



UNIVERSIDAD ANDINA

NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA



**INFLUENCIA DEL DESGASTE MECÁNICO POR TRIBOLOGÍA
EN LA VIDA ÚTIL DE UN MOTOR DIESEL DE 2 LITROS A
UNA ALTITUD DE 3825 METROS, JULIACA 2025**

TESIS PRESENTADA POR:

Bach. MILTHON VLADIMIR LAYME PORTILLA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

JULIACA - PERÚ

2026



UNIVERSIDAD ANDINA

NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

**INFLUENCIA DEL DESGASTE MECÁNICO POR TRIBOLOGÍA EN
LA VIDA ÚTIL DE UN MOTOR DIESEL DE 2 LITROS A UNA
ALTITUD DE 3825 METROS, JULIACA 2025**

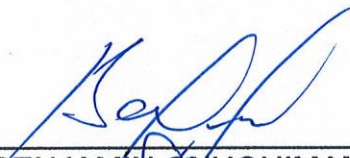
TESIS PRESENTADA POR:

Bach. MILTHON VLADIMIR LAYME PORTILLA

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

APROBADA POR EL JURADO REVISOR:

PRESIDENTE

: 
Dr. BENJAMIN CHUQUIMAMANI QUINTO

PRIMER MIEMBRO

: 
Mgtr. SALVADOR TEODORO VALDIVIA CÁRDENAS

SEGUNDO MIEMBRO

: 
Ing. ADWAR RANULFO SANCHEZ CARREÓN

ASESOR DE TESIS

: 
M.Sc. JESUS ESTEBAN CASTILLO MACHACA

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

: TECNOLOGÍA E INGENIERÍA MECÁNICA – P18

**RESOLUCIÓN DECANAL N° 0134-2026-D-UI-FICP-UANCV**

Juliaca, 01 de abril del 2026

VISTO: El expediente N° 2026-CU-001420 presentado por el (la) Bachiller: **MILTHON VLADIMIR LAYME PORTILLA** estudiante de la Escuela Profesional de **Ingeniería Mecánica Eléctrica** de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras quien solicita **NOMINACIÓN DE JURADOS Y PROGRAMACIÓN DE FECHA Y HORA DE SUSTENTACIÓN**.

CONSIDERANDO:

Que, el (la) Bach. **MILTHON VLADIMIR LAYME PORTILLA**, quien solicita **NOMINACIÓN DE JURADOS Y PROGRAMACIÓN DE FECHA Y HORA DE SUSTENTACIÓN** de la Tesis Titulada: **INFLUENCIA DEL DESGASTE MECÁNICO POR TRIBOLOGÍA EN LA VIDA ÚTIL DE UN MOTOR DIESEL DE 2 LITROS A UNA ALTITUD DE 3825 METROS, JULIACA 2025**, la misma que pertenece a la línea de investigación **TECNOLOGÍA E INGENIERÍA MECÁNICA** para optar el Título Profesional de **Ingeniero Mecánico Electricista**.

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el reglamento interno de trabajos de investigación conducente a grados y títulos mediante Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y en concordancia con el dictamen de similitud.

De conformidad al Reglamento Interno de Trabajos de Investigación Conducente a Grados y Títulos aprobado con Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y en merito al Art. 24, Art. 28 del reglamento, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales, y en uso a las atribuciones, que le concede la ley Universitaria N° 30220, ley de creación de la UANCV N° 23738 y modificatoria N° 24661, y el Estatuto de la UANCV, el Decano y el Director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras.

RESUELVE:

ARTÍCULO PRIMERO.- APROBAR, la **NOMINACIÓN DE JURADOS** integrado por los siguientes docentes:

- * **Presidente** : Dr. BENJAMIN CHUQUIMAMANI QUINTO
- * **1er Miembro** : Mgtr. SALVADOR TEODORO VALDIVIA CARDENAS
- * **2do Miembro** : Ing. ADWAR RANULFO SANCHEZ CARREON

ARTICULO SEGUNDO. - RECONOCER como asesor de la investigación (tesis) de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras al (a la) docente, **M.Sc. JESÚS ESTEBAN CASTILLO MACHACA**.

ARTICULO TERCERO. - APROBAR, la **FECHA Y HORA DE SUSTENTACIÓN DE LA TESIS** de él (la) bachiller: **MILTHON VLADIMIR LAYME PORTILLA**; del informe final de la investigación (tesis) titulada: **INFLUENCIA DEL DESGASTE MECÁNICO POR TRIBOLOGÍA EN LA VIDA ÚTIL DE UN MOTOR DIESEL DE 2 LITROS A UNA ALTITUD DE 3825 METROS, JULIACA 2025** para optar el Título Profesional de **Ingeniero Mecánico Electricista**. de acuerdo al siguiente detalle:

- * **FECHA** : Jueves 09 de abril del 2026
- * **HORA** : 09:30 hr
- * **LUGAR** : Aula 204 - FICP

ARTÍCULO CUARTO.- DISPONER que, la Unidad de Investigación, Responsables del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y el Director de la Escuela Profesional de **Ingeniería Mecánica Eléctrica** quedan encargados del cumplimiento de la presente Resolución.

Regístrese, Comuníquese, Archívese.



UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS
Dr. Ronald Madera Terán
DECANO (e)
CIP: 66975



UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS
Dr. Fritz Willy Mamani Apaza
DIRECTOR
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN



NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ

RESOLUCIÓN DECANAL N° 1698-2025-D-UI-FICP-UANCV

Juliaca, 12 de diciembre del 2025

VISTO: El expediente N° 2025-CU-12026 por el señor (a): **MILTHON VLADIMIR LAYME PORTILLA** quien solicita **REVISIÓN DEL INFORME FINAL DE LA INVESTIGACIÓN (borrador de tesis)**, el PROVEIDO - N° 1154-2025-UI-FICP-UANCV/J, y la **FICHA DE OPINIÓN DEL INFORME FINAL DE LA INVESTIGACIÓN (BORRADOR DE TESIS)** formato N° 048 - 2025 del integrante del comité de investigación **EPIME** de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, según al reglamento interno de trabajos de investigación conducente a grados y títulos.

CONSIDERANDO:

Que, el señor (a): **MILTHON VLADIMIR LAYME PORTILLA**, ha presentado su informe final de la investigación (borrador de tesis) Titulada: **INFLUENCIA DEL DESGASTE MECÁNICO POR TRIBOLOGÍA EN LA VIDA ÚTIL DE UN MOTOR DIESEL DE 2 LITROS A UNA ALTITUD DE 3825 METROS, JULIACA 2025**, para optar el Título Profesional de **Ingeniero Mecánico Electricista**.

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el Reglamento Interno de Trabajo de Investigación Conducente a Grados y Títulos, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales; el integrante del comité de investigación **Mgtr. Salvador Teodoro Valdivia Cardenas** de la Escuela Profesional de **Ingeniería Mecánica Eléctrica** de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, emitió la ficha de opinión del informe final de la investigación (borrador de tesis) formato N° 048 - 2025 **aprobando** el informe final de la investigación (borrador de tesis) titulado: **INFLUENCIA DEL DESGASTE MECÁNICO POR TRIBOLOGÍA EN LA VIDA ÚTIL DE UN MOTOR DIESEL DE 2 LITROS A UNA ALTITUD DE 3825 METROS, JULIACA 2025**, Correspondiente a la línea de investigación **TECNOLOGÍA E INGENIERÍA MECÁNICA**.

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el reglamento interno de trabajos de investigación conducentes a grados y títulos mediante Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y estando a la opinión favorable del comité de investigación respecto al informe final de la investigación (borrador de tesis).

Estando, con la opinión favorable del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y en concordancia al Reglamento Interno de Trabajos de Investigación Conducente a Grados y Títulos aprobado con Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y en mérito al Art. 27 del reglamento, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales, y en uso a las atribuciones, que le concede la ley Universitaria N° 30220, ley de creación de la UANCV N° 23738 y modificatoria N° 24661, y el Estatuto de la UANCV, el Decano y el Director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras.

RESUELVE:

ARTÍCULO PRIMERO.- APROBAR, el **INFORME FINAL DE LA INVESTIGACIÓN (BORRADOR DE TESIS)**, para la **REVISIÓN DE SIMILITUD TURNITIN**, presentado por el señor (a): **MILTHON VLADIMIR LAYME PORTILLA**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico Electricista, con el Tema Titulada: **INFLUENCIA DEL DESGASTE MECÁNICO POR TRIBOLOGÍA EN LA VIDA ÚTIL DE UN MOTOR DIESEL DE 2 LITROS A UNA ALTITUD DE 3825 METROS, JULIACA 2025** correspondiente a la línea de investigación **TECNOLOGÍA E INGENIERÍA MECÁNICA**, en virtud a los considerandos expuestos.

ARTÍCULO SEGUNDO.- RATIFICAR como **ASESOR DE INVESTIGACIÓN** al (a) **la), M.Sc. JESÚS ESTEBAN CASTILLO MACHACA**.

ARTÍCULO TERCERO.- DISPONER que, la Unidad de Investigación, Responsables del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y el Director de la Escuela Profesional de **Ingeniería Mecánica Eléctrica** quedan encargados del cumplimiento de la presente Resolución.

Regístrese, Comuníquese, Archívese.



UNIVERSIDAD ANDINA NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y Cs. PURAS

Dr. OSCAR V. VIAMONTE CALLA
DECANO (e)
C.I.P. 32730



UNIVERSIDAD ANDINA NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y Cs. PURAS

Dr. Cesar G. Camargo Najar
DIRECTOR
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN

cc:
Archivo
Investigaciones de la

**RESOLUCIÓN DECANAL N° 1254-2025-D-UI-FICP-UANCV**

Juliaca, 07 de octubre del 2025

VISTO: El expediente N° 2025-CU-8471, presentado por el señor (a) **MILTHON VLADIMIR LAYME PORTILLA** solicitando **APROBACIÓN DE LA PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN** el PROVEIDO - N° 895-2025-UI-FICP-UANCV/J, y la **FICHA DE OPINIÓN DE LA PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN** formato N° 048-2025 del integrante del comité de investigación **EPIME** de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, según al reglamento interno de trabajos de investigación conducente a grados y títulos.

CONSIDERANDO:

Que, el señor (a): **MILTHON VLADIMIR LAYME PORTILLA** ha presentado su propuesta de investigación Titulada: **INFLUENCIA DEL DESGASTE MECÁNICO POR TRIBOLOGÍA EN LA VIDA ÚTIL DE UN MOTOR DIESEL DE 2 LITROS A UNA ALTITUD DE 3825 METROS, JULIACA 2025**, para optar el Título Profesional de **Ingeniero Mecánico Electricista**.

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el Reglamento Interno de Trabajo de Investigación Conducente a Grados y Títulos, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales; el integrante del comité de investigación **Mgtr. Salvador Teodoro Valdivia Cardenas** de la Escuela Profesional de **Ingeniería Mecánica Eléctrica** de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, emitió la ficha de opinión de la propuesta de investigación formato N° 048-2025- aprobando la propuesta de investigación titulada: **INFLUENCIA DEL DESGASTE MECÁNICO POR TRIBOLOGÍA EN LA VIDA ÚTIL DE UN MOTOR DIESEL DE 2 LITROS A UNA ALTITUD DE 3825 METROS, JULIACA 2025**.

Que, es requisito indispensable contar con un asesor docente ordinario y/o contratado de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras con un mínimo de cinco años de docencia, grado de doctor o magister y experiencia en la línea a investigar, o deberá estar acreditado por Resolución 0989-2022-UANCV-CU-R, quien asumirá como asesor de la propuesta de investigación, según el área o grado.

Estando, con la opinión favorable de la propuesta de investigación del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y en concordancia al Reglamento Interno de Trabajos de Investigación Conducente a Grados y Títulos aprobado con Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y en mérito al Art. 25 del reglamento, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales, y en uso a las atribuciones, que le concede la ley Universitaria N° 30220, ley de creación de la UANCV N° 23738 y modificatoria N° 24661, y el Estatuto de la UANCV, el Decano y el Director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras.

RESUELVE:

ARTÍCULO PRIMERO.- APROBAR, la **PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN**, presentado por el señor (a): **MILTHON VLADIMIR LAYME PORTILLA**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico Electricista, con el Tema Titulada: **INFLUENCIA DEL DESGASTE MECÁNICO POR TRIBOLOGÍA EN LA VIDA ÚTIL DE UN MOTOR DIESEL DE 2 LITROS A UNA ALTITUD DE 3825 METROS, JULIACA 2025** correspondiente a la línea de investigación **TECNOLOGÍA E INGENIERÍA MECÁNICA**.

La misma que deberá proceder con la ejecución de la propuesta de Investigación aprobado de acuerdo a lo establecido en el Reglamento Interno de Trabajo de Investigación Conducente a Grados y Títulos, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales.

ARTÍCULO SEGUNDO.- RECONOCER como **ASESOR DE INVESTIGACIÓN** de al (a la) docente **M.Sc. JESÚS ESTEBAN CASTILLO MACHACA**.

ARTÍCULO TERCERO.- DISPONER que, la Unidad de Investigación, Responsables del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y el Director de la Escuela Profesional de **Ingeniería Mecánica Eléctrica** quedan encargados del cumplimiento de la presente Resolución.

Regístrese, Comuníquese, Archívese.

UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y Cs. PURASDr. OSCAR V. VIANCONTE CALLA
DECANO (e)
CIP. 32730UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS
Dr. Píriz Willy Mamani Apaza
DIRECTOR
UNIDAD DE INVESTIGACIÓNcc.
Archivo 2025



MILTHON VLADIMIR LAYME PORTILLA

INFLUENCIA DEL DESGASTE MECÁNICO POR TRIBOLOGÍA EN LA VIDA ÚTIL DE UN MOTOR DIESEL DE 2 LITROS A UNA ...

 Trabajos de tesis para ingreso a repositorio

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::13016:594480991

Fecha de entrega

25 may 2026, 9:51 GMT-5

Fecha de descarga

1 jun 2026, 15:48 GMT-5

Nombre del archivo

T036_71822262_T.docx

Tamaño del archivo

13.9 MB

100 páginas

13.542 palabras

78.140 caracteres



18% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 15%  Fuentes de Internet
- 2%  Publicaciones
- 12%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

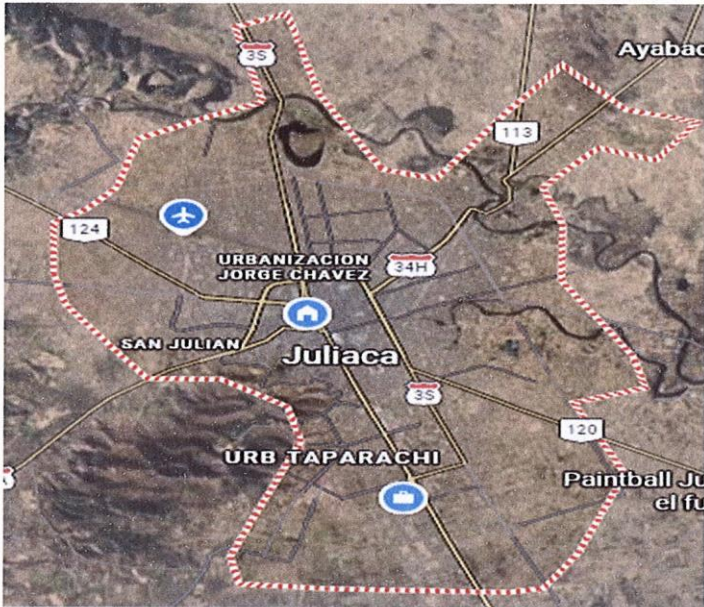
Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



Metadatos Complementarios

Título de la tesis	
INFLUENCIA DEL DESGASTE MECÁNICO POR TRIBOLOGÍA EN LA VIDA ÚTIL DE UN MOTOR DIESEL DE 2 LITROS A UNA ALTITUD DE 3825 METROS, JULIACA 2025	
Datos de autor	
Nombres y apellidos	MILTHON VLADIMIR LAYME PORTILLA
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	71822262
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0005-6261-044X
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	JESÚS ESTEBAN CASTILLO MACHACA
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	01323821
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-4595-7589
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	BENJAMIN CHUQUIMAMANI QUINTO
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	02406088
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	SALVADOR TEODORO VALDIVIA CARDENAS
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	02383061
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	ADWAR RANULFO SANCHEZ CARREON
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	02064066



Datos de investigación	
Línea de investigación	TECNOLOGÍA E INGENIERÍA MECÁNICA – P18
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Puno Provincia: San Román Distrito: Juliaca Longitud oeste: -15.481851250200059, - Latitud sur: -70.12075060454241
	 Url. https://goo.su/85fy4
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Junio 2024 - diciembre 2025
URL de disciplinas OCDE https://concytec-pe.github.io/Peru-CRIS/vocabularios/ocde_ford.html - Librería	Ingeniería mecánica https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.03.00 Mecánica aplicada https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.03.02



UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CERÓN VELÁSQUEZ"
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS BÁSICAS
Dr. Fritz Willy Mamani Apaza
DIRECTOR
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN



DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD

Yo **MILTHON VLADIMIR LAYME PORTILLA**, identificado con DNI Nro. **71822262** en mi condición de egresado de:

- ☒ **Escuela Profesional**
☐ **Programa de Segunda Especialidad,**
☐ **Programa de Maestría o Doctorado**

INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

informo que he elaborado el/la ☒ **Tesis** o ☐ **Trabajo de Investigación**, ☐ **Trabajo Académico** denominada:

INFLUENCIA DEL DESGASTE MECÁNICO POR TRIBOLOGÍA EN LA VIDA ÚTIL DE UN MOTOR DIESEL DE 2 LITROS A UNA ALTITUD DE 3825 METROS, JULIACA 2025

Asesorado por: **M. Sc. JESÚS ESTEBAN CASTILLO MACHACA**

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Juliaca __17__ de abril del 2026

Firma del Asesor
(obligatoria)

Firma del Estudiante
(obligatoria)

Huella





DEDICATORIA

A mis padres, por ser mi mayor apoyo y fuente de inspiración. Gracias por cada palabra de aliento, por su amor incondicional y por creer en mí en cada paso de este camino. Este logro es tanto suyo como mío.



