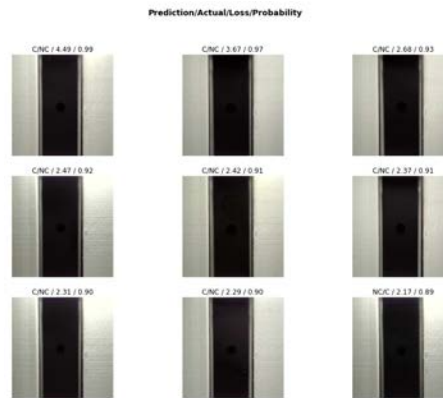


Figura 3-78: Errores de validación de la ResNet34 con todas las capas modificadas para la clasificación de imágenes del aceite lubricante O-1236 en el Grupo 4

El principal motivo por el cual estas imágenes no fueron clasificadas correctamente puede estar relacionado con la similitud visual entre las clases "Conforme" y "No Conforme". Las imágenes presentan características muy parecidas en términos de color, estructura y fondo. La falta de diferencias visuales notables probablemente dificulta que el modelo distinga correctamente entre ambas clases, dado que las variaciones son mínimas y pueden no haber sido suficientemente aprendidas durante el entrenamiento. Esta falta de información clara podría llevar a una clasificación incorrecta. Otro posible factor es la iluminación homogénea y el bajo contraste en las imágenes. En un entorno con pocas variaciones de luz y contraste, el modelo puede no ser capaz de captar los pequeños detalles que lo ayudarían a separar las clases. Si todas las imágenes son similares en términos de fondo y luz, el modelo podría quedarse "estancado" en los patrones no esenciales y fallar al clasificar, ya que no tiene características distintivas suficientes que usar para la diferenciación.

Finalmente, el entrenamiento del modelo con un conjunto de datos poco diverso podría haber limitado su capacidad de generalización. Si el modelo no fue expuesto a suficientes ejemplos que representaran todas las posibles variaciones de las muestras durante el entrenamiento, podría no haber aprendido a manejar las diferencias sutiles que se ven en estas imágenes. Esto lleva a que las predicciones se basen en patrones que no son generalizables, lo que aumenta la probabilidad de errores en la clasificación de nuevas imágenes.

En síntesis, la diferencia en precisión entre los modelos que solo optimizan la última capa y aquellos que optimizan todas las capas es aproximadamente del 8%, con precisiones del 86% y 94%, respectivamente. Aunque ambos métodos cumplen los objetivos establecidos, la optimización completa del modelo permite una mayor

Capítulo 3: Resultados y discusión

capacidad de aprendizaje y robustez. Este ajuste total mejora la capacidad del modelo para adaptarse a diferentes tipos de datos y manejar variaciones en nuevas muestras de manera más efectiva, lo que conduce a resultados más consistentes. Por esta razón, la optimización de todas las capas es preferible, ya que maximiza el rendimiento general del modelo y asegura una mayor estabilidad en escenarios complejos y desafiantes.

3.6.3.4.5 Comparación general entre la aplicación del modelo ResNet-34 en el control de calidad de los aceites O-1178 y O-1236 para el Grupo 4

En este apartado se lleva a cabo una evaluación comparativa del rendimiento del modelo ResNet34 aplicado a la clasificación de los aceites lubricantes O-1178 y O-1236 en el Grupo 4. Se examinan las diferencias en el desempeño del modelo al comparar dos enfoques: la optimización exclusiva de la última capa frente a la optimización de todas las capas. Además, se analiza cómo cada una de estas estrategias influye en la capacidad del modelo para clasificar ambos aceites de manera precisa, destacando el impacto de cada método en los resultados de clasificación y su efectividad general.

Para el aceite O-1178:

- **Optimización de la última capa:** Para el aceite O-1178 en el Grupo 4, la optimización de solo la última capa mostró un rendimiento aceptable, con una exactitud final del 92.20%. La matriz de confusión correspondiente (**Tabla 3-91**) muestra que el modelo clasificó correctamente 145 imágenes como "C" (Conforme) y 43 imágenes como "NC" (No Conforme), con un total de 17 errores de clasificación (12 falsos negativos y 5 falsos positivos). Estos resultados sugieren que, aunque el modelo logró un rendimiento razonable, la optimización de solo la última capa tiene limitaciones en cuanto a la capacidad del modelo para generalizar completamente, especialmente al capturar las características más complejas del aceite O-1178.
- **Optimización de todas las capas:** Al optimizar todas las capas, el rendimiento del modelo para el aceite O-1178 mejoró ligeramente, con una exactitud final del 94.15%. La matriz de confusión (**Tabla 3-95**) muestra una ligera mejora, con 147 imágenes correctamente clasificadas como "C" y 42 como "NC", resultando en un total de 16 errores de clasificación (10 falsos negativos y 6 falsos positivos). Esta optimización completa permitió una mejor generalización del modelo, capturando con mayor precisión las características del aceite O-1178 y reduciendo los errores de clasificación.

Capítulo 3: Resultados y discusión

Para el aceite O-1236:

- **Optimización de la última capa:** Para el aceite O-1236 en el Grupo 4, la optimización de la última capa también mostró un rendimiento razonable, con una exactitud final de 86.51%. La pérdida de validación interna fue algo variable, lo que indica desafíos en la estabilidad y la capacidad del modelo para generalizar. La matriz de confusión mostró un total de 90 errores de clasificación, con una alta proporción de falsos negativos (64), lo que sugiere que, aunque el modelo fue capaz de aprender ciertas características, la optimización de solo la última capa no fue suficiente para capturar completamente la complejidad del aceite O-1236.
- **Optimización de todas las capas:** La optimización de todas las capas para el aceite O-1236 resultó en una mejora considerable del rendimiento del modelo. La exactitud final alcanzó el 94.15%, con una pérdida de validación interna más estable en comparación con la optimización de solo la última capa. La matriz de confusión mostró una reducción significativa en los errores de clasificación, con un total de 33 errores (16 falsos negativos y 30 falsos positivos). Estos resultados indican que la optimización completa es esencial para capturar de manera más efectiva las características relevantes del aceite O-1236 y mejorar la capacidad de generalización del modelo.

En el Grupo 4, tanto para el aceite O-1178 como para el O-1236, la optimización de todas las capas de la ResNet-34 demostró ser superior en comparación con la optimización de solo la última capa. Este enfoque permitió una mejor extracción de características, lo que resultó en una mayor estabilidad del modelo, mejor capacidad de generalización y una mayor precisión en la clasificación. A pesar de que la optimización de solo la última capa mostró un rendimiento razonable, la complejidad de los aceites O-1178 y O-1236 requiere un enfoque de optimización integral para obtener los mejores resultados en la clasificación dentro del Grupo 4.

3.6.4 Análisis comparativo de los resultados

En el presente estudio, se ha realizado un análisis comparativo del rendimiento de dos modelos de clasificación: la regresión logística binaria (estudiada en las secciones 3.2.1.6 y 3.2.2.6 del documento) y el modelo ResNet-34, un tipo de red neuronal

Capítulo 3: Resultados y discusión

profunda. Ambos modelos se han aplicado para clasificar dos tipos específicos de aceites lubricantes: O-1178 (utiliza principalmente como aceite de transmisión) y O-1236 (emplea como aceite de motor).

El objetivo de este análisis es comparar el desempeño de la Regresión Logística Binaria, un modelo estadístico tradicional basado en datos de ensayos fisicoquímicos, con el modelo ResNet-34, un modelo de red neuronal profunda diseñado para la clasificación de imágenes. Se analizarán las estrategias de optimización empleadas en ResNet-34 y cómo estas afectan su rendimiento en comparación con la regresión logística.

En las siguientes secciones, se analizará cómo influyen las estrategias de optimización y las condiciones de captura en el rendimiento del modelo. Se evaluará tanto la optimización de la última capa como la optimización total del modelo ResNet-34. Además, se llevará a cabo una comparación directa entre la Regresión Logística Binaria y el modelo ResNet-34 en la tarea de clasificar los aceites O-1178 y O-1236 como “Conforme” o “No conforme”.

3.6.4.1 Impacto de las estrategias de optimización y condiciones de captura en el rendimiento del modelo

En este apartado, se evalúan las estrategias de optimización aplicadas al modelo, destacando cómo han influido en el rendimiento de la clasificación para los aceites O-1178 y O-1236. Las diferencias en el comportamiento del modelo al optimizar la última capa versus todas las capas subrayan la necesidad de seleccionar la estrategia adecuada según las características inherentes de cada tipo de aceite.

La **Tabla 3-105** resume los resultados clave de los ensayos realizados en los Grupos 1, 2, 3 y 4. Esta tabla proporciona una visión comparativa de las pérdidas de entrenamiento y validación interna, así como del tiempo requerido para cada ciclo en función de las diferentes estrategias de optimización aplicadas a los aceites O-1178 y O-1236. Este análisis es fundamental para entender cómo las diferentes estrategias afectan el rendimiento general del modelo para la clasificación de los aceites como “Conformes” o “No Conformes”.

Capítulo 3: Resultados y discusión

Tabla 3-105: Resultados de los diferentes modelos, así como las pérdidas tanto en el entrenamiento como en la validación interna.

Grupo	Optimización de la ResNet-34	Tipo de aceite	Número de ciclos	Pérdida de entrenamiento	Pérdida de validación interna	Tiempo (s)
1	Última capa	O-1178	8	0,322	0,197	14
	Todas las capas		5	0,144	0,306	14
	Última capa	O-1236	9	0,474	0,595	20
	Todas las capas		9	0,184	0,534	20
2	Última capa	O-1178	5	0,262	0,085	11
	Todas las capas		5	0,029	0,016	11
	Última capa	O-1236	8	0,229	0,523	8
	Todas las capas		5	0,026	0,251	8
3	Última capa	O-1178	11	0,106	0,203	3
	Todas las capas		5	0,061	0,220	3
	Última capa	O-1236	11	0,483	0,691	2
	Todas las capas		9	0,129	0,931	2
4	Última capa	O-1178	5	0,455	0,194	7
	Todas las capas		5	0,137	0,146	6
	Última capa	O-1236	5	0,421	0,288	10
	Todas las capas		5	0,137	0,146	6

A partir de la **Tabla 3-105** se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- **Grupo 1:** Se observa que la optimización completa para el aceite O-1178 reduce significativamente la pérdida de validación interna en comparación con la optimización de la última capa, lo que indica una mejor capacidad de

Capítulo 3: Resultados y discusión

generalización. Para el aceite O-1236, la optimización completa también muestra una mejora notable en la pérdida de validación interna.

- **Grupo 2:** Similar al Grupo 1, la optimización completa para ambos aceites mejora considerablemente la pérdida de validación interna. Notablemente, la pérdida de validación para O-1178 con optimización completa es muy baja (0.016), lo que sugiere una alta precisión en este grupo.
- **Grupo 3:** Aunque la optimización completa continúa mostrando mejores resultados, la diferencia entre las pérdidas de validación interna de la optimización de la última capa y la completa es más estrecha, especialmente en el aceite O-1236. Sin embargo, la optimización completa sigue siendo superior en términos de pérdida y tiempo de ejecución.
- **Grupo 4:** Al igual que en los grupos anteriores, la optimización completa reduce significativamente la pérdida de validación interna para ambos aceites, indicando una mejor capacidad de generalización. Es destacable que, para el aceite O-1178, la diferencia en la pérdida de validación es considerablemente menor, lo que podría indicar una menor complejidad en las características a extraer en este grupo.

3.6.4.1.1 Comparación entre la optimización de la última capa y la optimización completa del modelo ResNet-34

La elección de la estrategia de optimización es un factor crítico que influye significativamente en el rendimiento del modelo de clasificación. Al comparar la optimización de la última capa con la optimización completa de todas las capas, se observan diferencias notables en la capacidad del modelo para aprender y generalizar las características de los aceites O-1178 y O-1236.

- **Optimización de la última capa:** Al optimizar únicamente la última capa del modelo, se observó una rápida disminución en la pérdida de entrenamiento inicial, reflejando una convergencia acelerada. Sin embargo, esta ventaja se vio limitada por una estabilización prematura de la pérdida de validación, lo que indica que la optimización se queda corta al no ajustar las capas profundas del modelo. Al analizar los efectos de esta estrategia en los dos tipos de aceite estudiados, se observan diferencias claras en cómo el modelo ResNet-34 maneja las características específicas de cada uno

- **Aceite O-1178:** La optimización de la última capa mostró limitaciones significativas en la capacidad del modelo para generalizar y clasificar

correctamente este aceite, debido a la complejidad de las características que deben extraerse para evaluarlo adecuadamente. Esta falta de generalización se tradujo en un número considerable de errores de validación y clasificación, lo que indica que la simple optimización de la última capa no es suficiente para capturar todas las características esenciales del aceite de caja de cambio.

- **Aceite O-1236:** Aunque la optimización de la última capa también presentó limitaciones para el aceite de motor, el modelo mostró una ligera ventaja en términos de convergencia. Sin embargo, al igual que con el aceite O-1178, la capacidad de generalización fue insuficiente, lo que resultó en una precisión limitada y una cantidad notable de errores de validación y clasificación.
- **Optimización de todas las capas:** La optimización completa del modelo resultó en un rendimiento significativamente superior para ambos aceites. Este enfoque permitió un ajuste más profundo de las características, lo que se reflejó en una mejor alineación entre las curvas de aprendizaje y validación, y una mayor capacidad de generalización. Al analizar el impacto de la optimización completa en cada tipo de aceite, se destacan las siguientes observaciones clave:
 - **Aceite O-1178:** El modelo se benefició enormemente de la optimización completa, mostrando una mejora considerable en la precisión de la clasificación y una reducción significativa en los errores de validación en la clasificación. Estos resultados subrayan la importancia de ajustar las capas profundas del modelo para capturar completamente las características complejas del aceite de caja de cambio.
 - **Aceite O-1236:** Aunque las características del aceite de motor pueden ser más fáciles de modelar, la optimización completa también resultó en mejoras notables en la precisión y en la estabilidad del modelo. La optimización de todas las capas permitió al modelo refinar tanto las características simples como las complejas, lo cual es esencial para aplicaciones que requieren una alta precisión en la clasificación de diferentes tipos de aceites.

3.6.4.1.2 Comparación entre la Regresión Logística Binaria y ResNet-34 en la clasificación de los aceites lubricantes O-1178 y O-1236

En este apartado, se lleva a cabo un análisis comparativo entre la Regresión Logística Binaria, estudiada previamente en los apartados 3.2.1.6 y 3.2.2.6 de este capítulo, y el modelo de red neuronal ResNet-34. El objetivo es evaluar el rendimiento de ambos

Capítulo 3: Resultados y discusión

enfoques en la clasificación de los dos tipos de aceites lubricantes analizados: O-1178 y O-1236.

Se presentan los resultados obtenidos por cada modelo en la clasificación de estos aceites, destacando las diferencias entre la Regresión Logística Binaria, que se basa en características derivadas de ensayos fisicoquímicos, y el modelo ResNet-34, que utiliza imágenes de los aceites para realizar la clasificación. El análisis comparativo se centra en métricas como la precisión, el porcentaje de éxito en la predicción, el número de aciertos y los fallos, permitiendo así una evaluación completa del rendimiento de cada modelo.

A continuación, **Tabla 3-106**, se presentan los resultados obtenidos para el aceite O-1178, evaluando las métricas de precisión, aciertos, fallos y porcentaje de éxito de cada modelo. Se detallan los resultados correspondientes tanto a la regresión logística binaria como al modelo ResNet-34 en sus dos configuraciones: optimización de la última capa y optimización completa.

Tabla 3-106: Resultados de la Regresión Logística Binaria y el modelo ResNet-34 en la clasificación del aceite O-1178

Método	Configuración	Grupo	Precisión	Aciertos	Fallos	Porcentaje de éxito
Regresión Logística Binaria	N/A	N/A	92.6%	300	24	92.59%
ResNet-34	Última capa optimizada	1	95.3%	101	5	95.28%
		2	97.6%	82	2	97.62%
		3	92.3%	72	6	92.3%
		4	91.7%	188	17	91.7%
ResNet-34	Todas las capas optimizadas	1	95.3%	101	5	95.28%
		2	98.8%	83	1	98.81%
		3	96.1%	75	3	96.15%
		4	92.2%	189	16	92.19%

Capítulo 3: Resultados y discusión

El análisis de los resultados de la **Tabla 3-106** para O-1178 revela que el modelo ResNet34, en ambas configuraciones (última capa optimizada y todas las capas optimizadas), supera al modelo de Regresión Logística Binaria en términos de precisión y porcentaje de éxito en la predicción. La Regresión Logística Binaria logra un porcentaje de éxito del 92,59%, con 300 aciertos y 24 fallos, lo que indica un rendimiento sólido. Sin embargo, ResNet34 muestra mejoras notables:

- **Optimización de la última capa:** Aunque esta configuración de ResNet34 ya supera a la Regresión Logística, con un porcentaje de éxito que varía entre 91,7% y 97,6% según el grupo estudiado, el aumento más significativo se observa en el Grupo 2, con un 97,62% de éxito, lo que refleja la capacidad de ResNet34 para capturar patrones más complejos incluso con ajustes limitados.
- **Optimización de todas las capas:** Esta configuración maximiza el rendimiento de ResNet34, alcanzando una precisión promedio más alta en todos los grupos. En el Grupo 2, la precisión llega al 98,81%, lo que destaca la importancia de ajustar todas las capas para obtener el mejor desempeño posible. Los resultados de ResNet34 en esta configuración son consistentemente superiores, sugiriendo que la red neuronal es más adecuada para este tipo de datos.

Por tanto, el modelo ResNet34, especialmente con todas las capas optimizadas, demuestra ser más eficaz que el modelo de Regresión Logística Binaria para la clasificación de O-1178, proporcionando mayor precisión y un menor número de fallos en la predicción, junto con un proceso de evaluación más eficiente.

Los resultados para el aceite O-1236, **Tabla 3-107**, mostraron una mayor variabilidad en la clasificación. A continuación, se presentan los resultados de la Regresión Logística Binaria y del modelo ResNet-34 en sus dos configuraciones:

Capítulo 3: Resultados y discusión

Tabla 3-107: Resultados de la Regresión Logística Binaria y el modelo ResNet-34 en la clasificación del aceite O-1236

Método	Configuración	Grupo	Precisión	Aciertos	Fallos	Porcentaje de éxito
Regresión Logística Binaria	N/A	N/A	91%	294	30	90.74%
ResNet-34	Última capa optimizada	1	71.4%	125	50	71.43%
		2	85.4%	41	7	85.42%
		3	75.5%	37	12	75.51%
		4	73.6%	251	90	73.6%
ResNet-34	Todas las capas optimizadas	1	80.6%	141	34	80.57%
		2	93.7%	45	3	93.75%
		3	75.6%	39	10	75.59%
		4	86.5%	295	46	86.51%

Tal y como se observa en la **Tabla 3-107**, el análisis de los resultados para el aceite O-1236 revela que el modelo ResNet-34, en ambas configuraciones (optimización de la última capa y optimización de todas las capas), ofrece un rendimiento variable en comparación con el modelo de Regresión Logística Binaria, debido a la mayor complejidad de los datos asociados a este aceite. El modelo de Regresión Logística Binaria alcanza un porcentaje de éxito del 90,74%, con 294 aciertos y 30 fallos, lo que representa un resultado sólido. Sin embargo, el modelo ResNet-34 muestra un rendimiento dependiente de la estrategia de optimización utilizada:

- **Optimización de la última capa:** En este escenario, el rendimiento de ResNet-34 no supera de manera consistente al modelo de Regresión Logística Binaria. En el Grupo 1, el porcentaje de éxito es únicamente del 71,43%, señalando que el modelo tiene dificultades para capturar las complejidades inherentes a los datos (imágenes). No obstante, en el Grupo 2, se observa una mejora notable en el porcentaje de éxito, alcanzando un 85,42%. Esto indica que, aunque la optimización de la última capa puede ser eficaz en ciertos contextos, no resulta suficiente para abordar la variabilidad y complejidad de los datos en todos los grupos especialmente para las imágenes del aceite O-1236.

- **Optimización de todas las capas:** Al optimizar todas las capas del modelo ResNet-34, se observa una mejora significativa en su rendimiento. En el Grupo 2, la precisión alcanza el 93,75%, mientras que en el Grupo 4 llega al 86,51%. Esto demuestra que la optimización de todas las capas del modelo es clave para mejorar su capacidad de clasificación en este tipo de aceites. Sin embargo, aún se detecta cierta variabilidad entre los grupos, lo que indica que, a pesar de que el modelo ResNet-34 optimizado en todas sus capas supera el rendimiento de la configuración con solo la última capa optimizada, el modelo sigue encontrando dificultades al manejar la estructura compleja de los datos (imágenes) del aceite O-1236.

Por tanto, aunque la regresión logística binaria proporciona un rendimiento fiable en la clasificación del aceite lubricante O-1236, el modelo ResNet-34, al optimizarse todas sus capas presenta mejoras notables en términos de precisión y en la clasificación general. Esto resalta la importancia de ajustar adecuadamente la red neuronal para gestionar los datos más complejos asociados con este tipo de aceite.

3.6.4.2 Evaluación del desempeño del Modelo ResNet-34 en la clasificación de imágenes de los aceites O-1178 y O-1236

En este apartado se lleva a cabo un análisis de las imágenes de los aceites lubricantes O-1178 y O-1236, empleando un modelo de clasificación construido sobre la arquitectura ResNet-34. Se investigan las diferencias visuales entre las imágenes de ambos aceites y cómo estas variaciones influyen en el desempeño del modelo. El estudio se realiza a los cuatro grupos estudiados, considerando tanto la optimización solo de la última capa como la optimización de todas las capas del modelo. Además, se relaciona las características cromáticas de los aceites con los resultados cuantitativos obtenidos.

3.6.4.2.1 Evaluación del rendimiento del modelo ResNet-34 en la clasificación de imágenes del Grupo 1

En este apartado se analizan las imágenes de los aceites O-1178 y O-1236 pertenecientes al Grupo 1. Este análisis se enfoca en las características visuales de las imágenes y cómo estas influyen en el rendimiento del modelo de clasificación ResNet-34, tanto en la optimización de la última capa como en la optimización de todas las capas. Se estudian los errores de clasificación observados y se establece una relación entre el color del aceite y los resultados obtenidos.