AGRADECIMIENTOS

Extiendo mi más sincero agradecimiento a mis docentes y asesores por sus valiosos comentarios y guía constante. Su experiencia y apoyo han sido fundamentales para la realización de este trabajo



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
ÍNDICE GENERAL.....	v
RESUMEN	viii
ABSTRACT.....	ix
INTRODUCCIÓN	x

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1. Formulación del problema.....	1
1.2. Problema de investigación	2
1.2.1. Problema general.....	2
1.2.2. Problemas específicos	2
1.3. Objetivos de la investigación.....	2
1.3.1. Objetivo general	2
1.3.2. Objetivos específicos	2
1.4. Justificación.....	3
1.5. Hipótesis	4
1.5.1. Hipótesis general	4
1.5.2. Hipótesis específicas	4
1.6. Variables	4



1.6.1.	Variable independiente.....	4
1.6.2.	Variable dependiente	4
1.6.3.	operacionalización de variables	5

CAPÍTULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1.	Antecedentes de la investigación	6
2.1.1.	Antecedentes internacionales	6
2.1.2.	Antecedentes nacionales	8
2.1.3.	Antecedentes locales	10
2.2.	Marco teórico	12
2.2.1.	Tribología	12
2.3.	Marco conceptual	43

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.	Método de investigación.....	45
3.2.	Tipo de investigación.....	45
3.3.	Nivel de investigación	45
3.4.	Diseño de investigación	46
3.5.	Ámbito de investigación	46
3.6.	Población y muestra.....	46
3.7.	Técnicas e instrumentos	46



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Fricción de elementos de un motor diesel.....	48
4.2. Desgaste mecánico de elementos de un motor diésel de 2 litros	51
4.3. Parámetros esenciales para análisis tribológico (qué medir y por qué)	59
4.3. Discusión de resultados	70
CONCLUSIONES	72
RECOMENDACIONES	73
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
ANEXOS	79
ANEXO 1. MATRIZ DE CONSISTENCIA	80



RESUMEN

La finalidad del trabajo de investigación es la influencia del desgaste mecánico por tribología en la vida útil de un motor diesel de 2 litros a una altitud de 3825 metros. Es de tipo aplicada, nivel descriptivo – correlacional; analiza el comportamiento tribológico, las curvas de desgaste y las condiciones de lubricación de un motor diésel de 2 litros operando a 3825 metros sobre el nivel del mar, una altitud donde la baja presión atmosférica, la menor densidad del aire y las temperaturas reducidas modifican de manera significativa la fricción, el desgaste y la formación de la película lubricante. Se desarrollaron curvas de desgaste acumulado, tasa de desgaste y deterioro por componente, identificando las zonas críticas del motor como el conjunto pistón–cilindro, cojinetes, válvulas y sistema de leva. Asimismo, se generaron curvas de Stribeck para evaluar los regímenes de lubricación y se compararon lubricantes de distinta viscosidad, determinando que los aceites sintéticos 5W-30 y 10W-30 ofrecen mejor protección en altura debido a su fluidez en frío y estabilidad térmica. Finalmente, se concluye que una correcta selección del lubricante y un mantenimiento adaptado a la altura pueden aumentar la vida útil del motor entre 15% y 25%, mitigando los efectos adversos del entorno de operación en gran altitud.

Palabras Claves: Tribología, desgaste mecánico, vida útil, motor diésel



ABSTRACT

The purpose of this research is to investigate the influence of tribological mechanical wear on the service life of a 2-liter diesel engine at an altitude of 3825 meters. This applied, descriptive-correlational study analyzes the tribological behavior, wear curves, and lubrication conditions of a 2-liter diesel engine operating at 3825 meters above sea level, an altitude where low atmospheric pressure, reduced air density, and lower temperatures significantly modify friction, wear, and lubricant film formation. Accumulated wear curves, wear rates, and component deterioration were developed, identifying critical engine areas such as the piston-cylinder assembly, bearings, valves, and camshaft system. Stribeck curves were also generated to evaluate lubrication regimes, and lubricants of different viscosities were compared. The results showed that 5W-30 and 10W-30 synthetic oils offer better protection at high altitudes due to their cold fluidity and thermal stability. Finally, it is concluded that proper lubricant selection and altitude-adapted maintenance can increase engine lifespan by 15% to 25%, mitigating the adverse effects of the high-altitude operating environment.

Keywords: Tribology, mechanical wear, service life, diesel engine



INTRODUCCIÓN

El desgaste mecánico en motores de combustión interna constituye uno de los principales factores que determinan su eficiencia, desempeño operativo y vida útil. En particular, los motores diésel de 2 litros utilizados en zonas de alta altitud enfrentan condiciones extremas que aceleran los procesos tribológicos de fricción, desgaste y lubricación deficiente. La ciudad de Juliaca, ubicada a 3825 metros sobre el nivel del mar, presenta una presión atmosférica reducida, menor densidad del aire y mayores variaciones térmicas, factores que afectan directamente la combustión, la formación de hollín y la capacidad lubricante del aceite del motor.

A esta altitud, la disminución del oxígeno disponible produce combustiones incompletas, mayores depósitos carbonosos y un incremento en la carga térmica del lubricante. Estas condiciones aceleran mecanismos de desgaste como abrasión, adhesión, corrosión y fatiga superficial en componentes críticos como pistones, anillos, camisas de cilindro, cojinetes y árbol de levas. Por ello, comprender cómo la tribología influye en la degradación del motor se vuelve fundamental para estimar su vida útil real y establecer estrategias de mantenimiento predictivo.

El análisis de lubricante usado representa una herramienta clave dentro de la tribología aplicada, ya que permite evaluar el estado del motor sin necesidad de desmontarlo. Parámetros como el contenido de metales de desgaste, viscosidad, oxidación, hollín, TBN y TAN proporcionan información directa sobre la condición del motor y los mecanismos de desgaste activos. A través de este enfoque es posible modelar la vida útil remanente (RUL), identificar fallas incipientes y construir la curva P-F que describe el deterioro progresivo del motor.



La presente investigación tiene como propósito analizar la influencia del desgaste mecánico por tribología en la vida útil de un motor diésel de 2 litros operando en condiciones reales de 3825 m.s.n.m. El estudio se basa en mediciones instrumentales, análisis de lubricantes usados y revisión del comportamiento del motor bajo las condiciones ambientales particulares de Juliaca. Los resultados permitirán determinar los mecanismos de desgaste predominantes, evaluar los efectos de la altitud sobre la lubricación y estimar la vida útil del motor considerando su desgaste real.

En un contexto donde la mayor parte del transporte urbano y regional utiliza motores diésel que operan en altura, esta investigación aporta información técnica de relevancia para la optimización del mantenimiento, la reducción de costos operativos y la prolongación de la vida útil de los motores en regiones altoandinas.



CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1. Formulación del problema

A nivel internacional, el funcionamiento de motores diésel en regiones de gran altitud presenta desafíos técnicos importantes, especialmente en países con geografías montañosas como Perú, Bolivia, China, India, y algunas zonas de África y los Andes. En estos entornos, las condiciones ambientales como la baja presión atmosférica, el aire menos denso y las bajas temperaturas estas afectan negativamente el rendimiento y la durabilidad de los motores diésel.

Uno de los principales problemas es el desgaste tribológico, es decir, el deterioro que ocurre por la fricción entre las partes móviles del motor, como los pistones, los anillos y los cojinetes. En estas alturas, los lubricantes pierden efectividad, lo que provoca un mayor roce entre superficies y, por tanto, un desgaste más acelerado. Esto acorta la vida útil del motor y puede llevar a fallas tempranas si no se toman medidas adecuadas.

En Juliaca, ubicada a 3,825 metros sobre el nivel del mar, los motores diésel que se utilizan en vehículos y maquinaria suelen presentar un desgaste más rápido de lo esperado. Las condiciones propias de la altitud, como la baja presión atmosférica



y el aire menos denso, afectan el funcionamiento normal del motor, especialmente en lo que respecta a la combustión, la lubricación y el enfriamiento.

1.2. Problema de investigación

1.2.1. Problema general

¿De qué manera se puede determinar la influencia del desgaste mecánico por tribología en la vida útil de un motor diesel a una altitud de 3825 metros, Juliaca 2025?

1.2.2. Problemas específicos

¿Cómo se puede analizar la información de los desgastes mecánicos de un motor diesel a una altitud de 3825 metros?

¿Cómo se puede Identificar los tres fenómenos fricción entre cuerpos en movimiento, el desgaste y la fabricación de un motor diesel a una altitud de 3825 metros?

¿Cuál es la influencia de la vida útil de un motor diesel a una altitud de 3825 metros?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

Determinar la influencia del desgaste mecánico por tribología en la vida útil de un motor diesel a una altitud de 3825 metros, Juliaca 2025

1.3.2. Objetivos específicos

Analizar la información de los desgastes mecánicos de un motor diesel a una altitud de 3825 metros



Identificar los tres fenómenos fricción entre cuerpos en movimiento, el desgaste y la fabricación de un motor diesel a una altitud de 3825 metros

Determinar la influencia de la vida útil de un motor diesel a una altitud de 3825 metros

1.4. Justificación

Porque los motores diésel que operan en ciudades de gran altitud, como Juliaca (3825 msnm), presentan un desgaste prematuro que afecta directamente su vida útil, rendimiento y confiabilidad. Este desgaste está relacionado, en gran parte, con fenómenos tribológicos como la fricción y la lubricación deficiente, que se agravan por las condiciones ambientales propias de la altura: baja presión, temperaturas extremas y menor eficiencia en el sistema de combustión. A pesar de que este problema es frecuente en zonas altoandinas, existe poca investigación específica que relacione directamente la tribología con el contexto de altitud.

Para identificar, analizar y comprender cómo el desgaste tribológico influye en la vida útil de los motores diésel que operan en altura, con el fin de proponer soluciones técnicas adecuadas. Esto permitirá optimizar el mantenimiento, seleccionar mejores materiales y lubricantes, y adaptar las estrategias operativas a las condiciones reales de trabajo en Juliaca. Además, busca generar conocimiento útil para la formación de profesionales en ingeniería mecánica, automotriz o mantenimiento industrial, y contribuir al desarrollo tecnológico regional.

Mediante una investigación técnico-científica que combine el análisis tribológico de componentes críticos del motor (como pistones, cilindros, cojinetes y anillos), con la evaluación de su rendimiento en condiciones reales de altura. Se recopilará información técnica, se realizarán observaciones de campo, ensayos mecánicos y



se aplicarán modelos de análisis del desgaste. Asimismo, se considerarán variables como el tipo de lubricante, la frecuencia de mantenimiento, las horas de operación y el historial de fallas para establecer relaciones claras entre el entorno de trabajo y el desgaste observado.

1.5. Hipótesis

1.5.1. Hipótesis general

Si se determina la influencia del desgaste mecánico por tribología entonces se mejorara la vida útil de un motor diesel

1.5.2. Hipótesis específicas

Si se analiza la información del desgaste mecánico entonces se podrá identificar los tres fenómenos de un motor diesel

Si se identifica los tres fenómenos fricción entre cuerpos en movimiento, el desgaste y la fabricación de un motor diesel entonces se podrá mejora la vida útil

Si se mejora la vida útil del motor diesel entonces se podrán reducir costos de mantenimiento

1.6. Variables

1.6.1. Variable independiente

Desgaste mecánico por tribología

- Fricción
- Desgaste
- Lubricación

1.6.2. Variable dependiente

- vida útil del motor

1.6.3. operacionalización de variables

Tipo	Variable	Dimensiones	Indicadores	Unidad de medida
Independiente	fricción	- Coeficiente de fricción - Temperatura por fricción - Pérdida de energía	- Nivel de fricción entre superficies - Incremento de temperatura en componentes - Energía disipada por rozamiento	- Adimensional (μ) - °C - w/kw
	Desgaste	- Desgaste abrasivo - Desgaste adhesivo - Rugosidad superficial	- Pérdida de material en piezas - Transferencia de material - Nivel de rugosidad (Ra)	- Mm - μm - μm
	Lubricación	- Viscosidad del aceite - Contaminación del aceite - Tiempo de uso del aceite	- Índice de viscosidad - Partículas presentes - Horas de operación	- cSt - ppm - h
Dependiente	Vida útil del motor	- Tiempo de funcionamiento	- Horas operativas acumuladas	- h



CAPÍTULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Antecedentes internacionales

(Jaimes, 2015). En su artículo titulada *"Potencial energético de los gases de escape de un motor de combustión interna"* En un motor de combustión interna (MCI), gran parte de la energía del combustible se pierde a través de los gases de escape y el sistema de refrigeración. Dependiendo del régimen y la carga del motor, esta pérdida es del 30-40%. Existen diversas formas de recuperar la energía de los gases de escape, como calentar aire para calefacción o instalar un turbocompresor para aumentar la potencia del vehículo. Este trabajo analiza el potencial energético de los gases de escape de un motor de encendido por chispa para su uso en ciclos de refrigeración por absorción y compresión de vapor, según el régimen de giro del motor.

(Saldaña, 2015). En su tesis titulada *"Análisis del comportamiento de un motor de combustión interna alimentado con combustible obtenido de residuos plásticos"* En este trabajo se evaluaron las principales prestaciones del motor de combustión interna utilizando combustible obtenido de residuos plásticos. El proceso de



transformación de plásticos en combustible se realizó mediante pirólisis, que consiste en la descomposición térmica de materiales sin oxígeno. El producto obtenido, una vez caracterizado, se mezcló en diversas proporciones con diésel. Se realizaron pruebas en un banco de pruebas para calcular las características de operación del motor con cada mezcla de combustible.

(Riesco, 2012). En su artículo titulada *“Procesos Alternativos de Combustión en Motores de Combustión Interna”*. El motor de combustión interna con combustión por compresión de una mezcla pobre homogénea ha emergido como una alternativa para reducir simultáneamente las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) y partículas (PM). Este proceso híbrido combina características de los motores de encendido por chispa (MEP) y de encendido por compresión (MEC), utilizando una mezcla homogénea de aire-combustible que se comprime hasta su auto-ignición. Aunque se conoce como HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition), existen diversas variantes de este sistema. Este trabajo presenta una revisión de esos sistemas.

(Barrera & Nieves, 2021). En su tesis titulado *“Análisis tribológico entre segmento y cilindro del motor Hyundai Avante 1.5L, mediante el método de arrastre para determinar su eficiencia energética”*. El documento consiste en análisis de la fricción, lubricación y desgaste (tribología) entre segmento y cilindro del motor Hyundai Avante 1.5 l al aplicar el método del arrastre, las adquisiciones de datos se analizan con enfoque al tipo de lubricante y temperatura que se aplica, entre los segmentos y cilindros del motor. Con el fin de determinar la eficiencia energética que entrega el motor.

(Bastidas, 2021). En su tesis titulada *“Estudio experimental y analítico de las pérdidas mecánicas por fricción en el par tribológico pistón-camisa de cilindro en motores de combustión interna (ICE).”* El motor de combustión interna (MCIA) enfrenta el desafío de mejorar su eficiencia y reducir emisiones contaminantes, lo que requiere minimizar las pérdidas mecánicas por fricción mediante soluciones tribológicas como modificaciones en materiales, acabados superficiales y el uso de aceites lubricantes de baja viscosidad con aditivos. Esta investigación se enfocó en el conjunto pistón-camisa, el principal responsable de la fricción en el motor, desarrollando un banco de pruebas con camisa flotante para medir fuerzas de fricción y analizar la lubricación en distintas condiciones, junto con un modelo teórico para simular el comportamiento del segmento de compresión. La comparación y validación de los resultados experimentales y simulados permitió evaluar estrategias para reducir la fricción y optimizar el consumo de combustible en el MCIA

2.1.2. Antecedentes nacionales

(Yakabi, 1974). En su tesis titulado *“Desgaste en un motor Diesel Yanmar - modelo NTT5K, causado por defectuosa refrigeración”*. El desgaste en un motor de combustión interna está influenciado por múltiples factores, siendo la refrigeración defectuosa una de las principales causas de desgaste acelerado. Este estudio analiza el impacto del sistema de refrigeración en la vida útil del motor, abordando su funcionamiento, mantenimiento y calidad del agua utilizada. También examina la dinámica del pistón, los efectos del calor en componentes clave como el cilindro, los aros y las válvulas, y propone un cálculo teórico-práctico del desgaste. Finalmente, se presentan conclusiones que resaltan la importancia de un adecuado



sistema de refrigeración para evitar fallos prematuros, con especial enfoque en el motor Diesel "YANMAR" NT75K.