Capítulo 3: Resultados y discusión

- **Aceite O-1178:** Las imágenes presentan un color marrón claro y uniforme, lo cual facilita la extracción de características consistentes por parte del modelo. La uniformidad en el brillo y contraste es evidente, lo que permite un procesamiento más eficiente. Estas características visuales permiten que el modelo de ResNet-34 logre un rendimiento superior, con pocos errores de clasificación. Incluso con la optimización de la última capa, el modelo muestra un buen desempeño, y la optimización completa mejora ligeramente la precisión. En la optimización de la última capa, la pérdida de entrenamiento de 0,322 y la pérdida de validación interna de 0,197 sugieren que el modelo se adapta bien a la uniformidad del color. El tiempo de procesamiento de 14 segundos indica que el modelo no necesita realizar ajustes complejos para alcanzar una precisión alta. Y en la optimización de todas las capas, con una pérdida de entrenamiento de 0,144, el modelo muestra una mejora en la precisión, aunque la pérdida de validación interna aumenta ligeramente a 0,306, lo que podría indicar un sobreajuste debido a la simpleza y uniformidad del color.
- **Aceite O-1236:** Las imágenes del aceite O-1236 muestran una mayor variabilidad en la tonalidad, desde marrón oscuro hasta negro. El brillo es menos uniforme y el contraste es más alto, lo que introduce complejidad adicional en la clasificación. Las imágenes de este aceite presentan variaciones en la superficie que no son consistentes o regulares, lo que genera más errores de clasificación. Por ello se introduce variabilidad visual que puede dificultar la tarea del modelo de IA para realizar una clasificación precisa, ya que el modelo debe lidiar con estas inconsistencias al extraer características relevantes. La optimización de todas las capas incrementa el rendimiento, aunque no logra eliminar por completo la disparidad en comparación con O-1178.

En el análisis de los resultados cuantitativos, se observa que la optimización de la última capa presenta pérdidas de 0,229 en entrenamiento y 0,523 en validación interna. Estos valores indican una mejora con respecto al Grupo 1, lo que sugiere que el modelo está comenzando a adaptarse mejor a las características del aceite. Sin embargo, el color oscuro del aceite sigue representando un desafío significativo para el modelo, impidiendo que alcance una precisión óptima en la clasificación.

Por otro lado, cuando se realiza la optimización de todas las capas, las pérdidas se reducen notablemente, alcanzando 0,026 en entrenamiento y 0,251 en validación interna. Esta mejora refleja que la optimización completa permite al modelo

manejar de manera más efectiva las complejidades introducidas por la variabilidad del color oscuro. A pesar de esta mejora, la presencia de un color oscuro con variabilidad sigue dificultando el proceso de clasificación, lo que sugiere que la capacidad del modelo para generalizar en estas condiciones aún está limitada.

3.6.4.2.2 Evaluación del rendimiento del modelo ResNet-34 en la clasificación de imágenes del Grupo 2

El Grupo 2 proporciona un conjunto adicional de imágenes de los aceites O-1178 y O-1236. En este apartado, se realiza un análisis de sus características visuales y se evalúa cómo estas afectan el desempeño del modelo ResNet-34 bajo dos estrategias de optimización. El objetivo es identificar patrones consistentes y diferencias clave entre ambos aceites en este grupo específico.

- **Aceite O-1178:** En el Grupo 2, las imágenes de O-1178 mantienen la uniformidad visual observada anteriormente. La consistencia en color y textura permite al modelo realizar una clasificación precisa con pocos errores, incluso con la optimización de la última capa. La optimización completa de todas las capas mejora ligeramente la precisión, lo que indica que las características visuales son capturadas efectivamente desde etapas tempranas.

En el análisis de los resultados cuantitativos, se observa que la optimización de la última capa presenta una pérdida de entrenamiento de 0,262 y una pérdida de validación interna de 0,085. Estos valores reflejan que la uniformidad del color del aceite O-1178 permite al modelo adaptarse rápidamente a sus características, logrando una clasificación precisa con un tiempo de procesamiento reducido de 11 segundos. La uniformidad cromática simplifica la tarea del modelo, contribuyendo a un rendimiento estable y eficiente.

Al realizar la optimización de todas las capas, las pérdidas disminuyen significativamente, alcanzando 0,029 en entrenamiento y 0,016 en validación interna. Esta mejora refleja que la optimización completa permite al modelo aprovechar al máximo la uniformidad cromática del aceite O-1178, mejorando aún más la precisión de la clasificación. La reducción de las pérdidas demuestra que el modelo logra captar con mayor eficacia los patrones visuales consistentes, resultando en un rendimiento superior.

Capítulo 3: Resultados y discusión

- **Aceite O-1236:** Las imágenes de O-1236 en este grupo presentan una mayor complejidad visual, con variabilidad en color y brillo. Las pocas variaciones en el color, el contraste y la textura hacen que sea más difícil para el modelo identificar características consistentes con solo la optimización de la última capa. La optimización completa mejora el rendimiento, reduciendo los errores, pero el número de errores sigue siendo superior en comparación con O-1178. Esto sugiere que, aunque la optimización más profunda ayuda a capturar detalles adicionales, la complejidad visual de las imágenes de O-1236 sigue siendo un desafío considerable para el modelo.

En el análisis de los resultados cuantitativos, se observa que la optimización de la última capa presenta pérdidas de 0,229 en entrenamiento y 0,523 en validación interna. Estos valores indican una mejora con respecto al Grupo 1, lo que sugiere que el modelo está comenzando a adaptarse mejor a las características del aceite. Sin embargo, el color oscuro del aceite sigue representando un desafío significativo para el modelo, impidiendo que alcance una precisión óptima en la clasificación.

Por otro lado, cuando se realiza la optimización de todas las capas, las pérdidas se reducen notablemente, alcanzando 0,026 en entrenamiento y 0,251 en validación interna.

Esta mejora refleja que la optimización completa permite al modelo manejar de manera más efectiva las complejidades introducidas por la variabilidad del color oscuro. A pesar de esta mejora, la presencia de un color oscuro con variabilidad sigue dificultando el proceso de clasificación, lo que sugiere que la capacidad del modelo para generalizar en estas condiciones aún está limitada.

3.6.4.2.3 Evaluación del rendimiento del modelo ResNet-34 en la clasificación de imágenes del Grupo 3

El análisis del Grupo 3 se centra en evaluar el rendimiento del modelo ResNet-34 cuando se enfrenta a las imágenes de los aceites O-1178 y O-1236 en este conjunto de datos. Este apartado explora las particularidades de las imágenes de este grupo y cómo las diferentes técnicas de optimización impactan en la precisión de la clasificación y la cantidad de errores cometidos.

- **Aceite O-1178:** Las imágenes de O-1178 en el Grupo 3 son consistentes con los grupos anteriores en términos de tonalidad y textura. La claridad visual facilita que

Capítulo 3: Resultados y discusión

el modelo categorice adecuadamente la mayoría de las imágenes, incluso cuando se optimiza solo la capa final. La optimización de todas las capas ofrece una mejora marginal, lo que refuerza la efectividad del modelo con imágenes simples.

En el análisis de los resultados cuantitativos, se observa que la optimización de la última capa muestra una pérdida de entrenamiento de 0,106 y una pérdida de validación interna de 0,203, con un tiempo de procesamiento reducido a 3 segundos. Estos resultados reflejan que la uniformidad cromática no solo facilita una alta precisión en la clasificación, sino que también permite un procesamiento más rápido. La consistencia del color ayuda al modelo a ajustarse rápidamente a las características visuales, optimizando tanto la precisión como la eficiencia del proceso.

Al optimizar todas las capas, la pérdida de entrenamiento disminuye a 0,061, lo que indica una mejora en la precisión del modelo. Sin embargo, la ligera elevación en la pérdida de validación interna a 0,220 sugiere que, en condiciones de color muy uniforme, la optimización completa puede llevar a un sobreajuste de detalles menores que no son cruciales para la clasificación general. Esto indica que, aunque la optimización completa mejora el rendimiento en ciertos aspectos, puede no ser siempre necesaria para imágenes con características cromáticas tan uniformes.

- **Aceite O-1236:** Las imágenes de O-1236 en el Grupo 3 muestran variaciones en tonalidad, brillo y textura parecen confundir al modelo, dificultando la extracción de características consistentes. Se observa una mayor cantidad de errores de clasificación con la optimización de la última capa en comparación con O-1178. Aunque la optimización de todas las capas reduce los errores, el número de errores sigue siendo considerablemente mayor que con las imágenes de O-1178. Esto sugiere que la complejidad visual de O-1236 continúa siendo un obstáculo significativo para el modelo, incluso con una optimización más profunda.

En el análisis de los resultados cuantitativos, se observa que la optimización de la última capa presenta pérdidas de 0,483 en entrenamiento y 0,691 en validación interna. Estos valores reflejan la dificultad extrema que el modelo enfrenta al intentar clasificar un color tan oscuro. La falta de variabilidad cromática impide que el modelo capte características visuales distintivas, lo que resulta en mayores pérdidas y una menor capacidad para generalizar correctamente.

Aunque la optimización completa mejora la pérdida de entrenamiento, reduciéndola a 0,129, la pérdida de validación interna aumenta significativamente a 0,931. Este incremento sugiere un sobreajuste significativo, donde el modelo intenta compensar la falta de características visuales claras ajustando excesivamente otros aspectos menores, lo que lleva a un rendimiento menos efectivo en la clasificación de imágenes con un color tan oscuro y uniforme.

3.6.4.2.4 Evaluación del rendimiento del modelo ResNet-34 en la clasificación de imágenes del Grupo 4

El Grupo 4 representa un conjunto crítico de imágenes que pone a prueba la robustez del modelo ResNet-34 en la clasificación de los aceites O-1178 y O-1236. Este apartado analiza en detalle cómo las características visuales de las imágenes en este grupo influyen en el rendimiento del modelo bajo las dos estrategias de optimización, y discute la importancia de estos hallazgos para aplicaciones prácticas.

- **Aceite O-1178:** En el Grupo 4, las imágenes de O-1178 continúan mostrando una tonalidad marrón clara y uniforme. El brillo y contraste moderado permiten al modelo mantener un alto nivel de precisión, con pocos errores, tanto en la optimización de la última capa como en la optimización completa.

En el análisis de los resultados cuantitativos, se observa que la optimización de la última capa presenta una pérdida de entrenamiento de 0,455 y una pérdida de validación interna de 0,194. Estos valores indican un rendimiento sólido, reflejando que la uniformidad cromática permite al modelo adaptarse eficazmente a las características del aceite. Además, el tiempo de procesamiento de 7 segundos es eficiente, demostrando que el modelo puede procesar las imágenes de manera rápida y precisa sin necesidad de ajustes complejos.

Cuando se realiza la optimización de todas las capas, las pérdidas se reducen a 0,137 en entrenamiento y 0,146 en validación interna. Esta disminución refleja que la optimización completa sigue beneficiando al modelo, permitiéndole captar con mayor precisión las características visuales del aceite. A pesar de la ya alta precisión alcanzada con la optimización de la última capa, la optimización completa refina aún más el rendimiento, aprovechando al máximo la consistencia cromática del aceite O-1178.

- **Aceite O-1236:** Las imágenes de O-1236 en el Grupo 4 presentan una mayor cantidad de errores de clasificación en comparación con O-1178. Las variaciones en tonalidad, brillo y textura parecen dificultar la tarea del modelo, que lucha por captar características consistentes. La mayor variabilidad en tonalidad, con colores que van desde marrón oscuro hasta negro, introduce un desafío significativo para el modelo. El contraste alto y la textura irregular generan más errores de clasificación, y aunque la optimización de todas las capas mejora el rendimiento del modelo y reduce los errores, pero el número de errores sigue siendo mayor que en O-1178. Esto indica que la complejidad visual de O-1236 continúa siendo un desafío significativo, incluso con una optimización más profunda.

Los resultados cuantitativos muestran una pérdida de entrenamiento de 0,421 y una pérdida de validación interna de 0,288. Estos valores sugieren que, aunque el modelo maneja la variabilidad en el color oscuro con cierta dificultad, logra un rendimiento aceptable. Sin embargo, el tiempo de procesamiento de 10 segundos indica que el modelo requiere más tiempo para ajustar sus parámetros, reflejando la complejidad añadida por la variabilidad cromática.

Con la optimización completa, las pérdidas disminuyen a 0,137 en entrenamiento y 0,146 en validación interna, lo que indica una mejora significativa. Esta mejora sugiere que la optimización completa permite al modelo manejar de manera más efectiva la complejidad introducida por el color oscuro y variable del aceite O-1236. No obstante, la oscuridad sigue siendo un factor limitante que impide que el modelo alcance un rendimiento óptimo, a pesar de las mejoras observadas.

3.6.4.3 Análisis de la influencia de las características visuales en el rendimiento cuantitativo del modelo de IA

En este apartado se explora la relación entre las características visuales observadas en las imágenes de los aceites O-1178 y O-1236 y los resultados cuantitativos obtenidos a través del modelo de IA ResNet-34. El análisis se estructura en torno a tres aspectos clave: tonalidad y homogeneidad, brillo y contraste, y textura y complejidad superficial. Se busca entender cómo estas características influyen en la capacidad del modelo para clasificar correctamente las imágenes y minimizar los errores.

Capítulo 3: Resultados y discusión

Para establecer una relación entre las características visuales de las imágenes de los aceites y los resultados cuantitativos obtenidos a través del modelo de IA (ResNet-34), es crucial considerar cómo las propiedades visuales de las imágenes afectan la capacidad del modelo para extraer características relevantes y clasificarlas correctamente.

3.6.4.3.1 Impacto de la tonalidad y homogeneidad del color en la precisión de clasificación

Este subapartado analiza cómo la tonalidad y la homogeneidad de las imágenes de los aceites O-1178 y O-1236 afectan la capacidad del modelo ResNet-34 para realizar clasificaciones precisas. Se explora la relación entre la uniformidad del color en las imágenes y la cantidad de errores de clasificación, destacando la importancia de estas características visuales para la efectividad del modelo:

- **Aceite O-1178:** Las imágenes de O-1178 tienen una tonalidad uniforme, con un color marrón claro y una textura suave. La homogeneidad en el brillo y la falta de variabilidad significativa en el color hacen que estas imágenes sean más fáciles de clasificar para el modelo. Esto se refleja en altas tasas de exactitud en todos los grupos, independientemente de si se optimiza solo la última capa o todas las capas del modelo. La baja cantidad de imágenes mal clasificadas indica que el modelo es capaz de identificar y generalizar los patrones visuales de O-1178 de manera efectiva.
- **Aceite O-1236:** Las imágenes de O-1236 son más complejas, con una mayor variabilidad en la tonalidad (desde marrón oscuro hasta negro) y un brillo menos uniforme. Además, la textura es más irregular, lo que introduce ruido visual. Esta variabilidad y complejidad visual resulta en una menor exactitud y un mayor número de errores de clasificación, especialmente cuando solo se optimiza la última capa del modelo. Esto sugiere que el modelo lucha por identificar características consistentes en las imágenes más variadas de O-1236.

3.6.4.3.2 Efecto del brillo y contraste en el desempeño del modelo ResNet-34

En este subapartado se examina el impacto del brillo y el contraste de las imágenes de los aceites O-1178 y O-1236 en el rendimiento del modelo de clasificación. Se analiza cómo las variaciones en la iluminación y el contraste influyen en la precisión de la clasificación y en la capacidad del modelo para identificar correctamente las características distintivas de cada tipo de aceite.

- **Aceite O-1178:** El brillo en las imágenes de O-1178 es uniforme, con un contraste moderado que no introduce sombras o áreas oscuras que puedan confundir al modelo. Esto facilita la extracción de características relevantes. El rendimiento del modelo en términos de exactitud es consistentemente alto, y la cantidad de errores es mínima. Esto se debe a que la uniformidad del brillo y el contraste moderado permiten al modelo capturar y procesar las características visuales de manera eficiente.
- **Aceite O-1236:** Las imágenes de O-1236 presentan un brillo variable y un contraste más pronunciado, lo que crea sombras profundas y variaciones en la iluminación. Esto añade complejidad al proceso de clasificación. El modelo presenta mayores dificultades para clasificar estas imágenes, lo que se refleja en la mayor cantidad de errores de clasificación. Incluso con la optimización completa, la exactitud mejora, pero los errores persisten, lo que sugiere que las variaciones en brillo y contraste dificultan la identificación de patrones consistentes.

3.6.4.3 Influencia de la textura y complejidad superficial en la exactitud de la clasificación

Este subapartado se centra en la textura y la complejidad superficial de las imágenes de los aceites O-1178 y O-1236, evaluando cómo estas características impactan en los resultados del modelo ResNet-34. Se discute la relación entre la variabilidad en la textura de las imágenes y la tasa de errores de clasificación, resaltando los desafíos que estas características presentan para el modelo de IA.

- **Aceite O-1178:** Las imágenes de O-1178 tienen una textura lisa y homogénea, lo que simplifica la tarea del modelo al proporcionar características claras y consistentes para el análisis. La textura uniforme contribuye a la alta precisión y a la baja cantidad de errores de clasificación, ya que el modelo no se enfrenta a irregularidades que puedan introducir ruido o confusión.
- **Aceite O-1236:** Las imágenes de O-1236 presentan una textura más compleja e irregular, lo que puede introducir variabilidad adicional que el modelo necesita interpretar y clasificar. La complejidad de la textura se traduce en una mayor dificultad para el modelo al realizar clasificaciones precisas, explicando así por qué, incluso con la optimización completa, los errores de clasificación siguen siendo relativamente altos.

3.6.4.4 Conclusiones generales de los resultados obtenidos del modelo ResNet-34

El análisis realizado a través de los cuatro grupos diferentes de ensayo confirma que la optimización de todas las capas es la estrategia recomendada para ambos tipos de aceites, especialmente cuando se quiere conocer la calidad del aceite lubricante en situaciones donde la precisión y la fiabilidad son cruciales. Mientras que la optimización de la última capa puede ser útil para ajustes rápidos o en situaciones donde las características son relativamente sencillas, este enfoque no es suficiente para capturar la complejidad de los datos, particularmente en el caso del aceite de caja de cambio (O-1178).

Para aplicaciones que exigen un alto nivel de precisión y donde las características profundas son críticas, la optimización completa del modelo es fundamental. Este enfoque garantiza que el modelo pueda generalizar mejor y ofrecer clasificaciones más precisas, lo cual es crucial en entornos industriales o en aplicaciones prácticas que requieren una alta precisión y fiabilidad en la clasificación de diferentes tipos de aceites lubricantes.

Los resultados del Grupo 4 (correspondientes al prototipo), que son una consecuencia directa de los análisis previos realizados, subrayan la importancia de seleccionar la estrategia de optimización adecuada, basada en el tipo de aceite que se está modelando. Los resultados indican que, aunque la optimización de la última capa puede ser útil para ajustes rápidos o en situaciones donde las características son relativamente sencillas, la optimización de todas las capas es fundamental para obtener un rendimiento óptimo en tareas más complejas, como es el caso del aceite de caja de cambio. Este enfoque garantiza que el modelo pueda generalizar mejor y ofrecer clasificaciones más precisas, lo cual es crucial en aplicaciones industriales donde la precisión y la fiabilidad son esenciales.

Para respaldar estas conclusiones, la **Tabla 3-108** muestra los resultados obtenidos en las validaciones a ciegas realizadas en los Grupos 1, 2, 3 y 4. En esta tabla, se detalla la exactitud final alcanzada por el modelo y el número de imágenes mal clasificadas en cada grupo y tipo de aceite, lo que proporciona una medida clara del rendimiento de cada estrategia de optimización.

Capítulo 3: Resultados y discusión

Tabla 3-108: Datos y resultados de las validaciones a ciegas de los diferentes modelos empleados para cada tipo de ensayo y aceite, así como el número de imágenes mal clasificadas.

Grupo	Optimización de la ResNet34	Tipo de aceite	Número de imágenes	Exactitud final (%)	Imágenes mal clasificadas
1	Última capa	O-1178	106	95,28	5
	Todas las capas		106	95,28	5
	Última capa	O-1236	175	71,43	50
	Todas las capas		175	80,57	34
2	Última capa	O-1178	84	97,62	2
	Todas las capas		84	98,81	1
	Última capa	O-1236	48	85,42	7
	Todas las capas		48	93,75	3
3	Última capa	O-1178	78	93,31	6
	Todas las capas		78	96,15	3
	Última capa	O-1236	49	75,51	12
	Todas las capas		49	79,59	10
4	Última capa	O-1178	205	92,19	17
	Todas las capas		205	94,14	16
	Última capa	O-1236	341	86,51	90
	Todas las capas		341	94,14	46

Para entender mejor cómo cada estrategia de optimización afectó la precisión y la capacidad de generalización del modelo, se ha realizado un análisis detallado de las validaciones a ciegas en cada grupo de ensayo. A continuación, se comentan los resultados observados en la **Tabla 3-108** para los Grupos 1, 2, 3 y 4, lo que permitirá identificar las tendencias y diferencias clave entre la optimización de la última capa y la optimización completa en la clasificación de los aceites O-1178 y O-1236.

Capítulo 3: Resultados y discusión

- **Grupo 1:** La exactitud es elevada para el aceite O-1178, con un bajo número de imágenes mal clasificadas. Sin embargo, para el aceite O-1236, la optimización completa muestra una mejora significativa en la exactitud y una reducción en el número de imágenes mal clasificadas en comparación con la optimización de la última capa.
- **Grupo 2:** En este grupo, la optimización completa muestra una mejora marginal en la exactitud para el aceite O-1178, con solo una imagen mal clasificada. Para el aceite O-1236, la mejora en la exactitud con la optimización completa es más notable, con una reducción significativa en el número de imágenes mal clasificadas.
- **Grupo 3:** Se observa una tendencia similar, donde la optimización completa mejora la exactitud y reduce el número de imágenes mal clasificadas para ambos aceites, aunque las diferencias son menos pronunciadas para el aceite O-1236.
- **Grupo 4:** Este grupo muestra una mejora notable en la exactitud para el aceite O-1236 con la optimización completa, con una reducción considerable en las imágenes mal clasificadas. Sin embargo, para el aceite O-1178, la diferencia entre ambas estrategias de optimización es menos significativa, aunque la optimización completa sigue siendo ligeramente superior.