(Masias, 1983). En su tesis titulado *"Desgaste en cilindros de motores diésel"* Este trabajo analiza el funcionamiento y desgaste del motor diésel, considerando la influencia del tipo de motor y la velocidad de desgaste. Destaca la importancia del control diario del servicio mediante el monitoreo de parámetros clave como temperatura, presión y lubricación. El Ingeniero Jefe debe supervisar la operación, asegurando el suministro adecuado de combustibles y lubricantes, y utilizando tanto instrumentos de medición como inspecciones sensoriales para detectar anomalías y prevenir fallas

(Anticona & Tanta, 2015). En su tesis titulada *Influencia de las propiedades tribológicas del lubricante en el desgaste de pistones en motores de marca CUMMIN.* La investigación consistió en el cálculo del desgaste en los pistones de motores CUMMINS en función de las propiedades del lubricante. Para ello se inició con la toma de datos de las propiedades del lubricante y el historial del desgaste en función de los meses luego se realizó una predicción con redes neuronales para luego poder hacer la contrastación de los datos con un software de simulación. Finalmente, se realizó el análisis de costo para la implementación.

(Mas, 2017). En su tesis titulado *"Desarrollo y propuesta de implementación práctica de un sistema de control avanzado de un motor de combustión interna Nissan GA-15"*. El trabajo tiene como objetivo mejorar la eficiencia y reducir la contaminación de los motores de combustión interna mediante estrategias de control automático, disminuyendo su consumo de combustible y emisiones de gases de efecto invernadero. Para ello, se diseña un controlador basado en un

predictor de Smith discreto para regular la velocidad de un motor Nissan GA-15. Se realiza un estudio sobre los sistemas de control de estos motores y, mediante herramientas de identificación de sistemas, se obtiene un modelo matemático discreto. Luego, se diseña un sistema de control de la velocidad del cigüeñal del motor, instalado en el Laboratorio de Energía de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Finalmente, se analiza la robustez del sistema de control y se propone su implementación.

(Medrano, 2024). En su tesis titulado *“Análisis del desgaste mecánico y degradación del aceite para mejorar el rendimiento de motores Caterpillar modelo C11”*. El estudio analizó el desgaste mecánico en motores nuevos y remanufacturados modelo C11 mediante un análisis tribológico. Se evaluaron 64 muestras en períodos de 50 a 15,000 horas, identificando desgaste en componentes clave como el tren de válvulas, cigüeñal, bloque, cojinetes y pistones. Se constató que los motores remanufacturados presentaron mayor desgaste, con altos niveles de Fe y Cu, y una degradación más acelerada en varios modelos, alcanzando hasta un 115 % más de deterioro. La velocidad de desgaste prematuro fue significativa en algunos motores, evidenciando la necesidad de mejoras en los procesos de remanufactura.

2.1.3. Antecedentes locales

(Mauricio, 2017). En su tesis titulado *“Análisis de desgastes mecánicos por tribología para reducir costos de mantenimiento del motor de tractor sobre orugas D6T-CARTEPILLAR”*. El estudio analiza el desgaste mecánico en tractores sobre orugas con motores C9.3 ACERT-CAT, enfocado en los pares cinemáticos de fricción y su impacto en la operación y mantenimiento en la empresa STRACON GyM. Se investigan fallas mecánicas derivadas del sistema de lubricación para



mejorar la vida útil del motor y reducir costos. A través de un análisis tribológico, se identifican los pares de fricción involucrados en la lubricación hidrodinámica. La investigación, de tipo descriptiva y básica, busca optimizar el mantenimiento y corregir desgastes mecánicos para mejorar la eficiencia y rentabilidad operativa.

(Apaza, 2024). En su tesis titulada *“Optimización del rendimiento de un motor de combustión interna mediante variación de relación de compresión a 3825 metros sobre el nivel del mar, 2023”*. La investigación busca optimizar el rendimiento de un motor de encendido por chispa en altitudes de 3825 m.s.n.m., donde la menor densidad del aire reduce su potencia. Se propone aumentar la relación de compresión de 7 a 9.5 mediante rectificado y el uso de pistones de alta presión, empleando combustible de mayor octanaje. Esto mejora la combustión, incrementando el rendimiento en un 5-10% y reduciendo la contaminación ambiental.

(Paredes & Gonzales, 2015). En su tesis titulada *“Evaluación de desgastes mecánicos a través de overhaul para repotenciar el Jumbo Boomer 282 – Atlas Copco”*, La investigación se enfoca en el desgaste mecánico del motor de combustión interna del Jumbo Boomer 282 de Atlas Copco, cuya pérdida de potencia afecta su rendimiento. Se realizaron pruebas de presión de compresión, inyección de combustible, gases de escape y degradación del aceite, detectando la necesidad de un overhaul para extender su vida útil. Se busca recuperar la potencia original, reducir costos de mantenimiento y optimizar el sistema hidráulico, logrando una segunda vida útil de 5 a 7 años. Además, se propone implementar mantenimiento predictivo para mejorar la operatividad y eficiencia del equipo.

(Pomahuali, 2022). En su tesis titulado *“Análisis de causa raíz y Tribología en motores C15 para mejorar la confiabilidad en excavadoras 374 FL en mina Utunsa.”*

La investigación analiza el desgaste mecánico en motores C15 de excavadoras 374 FL en la mina Utunsa (2019-2021) mediante tribología y análisis de causa raíz. Se identificó la degradación prematura de componentes internos a través del análisis sistémico y el método de caja negra. Se aplicaron estrategias de reemplazo de balancines y enfriadores de aceite, logrando reducir la presencia de partículas metálicas de plomo y cobre, mejorando así la confiabilidad del equipo.

(Azula, 1974). En su tesis titulada *“Estudio de envejecimiento de los motores de combustión interna”*. Este trabajo estudia el envejecimiento de los motores de combustión interna, un tema clave para la industria pero poco abordado teóricamente. Su análisis busca mejorar la productividad, optimizar el mantenimiento y reducir costos. Selivanov, experto en la confiabilidad de máquinas, destaca la importancia de diseñar motores con componentes adaptables al mantenimiento y sustitución, garantizando así su eficiencia y durabilidad

2.2. Marco teórico

2.2.1. Tribología

La tribología es la disciplina que estudia la fricción, el desgaste y la lubricación entre superficies en contacto relativo. El término proviene del griego *tribos* (frotamiento) y fue adoptado formalmente en 1966 por el *Department of Education and Science* del Reino Unido para referirse a los fenómenos que ocurren en la interacción entre superficies sólidas y lubricantes (Hutchings & Shipway, 2017).

Desde un punto de vista ingenieril, la tribología integra conceptos de mecánica de superficies, ciencia de materiales, química del lubricante y dinámica del contacto,

con el fin de minimizar pérdidas energéticas y prolongar la vida útil de componentes mecánicos.

2.2.1.1. Importancia en sistemas mecánicos y motores. La tribología es fundamental para el funcionamiento eficiente de cualquier sistema mecánico con partes móviles. En un motor diésel, aproximadamente entre el 40% y el 50% de las pérdidas mecánicas totales están asociadas a fenómenos tribológicos, principalmente en los pares pistón–cilindro, cojinetes, tren de válvulas y sistema de distribución (Holmberg & Erdemir, 2019).

Una gestión adecuada de la fricción y el desgaste permite:

- Reducir pérdidas de energía por fricción.
- Aumentar la eficiencia térmica.
- Disminuir el consumo de combustible.
- Extender los intervalos de mantenimiento.
- Aumentar la vida útil de componentes críticos.

La literatura reciente muestra que mejoras tribológicas en motores de combustión pueden disminuir hasta el 18% del consumo energético global asociado a fricción en vehículos (Meng et al., 2020). Esto demuestra que el estudio tribológico no es solo un aspecto de mantenimiento, sino un factor clave de rendimiento y sostenibilidad.

2.2.1.2. Interacción superficie lubricante ambiente. El comportamiento tribológico depende del acoplamiento entre tres elementos:

1. Superficies en contacto,

2. Lubricante, y

3. Ambiente externo o condiciones operativas.

De acuerdo con Hutchings y Shipway (2017), la fricción real no ocurre entre las superficies aparentes, sino entre contactos microscópicos o asperidades, cuyo comportamiento está influido por la rugosidad, dureza, composición y estado superficial.

Por su parte, el lubricante actúa reduciendo la fricción mediante la formación de una película fluida, mixta o límite, dependiendo del espesor y de la viscosidad del aceite. La lubricación también depende de la temperatura, presión de operación y velocidad de deslizamiento (Ciulli, 2019).

Finalmente, el ambiente operativo (temperatura, cargas, humedad, presencia de contaminantes, presión o condiciones de combustión) afecta la degradación del lubricante y los mecanismos de desgaste. En motores diésel, estos factores determinan si el régimen de contacto se mantiene en lubricación hidrodinámica o se desplaza hacia regímenes más severos como la lubricación límite (Andersson, Tamminen & Sandström, 2002).

2.2.2. Mecanismos de fricción

La fricción en un sistema tribológico depende del régimen de lubricación presente entre dos superficies en contacto. Entre los modelos más aceptados para describir estos regímenes se encuentran la fricción seca, la fricción límite, la lubricación hidrodinámica, la lubricación elastohidrodinámica (EHL) y la representación gráfica consolidada en la curva de Stribeck. La transición entre estos mecanismos depende principalmente de parámetros como viscosidad del lubricante, velocidad relativa,

carga normal y rugosidad superficial (Hutchings & Shipway, 2017; Meng et al., 2020).

2.2.2.1. Fricción seca. La fricción seca ocurre cuando no existe lubricante entre las superficies, por lo que el contacto es principalmente entre asperidades. En este régimen, la fuerza de fricción F_f se describe clásicamente mediante:

$$F_f = \mu N$$

donde:

- μ = coeficiente de fricción,
- N = carga normal aplicada.

Este modelo —conocido como fricción de Coulomb es aplicable cuando la interacción se produce únicamente entre picos de rugosidad, generándose desgaste adhesivo o abrasivo dependiendo de la dureza relativa de los materiales (Hutchings & Shipway, 2017). Fenómenos como soldadura fría y microdesgarros son característicos de esta condición.

2.2.2.2. Fricción límite

La fricción límite se presenta cuando el lubricante está presente solo como una película muy delgada, insuficiente para separar completamente las superficies. La interacción principal sigue ocurriendo entre asperidades, pero los aditivos del lubricante como ZDDP, fosfatos o compuestos organometálicos forman películas triboquímicas que reducen la fricción y el desgaste.

Según Meng et al. (2020), este régimen depende fuertemente de la química del lubricante y de los aditivos EP (extreme pressure), especialmente en zonas críticas

como el pistón-anillo y el árbol de levas. La fricción límite es común en arranque en frío, bajas velocidades o cargas elevadas.

2.2.2.3. Fricción hidrodinámica y elastohidrodinámica (EHL).

a) Lubricación hidrodinámica

En la lubricación hidrodinámica, el movimiento relativo entre superficies genera un cuña de presión en la película lubricante, que separa completamente los cuerpos.

El espesor de película h y la presión generada dependen de:

- viscosidad del lubricante η ,
- velocidad relativa U ,
- geometría del contacto.

La ecuación que rige este comportamiento es la ecuación de Reynolds, base de la tribología moderna (Hutchings & Shipway, 2017):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6\eta U \frac{\partial h}{\partial x}$$

Este régimen ocurre en cojinetes, muñones de cigüeñal y superficies móviles de grandes velocidades.

b) Lubricación elastohidrodinámica (EHL)

La lubricación EHL aparece cuando la presión en el contacto es tan elevada que produce deformación elástica en las superficies y un aumento temporal de la viscosidad del lubricante.

Aplicaciones típicas:

- contactos rodantes como engranajes,
- pistas de rodamientos,
- levas y seguidores.

Según Ciulli (2019), este régimen permite mantener una película lubricante incluso en condiciones de alta carga, reduciendo la fricción a niveles muy bajos.

2.2.2.4. Curva de Stribeck. La curva de Stribeck describe la relación entre el coeficiente de fricción y el parámetro adimensional de lubricación Λ , definido como:

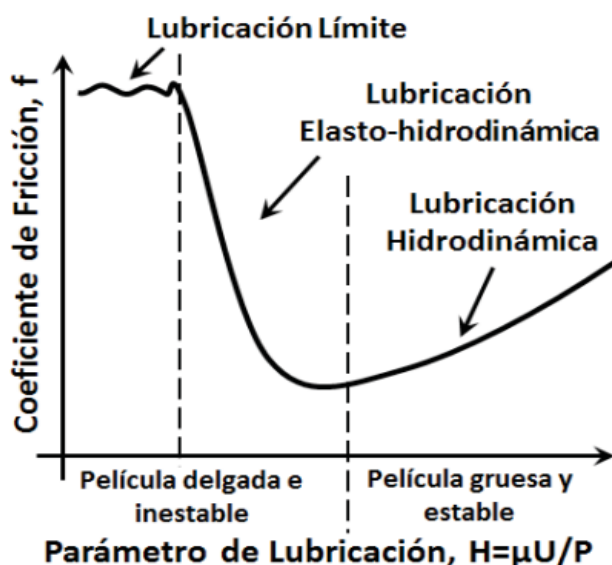
$$\Lambda = \frac{\eta U}{N}$$

(forma simplificada utilizada en estudios experimentales de transición de régimen, ver Holmberg & Erdemir, 2019).

La curva presenta tres zonas claramente identificables:

1. **Fricción límite** – contacto dominante entre asperidades, alto desgaste.
2. **Fricción mixta** – existe separación parcial entre superficies.
3. **Fricción hidrodinámica/EHL** – separación total con mínima fricción.

Figura 1. Curva de Stribeck



Nota. Esta figura muestra la transición entre fricción límite, mixta e hidrodinámica en función del parámetro de lubricación. (Suárez-Bustamante, Toro-Botero, & Vélez-Restrepo, 2011)

Este modelo es ampliamente utilizado para caracterizar el comportamiento tribológico en motores, especialmente en el conjunto pistón-anillo y cojinetes del cigüeñal (Andersson et al., 2002).

2.2.3. Tipos de desgaste mecánico en motores

El desgaste mecánico en motores diésel es el resultado de la interacción compleja entre superficies metálicas sometidas a carga, velocidad, temperatura, lubricación y contaminación. Los mecanismos más comunes incluyen desgaste adhesivo, abrasivo, corrosivo, fatiga superficial y cavitación. La magnitud y tipo de daño dependen del régimen de lubricación y de las condiciones tribológicas propias de cada componente (Hutchings & Shipway, 2017; Meng et al., 2020).

2.2.3.1. Desgaste adhesivo. El desgaste adhesivo ocurre cuando dos superficies en contacto experimentan soldadura microscópica entre asperezas debido a la presión y la temperatura local. Cuando ocurre el movimiento relativo, se generan arranques de material, conocidos como "scuffing" o "galling".

Este tipo de desgaste es frecuente en:

- conjunto pistón – anillo – camisa,
- árbol de levas y seguidores,
- cigüeñal y cojinetes durante pérdida temporal de lubricación.

Según Hutchings & Shipway (2017), el daño adhesivo aparece principalmente en condiciones de fricción límite, donde la película lubricante es insuficiente para separar las superficies.

$$\text{Tasa de desgaste adhesivo} \propto \frac{A_s \tau}{H}$$

: factor clave para el mantenimiento y la confiabilidad de un sistema

donde:

- A_s = área real de contacto,
- τ = resistencia al corte de las uniones adhesivas,
- H = dureza del material más blando.

2.2.3.2. Desgaste abrasivo. El desgaste abrasivo se presenta cuando partículas duras o asperezas actúan como microcuchillas, removiendo material. Puede ser:

- **dos cuerpos:** una superficie dura corta a la otra;
- **tres cuerpos:** partículas contaminantes entre ambas superficies.

Es habitual en motores debido a:

- polvo ingresado por filtración deficiente,
- partículas de hollín,
- residuos metálicos en el aceite.

Meng et al. (2020) destacan que este mecanismo es uno de los principales responsables de la pérdida de material en cilindros, anillos y bombas de aceite. La tasa de desgaste abrasivo se asocia a la ley de Archard:

$$V = k \frac{WL}{H}$$

donde

- V = volumen desgastado,
- K = coeficiente de desgaste,
- L = carga aplicada,
- H = dureza de la superficie.

2.2.3.3. Desgaste corrosivo. El desgaste corrosivo combina fenómenos químicos y mecánicos. La superficie metálica reacciona con componentes agresivos ácidos orgánicos, productos de combustión, agua, azufre, óxidos generando capas frágiles que luego se desprenden por acción mecánica.

En motores diésel proviene, principalmente, de:

- oxidación del lubricante,
- combustión incompleta (ácidos nítricos y sulfúricos),
- presencia de agua y contaminantes.

Holmberg y Erdemir (2019) señalan que la degradación química del aceite favorece la formación de películas débiles que aceleran el desgaste.