En resumen, mientras que la optimización de una sola capa puede proporcionar mejoras rápidas, no logra capturar completamente las complejidades de los datos, especialmente en el caso de O-1178. Por lo tanto, para aplicaciones que exigen un alto nivel de precisión y donde las características profundas son críticas, como en el caso del prototipo (Grupo 4) basado en estos aceites, es crucial emplear la optimización completa del modelo para garantizar un rendimiento robusto y confiable.

3.6.4.4.1 Ventajas operativas y simplificación del proceso de clasificación con el modelo ResNet-34 frente a la Regresión Logística Binaria

Una ventaja clave del modelo ResNet34 frente al modelo de Regresión Logística Binaria es la simplicidad y eficiencia del proceso de clasificación. Mientras que la Regresión Logística Binaria requiere la realización de todos los ensayos fisicoquímicos antes de aplicar el método para determinar si el aceite es conforme o no, ResNet34 permite la clasificación utilizando solo una imagen del aceite. Esto simplifica y acelera significativamente el proceso, reduciendo los costes y tiempos asociados con la

Capítulo 3: Resultados y discusión

evaluación, y haciendo que esta tecnología sea más accesible y eficiente en su aplicación práctica.

El modelo ResNet34 no solo proporciona una mayor precisión en muchos casos estudiados, sino que también tiene la capacidad de generalizar mejor a partir de los datos visuales, sin necesidad de análisis fisicoquímicos extensivos, lo que representa un avance significativo en la clasificación de aceites lubricantes.

Capítulo 4: Conclusiones

El análisis integrado realizado en esta tesis ha permitido evaluar en profundidad las propiedades fisicoquímicas, el desempeño operativo y la clasificación predictiva de los aceites lubricantes O-1178 (5W30) y O-1236 (15W40), utilizados en los carros de combate Leopard. Este trabajo combina métodos estadísticos, análisis predictivos basados en inteligencia artificial y herramientas de gestión eficiente de datos, proporcionando hallazgos clave para la optimización del mantenimiento de estos sistemas críticos.

En la primera parte del estudio, se analizaron las propiedades fisicoquímicas de ambos aceites, diferenciando sus aplicaciones específicas en la caja de cambios y en el motor. El aceite O-1178, destinado a la transmisión, mostró una viscosidad más baja a 40°C y 100°C, facilitando el flujo del aceite y optimizando el desempeño de los sistemas de cambio bajo condiciones de baja temperatura. Sus niveles más bajos de contaminación metálica y su estabilidad en parámetros como el TAN confirmaron su idoneidad para garantizar la durabilidad y eficiencia de los componentes de la caja de cambios.

Por su parte, el O-1236, diseñado para motores, presentó un punto de inflamación más alto, una propiedad fundamental para operar a temperaturas elevadas generadas por la combustión y la fricción. Sin embargo, mostró una mayor variabilidad en sus propiedades fisicoquímicas, con concentraciones más altas de metales como Fe, Cu y Pb, que indicaron un desgaste más pronunciado en los componentes del motor. Este comportamiento refleja las exigencias térmicas y mecánicas más severas a las que está sometido el aceite en el motor.

El análisis estadístico permitió establecer patrones clave entre las propiedades fisicoquímicas y los contaminantes metálicos. Se identificaron correlaciones significativas, como la fuerte relación (0,88) entre viscosidades a 40°C y 100°C en el O-1178, que facilita la predicción de su comportamiento térmico, y correlaciones moderadas como Fe-Al y Fe-Cu en el O-1236, que sugieren fuentes comunes de desgaste en los motores. Además, la identificación de valores atípicos en metales como Cu y Pb subrayó la necesidad de estrategias de monitoreo específicas para prevenir fallos críticos.

Capítulo 4: Conclusiones

La combinación de análisis estadístico clásico con técnicas de aprendizaje profundo representa un enfoque innovador y robusto. Esta integración permite una comprensión más completa de las propiedades y el comportamiento de los aceites lubricantes, aprovechando las fortalezas de ambos métodos: el análisis estadístico proporciona una base sólida para entender las propiedades fisicoquímicas y las correlaciones entre variables, mientras que el modelo ResNet-34 ofrece una capacidad superior para clasificar los aceites basándose en características visuales, superando los métodos estadísticos tradicionales en precisión y eficiencia.

El modelo de regresión logística binaria utilizado para clasificar los aceites alcanzó una precisión del 92.59%, destacando variables como la viscosidad a 100°C, el Cu, el Pb y el TBN como los principales indicadores de la calidad del aceite. No obstante, el modelo presentó limitaciones en la clasificación de casos "No Conformes", resaltando la importancia de mejorar la representatividad de las muestras en futuros estudios. Por otro lado, el análisis de componentes principales (PCA) permitió simplificar los datos, identificando seis componentes clave que explicaron el 65% y el 70 % aproximadamente de la variabilidad total en cada uno de los dos aceites estudiados, optimizando los procesos predictivos.

La segunda parte de este estudio evaluó el desempeño del modelo de red neuronal profunda ResNet-34 en la clasificación de aceites lubricantes de vehículos militares bajo condiciones progresivamente más complejas. Para ello, se comparó con un modelo estadístico de regresión logística binaria, aplicado a los resultados obtenidos de los ensayos fisicoquímicos de los aceites. El análisis se centró en dos tipos de aceites: O-1178 (aceite multigrado 5W30, usado principalmente como aceite de transmisión) y O-1236 (aceite multigrado 15W40, empleado como aceite de motor). Se llevaron a cabo cuatro grupos de ensayos en los que se fotografiaron muestras de aceite bajo diferentes condiciones, utilizando dos tipos de cámaras: una cámara réflex y una cámara endoscópica. Además, se evaluaron diversas estrategias de optimización del modelo y se analizó cómo las características visuales de los aceites afectaban su clasificación.

Los resultados demostraron que el modelo ResNet-34, especialmente cuando se realizó la optimización completa de todas las capas, superó al modelo estadístico de regresión logística binaria. En el caso del aceite O-1178, ResNet-34 alcanzó precisiones de hasta el 98,81% en el Grupo 2, gracias a su capacidad para extraer características profundas de

Capítulo 4: Conclusiones

las imágenes, lo que permitió una clasificación más precisa con menos errores. Para el aceite O-1236, la clasificación presentó mayor variabilidad debido a su complejidad visual, caracterizada por variaciones en tonalidad, brillo y textura, además de un color negro predominante que dificultó la discriminación de sus características. Aunque la regresión logística binaria mantuvo un rendimiento sólido con un 90,74% de éxito, ResNet-34, con la optimización completa de todas las capas, mostró mejoras notables, alcanzando hasta un 93,75% en el Grupo 2. Esto sugiere que, incluso para aceites con características visuales más complejas, la red neuronal profunda puede superar a los métodos estadísticos tradicionales cuando se optimiza adecuadamente.

La comparación entre las dos estrategias de optimización de ResNet-34, la optimización de la última capa y la optimización completa de todas las capas reveló que la optimización completa de todas las capas es la estrategia recomendada para ambos tipos de aceites, especialmente en situaciones donde la precisión y la fiabilidad son cruciales. Mientras que la optimización de la última capa ofreció una convergencia rápida en las primeras etapas, limitó la capacidad del modelo para generalizar y capturar características complejas, particularmente en el aceite O-1236. La optimización completa de todas las capas permitió al modelo aprender características más profundas y complejas, mejorando significativamente la precisión y reduciendo los errores de clasificación.

Las características visuales de los aceites tuvieron un impacto significativo en el rendimiento del modelo. El aceite O-1178, con tonalidad marrón claro y uniforme, brillo y contraste moderados, y textura homogénea, facilitó la extracción de patrones consistentes, lo que resultó en altas tasas de precisión y pocos errores de clasificación. Por el contrario, el aceite O-1236 presentó mayor variabilidad en tonalidad, brillo y contraste, con un color negro predominante que complicó la tarea del modelo, aumentando los errores de clasificación. Aunque la optimización completa de todas las capas mejoró el rendimiento, no eliminó completamente las dificultades, lo que sugiere que la capacidad del modelo para generalizar bajo estas condiciones aún tiene margen de mejora.

Una ventaja clave de ResNet-34 frente a la regresión logística binaria es la simplicidad y eficiencia del proceso de clasificación. Mientras que la regresión logística binaria requiere ensayos fisicoquímicos para clasificar el aceite como "Conforme" o "No conforme", ResNet-34 permite la clasificación utilizando solo una imagen del aceite. Esto simplifica

Capítulo 4: Conclusiones

y acelera significativamente el proceso, reduciendo los costes y tiempos asociados con la evaluación, y haciendo que esta tecnología sea más accesible y eficiente en su aplicación práctica.

La implementación del sistema portátil desarrollado en este estudio, basado en ResNet-34 y validado en el Grupo 4, representa un avance significativo en el mantenimiento predictivo. Este sistema, encapsulado en un maletín ruggedizado, fue diseñado como una solución autónoma y versátil, capaz de determinar si el aceite es "Conforme" o "No conforme" en tiempo real, incluso en entornos exigentes como zonas de operaciones o campos de maniobras. Con una precisión del 94%, el modelo demostró su eficacia en clasificar aceites, optimizando los procesos de monitoreo y mantenimiento. La capacidad de ofrecer resultados inmediatos refuerza su valor como herramienta predictiva, mejorando la planificación y previniendo fallos.

Desde la perspectiva de la sostenibilidad, la aplicación de inteligencia artificial y sistemas portátiles en el análisis predictivo de aceites lubricantes tiene importantes implicaciones positivas. En los vehículos estudiados, tanto el cárter del motor como el de la caja de cambios tienen una capacidad superior a 100 litros, lo que amplifica los beneficios de optimizar el ciclo de vida del aceite. Al cambiar el aceite únicamente cuando ha perdido sus propiedades fisicoquímicas o está contaminado, se reduce el procesamiento y la gestión de grandes volúmenes de aceite en condiciones óptimas, disminuyendo así el impacto ambiental asociado a su eliminación y tratamiento. La capacidad de realizar análisis in situ con el maletín ruggedizado también minimiza la necesidad de transporte y la dependencia de laboratorios externos, contribuyendo a reducir la huella de carbono. Este enfoque proactivo en la detección temprana de problemas permite una planificación estratégica del mantenimiento, garantizando operaciones más eficientes y sostenibles.

En conclusión, la combinación de métodos estadísticos avanzados, redes neuronales profundas y sistemas portátiles proporciona una solución robusta para el mantenimiento predictivo de los carros de combate Leopard. Los aceites O-1178 y O-1236 cumplen roles específicos en la transmisión y el motor, respectivamente, y su evaluación mediante estas técnicas garantiza un mantenimiento más eficiente y sostenible. Este trabajo sienta las bases para el desarrollo de estrategias avanzadas de mantenimiento predictivo en entornos tanto militares como civiles, mejorando la fiabilidad operativa y contribuyendo a una gestión más responsable de los recursos.