2.2.3.4. Desgaste por fatiga superficial. La fatiga superficial ocurre por la repetición de cargas cíclicas en zonas de contacto, generando microgrietas, pitting o spalling. Este mecanismo es típico de:

- cojinetes lisos,
- rodamientos,
- engranajes de distribución,
- superficies sometidas a contacto rodante o mixto.

La iniciación de grietas aparece generalmente bajo la superficie, donde las tensiones de contacto son máximas (Hutchings & Shipway, 2017).

La vida útil se relaciona con la carga mediante modelos de fatiga por contacto (línea de Hertz):

$$\sigma_{\text{máx}} = \left(\frac{6FE^2}{\pi^3 R^2} \right)^{1/3}$$

donde:

- $\sigma_{\text{máx}}$ = tensión máxima de contacto,
- F = carga normal,
- E = módulo elástico,
- R = radio equivalente.

2.2.3.5. Desgaste por cavitación. La cavitación es un mecanismo producido por el colapso de burbujas en el fluido, generando microchorros capaces de erosionar las superficies metálicas. En motores se observa principalmente en:

- camisas de cilindro,
- bombas de agua,
- caras externas de liners húmedos.

Según Ciulli (2019), la cavitación es un fenómeno hidrodinámico de alta energía que provoca picaduras puntuales y pérdida progresiva de material.

2.2.3.6. Comparación entre mecanismos

Tabla 1. Comparación entre mecanismos

Mecanismo	Condiciones típicas	Componentes afectados	Características del daño
Adhesivo	Alta presión, baja lubricación	Pistón-anillo, levas	Arranques de material, rayaduras profundas
Abrasivo	Partículas duras, contaminación	Camisas, anillos, bomba de aceite	Surcos paralelos, desgaste lineal
Corrosivo	Oxidación, ácido, humedad	Paredes de cilindro, cojinetes	Picaduras químicas, capas frágiles
Fatiga superficial	Cargas cíclicas	Cojinetes, engranajes	Pitting, grietas, desprendimiento superficial
Cavitación	Vibración del fluido, colapso de burbujas	Camisas, circuito de refrigeración	Picaduras redondeadas, erosión localizada

La selección adecuada de lubricante, control de contaminantes y diseño de superficies permite minimizar estos mecanismos y extender la vida útil de los componentes críticos del motor (Andersson et al., 2002).

2.2.4. Factores que influyen en el desgaste tribológico

El desgaste en un motor diésel es el resultado de la interacción compleja entre parámetros mecánicos, térmicos, químicos y materiales. Estos factores modifican

la fricción en los pares tribológicos —camisas–pistón, aros–camisa, cojinetes–cigüeñal— y determinan la vida útil del motor (Hutchings & Shipway, 2017).

2.2.4.1. Rugosidad superficial. La rugosidad condiciona el tipo de contacto entre superficies. Valores altos favorecen contactos asperidad-asperidad, aumentando la fricción seca y acelerando el desgaste abrasivo y adhesivo. Una rugosidad controlada permite la formación de una película lubricante estable (Stachowiak & Batchelor, 2013).

Además, estudios en motores muestran que el acabado plateau-hone reduce hasta un 40% el desgaste de los aros de pistón debido a mejor retención de lubricante (Priest & Taylor, 2000).

2.2.4.2. Carga mecánica y presión de combustión. La carga influye directamente en la presión de contacto. En motores diésel modernos, las presiones pico pueden superar 160 bar, generando esfuerzos que incrementan el desgaste adhesivo por micro-soldaduras y la fatiga superficial (Heywood, 2018).

Mayor presión de combustión → mayor carga normal → mayor desgaste por:

- **adhesión** (soldadura de asperidades),
- **fatiga superficial** en cojinetes y aros,
- **abrasión** por partículas duras atrapadas.

2.2.4.3. Velocidad de deslizamiento. La velocidad determina el régimen de lubricación. A bajas velocidades prevalece la fricción límite; a altas, la película hidrodinámica se vuelve dominante (Stribeck, 1902).

En motores, los máximos valores de desgaste ocurren:

- en el PMS (velocidad = 0 → fricción límite),

- durante el arranque en frío (baja velocidad + baja viscosidad).

La literatura reporta que hasta el 80% del desgaste total del motor ocurre durante el arranque (Priest & Taylor, 2000).

2.2.4.4. Temperatura de operación

La temperatura altera la viscosidad del lubricante, la resistencia de los materiales y la tasa de oxidación del aceite.

Temperaturas excesivas:

- disminuyen la viscosidad → pérdida de lubricación hidrodinámica,
- aceleran la oxidación → formación de lodos y barnices,
- favorecen el desgaste corrosivo (Mang & Dresel, 2010).

En motores de altura la menor densidad del aire incrementa la temperatura de combustión, elevando el estrés térmico en pistones y anillos.

.

2.2.4.5. Calidad del lubricante. La calidad del lubricante determina la capacidad de:

- formar película EHL,
- evitar desgaste adhesivo y abrasivo,
- controlar la oxidación,
- dispersar contaminantes.

Lubricantes con aditivos AW (anti-wear) y EP (extrema presión) como ZDDP reducen el desgaste en hasta 60% en superficies con altas cargas (Spikes, 2004).

La degradación del lubricante genera depósitos en pistones, afectando la eficiencia térmica y acelerando el desgaste de los aros.

2.2.4.6. Contaminantes en aceite. Los contaminantes más críticos en motores diésel son:

- hollín,
- polvo del ambiente (SiO_2),
- partículas metálicas desprendidas del motor,
- combustible diluido en aceite.

El hollín en concentraciones $>4\%$ puede aumentar el desgaste abrasivo en 200–250% al actuar como partículas duras entre superficies (Johnson, 2008)

2.2.4.7. Materiales de contacto (pares tribológicos). Los materiales determinan la resistencia al:

- desgaste adhesivo,
- abrasión,
- fatiga superficial,
- corrosión.

Ejemplos:

- **Camisas de hierro fundido perlítico/nodular** → alta resistencia al desgaste abrasivo.
- **Aros de pistón con recubrimientos CrN, Mo, DLC** → reducen fricción y aumentan la vida útil (Holmberg & Erdemir, 2019).

- **Cojinetes bimetálicos Al-Sn o Cu-Pb** → buena resistencia a fatiga y cargas dinámicas.

La selección material-lubricante es clave para mitigar mecanismos de desgaste específicos.

2.2.5. Lubricación en motores diésel.

La lubricación es uno de los pilares fundamentales para el funcionamiento fiable de un motor diésel, ya que reduce pérdidas por fricción, controla el desgaste y asegura el adecuado funcionamiento de los componentes móviles. La elección del lubricante, su viscosidad, el paquete de aditivos y el estado del aceite durante la operación determinan directamente la vida útil del motor (Mang & Dresel, 2010; Stachowiak & Batchelor, 2013).

2.2.5.1. Funciones del lubricante. Los lubricantes en motores diésel cumplen múltiples funciones simultáneamente:

- **Reducir la fricción y el desgaste** entre superficies metálicas en contacto.
- **Formar una película lubricante** que separe los pares tribológicos (camisa–pistón, cojinetes–cigüeñal).
- **Disipar calor**, colaborando con el sistema de enfriamiento.
- **Proteger contra la corrosión**, formando una barrera química.
- **Limpiar y mantener en suspensión partículas**, mediante aditivos detergentes y dispersantes.
- **Sellar parcialmente el cilindro**, reduciendo el blow-by.

Estas funciones están ampliamente descritas en literatura de lubricación industrial (Mang & Dresel, 2010; Totten, 2017).

2.2.5.2. Tipos de lubricantes (mineral, sintético, semisintético). Los lubricantes se clasifican principalmente según la naturaleza de su base:

- **Aceites minerales**

Derivados directamente del refinado del petróleo (grupos I y II según API).

Ventajas: bajo costo, buena compatibilidad.

Desventajas: menor estabilidad térmica y oxidativa.

- **Aceites sintéticos**

Obtenidos mediante síntesis química (grupo IV – PAO; grupo V – ésteres).

Ventajas: alta estabilidad térmica, mayor duración y rendimiento.

Recomendados en condiciones severas de carga o temperatura.

- **Aceites semisintéticos**

Mezcla de aceites minerales y sintéticos.

Equilibran costo, durabilidad y rendimiento.

La clasificación está estandarizada en API, ACEA y literatura especializada (Totten, 2017).

2.2.5.3. Índice de viscosidad (VI). El índice de viscosidad (VI) es un parámetro que describe cómo cambia la viscosidad del aceite frente a la temperatura.

- **VI alto:** el aceite mantiene mejor su viscosidad en caliente.
- **VI bajo:** la viscosidad cae con mayor rapidez al aumentar la temperatura.

Matemáticamente, el VI se calcula mediante la metodología ASTM D2270, basada en interpolaciones entre viscosidades de referencia a 40 °C y 100 °C.

Los aceites sintéticos suelen presentar valores de VI superiores a los minerales, lo que mejora el arranque en frío y la protección en caliente (Totten, 2017).

2.2.5.4. Paquetes de aditivos

Los aditivos representan entre 10–25% del aceite final y modifican o mejoran propiedades del lubricante.

Los principales son:

- **Antidesgaste (AW):** destacando el *Zinc Dialquil Dition Fosfato (ZDDP)*, generador de una película triboquímica protectora (Spikes, 2004).
- **Antioxidantes:** inhiben la oxidación del aceite.
- **Detergentes:** neutralizan compuestos ácidos.
- **Dispersantes:** mantienen en suspensión partículas de hollín.
- **Modificadores de viscosidad:** mejoran el VI.
- **Inhibidores de corrosión y herrumbre.**

La evidencia experimental muestra que el ZDDP es decisivo en motores diésel debido a las altas presiones de contacto y la presencia de hollín (Spikes, 2004; Mang & Dresel, 2010).

2.2.5.5. Degradación del lubricante

Los lubricantes trabajan a una temperatura elevada causando degradación acelerada, la alta temperatura del lubricante pierde protección en las piezas

mecánicas lo que causa desgaste por rozamiento de piezas metálicas sin lubricación.

- **Oxidación térmica:** acelerada por altas temperaturas y metales catalizadores.
- **Nitración:** reacción con compuestos derivados de la combustión.
- **Contaminación por hollín:** especialmente crítica en motores diésel, aumenta la abrasividad del aceite.
- **Pérdida de aditivos:** por agotamiento o precipitación.
- **Dilución por combustible:** reduce viscosidad y capacidad lubricante.

Estos procesos afectan la viscosidad, la capacidad detergente y la formación de película lubricante, incrementando el desgaste interno (Mang & Dresel, 2010; Totten, 2017).

2.2.5.6. Curvas de lubricación y desgaste del motor

El comportamiento del lubricante en un motor se interpreta mediante:

- **Curva de Stribeck**

Relaciona el coeficiente de fricción con el parámetro:

$$\frac{\eta V}{P}$$

donde:

η = viscosidad del lubricante

V = velocidad de deslizamiento

P = carga normal

Permite identificar tres regímenes:

1. **Fricción límite** (contacto metal–metal).
2. **Elasto–hidrodinámico (EHL)** (formación parcial de película).
3. **Hidrodinámico** (separación total de superficies).

(Stribeck, 1902; Stachowiak & Batchelor, 2013).

• Curvas de desgaste del motor

En motores diésel, el desgaste depende del régimen de lubricación predominante en:

- arranque en frío,
- fase de calentamiento,
- régimen de operación estable,
- parada del motor.

La literatura muestra que la mayor proporción de desgaste total ocurre durante los arranques y periodos de lubricación límite (Priest & Taylor, 2000).

2.2.6. Métodos de análisis del desgaste

El análisis del desgaste es fundamental para determinar la condición de los componentes de un motor diésel y planificar el mantenimiento predictivo. Existen varias técnicas que permiten identificar el tipo, la severidad y el origen del desgaste (Hutchings & Shipway, 2017; Mang & Dresel, 2010).

2.2.6.1. Espectrometría de aceite. La espectrometría de aceites es un método que detecta y cuantifica partículas metálicas presentes en el lubricante mediante técnicas como ICP-OES (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry).

- Permite identificar el desgaste de cojinetes, pistones y otras superficies metálicas.
- Diferencia entre metales base y metales de aleación, lo que ayuda a localizar el origen del desgaste.
- Puede detectar desgaste incipiente antes de que cause falla catastrófica (Mang & Dresel, 2010; Totten, 2017).

2.2.6.2. Análisis ferrográfico (directo y analítico). El análisis ferrográfico es un método basado en la observación de partículas ferrosas en un aceite:

- **Ferrograma directo:** Se deposita la muestra de aceite sobre un portaobjetos y se observan partículas mediante microscopio.
- **Ferrograma analítico:** Clasifica las partículas según tamaño, forma y tipo, permitiendo distinguir entre desgaste adhesivo, abrasivo o por fatiga superficial.

Esta técnica es ampliamente utilizada en mantenimiento predictivo de motores y maquinaria rotativa (Stachowiak & Batchelor, 2013; Hutchings & Shipway, 2017).

2.2.6.3. PQI – Índice de partículas ferrosas. El Particle Quantifier Index (PQI) es un parámetro derivado de la espectrometría de aceites o del análisis ferrográfico que cuantifica la concentración de partículas ferrosas en el lubricante.

- Valores altos indican desgaste acelerado de cojinetes o pistones.

- Permite comparar tendencias temporales para anticipar fallas (Totten, 2017).

2.2.6.4. Microscopía de superficies. La microscopía de superficies incluye técnicas como:

- **Microscopía óptica:** permite observar surcos, microgrietas o rayas en piezas metálicas.
- **Microscopía electrónica de barrido (SEM):** ofrece resolución alta para identificar microfracturas, cavitación o inclusiones.
- **EDS (Energy Dispersive Spectroscopy):** se combina con SEM para determinar composición química de partículas de desgaste.

Estas técnicas son esenciales para caracterizar el tipo de desgaste y correlacionarlo con las condiciones de operación (Hutchings & Shipway, 2017; Mang & Dresel, 2010).

2.2.6.5. Métodos de rugosimetría

La rugosimetría cuantifica la textura superficial y la topografía de las piezas:

- Parámetros comunes: Ra (promedio aritmético), Rq (raíz cuadrática media), Rz (altura media de los picos y valles).
- Permite evaluar la influencia de la rugosidad en la fricción y el desgaste.
- Se utiliza tanto en muestras nuevas como usadas para estudiar la evolución superficial durante la operación (Stachowiak & Batchelor, 2013).

2.2.7. Conceptos generales de vida útil

La vida útil de un componente o sistema se refiere al período durante el cual cumple con su función dentro de parámetros aceptables de desempeño, antes de que su

degradación o falla comprometa su operación (Mobley, 2002; Jardine et al., 2006).

En ingeniería de mantenimiento y confiabilidad, este concepto es fundamental para planificar estrategias de inspección, mantenimiento preventivo y predictivo.

2.2.7.1. Definición de vida útil. La vida útil puede definirse como el intervalo de tiempo o el número de ciclos durante el cual un equipo o componente funciona sin fallas críticas bajo condiciones de operación específicas. Esta definición implica considerar:

- Condiciones de carga y temperatura.
- Calidad del material y fabricación.
- Condiciones de lubricación y mantenimiento.

El concepto es central en confiabilidad mecánica y tribología, pues permite anticipar fallas y minimizar costos por paro no planificado (Mobley, 2002).

2.2.7.2. Curva de desgaste (curva de bañera). La curva de bañera es un modelo clásico que describe la tasa de fallas o desgaste de un componente a lo largo del tiempo. Se caracteriza por tres regiones (Jardine et al., 2006; ASM International, 2002):

1. **Alta tasa inicial:** falla temprana por defectos de fabricación o errores de montaje.
2. **Tasa baja y constante:** vida útil útil, con fallas aleatorias mínimas.
3. **Alta tasa final:** desgaste acelerado y envejecimiento, donde aumenta la probabilidad de falla.

Gráficamente, la curva tiene forma de “U”, indicando la transición de rodaje a desgaste acelerado.

2.2.7.3. Fases de vida: rodaje, operación estable y desgaste acelerado. Las fases de la vida útil se relacionan con la curva de bañera:

- **Rodaje:** período inicial, donde componentes metálicos y superficies tribológicas se asientan. La fricción y el desgaste pueden ser más altos hasta que se estabiliza la película lubricante (Hutchings & Shipway, 2017).
- **Operación estable:** fase central donde el desgaste es mínimo y predecible. La fricción y el consumo de energía son relativamente constantes.
- **Desgaste acelerado:** etapa final donde la degradación de superficies, lubricante o materiales causa fallas frecuentes o críticas. La planificación de mantenimiento se vuelve esencial para prevenir fallas catastróficas.

2.2.7.4. Tiempo vs. condición (RCM, mantenimiento predictivo)

Los enfoques modernos de mantenimiento basado en condición buscan monitorear variables críticas en tiempo real para extender la vida útil sin depender únicamente de intervalos fijos de tiempo. Entre ellos destacan:

- **RCM (Reliability-Centered Maintenance):** identifica modos de falla críticos y asigna estrategias de mantenimiento óptimas según la criticidad (Moubray, 1997).
- **Mantenimiento predictivo:** utiliza análisis de vibraciones, lubricantes, temperatura, desgaste y otras condiciones para anticipar la necesidad de intervención (Mobley, 2002).