Bibliografía

1. Zonta T, da Costa CA, da Rosa Righi R, de Lima MJ, da Trindade ES, Li GP. Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review. *Comput Ind Eng.* 2020 Dec 1;150.
2. Saman Azari M, Flammini F, Member S, Santini S, Caporuscio M. A Systematic Literature Review on Transfer Learning for Predictive Maintenance in Industry 4.0.
3. Zonta T, da Costa CA, da Rosa Righi R, de Lima MJ, da Trindade ES, Li GP. Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review. *Comput Ind Eng.* 2020 Dec 1;150.
4. Robatto Simard S, Gamache M, Doyon-Poulin P. Current Practices for Preventive Maintenance and Expectations for Predictive Maintenance in East-Canadian Mines. *Mining.* 2023 Mar 1;3(1):26–53.
5. Wang X, Wang J, Ning R, Chen X. Joint Optimization of Maintenance and Spare Parts Inventory Strategies for Emergency Engineering Equipment Considering Demand Priorities. *Mathematics.* 2023 Sep 1;11(17).
6. Wang Y, Gao W, Li X, Liu Y. Joint optimization of performance-based contracting, condition-based maintenance and spare parts inventory for degrading production systems. *Reliab Eng Syst Saf.* 2024 Mar 1;243.
7. Romanssini M, de Aguirre PCC, Compassi-Severo L, Girardi AG. A Review on Vibration Monitoring Techniques for Predictive Maintenance of Rotating Machinery. Vol. 4, Eng. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI); 2023. p. 1797–817.
8. Prommachan W, Surin P, Srinoi P, Pipathattakul M. Selection Criteria for Evaluating Predictive Maintenance Techniques for Rotating Machinery using the Analytic Hierarchical Process (AHP). *Engineering, Technology and Applied Science Research.* 2024;14(1):13058–65.

Bibliografía

9. Valencia Jarama JL, Ortiz Moscoso VH, Rashuaman Flores R. Tendencias actuales en mantenimiento productivo total. *e-Revista Multidisciplinaria del Saber*. 2024 Aug 8;1–12.
10. Kučera M, Kopčanová S, Sejkorová M. Lubricant Analysis as the Most Useful Tool in the Proactive Maintenance Philosophies of Machinery and its Components. *Management Systems in Production Engineering*. 2020 Sep 1;28(3):196–201.
11. Bureau Veritas - Formación. Curso: Análisis avanzado aplicado al mantenimiento y fiabilidad (AOA). <https://www.bureauveritasformacion.com/analisis-avanzado-aplicado-al-mantenimiento-y-fiabilidad-aoa-2730.aspx>. 2024.
12. Jardine AKS, Lin D, Banjevic D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. Vol. 20, *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2006. p. 1483–510.
13. Kearthland S, Van Zyl TL. Automating predictive maintenance using oil analysis and machine learning. In: 2020 International SAUPEC/RobMech/PRASA Conference, SAUPEC/RobMech/PRASA 2020. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2020.
14. Technical manual: Joint Oil Analysis Program Manual, Volume I. Introduction, theory, benefits, customer sampling procedures, programs and reports. Vol. Volume I. Naval Air Systems Command; 2013.
15. Technical manual: Joint Oil Analysis Program manual, Volume IV. Laboratory analytical methodology and equipment criteria (non-aeronautical). 2013.
16. Ejército de Tierra. NT 09/23: Programa de análisis de aceites en el Ejército de Tierra (PAAET). 2023.
17. Stachowiak GW, Batchelor AW. *Engineering tribology*. Butterworth–Heinemann, editor. 2013.
18. SAE. SAE J300, Engine Oil Viscosity Classification. 2021.
19. SAE. SAE J306, Automotive Gear Lubricant Viscosity Classification FEB2019. 2019.

Bibliografía

20. ASTM. ASTM D2422-97(2018), Standard Classification of Industrial Fluid Lubricants by Viscosity System. 2018.
21. Oil Viscosity Chart | Compare, Choose, and Substitute Industrial Oil based on Viscosity [Internet]. [cited 2024 May 15]. Available from: <https://oilviscositychart.com/>
22. Rudnick LR. Lubricant Additives Chemistry and Applications. Second Edition. CRC Press, editor. 2009.
23. Totten GE, Webster GM. Handbook of lubrication and tribology: Volume I. Second edition. CRC Press, editor. Vol. Volume 1. 2006.
24. Fitch J, Troyer D. Oil analysis basics. 2nd Edition. Noria Corporation, editor. 2010.
25. Gergel WC. Lubricant additive chemistry. International Symposium on Technical Organic Additives and Environment. In Interlaken, Suiza; 1984.
26. SKF. Manual de lubricación SKF ACEITE. <https://mantenimientoplanificado.com>.
27. Mang T, Dresel W. Lubricants and Lubrication. 2nd Edition. WILEY-VCH GmbH, editor. Weinheim; 2007.
28. Estado Mayor del Ejército. Manual técnico: Carro de combate Leopard 2A4. 1997.
29. Tormos B. Diagnóstico de motores diesel mediante el análisis del aceite usado. Editorial Reverté, editor. 2012.
30. Watts RF, Szykowski JP. "Formulating Automatic Transmission Fluids with Improved Low Temperature Fluidity", SAE Paper Number 902144, International Fuels and Lubricants Meeting and Exposition. Tulsa, Oklahoma; 1990 Oct.
31. Dowson D. History of tribology. Longman Group Limited, editor. 1979.
32. Bhushan B. Introduction to tribology. John Wiley & Sons, editor. 2013.
33. Noria Latín América. Una exploración integral de la tribología: Revelando la evolución histórica. <https://noria.mx/lube-learn/una-exploracion-integral-de-la-tribologia-revelando-la-evolucion->

Bibliografía

- historica/#:~:text=En%201966%2C%20el%20término%20«tribología,el%20desgaste%20y%20la%20lubricación. 2023.
34. Echávarri Otero J, de la Guerra Ochoa E, Bellón Vallinot I, Chacón Tanarro E. Optimising the design of textured surfaces for reducing lubricated friction coefficient. *Lubrication Science*. 2017 Apr 1;29(3):183–99.
 35. Pirro DM, Wessol AA. *Lubrication Fundamentals*. Marcel Dekker Inc., editor. New York and Basel; 2001.
 36. Tormos B. Diagnóstico de motores diesel mediante el análisis del aceite usado. EDITORIAL REVERTÉ SA, editor. 2013.
 37. Zhu J, He D, Bechhoefer E. Survey of Lubrication Oil Condition Monitoring, Diagnostics, and Prognostics Techniques and Systems. Vol. 2, *Journal of Chemical Science and Technology*. 2013.
 38. Adamczewska J, Love C. Oxidative stability of lubricants measured by PDSC CEC L-85-T-99 test procedure. *J Therm Anal Calorim*. 2005;80:753–9.
 39. Gómez Estrada YA, Tormos Martínez B. Contribución al desarrollo y mejora para la cuantificación de la degradación en aceites lubricantes usados de MCIA a través de la técnica de espectrometría infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR). [Valencia]: Universidad Politécnica de Valencia; 2013.
 40. Wooton D. Oxidation - The Lubricant's Nemesis [Internet]. *Practicing Oil Analysis*. 2007 [cited 2023 Oct 28]. Available from: <https://www.machinerylubrication.com/Read/1028/oxidation-lubricant>
 41. ASTM International. ASTM D 664-18: “Standard test method for acid number of petroleum products by potentiometric titration.” 2019; Available from: www.astm.org,
 42. Standard Test Method for Base Number of Petroleum Products by Potentiometric Perchloric Acid Titration. 2011. Report No.: ASTM D 2896.
 43. Shinde HM, Bewoor AK. Evaluating petrol engine oil deterioration through oxidation and nitration parameters by low-cost IR sensor. *Appl Petrochem Res*. 2020 Aug;10(2):83–94.

Bibliografía

44. Standard Practice for Condition Monitoring of Used Lubricants by Trend Analysis Using Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometry. 2004. Report No.: ASTM E 2412.
45. Combustibles para automoción. Combustibles para motor Diesel (gasóleo). Requisitos y métodos de ensayo. 2010. Report No.: UNE-EN590.
46. Owrang F, Mattsson H, Olsson J, Pedersen J. Investigation of oxidation of a mineral and a synthetic engine oil. *Thermochim Acta*. 2004 Apr 8;413(1–2):241–8.
47. MIL. MIL-PRF-2104N: LUBRICATING OIL, INTERNAL COMBUSTION ENGINE, COMBAT/TACTICAL SERVICE. 2017.
48. BAAINBw. TL 9150-0080: Lubricating oil, combustion engine, NATO Code: O-1178. 2016.
49. Trujillo Corona G. Interpretación de análisis lubricantes- Guía de diagnóstico para la toma de decisiones sustentadas. Noria Latin America, editor. León, Guanajuato, México; 2012.
50. ISO. ISO 3448:1992: “Industrial liquid lubricants - ISO viscosity classification.” 1992. Report No.: 3448.
51. ASTM. ASTM D2270-10: “Standard practice for calculating viscosity index from kinematic viscosity at 40 and 100°C.” 2016. Report No.: D2270.
52. ASTM International. ASTM D445-21: Standard test method for kinematic viscosity of transparent and opaque liquids (and calculation of dynamic viscosity). 2021. Report No.: D445.
53. CANNON INSTRUMENT COMPANY. CAV-2100/2200 Automatic Viscometer: Instruction & Operation Manual. 2009.
54. ASTM. ASTM D92 – 18 Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester 1 [Internet]. Available from: <http://www.ansi.org>.
55. ASTM. ASTM D93 – 20 Standard Test Methods for Flash Point by Pensky-Martens Closed Cup Tester 1 [Internet]. Available from: <http://www.ansi.org>.
56. Noria Latin América. Número ácido: Una guía completa. <https://noria.mx/lube-learn/analisis-lubricantes/numero-acido-una-guia-completa/>. 2021.