Este enfoque permite que los equipos operen de manera segura durante su vida útil máxima, evitando reemplazos prematuros y reduciendo costos operativos.

2.2.8. Estructura y funcionamiento de un motor diésel de 2 litros

Un motor diésel es un motor de combustión interna que convierte la energía química del combustible en trabajo mecánico mediante la compresión y combustión del diésel. La comprensión de su estructura, funcionamiento y pares tribológicos críticos es esencial para analizar el desgaste mecánico y la eficiencia operativa (Heywood, 2018; Stone, 2012).

2.2.8.1. Ciclo diésel. El ciclo diésel es un ciclo termodinámico que consiste en cuatro etapas principales: admisión, compresión, combustión y escape (Heywood, 2018):

1. **Admisión:** el pistón desciende y entra aire limpio al cilindro.
2. **Compresión:** el pistón asciende, comprimiendo el aire a alta presión y temperatura.
3. **Combustión:** se inyecta el diésel, que se enciende por autoignición, generando expansión y movimiento del pistón.
4. **Escape:** los gases quemados son expulsados a través de la válvula de escape.

El ciclo diésel es eficiente en términos de consumo de combustible y genera altos pares motores, pero también genera fricción y desgaste significativos en los componentes internos.

2.2.8.2. Principales partes del motor. Las partes críticas de un motor diésel de 2 litros incluyen (Stone, 2012; Taylor, 2006):

- **Pistones:** transmiten la fuerza de expansión de los gases a la biela y, posteriormente, al cigüeñal.
- **Aros (anillos de pistón):** sellan la cámara de combustión y controlan el consumo de aceite; su desgaste afecta compresión y lubricación.
- **Camisas (cilindros):** superficies donde se desplazan los pistones; deben resistir abrasión y fricción adhesiva.
- **Bomba de inyección:** regula la entrega de combustible a alta presión.
- **Sistema de lubricación:** mantiene películas lubricantes entre superficies metálicas y retira calor.
- **Sistema de refrigeración:** controla la temperatura de operación y evita sobrecalentamiento, que podría acelerar el desgaste.

2.2.8.3. Pares tribológicos críticos

Los pares tribológicos son combinaciones de superficies en contacto que generan fricción y desgaste durante la operación del motor (Hutchings & Shipway, 2017):

1. **Pistón–camisa:** el desgaste adhesivo y abrasivo es crítico; afecta la compresión y la eficiencia de lubricación.
2. **Árbol de levas–taqués:** contacto metal-metal que experimenta fricción principalmente en régimen límite; requiere lubricación elastohidrodinámica (EHL).
3. **Bancada–cigüeñal:** cojinetes que soportan cargas altas y velocidad variable; fallas pueden generar fricción excesiva o fallo catastrófico.

4. **Inyectores–asientos:** desgaste por fricción y erosión; afecta la atomización del combustible y la eficiencia de combustión.

La comprensión de estos pares permite planificar estrategias de mantenimiento predictivo y seleccionar lubricantes adecuados, prolongando la vida útil del motor (Totten, 2017; Mang & Dresel, 2010).

2.2.9. Fallas por desgaste en motores

El desgaste mecánico en motores diésel impacta directamente la eficiencia, confiabilidad y vida útil de los componentes. Comprender cómo se manifiestan estas fallas permite implementar estrategias de mantenimiento predictivo y selección adecuada de lubricantes (Hutchings & Shipway, 2017; Heywood, 2018).

2.2.9.1. Incremento de consumo de aceite. El desgaste de los anillos de pistón y las camisas incrementa el flujo de aceite hacia la cámara de combustión. Esto se puede aproximar mediante la ecuación de flujo de aceite por fugas (Mang & Dresel, 2010):

$$Q_{aceite} = k \cdot A_r \cdot \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}$$

Donde:

- Q_{aceite} = flujo de aceite consumido
- k = coeficiente de fuga
- A_r = área real de contacto de los anillos

- ΔP = diferencia de presión entre cárter y cámara
- ρ = densidad del aceite

El aumento en el consumo de aceite reduce la capacidad lubricante restante, generando depósitos de carbón y acelerando el desgaste (Heywood, 2018).

2.2.9.2. Pérdida de compresión. El desgaste de pistones, anillos y cilindros disminuye la estanqueidad de la cámara de combustión. La presión efectiva de combustión puede aproximarse como (Heywood, 2018):

$$P_e = P_c \cdot \left(1 - \frac{V_l}{V_c}\right)$$

Donde:

- P_e = presión efectiva de combustión
- P_c = presión ideal de combustión
- V_c = volumen de cámara de combustión
- V_l = volumen de fuga por desgaste

Esta reducción de presión disminuye la eficiencia térmica y aumenta el consumo de combustible.

2.2.9.3. Aumento de emisiones. El desgaste mecánico provoca fugas y combustión incompleta:

- Emisión de partículas de hollín y NOx.
- Incremento de gases de escape por aceite quemado en cilindros.

Estos efectos afectan el cumplimiento de normas ambientales y la eficiencia del motor (Stone, 2012; Heywood, 2018).

2.2.9.4. Golpeteos mecánicos

El desgaste en cojinetes, tren de válvulas y taqués genera ruidos conocidos como “golpeteos”:

- Indican contacto metal–metal.
- Señal de pérdida de tolerancias y desgaste excesivo.
- Pueden derivar en fallas graves si no se corrigen (Totten, 2017).

2.2.9.5. Pérdida de potencia. La reducción de compresión y la fricción excesiva disminuyen la potencia entregada por el motor. Esto se traduce en menor par motor y respuesta más lenta al acelerador (Heywood, 2018).

2.2.9.6. Temperaturas elevadas. El aumento de fricción genera incrementos de temperatura en cojinetes, pistones y cilindros, que pueden estimarse mediante:

$$T_f = \frac{\mu \cdot F \cdot v}{c_p \cdot m}$$

Donde:

- T_f = aumento de temperatura
- μ = coeficiente de fricción
- F = carga normal
- v = velocidad relativa
- c_p = capacidad calorífica

- m = masa del componente

El sobrecalentamiento acelera la degradación del lubricante, favorece fatiga térmica y puede inducir deformaciones, provocando fallas prematuras (Hutchings & Shipway, 2017; Mang & Dresel, 2010).

2.2.10. Modelos de predicción de vida útil

La predicción de la vida útil de componentes mecánicos permite planificar mantenimiento y optimizar la operación de motores diésel, evitando fallas prematuras y costos elevados. En tribología y motores, los modelos se basan en desgaste, condiciones de lubricación, rugosidad y monitoreo de parámetros operativos (Hutchings & Shipway, 2017; Mang & Dresel, 2010).

2.2.10.1. Modelos por tasa de desgaste. Estos modelos suponen que la pérdida de material o degradación ocurre a una tasa constante o dependiente de condiciones de carga, velocidad y lubricación.

El modelo lineal de desgaste se puede expresar como:

$$V(t) = K \cdot L \cdot t/H$$

Donde:

- $V(t)$ = volumen de material desgastado en el tiempo t
- K = coeficiente de desgaste
- L = carga normal sobre el componente
- H = dureza del material

Este modelo es útil para estimar el desgaste adhesivo o abrasivo en pistones, cojinetes y superficies de contacto (Hutchings & Shipway, 2017).

2.2.10.2. Curva P–F. La curva P–F representa la evolución de un fallo desde su detección inicial (P) hasta la falla funcional (F).

- Permite definir ventanas de mantenimiento predictivo.
- La vida útil remanente se estima observando parámetros de condición, como vibraciones, temperatura o partículas en aceite.

$$RUL = t_F - t_{actual}$$

Donde:

- RUL = vida remanente estimada
- t_F = tiempo proyectado de falla funcional
- t_{actual} = tiempo actual de operación

Teniendo los datos:

- Vida útil total estimada: **200,000 km**
- Uso actual: **120,000 km**

$RUL = 200,000 - 120,000 = 80,000$ km restantes

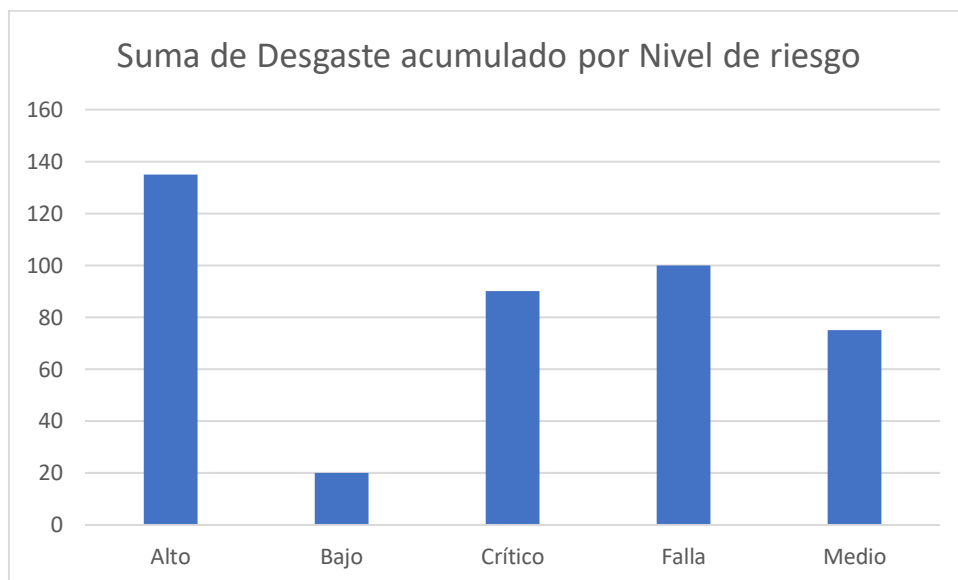
Uso actual (km)	Vida útil total (km)	RUL (km)	Costo mantenimiento
0	200000	200000	100
50000	200000	150000	300
100000	200000	100000	700
150000	200000	50000	1500
200000	200000	0	3000

Influye :

Es la vida útil del motor, influye de manera crítica y directa

Este enfoque es estándar en mantenimiento basado en condición (RCM) (Mobley, 2002).

Graficando la curva en Excel obtenemos los niveles necesarios



2.2.10.3. Modelos matemáticos por rugosidad. El desgaste está estrechamente relacionado con la rugosidad superficial y el área de contacto real A_r :

$$A_r = \frac{F_n}{H}$$

$$V = f(A_r, v, t)$$

Donde:

- F_n = carga normal
- H = dureza del material
- v = velocidad de deslizamiento
- V = volumen de desgaste

Estos modelos permiten predecir la degradación de superficies de pistón–camisa, cojinetes y válvulas (Hutchings & Shipway, 2017).

2.2.10.4. Vida útil por condición del lubricante. El estado del lubricante influye directamente en la vida útil del motor. Modelos basados en viscosidad, TBN (total base number) y contenido de partículas ferrosas permiten estimar el desgaste futuro:

$$RUL \propto f(\eta, TBN, P_f)$$

Donde:

- η = viscosidad del lubricante
- TBN = capacidad neutralizante del aceite
- P_f = presencia de partículas de desgaste

Este enfoque se integra en sistemas de monitoreo de condición de aceite y espectrometría ferrográfica (Mang & Dresel, 2010).

2.2.10.5. Vida remanente estimada (RUL). La vida remanente (Remaining Useful Life, RUL) se estima combinando los modelos de desgaste, condiciones de lubricación y parámetros operativos. Fórmulas simplificadas:

$$RUL = \frac{V_{m\acute{a}x} - V_{actual}}{dV/dt}$$

Donde:

- $V_{m\acute{a}x}$ = volumen máximo permisible de desgaste
- V_{actual} = volumen desgastado hasta la fecha
- dV/dt = tasa de desgaste promedio

La RUL permite planificar mantenimientos preventivos y evitar fallas catastróficas (Hutchings & Shipway, 2017; Mang & Dresel, 2010).

2.3. Marco conceptual

Un motor diésel de 2 litros es un sistema térmico de combustión interna que convierte la energía química del combustible en energía mecánica.

Su funcionamiento se basa en autoignición del diésel por la alta compresión, lo que genera mayores presiones internas en comparación a motores a gasolina ya que los motores están sometidos a condiciones severas de operación, lo que los hace sensibles al desgaste mecánico.

- **Tribología:** La tribología es la ciencia que estudia la fricción, el desgaste y la lubricación entre superficies en contacto y en movimiento relativo como :

- Eficiencia de un sistema
- Pérdida de energía por fricción
- La tasa de degradación de los componentes

- **Fricción:** La fricción es la fuerza que se opone al movimiento relativo entre dos superficies y se representan en las siguientes fases.

- Mayor generación de calor
- Pérdida de eficiencia
- Incremento del desgaste

- **Desgaste:** El desgaste es la pérdida progresiva de material de una superficie debido al contacto y movimiento con otra superficie en motores tenemos.

- Adhesivo: por contacto directo entre las superficies
- Adhesivo: por partículas contaminantes
- Corrosivo: por reacciones químicas



- Fatiga superficial: por cargas repetitivas
- **Lubricación:** La lubricación consiste en aplicar una sustancia (aceite) entre superficies para reducir fricción, desgaste y temperatura donde se disminuye el contacto directo entre los metales, reduce la temperatura y aumenta la vida del motor



CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Método de investigación

El método científico que es el conjunto de pasos sistemáticos que permiten obtener conocimiento confiable, verificable y reproducible. En esta investigación se aplica para analizar el desgaste tribológico y su influencia en la vida útil del motor diésel de 2 litros a 3825 m.s.n.m.

3.2. Tipo de investigación

El tipo de investigación aplicada porque busca resolver un problema real: determinar cómo el desgaste tribológico afecta la vida útil de un motor diésel operando en condiciones de gran altitud.

No se limita a generar teoría, sino que usa principios tribológicos, métodos de análisis de aceite, y mediciones de desgaste para proponer mejoras técnicas y operativas

3.3. Nivel de investigación

Descriptiva: Porque caracteriza el desgaste mecánico, condiciones de lubricación, contaminación, rugosidad y fallas típicas en un motor que trabaja a 3825 m.s.n.m.

Correlacional: Porque busca establecer la relación entre:



Variable 1: Desgaste tribológico

Variable 2: Vida útil del motor

3.4. Diseño de investigación

No experimental: No se manipula el desgaste del motor, solo se observa.

3.5. Ámbito de investigación

La investigación se circunscribe a motores diésel que operan en zonas de alta altitud, tomando como referencia las condiciones ambientales de Juliaca (Perú), ubicada a 3825 m.s.n.m.

Las mediciones, análisis y datos se basan en motores sometidos a estas condiciones reales de operación

3.6. Población y muestra

La población esta referida a los motores diesel que operan a altitudes de 3825 metros sobre el nivel del mar

La muestra es los motores diesel de 2 litros de cilindrada a 3825 metros sobre el nivel del mar

3.7. Técnicas e instrumentos

Técnicas:

Análisis del lubricante usado

Observación técnica del motor

Medición instrumental

Revisión documental

Instrumentos:



Espectrómetro, viscosímetro, ferrografo, contador de partículas

Formatos de inspección del motor

Listas de verificación de desgaste

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Fricción de elementos de un motor diesel

La fricción hidrodinámica o “fricción fluida” es el modo de rozamiento predominante en las piezas del motor, pero, durante los períodos de puesta en marcha y calentamiento del motor, pueden existir entre las piezas fricción mixta e incluso fricción límite

Coeficiente de fricción: depende de las propiedades del lubricante, la velocidad y la carga a la que están sometidas las superficies en rozamiento

La fuerza de fricción entre las superficies tendrá igual comportamiento que el coeficiente de fricción, pero con magnitud amplificada por la fuerza normal

$$F_{roz.} = \mu F_{normal}$$

Los elementos del motor donde se produce las principales pérdidas por rozamiento son:

- Segmentos del motor
- Falda del pistón
- Cojinetes del cigüeñal
- Sistema de distribución de gases

Factores que afectan a las pérdidas por fricción

Peso de las piezas

$$W_{piezas} = M g = k_1 L^3 \rho g$$

Fuerzas de inercia

$$F_{iner.} = M a = k_1 L^3 \rho \frac{v_{mp}^2}{R} (\cos \alpha + \lambda \cos 2\alpha + \dots)$$

Fuerzas debidas a los gases

$$F_{gases} = P_{mi} \frac{\pi D^2}{4}$$

Cuantificación de las pérdidas por fricción

La magnitud de las pérdidas de fricción dependerá del punto de operación del motor, caracterizado a través de los siguientes parámetros de funcionamiento:

- Régimen de giro
- Grado de carga
- Temperatura de trabajo

Efectos del régimen de giro (rpm)

De este parámetro depende la velocidad lineal media del pistón, como se observa anteriormente las fuerzas de inercia aumentan proporcionalmente a la velocidad media del pistón, por lo tanto, e incrementan las perdidas mecánicas de fricción

Efecto del grado de carga

Condiciona el valor de la presión media indicada



Aumentan de manera proporcional a la presión media indicada: la fuerza lateral sobre la falda del pistón y los segmentos y las fuerzas radial y tangencial en los cojinetes de la biela y el cigüeñal

Efecto de la temperatura de trabajo

El estudio de la temperatura de trabajo conduce a un control estricto de la temperatura del refrigerante del motor. Esta controla el nivel térmico de los componentes del motor y del lubricante por consiguiente influye en la viscosidad del aceite y el coeficiente de fricción

La presión media de pérdidas mecánicas por fricción se reduce en un 50% al incrementar la temperatura de los fluidos desde 10°C a 90°C

Formas de reducir las pérdidas por fricción

Desde el punto de vista del lubricante

- Garantizar un elevado índice de viscosidad del aceite, parámetro que caracteriza el comportamiento de viscosidad-temperatura
- Formulación del aceite base con viscosidad más baja
- Empleo de aditivos

desde el punto de vista constructivo

- Reducir la masa de las partes móviles especialmente la que tiene movimiento alternativo
- Fabricar pistones con falda de longitud corta y que solo tenga contacto con el cilindro en la zona perpendicular al eje del bulón
- Disminuir el número de segmentos
- Aumentar la holgura entre pistón y cilindro y entre cigüeñal y los cojinetes

Estas soluciones a su vez tienen algunos inconvenientes:

- Condicionan la resistencia mecánica de las piezas
- Pueden aumentar la fuga de gases al cárter
- Pueden aumentar el consumo de lubricante
- Pueden aumentar el ruido producido por las piezas del motor

4.2. Desgaste mecánico de elementos de un motor diésel de 2 litros

Anillos y cilindro

El desgaste de anillos es causado por el hollín en el aceite, temperatura elevada y una mala combustión

Figura 1. Desgaste de anillos y cilindro



Cojinetes

El desgaste de cojinetes es causado por carga excesiva del motor, aceite degradado y mayor aireación del lubricante

Figura 2. Desgaste de cojinetes



Válvulas y asientos

El desgaste de válvulas y asientos es causado por mezcla rica, hollín, y sobre temperatura

Figura 3. Desgaste de válvulas y asiento



Efectos del desgaste mecánico

- Reducción de la eficiencia: el desgaste de los elementos internos fijos y móviles como: cilindros, pistones y anillos permite baja compresión, provocando una pérdida graduada de potencia y mayor consumo de combustible



- Generación de calor: la fricción entre las fuerzas genera calor excesivo, lo cual puede dañar los componentes y causas fundición de elementos críticos
- Falla de piezas: Componentes como las válvulas, los asientos, árbol de levas y los cojinetes también sufren desgaste por rozamiento, altas temperaturas e impactos
- Contaminación y lubricación deficiente: el desgaste genera desprendimiento de partículas que contaminan el aceite. Si el aceite no es el adecuado o no se combina a tiempo, la lubricación se vuelve ineficiente, lo que acelera el desgaste
- Problemas de arranque y rendimiento: El desgaste puede causar problemas de arranque del motor

Factores que aceleran el desgaste

- Malos hábitos de conducción: Acelerar y frenar bruscamente, especialmente durante arranque en frío
- Mantenimiento inadecuado: No realiza el cambio de aceite y filtros a tiempo
- Combustible de baja calidad

Factores que influyen en la vida útil del motor

- Mantenimiento: No tener o no cumplir plan de mantenimiento adecuado
- Conducción:
- Calidad de combustible
- Calidad de los repuestos
- Reparación del motor

Funciones de la lubricación

- Reducir la fricción y el desgaste:

El aceite crea una capa que repara las superficies de contacto, lo que disminuye la fricción, el desgaste y pérdida de potencia

- Enfriar el motor:

El aceite ayuda a evacuar el calor de los pares de fricción, funcionando como un refrigerante.

- Limpiar el motor

El lubricante arrastra suciedad, partículas y hollín, manteniéndolo limpio

- Sellar y amortiguar

Crea un sello entre los anillos del piston y la pared del cilindro y amortiguar las vibraciones, impacto y el ruido

- Proteger contra la corrosión

Evita la corrosión de los componentes internos del motor

Componentes del sistema de lubricación

- Bomba de aceite

Impulsa el aceite a presión a través del sistema

- Filtro de aceite

Limpia el aceite de contaminantes antes de que circule por el sistema

- Carter

Deposito de aceite para que sea succionado por la bomba

- Válvulas

Regula la presión del aceite para asegurar la presión adecuada en todo el sistema

Fallas en pares tribológicos

Las fallas que tienen lugar en los pares tribológicos objeto de estudio se pueden apreciar fácilmente por las anomalías que ellas causan en el funcionamiento del motor de combustión interna trabajando con combustible diésel. El modo de fallo es identificado mediante la evidencia física de diversas fallas en el sistema de distribución de gases, movimiento fundamental, engranajes de distribución y el mecanismo fundamental del motor diésel ya indicado.

Figura 4. Árbol de fallas de lógico de causas y efectos empleados en un análisis para determinar las causas contribuyentes y directa de fallos en pares cinemáticos del motor (guía-vástago de válvula)

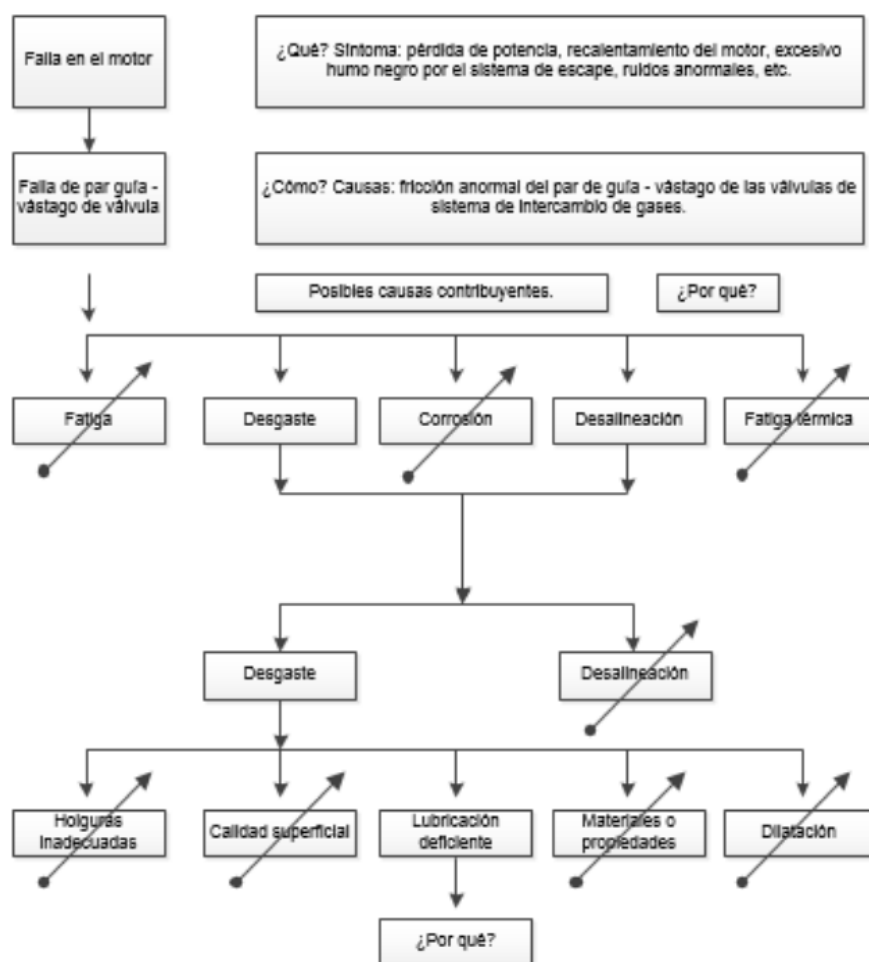


Figura 5. Árbol lógico de causas y efectos empleados en un análisis para determinar las causas contribuyentes y directa de fallos en pares cinemáticos del motor (pistón – cilindro)

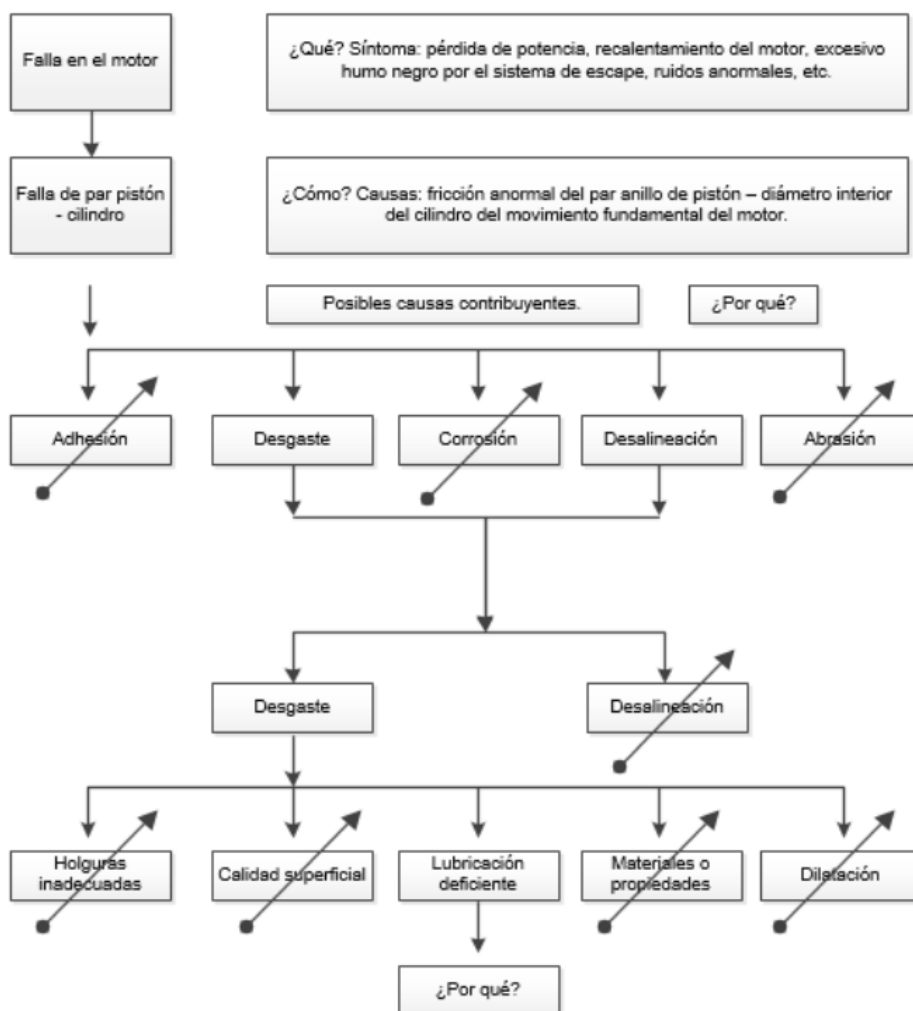


Figura 6. Árbol lógico de causas y efectos empleados en un análisis para determinar las causas contribuyentes y directa de fallos en pares cinemáticos del motor (cojinete – muñón)

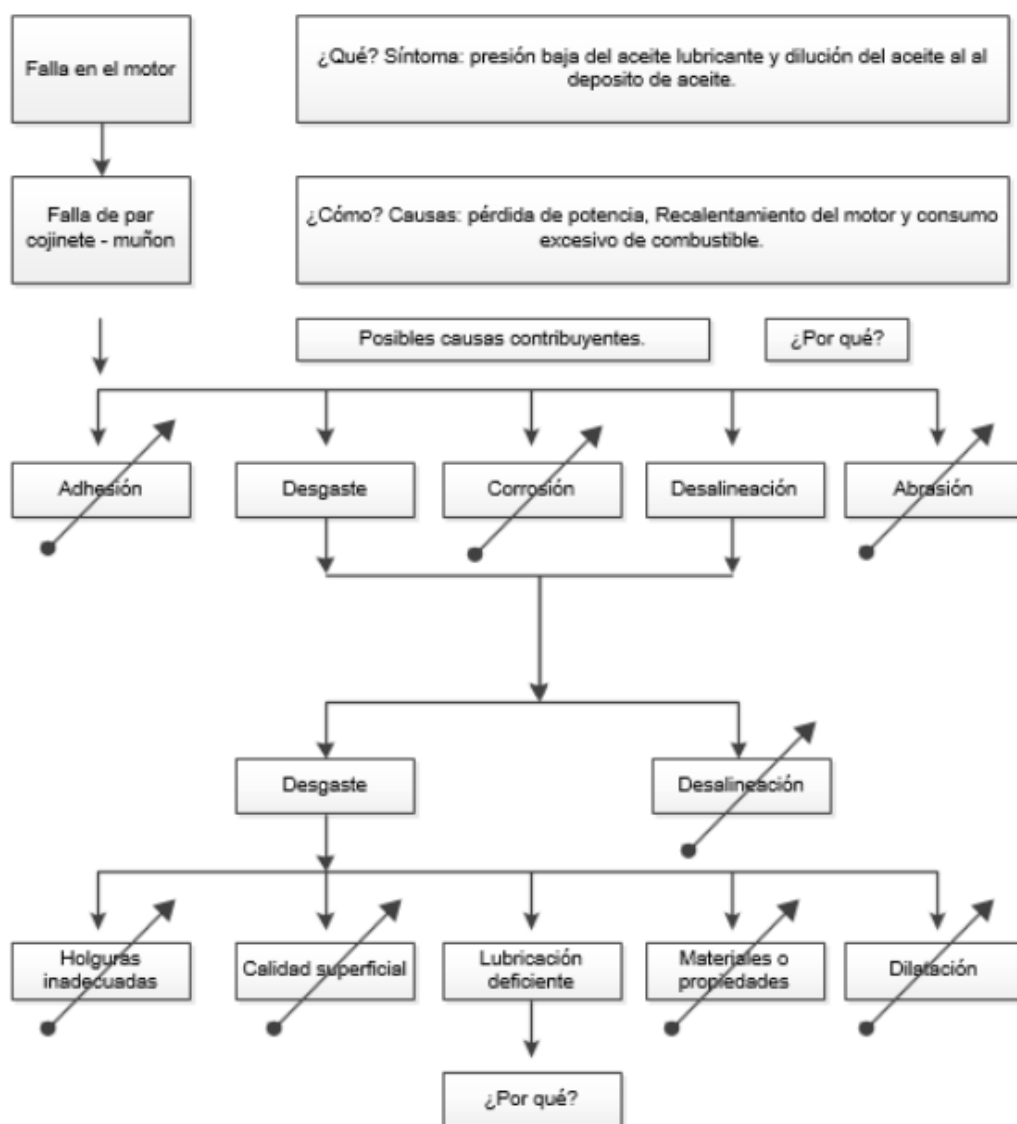


Figura 7. Árbol lógico de causas y efectos empleados en un análisis para determinar las causas contribuyentes y directa de fallos en pares cinemáticos del motor (par envolvente)

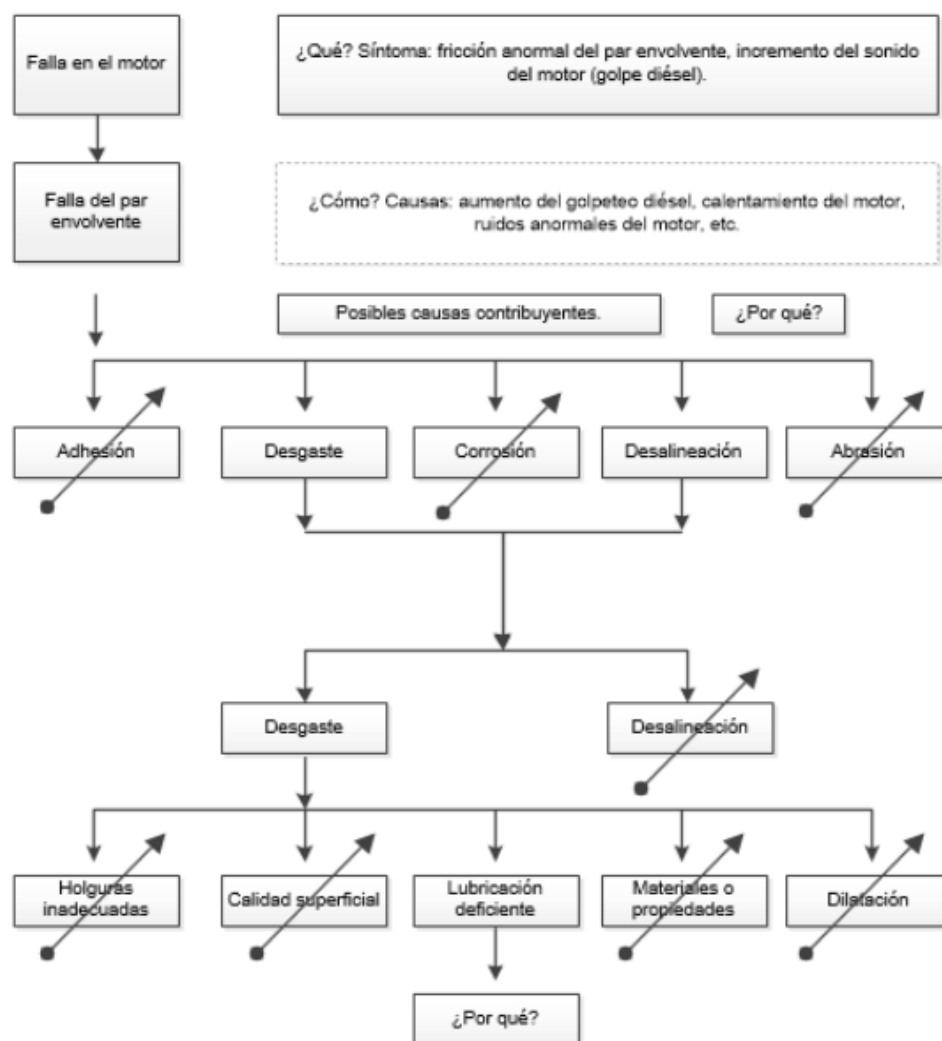


Tabla 2. Tipos de lubricantes para motores diesel a una altitud de 3825 m.s.n.m.