Bibliografía

57. Metrohm AG. Manual: 904 Titrande. Herisau, Suiza; 2022.
58. PROCOPER 4.108 Ed 11: "TAN/Total Acid Number."
59. ASTM International. ASTM D 2896-21 "Standard test method for base number of petroleum products by potentiometric perchloric acid titration." 2021.
60. ASTM International. ASTM D 6595-22 : "Standard test method for determination of wear metals and contaminants in used lubricating oils or used hydraulic fluids by rotating disc electrode atomic emission spectrometry". 2022.
61. Peñas Marchessi JL. PROCOPER-4.101 Ed. 6: "Análisis de elementos de desgaste". Madrid; 2020.
62. López Pingarrón C, Torrecilla JS, Vega Vera CJ, Rodrigo C, Perez Calabuig AM, Pradana López S, et al. Mantenimiento inteligente de los vehículos del Ejército de Tierra a través de la tribología. Pontevedra; 2022.
63. ASTM. ASTM D 6304-20 "Standard test method for determination of water in petroleum products, lubricating oils, and additives by coulometric Karl Fischer titration". 2020;
64. Illescas S. Velocidad de Obturación: Qué Es y Para Qué Sirve [Internet]. [cited 2024 Feb 25]. p. s.f. Available from: <https://www.dzoom.org.es/para-que-sirve-la-velocidad-de-obturacion/>
65. León N. La Apertura del Diafragma: la Explicación Más Sencilla [Internet]. [cited 2024 Feb 25]. p. s.f. Available from: <https://www.dzoom.org.es/la-apertura-del-diafragma-en-fotografia-entiende-de-una-vez-por-todas-sus-implicaciones/>
66. Diligent Team. Fotografía de producto, conceptos: Apertura y Velocidad de disparo [Internet]. [cited 2024 Feb 25]. p. s.f. Available from: <https://www.diligent.es/fotografia-de-producto-conceptos-basicos-apertura-y-velocidad-de-disparo/>
67. Chollet F. Deep Learning with Python. Second Edition. Manning Publications Co., editor. Shelter Island, NY: Manning Publications Co.; 2021.
68. García-Olalla Olivera O. ¿Qué es Machine Learning? <https://www.xeridia.com/blog/que-es-machine-learning>. 2019.

Bibliografía

69. Neuron Diagram & Types | Ask A Biologist [Internet]. [cited 2024 Sep 14]. Available from: <https://askabiologist.asu.edu/neuron-anatomy>
70. García-Olalla Olivera O. Redes Neuronales artificiales: Qué son y cómo se entrenan [Internet]. 2019 [cited 2024 Jan 14]. Available from: <https://www.xeridia.com/blog/redes-neuronales-artificiales-que-son-y-como-se-entrenan-parte-i>
71. Pérez Calabuig AM, Torrecilla Velasco JS. Visión inteligente en el control de calidad y detección de fraudes en el sector alimentario. [Madrid]: Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Químicas; 2023.
72. Neurociencias (4) - Escolar - ABC Color [Internet]. [cited 2024 Sep 14]. Available from: <https://www.abc.com.py/edicion-impresa/suplementos/escolar/2023/03/07/neurociencias-4/>
73. Neuron Diagram & Types | Ask A Biologist [Internet]. [cited 2024 Sep 14]. Available from: <https://askabiologist.asu.edu/neuron-anatomy>
74. Raschka S, Mirjalili V. Python Machine Learning. 2nd ed. Packt, editor. Birmingham; 2017.
75. Ponce J. Conoce qué son las funciones de activación y cómo puedes crear tu función de activación usando PYTHON, R Y TENSORFLOW. <https://jahazielponce.com/funciones-de-activacion-y-como-puedes-crear-la-tuya-usando-python-r-y-tensorflow/>. 2021.
76. Turing. What Is the Necessity of Bias in Neural Networks? [Internet]. [cited 2024 Jan 14]. Available from: <https://www.turing.com/kb/necessity-of-bias-in-neural-networks>
77. CS231n Convolutional Neural Networks for Visual Recognition [Internet]. [cited 2024 Jan 13]. Available from: <https://cs231n.github.io/neural-networks-1/>
78. Svozil D, Kvasnieka V, Pospichal J. Introduction to multi-layer feed-forward neural networks. Vol. 39, Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. 1997.
79. Palancar MC; AJM; MJA& TJS. Application of a model reference adaptive control system to pH control. Effects of lag and delay time. Ind Eng Chem Res. 1996;35(11):4100–10.

Bibliografía

80. Lu D, Weng Q. A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. Vol. 28, International Journal of Remote Sensing. Taylor and Francis Ltd.; 2007. p. 823–70.
81. Ruineihart DE, Hint GE, Williams RJ. Learning representations by error propagation. 1985.
82. Le Cun Y, Le Cun Y. Generalization and Network Design Strategies. 1989.
83. Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton GE. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks [Internet]. Available from: <http://code.google.com/p/cuda-convnet/>
84. Albawi S, Mohammed TA, Al-Zawi S. Understanding of a convolutional neural network. In: Proceedings of 2017 International Conference on Engineering and Technology, ICET 2017. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2017. p. 1–6.
85. Kim P. Capítulo 6: Convolutional Neural Network. In: Apress, editor. MATLAB Deep Learning: With Machine Learning, Neural Networks and Artificial Intelligence. 1st ed. 2017. p. 121–49.
86. Soffer S, Ben-Cohen A, Shimon O, Amitai MM, Greenspan H, Klang E. Convolutional Neural Networks for Radiologic Images: A Radiologist’s Guide. Vol. 290, Radiology. NLM (Medline); 2019. p. 590–606.
87. Yamashita R, Nishio M, Do RKG, Togashi K. Convolutional neural networks: an overview and application in radiology. Vol. 9, Insights into Imaging. Springer Verlag; 2018. p. 611–29.
88. Calvo D. Red Neuronal Convolutacional CNN [Internet]. <https://www.diegocalvo.es/red-neuronal-convolutacional/>. 2017 [cited 2023 Dec 11]. Available from: <https://www.diegocalvo.es/red-neuronal-convolutacional/>
89. Codificando Bits. La Convolución en las Redes Convolutacionales. <https://www.youtube.com/watch?v=ySbmdeqR0-4>. 2019.
90. Silva S, Freire E. Intro a las redes neuronales convolutacionales | by Bootcamp AI | Medium [Internet]. 2019 [cited 2023 Dec 11]. Available from: <https://bootcampai.medium.com/redes-neuronales-convolutacionales-5e0ce960caf8>

Bibliografía

91. Sharma P. CNN Tutorial | Tutorial On Convolutional Neural Networks [Internet]. [cited 2023 Dec 11]. Available from:
<https://www.analyticsvidhya.com/blog/2018/12/guide-convolutional-neural-network-cnn/>
92. Rosebrock A. Convolutional Neural Networks (CNNs) and Layer Types [Internet]. <https://pyimagesearch.com/2021/05/14/convolutional-neural-networks-cnns-and-layer-types/>. 2021 [cited 2023 Dec 11]. Available from:
<https://pyimagesearch.com/2021/05/14/convolutional-neural-networks-cnns-and-layer-types/>
93. Kim P. Capítulo 6: Convolutional Neural Network. In: Appers, editor. MATLAB Deep Learning: With Machine Learning, Neural Networks and Artificial Intelligence. 1st ed. p. 121–49.
94. Lin M, Chen Q, Yan S. Network In Network. 2013 Dec 16; Available from:
<http://arxiv.org/abs/1312.4400>
95. López Saca F. Clasificación de imágenes usando redes neuronales convolucionales. Universidad Autónoma Metropolitana; 2019.
96. López Saca F, Avilés Cruz C, Ferreyra Ramírez A. Clasificación de imágenes usando redes neuronales convolucionales. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA; 2019.
97. Vasudev R. Understanding and Calculating the number of Parameters in Convolution Neural Networks (CNNs).
<https://towardsdatascience.com/understanding-and-calculating-the-number-of-parameters-in-convolution-neural-networks-cnns-fc88790d530d>. 2019.
98. Deeplizard. Learnable Parameters in a Convolutional Neural Network (CNN) explained. . <https://www.youtube.com/watch?v=gmBfb6LNnZs&t=183s>. 2018.
99. He K, Zhang X, Ren S, Sun J. Deep Residual Learning for Image Recognition [Internet]. Available from: <http://image-net.org/challenges/LSVRC/2015/>
100. Randles BM, Pasquetto IV, Golshman MS, Borgman C. Using the Jupyter notebook as a tool for open science: An empirical study. In: ACM/IEEE Joint Conference on Digital Libraries (JCDL), 1-2. 2017.

Bibliografía

101. Palm R. ¿Ya has probado los cuadernos de Jupyter? Publicado en 2019 en Open Science Labs. 2019.
102. Jupyter. Jupyter. (2020) <https://jupyter.org/>. <https://jupyter.org/>. 2020.
103. Python. Preguntas frecuentes generales sobre Python. <https://docs.python.org/es/3/faq/general.html#why-was-python-created-in-the-first-place>. 2021.
104. Pérez López C. Técnicas de análisis multivariante de datos. Pearson Educación, editor. Madrid; 2008.
105. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA EN R [Internet]. [cited 2024 Apr 16]. Available from: https://rstudio-pubs-static.s3.amazonaws.com/647537_aa2563a0272f4e7dbc8852012951a00e.html
106. Marín Diazaraque JM. Tema 3: Análisis de Componentes Principales. Introducción a la distribución normal multivariante [Internet]. 2014 [cited 2024 Sep 1]. Available from: <https://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/jmmarin/esp/AMult/tema3am.pdf>
107. Fitch J. Guía de procedencia de elementos para aceite usado. Noria Corporation, editor. México; 2008.
108. Stecki J. Contamination. Control and Failure. Analysis. In: Totten GE, editor. Handbook of lubrication and tribology. 2nd ed. Taylor & Francis Group; 2006.
109. BAAINBw K. TL 9150-0080: “Lubricating oil, combustion engine NATO Code: O-1178, Bundeswehr Code: OY1175.” 2016.
110. Tank- Automotive and Armaments Command-USA Army. MIL-PRF-2104M: “Performance specification: Lubricating oil, internal combustion engine, combat/tactical service.” 2017.
111. Komatsu. KOWA procedure manual, SELA 1105-12S. 5th ed. Komatsu, editor.
112. Stachowiak GW, Batchelor AW. Engineering Tribology. Butterworth-Heinemann., editor. 2001.
113. Rabinowicz E. Friction and Wear of Materials. John Wiley and Sons, editor. New York; 1995.

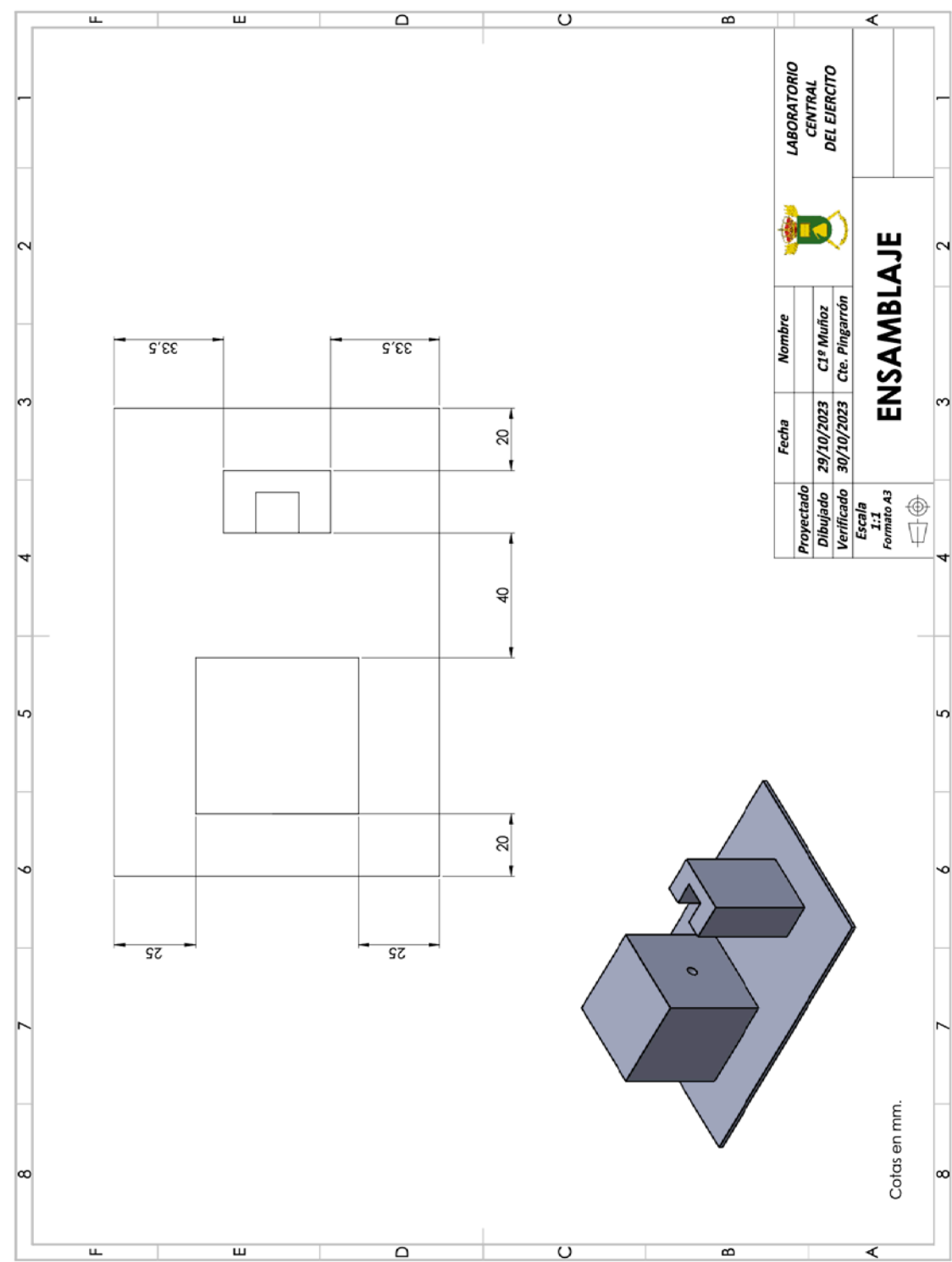
Bibliografía

114. Maldonado Y. Las 12 Características del cobre más importantes [2024] [Internet]. 2021 [cited 2024 Mar 30]. Available from:
<https://geologiaweb.com/minerales/caracteristicas-del-cobre/>
115. Maldonado Y. PLOMO (Pb) 13 Propiedades y Características del metal [Internet]. 2021 [cited 2024 Mar 30]. Available from:
<https://geologiaweb.com/minerales/plomo/>
116. Stachowiak GW, Batchelor AW. ENGINEERING TRIBOLOGY. 4th ed. Elsevier Inc.; 2014.
117. Schwartz SE. Automotive Engine Oil Life Factors. In: Booser ER, editor. Tribology data handbook. New York; 1997.
118. Davydov V, Vakorina D, Provodin D, Ryabogina N, Stepanenkov G. New Method for State Express Control of Unstable Hydrocarbon Media and Their Mixtures. *Energies* (Basel). 2023 Mar 1;16(6).

APÉNDICES

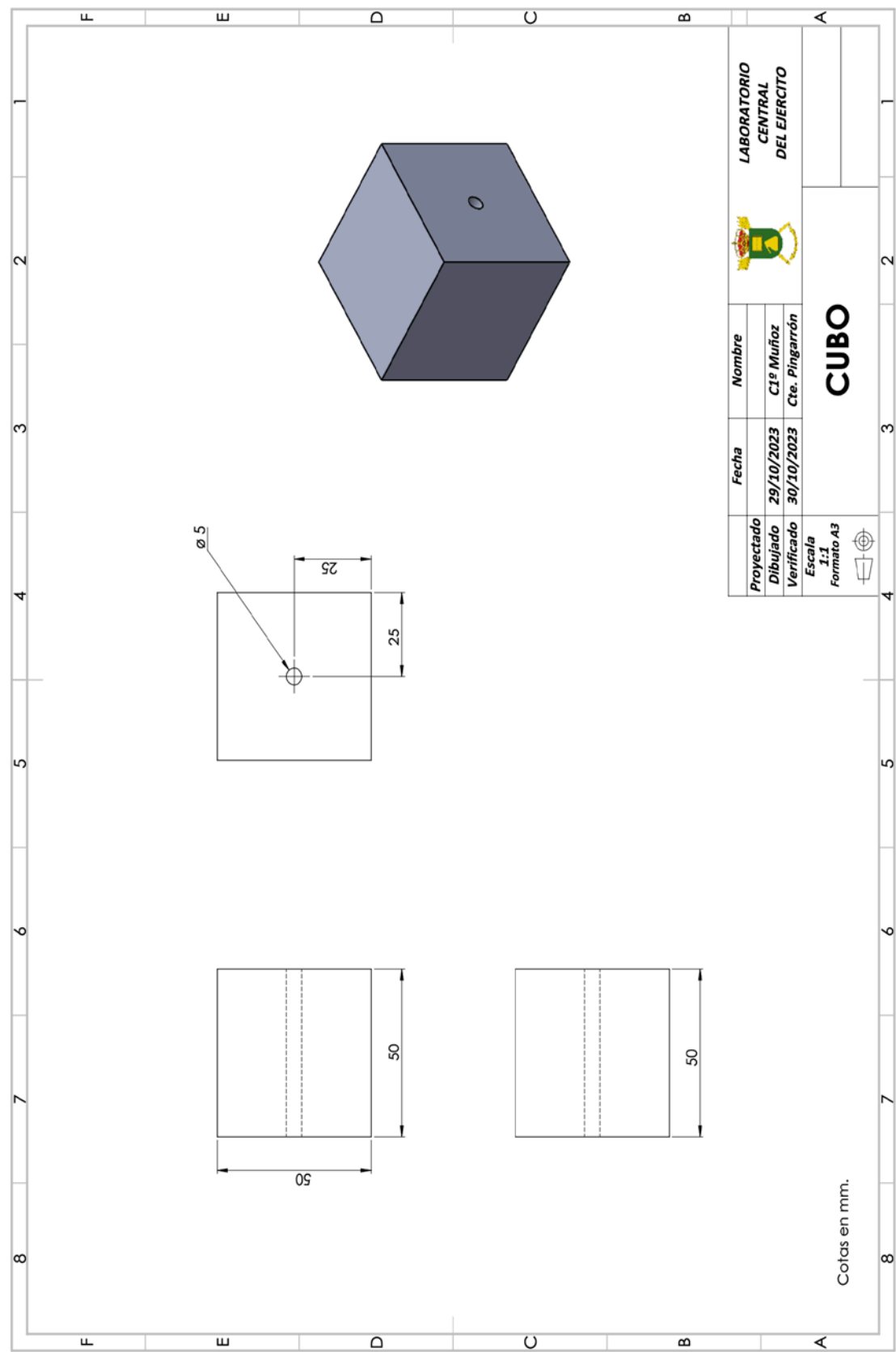
Apéndice A: Planos

- A.1: Plano del ensamblaje de las piezas



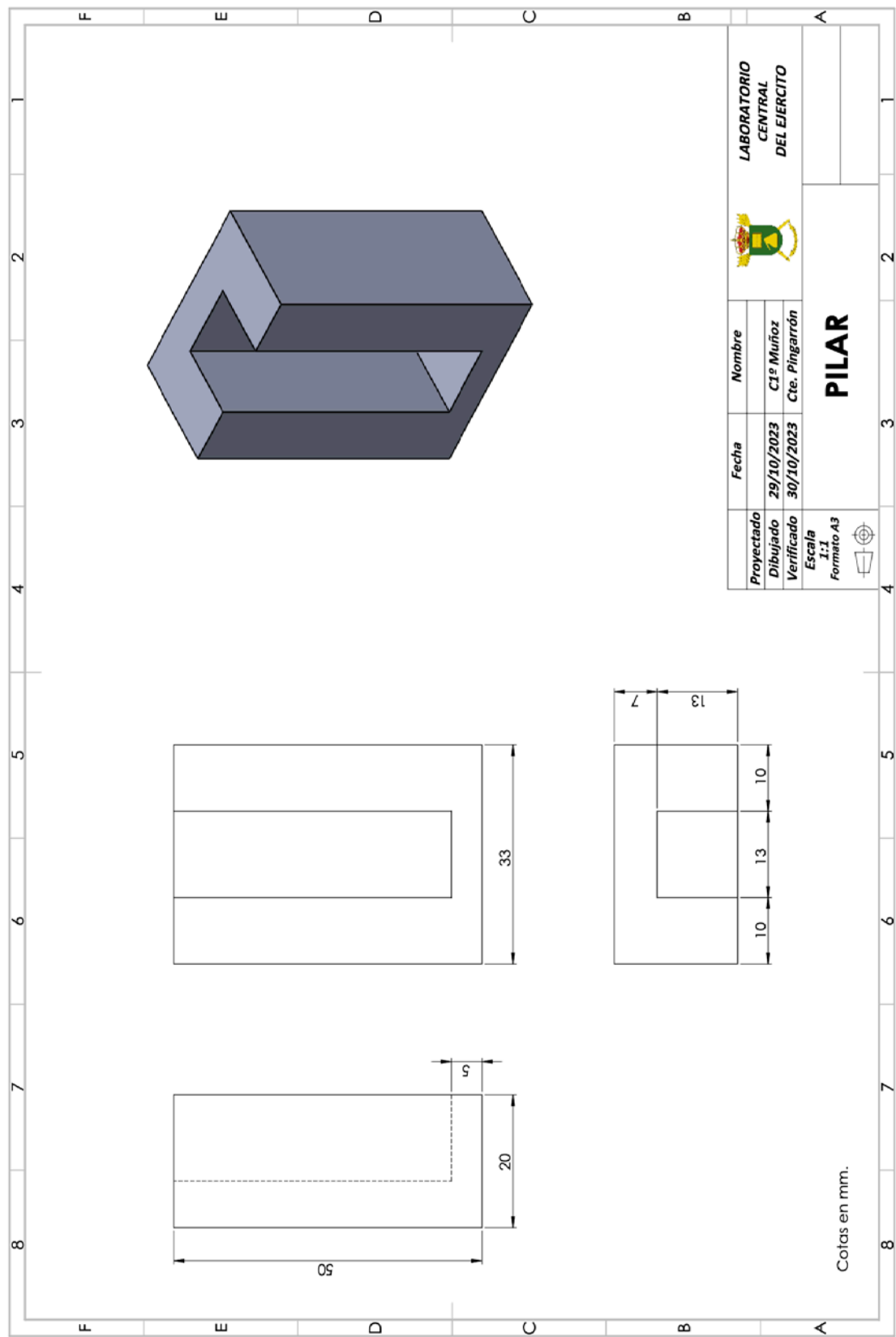
Apéndices

- A.2: Plano de la pieza por donde pasa la cámara endoscópica



Apéndices

- A.3: Plano de la pieza donde se coloca la cubeta que contiene la muestra



Apéndices

- A.4: Plano del soporte de la plataforma al que van unidos el cubo y el pilar