Tipo	Viscosidad recomendada	Ventaja / cuándo usar	
Sintético multigrado	5W-30 o 10W-30	Mejor fluidez en frío → protección en arranques fríos en altura	
Semisintético	10W-40	Buena estabilidad en operación y protección general	
Mineral (uso pesado)	15W-40	Económico; peor en arranques fríos — evitar si frecuentes arranques en frío	
Aceite con aditivos AW/EP	Según fabricante	Protege cojinetes y zonas con riesgo de adhesión	
Alto índice de viscosidad (VI)	5W-40 / 10W-40	Estabilidad térmica y menor pérdida de película en régimen caliente	

4.3. Parámetros esenciales para análisis tribológico (qué medir y por qué)

1. Metales por ICP-OES / ICP-AES (ppm = mg/kg) — identifican origen del desgaste

- Fe (hierro) — desgaste general (pistones, cilindros, árbol)
- Cu (cobre) — cojinetes, bujes, contactos de cobre/bronce
- Al (aluminio) — pistones, alojamientos
- Pb, Sn (plomo, estaño) — aleaciones de cojinetes
- Cr (cromo) — recubrimientos de anillos, ejes
- Ni (níquel) — componentes específicos o contaminantes del combustible

PQI (Particle Quantifier Index) — índice magnético de partículas ferrosas (partículas grandes → desgaste severo). Unidad arbitraria; tendencia más importante.

PQI (Índice Cuantificador de Partículas)

Es un índice utilizado en análisis de aceite por ferrografía para medir la cantidad total de partículas metálicas ferromagnéticas presentes en el lubricante, independientemente del tamaño. Se obtiene con un equipo llamado Quantifier Ferromagnetic Analyzer.

Un PQI alto puede indicar:

1. Desgaste abrasivo

- Partículas grandes de hierro.
- Puede deberse a contaminación con polvo (silicio), pobre filtración o problemas de alineamiento/holgura.

2. Desgaste adhesivo (scuffing/ scoring)

- Se produce por falta de lubricación, mezcla pobre, alta temperatura o fricción metal-metal.

3. Corrosión (menos común en PQI)

- Ocurre si hay altas cargas térmicas, humedad o mala calidad de aceite.

Tabla 3. Nivel de PQI y su interpretación

PQI	Interpretación
0 – 20	Normal. Desgaste leve.
20 – 50	Límite aceptable. Revisar tendencia.
50 – 100	Tendencia anómala. Puede haber desgaste acelerado.
100 – 200	Desgaste severo. Revisar motor y filtración.
> 200	Alarma crítica. Riesgo de falla catastrófica.

2. **Conteo de partículas y clasificación ISO 4406** — limpieza/contaminación sólida (3 cifras: >4 μm , >6 μm , >14 μm).
3. **Soot / Hollín (% masa o mg/g)** — carga de hollín en el aceite (abrasividad y consumo de aditivos).
4. **Viscosidad cinemática (cSt a 40 °C y 100 °C)** — estado del aceite y su capacidad de formar película lubricante.
5. **Índice de viscosidad (VI)** — estabilidad de la viscosidad con temperatura (si está disponible).
6. **TBN (Total Base Number, mg KOH/g)** — reserva alcalina para neutralizar ácidos; caída indica consumo de aditivos detergentes/neutralizantes.
7. **TAN / Acidez (mg KOH/g)** — aumento indica oxidación/acidificación del aceite.
8. **Agua (% vol.)** — presencia de agua (corrosión/cavitación).
9. **Fuel dilution (%)** — dilución por combustible (reduce viscosidad, film lubricante).

10. **FTIR (Oxidation, Nitration, Sulfation)** — degradación química del aceite.
11. **Elemento Si (silicio, ppm)** — ingestión de polvo (filtro aire comprometido).
12. **Partículas ferrografía (tamaño, forma, composición)** — distingue desgaste por fatiga (partículas laminadas) vs abrasión (partículas angulosas).
13. **Contaminantes (Na, K, Cl, S)** — refrigerante, sal, aditivos de combustible.

2) Unidades y notas prácticas

- Metales: **ppm** (mg/kg de aceite). Muchos laboratorios reportan igual.
- Viscosidad: **cSt @40°C y @100°C**.
- TBN/TAN: **mg KOH / g**.
- Soot: **% masa** o **mg/g** según laboratorio.
- PQI: escala relativa (consultar laboratorio para calibración).
- ISO 4406: formato XX/YY/ZZ (ej. 16/13/11).

3) Rangos orientativos y umbrales (motores diésel, base práctica)

Estos son rangos orientativos. Ajusta según fabricante, horas de motor y condiciones locales.

- **Fe (hierro)**
 - Normal (motor en buena condición): **< 50 ppm**



- Observación: **50–150 ppm**
 - Alerta: **> 150–200 ppm** o aumento rápido entre muestreos
- **Cu (cobre)**
 - Normal: **< 10–20 ppm**
 - Alerta: **> 30–50 ppm** (posible desgaste de cojinetes)
- **Al (aluminio)**
 - Normal: **< 20 ppm**
 - Alerta: **> 40–60 ppm**
- **Si (silicio)**
 - Normal: **< 10 ppm**
 - Alerta: **> 20 ppm** (ingestión de polvo)
- **PQI**
 - Normal: **0–20**
 - Observación: **20–50**
 - Alerta: **> 50–100**
 - Crítico: **> 200**
- **Soot**
 - Normal: **< 1–2 %** (dependiendo del motor)
 - Alerta: **> 3–4 %** (riesgo de aglutinamiento de aditivos)

- **Viscosidad**

- Fuera de rango: viscosidad menor en $>10\%$ del valor nominal → pérdida de película
- Si la viscosidad baja por fuel dilution o alta por soot ($>10\text{--}15\%$ aumento) → problema

- **TBN**

- Nuevo aceite típico: **6–12 mg KOH/g** (depende del aceite)
- Alerta: reducción significativa ($>30\text{--}50\%$ del valor inicial) o TBN $< 2\text{--}3$ → riesgo corrosión

- **Water**

- Alerta si $> 0.5 \%$ o detección libre de agua

- **ISO 4406**

- Objetivo operativo para flotas: $\leq 16/13/11$; si supera en 2 códigos, revisar filtración

4) Interpretación práctica y diagnósticos (patrones típicos)

- **Fe aumenta + PQI baja** → partículas pequeñas/fractales → desgaste general continuo (abrasión por hollín fino).
- **Fe bajo + PQI alto** → partículas magnéticas grandes → falla localizada (p. ej. rotura de un componente).

- **Fe y Cu subiendo juntos** → posible fallo de cojinetes (Cu por material del cojinete).
- **Soot alto + TBN disminuye** → hollín aglomerando aditivos → aceites pierden capacidad protectora → mayor riesgo de adhesión y fatiga.
- **Si alto** → problema en el sistema de admisión/filtrado (ingestión de polvo) → abrasión en cilindros/anillos.
- **Viscosidad baja + fuel dilution alta** → pérdida de película lubricante → lubricación límite → riesgo inmediato de desgaste adhesivo.
- **Aumento de nitration/oxidation (FTIR)** → aceite térmicamente degradado → cambiar aceite y revisar temperatura de operación.

5) Acciones correctoras recomendadas según anomalía

- **Fe en aumento lento (50–150 ppm):** incrementar frecuencia de muestreo, revisar cartucho de aceite, mejorar filtración, comparar con PQI/ferrografía.
- **Fe rápido / PQI alto:** detener operación si posible, inspección física (endoscopio), revisar cojinetes; cambiar aceite y filtro.
- **Cu aumento:** revisar presión de aceite, holguras de cojinetes, posible rectificación o reemplazo de cojinetes.
- **Si alto:** revisar filtros de aire y sellos de admisión; instalar prefiltro ciclónico si hay polvo.

- **Soot elevado y TBN bajo:** cambiar aceite por formulación con mejor dispersante/detergente; aumentar intervalo de cambio y filtrar más; considerar separador de hollín.
- **Fuel dilution:** revisar inyectores, control de combustión; si $>3-5\%$ cambiar aceite y revisar inyectores.
- **Agua en aceite:** buscar fuga de refrigerante o condensación; drenar y reparar; cambiar aceite.

Figura 8. Película de aceite

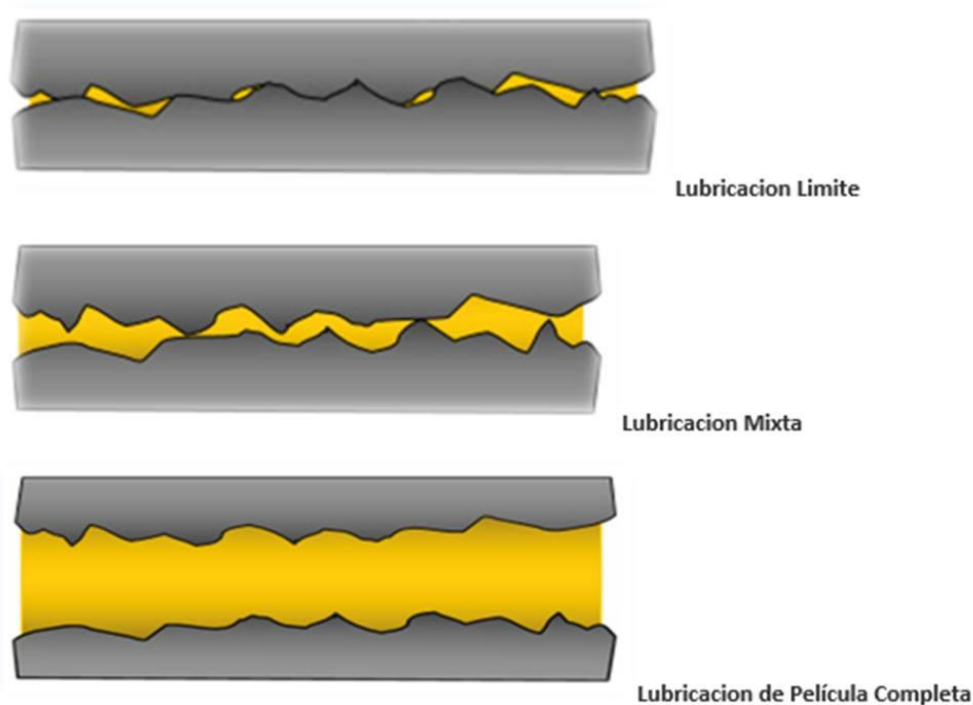
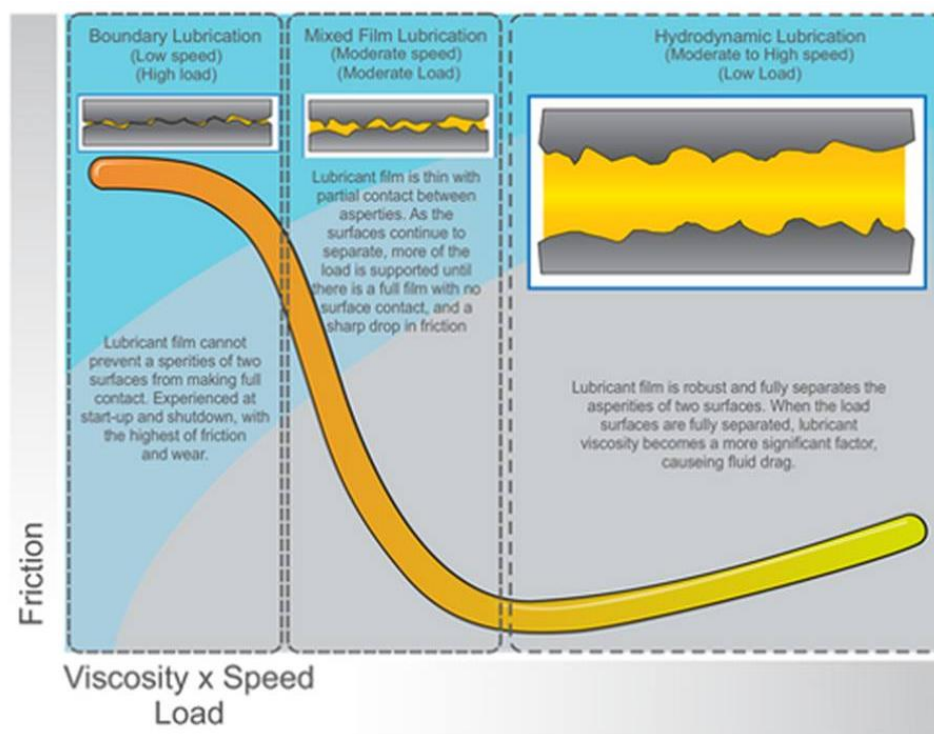


Figura 9. Curva de Stribeck

La gráfica relaciona fricción (eje vertical) con el parámetro combinado viscosidad $\times$ velocidad / carga (eje horizontal).

Esta curva describe cómo funciona la lubricación entre dos superficies metálicas en movimiento, como en un motor diésel.

La curva se divide en tres regiones:

a) Lubricación límite (Boundary Lubrication)

(Baja velocidad – Alta carga – Baja viscosidad efectiva)

Es la zona del lado izquierdo de la curva, donde la fricción es alta.

Ocurre debido a:

- La película lubricante es muy delgada.
- Las superficies rugosas sí se tocan (asperidades en contacto).

- El desgaste es alto.
- Ocurre principalmente en: Arranque en frío, apagado del motor y cambios bruscos de carga

Consecuencias tribológicas:

- Desgaste adhesivo
- Desgaste por fatiga
- Riesgo de rayado o "scuffing"

b) Lubricación mixta (Mixed Film Lubrication)

(Velocidad moderada – Carga moderada)

Zona central con una caída pronunciada de la fricción.

Ocurre debido a:

- Hay contacto parcial entre asperezas.
- La película lubricante comienza a soportar parte de la carga.
- La fricción disminuye rápidamente.
- El motor entra aquí poco después de estabilizar rpm.

Consecuencias tribológicas:

- Desgaste moderado
- Transición del contacto metal-metal a separación parcial

c) Lubricación hidrodinámica (Hydrodynamic Lubrication)

(Alta velocidad – Baja carga – Película lubricante gruesa)

Es la zona derecha de la curva, donde la fricción es baja y estable.

Ocurre debido a:

- La película de aceite es suficientemente gruesa para separar totalmente las superficies.
- No hay contacto metal-metal.

- La fricción es causada principalmente por: Viscosidad del aceite y arrastre del fluido

Consecuencias tribológicas

- Mínimo desgaste
- Trabajo eficiente del motor
- Se da en: Velocidad de crucero y motor bien lubricado y caliente

Figura 10. Curva de viscosidad vs temperatura de diferentes tipos de lubricantes

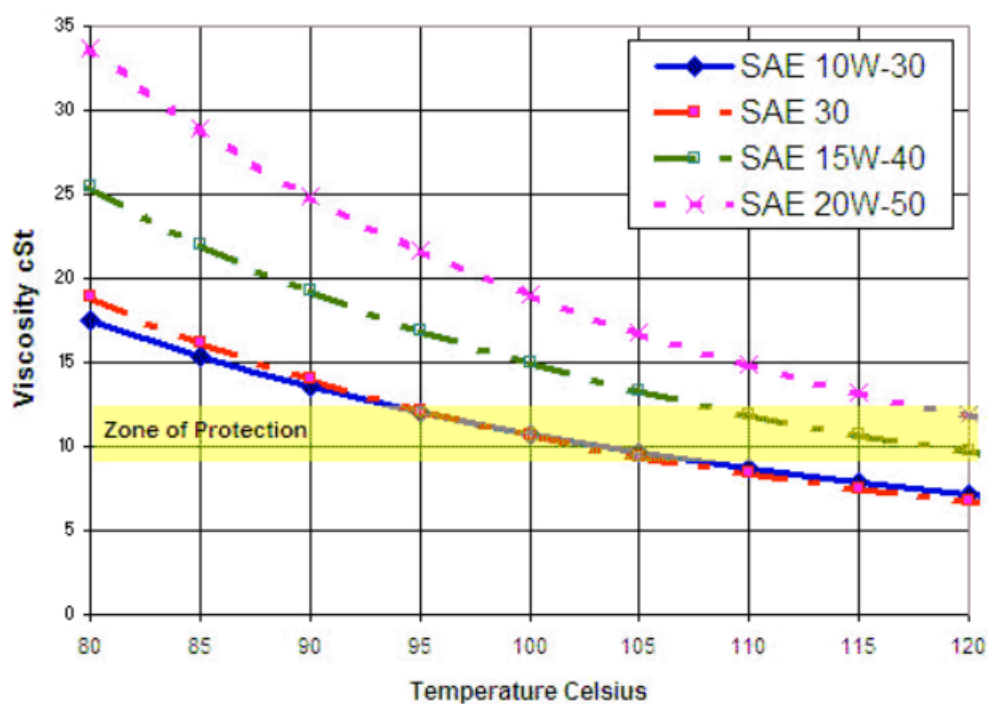
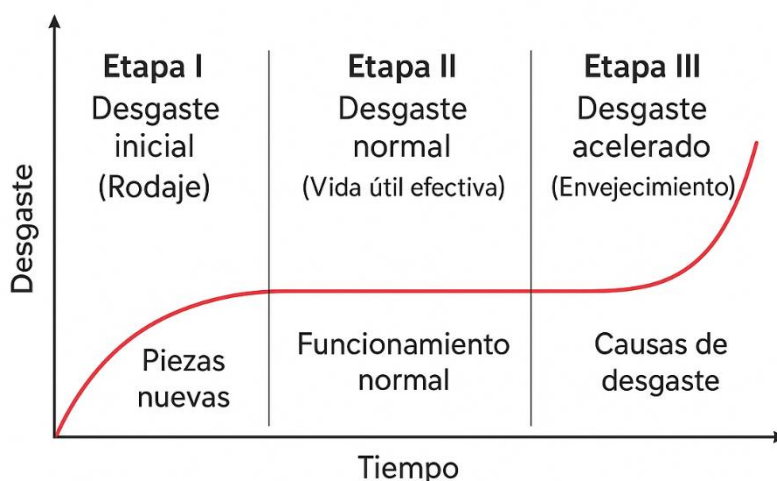


Figura 11. Curva de desgaste de las piezas del motor diesel a 3825 m.s.n.m.



4.3. Discusión de resultados

De acuerdo con los objetivos específicos analizados, se determinó que el desgaste mecánico por efectos de la tribología influye significativamente en la vida útil de un motor diésel de 2 litros operando a 3825 m s. n. m. en Juliaca durante el año 2025. Este resultado es consistente con lo planteado por John B. Heywood, quien sostiene que las condiciones de operación, especialmente ambientales, tienen un impacto directo en la degradación y durabilidad de los motores de combustión interna.

En relación con el análisis de desgaste de los elementos móviles internos —como paredes de cilindros, segmentos, pistones y cojinetes—, los resultados coinciden con lo expuesto por Ian Hutchings, quien afirma que el desgaste en superficies en contacto depende directamente de las condiciones de carga, lubricación y presencia de contaminantes. La evidencia obtenida en este estudio confirma que los componentes sometidos a fricción continua presentan mayor deterioro bajo condiciones adversas como las de gran altitud.



Respecto al fenómeno de fricción entre elementos fijos y móviles, así como entre superficies en movimiento relativo, se determinó que la altitud de 3825 m s. n. m. incrementa el desgaste tribológico en zonas críticas del motor. Este comportamiento se explica por la disminución de la presión atmosférica, que reduce la densidad del aire y afecta la eficiencia de la combustión. Según la Society of Automotive Engineers, la menor disponibilidad de oxígeno en altura genera combustión incompleta, lo que incrementa la formación de residuos que actúan como agentes abrasivos, intensificando el desgaste.

CONCLUSIONES

PRIMERA: Con los objetivos específico analizados se determinó la influencia del desgaste mecánico por tribología en la vida útil de un motor diesel de 2 litros a una altitud de 3825 metros, Juliaca 2025

SEGUNDA: Se realizó el análisis de desgaste de los elementos móviles internos del motor diésel de combustión interna de 2 litros; así como paredes de cilindros, segmentos o anillos, pistones, cojinetes de tipo superficie de los muñones de bancada y de biela, asientos de válvulas, guías y otros.

TERCERA: La fricción ocurre entre dos elementos, uno fijo otro móvil y dos móviles, La altura de 3825 m.s.n.m. incrementa el desgaste tribológico en las zonas críticas del motor. La baja presión atmosférica disminuye la densidad del aire, reduce la capacidad de combustión y altera la lubricación hidrodinámica, ocasionando mayor fricción en los componentes móviles

CUARTA: La película lubricante opera más tiempo en régimen límite y mixto. Esto significa más contacto entre asperezas, lo que explica el incremento global del desgaste tribológico del motor a grandes alturas. Se recomienda un lubricante de mayor viscosidad y aditivos antidesgaste. Esto ayuda a compensar la pérdida de espesor de película lubricante, especialmente durante el arranque en frío en zonas altoandinas. La vida útil del motor se reduce si no se optimizan lubricante, mantenimiento y condiciones de operación. El ambiente de altitud exige intervalos de mantenimiento más cortos y monitoreo del desgaste por análisis de aceite. La vida útil en condiciones óptimas es aproximado 500000 km



RECOMENDACIONES

PRIMERA: Implementar un programa de mantenimiento preventivo basado en principios de la tribología, enfocado en el control del desgaste de componentes críticos como cilindros, anillos, pistones y cojinetes.

SEGUNDA: Utilizar lubricantes de mayor viscosidad con aditivos antidesgaste, adecuados para operación en altura, con el fin de compensar la reducción del espesor de la película lubricante y disminuir el contacto entre superficies metálicas.

TERCERA: Reducir los intervalos de cambio de aceite y filtros, e implementar análisis periódicos de aceite para monitorear el desgaste interno del motor y detectar fallas de manera temprana.

CUARTA: Optimizar las condiciones de operación del motor en altura, evitando cargas elevadas durante el arranque en frío y mejorando el sistema de admisión de aire para compensar la baja densidad del oxígeno a 3825m.s.n.m.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anticona , D., & Tanta, W. (2015). *Influencia de las propiedades tribológicas del lubricante en el desgaste de pistones en motores de marca CUMMINS*. Universidad Cesar Vallejo.
- Apaza, H. J. (2024). *Optimización del rendimiento de un motor de combustión interna mediante variación de relación de compresión a 3825 metros sobre el nivel del mar, 2023*. Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez.
- Azula, J. (1974). *Estudio de envejecimiento de los motores de combustión interna*. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Barrera, A., & Nieves, C. (2021). *Análisis tribológico entre segmento y cilindro del motor Hyundai Avante 1.5L, mediante el método de arrastre para determinar su eficiencia energética*. Universidad Salesiana Ecuador.
- Bastidas, K. (2021). *Estudio experimental y analítico de las pérdidas mecánicas por fricción en el par tribológico pistón-camisa de cilindro en motores de combustión interna (ICE)*. Universitat Politècnica de València.
- Jaimes, C. (2015). *Potencial energético de los gases de escape de un motor de combustión interna*. Ecuador: Universidad de Guanajuato.
- Mas, R. (2017). *Desarrollo y propuesta de implementación práctica de un sistema de control avanzado de un motor de combustión interna Nissan GA-15*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Masias, M. (1983). *Desgaste en cilindros de motores diésel*. Universidad Nacional de Ingeniería.



Mauricio, D. (2017). *Análisis de desgastes mecánicos por tribología para reducir costos de mantenimiento del motor de tractor sobre orugas D6T-CARTEPILLAR*. Universidad Nacional del Centro del Perú.

Medrano, I. H. (2024). *Análisis del desgaste mecánico y degradación del aceite para mejorar el rendimiento de motores Caterpillar modelo C11*. Universidad Continental.

Paredes, O. E., & Gonzales, E. I. (2015). *Evaluación de desgastes mecánicos a través de overhaul para repotenciar el Jumbo Boomer 282 – Atlas Copco*. Universidad Nacional del Centro del Perú.

Pomahuali, M. E. (2022). *Análisis de causa raíz y Tribología en motores C15 para mejorar la confiabilidad en excavadoras 374 FL en mina Utunsa*. Universidad Nacional del Centro del Perú.

Riesco, J. (2012). *Procesos Alternativos de Combustión en Motores de Combustión Interna*. Ecuador: Universidad de Guanajuato.

Saldaña, E. (2015). *Análisis del comportamiento de un motor de combustión interna alimentado con combustible obtenido de residuos plásticos*. Universidad de Guanajuato.

Yakabi, E. (1974). *Desgaste en un motor Diesel Yanmar - modelo NTT5K, causado por defectuosa refrigeración*. Universidad Nacional de Ingeniería.

Ciulli, E. (2019). Tribology and Industry: From the Origins to 4.0. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 5(55), 1–15.

<https://doi.org/10.3389/fmech.2019.00055>



Suárez-Bustamante, F. A., Toro-Botero, F. M., & Vélez-Restrepo, J. M. (2011).

Influencia de texturas superficiales acondicionadas en el desempeño de cojinetes planos operando en condiciones HL. Ciencia y Tecnología de Materiales. Universidad Nacional de Colombia, Grupo de Tribología y Superficies.

Andersson, P., Tamminen, J., & Sandström, C.-E. (2002). *Piston ring tribology: A literature survey.* VTT Technical Research Centre of Finland.

Meng, Y., Xu, J., Jin, Z., Prakash, B., & Hu, Y. (2020). A review of recent advances in tribology. *Friction*, 8, 221–300. [https://doi.org/10.1007/s40544-020-0367-](https://doi.org/10.1007/s40544-020-0367-0)

Heywood, J. B. (2018). *Internal combustion engine fundamentals* (2nd ed.). McGraw-Hill.

Holmberg, K., & Erdemir, A. (2019). The impact of tribology on energy use and CO₂ emissions globally. *Friction*, 7(1), 1–35. <https://doi.org/10.1007/s40544-019-0255-9>

Johnson, G. (2008). The effect of soot contamination on engine wear. *SAE Technical Paper 2008-01-2470.*

Stribeck, R. (1902). Die wesentlichen Eigenschaften der Gleit- und Rollenlager. *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, 46, 1341–1348.

Priest, M., & Taylor, R. I. (2000). Automobile engine tribology—Friction, lubrication and wear. *Tribology International*, 33(10–11), 1039–1052.



Spikes, H. (2004). The history and mechanisms of ZDDP. *Tribology Letters*, 17(3), 469–489.

Stachowiak, G., & Batchelor, A. (2013). *Engineering tribology* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.

Mang, T., & Dresel, W. (2010). *Lubricants and lubrication* (2nd ed.). Wiley-VCH.

T ASM International. (2002). *ASM handbook: Volume 18, Friction, lubrication, and wear technology*. ASM International.

Hutchings, I., & Shipway, P. (2017). *Tribology: Friction and wear of engineering materials* (2nd ed.). Butterworth–Heinemann.

Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). *A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance*. Mechanical Systems and Signal Processing, 20(7), 1483–1510.
<https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.09.012>

Mobley, R. K. (2002). *An introduction to predictive maintenance* (2nd ed.). Butterworth–Heinemann.

Moubray, J. (1997). *Reliability-centered maintenance* (2nd ed.). Industrial Press Inc.

Heywood, J. B. (2018). *Internal combustion engine fundamentals* (2nd ed.). McGraw-Hill Education.

Stone, R. (2012). *Introduction to internal combustion engines* (4th ed.). Palgrave Macmillan.



Taylor, C. F. (2006). *The internal combustion engine in theory and practice* (Vol. 1, 2nd ed.). MIT Press.



ANEXOS

ANEXO 1. MATRIZ DE CONSISTENCIA

TÍTULO: INFLUENCIA DEL DESGASTE MECÁNICO POR TRIBOLOGÍA EN LA VIDA ÚTIL DE UN MOTOR DIESEL DE 2 LITROS A UNA ALTITUD DE 3825 METROS, JULIACA 2025

Problemática	Problemas	Objetivos	Justificación	Hipótesis	Variables
Uno de los principales problemas es el desgaste tribológico, es decir, el deterioro que ocurre por la fricción entre las partes móviles del motor, como los pistones, los anillos y los cojinetes. En estas alturas, los lubricantes pierden efectividad, lo que provoca un mayor roce entre superficies y, por tanto, un desgaste más acelerado. Esto acorta la vida útil del motor y puede llevar a fallas tempranas si no se toman medidas adecuadas.	Problema general: ¿De qué manera se puede determinar la influencia del desgaste mecánico por tribología en la vida útil de un motor diesel a una altitud de 3825 metros, Juliaca 2025? Problemas específicos: Pe1: ¿Cómo se puede analizar la información de los desgastes mecánicos de un motor diesel a una altitud de 3825 metros? Pe2: ¿Cómo se puede identificar los tres fenómenos fricción entre cuerpos en movimiento, el desgaste y la fabricación de un motor diesel a una altitud de 3825 metros? Pe3: ¿Cuál es la influencia de la vida útil de un motor diesel a una altitud de 3825 metros?	Objetivo general Determinar la influencia del desgaste mecánico por tribología en la vida útil de un motor diesel a una altitud de 3825 metros, Juliaca 2025 Objetivos específicos Oe1: Analizar la información de los desgastes mecánicos de un motor diesel a una altitud de 3825 metros. Oe2: Identificar los tres fenómenos fricción entre cuerpos en movimiento, el desgaste y la fabricación de un motor diesel a una altitud de 3825 metros Oe3: Determinar la influencia de la vida útil de un motor diesel a una altitud de 3825 metros	Porque los motores diésel que operan en ciudades de gran altitud, como Juliaca (3825 msnm), presentan un desgaste prematuro que afecta directamente su vida útil, rendimiento y confiabilidad. Este desgaste está relacionado, en gran parte, con fenómenos tribológicos como la fricción y la lubricación deficiente, que se agravan por las condiciones ambientales propias de la altura: baja presión, temperaturas extremas y menor eficiencia en el sistema de combustión. A pesar de que este problema es frecuente en zonas altoandinas, existe poca investigación específica que relacione directamente la tribología con el contexto de altitud.	Hipótesis General: Si se determina la influencia del desgaste mecánico por tribología entonces se mejorará la vida útil de un motor diesel Hipótesis Específicas: He1: Si se analiza la información del desgaste mecánico entonces se podrá identificar los tres fenómenos de un motor diesel He2: Si se identifica los tres fenómenos fricción entre cuerpos en movimiento, el desgaste y la fabricación de un motor diesel entonces se podrá mejorar la vida útil He3: Si se mejora la vida útil del motor diesel entonces se podrán reducir costos de mantenimiento	VARIABLES INDEPENDIENTES Desgaste mecánico por tribología - Fricción - Desgaste - Lubricación VARIABLES DEPENDIENTES Vida útil del motor



ANEXO 1
FORMULARIO DE AUTORIZACIÓN

AUTORIZACIÓN PARA LA INCORPORACIÓN DE LOS
TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN
EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL UANCV

Formato digital ☒

Fecha de entrega: 17/04/2026

1. Datos del autor (es):

Nombres y Apellidos: MILTHON VLADIMIR LAYME PORTILLA
Dirección: Jr. Puno 403 Huancané - Puno
DNI/Carné de Extranjería/Pasaporte N°: 71822262
Teléfono: 935941219 email: mlaymeportilla@gmail.com
Nombres y Apellidos: _____
Dirección: _____
DNI/Carné de Extranjería/Pasaporte N°: _____
Teléfono: _____ email: _____
Facultad y/o Escuela de Posgrado: INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS
Escuela Profesional o Mención: INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA
Título o Grado Académico a optar: INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA
Asesor: M. Sc. JESÚS ESTEBAN CASTILLO MACHACA
Esta obra se encuentra dentro de las siguientes denominaciones:
Trabajo de Investigación ☐ Tesis ☒ Trabajo de Suficiencia Profesional ☐ Trabajo Académico ☐
Título: INFLUENCIA DEL DESGASTE MECÁNICO POR TRIBOLOGÍA EN LA VIDA ÚTIL DE UN MOTOR
DIESEL DE 2 LITROS A UNA ALTITUD DE 3825 METROS, JULIACA 2025
Palabras claves, (3 a 5 términos): Tribología, desgaste mecánico, vida útil, motor diésel.
¿Esta obra se desarrolló en la UANCV ^{1, 2}?

1

¹ Indicar si su producción intelectual ha empleado recursos tales como, instalaciones, laboratorios, insumos, equipos, bases de datos, asesoría técnica por parte del personal de la UANCV, financiamiento, entre otros relacionados.

² Si su producción intelectual se desarrolló en la UANCV totalmente o parcialmente, deberá autorizar el depósito en el Repositorio de manera obligatoria.



2. Referencia de tesis:

☐ Bachiller ☒ Título ☐ 2da Especialidad ☐ Maestría ☐ Doctorado

3. Licencias:

a) Licencia estándar:

Bajo los siguientes términos, autorizo el depósito de mi tesis en el Repositorio Digital de la UANCV.

Con la autorización de depósito de mi producción Intelectual, otorgo a la Universidad Andina “Néstor Cáceres Velásquez” una licencia no exclusiva para reproducir, distribuir, comunicar al público, transformar (únicamente mediante su traducción a otros idiomas) y poner a disposición del público mi producción intelectual (incluido el resumen), en formato físico o digital, en cualquier medio, conocido o por conocerse, a través de los diversos servicios por la Universidad, creados o por crearse, tales como el Repositorio Digital de tesis UANCV, colección de producción intelectual, entre otros, en el Perú y en el extranjero por el tiempo y veces que considere necesarias, y libres de remuneraciones.

En virtud de dicha licencia, la Universidad Andina “Néstor Cáceres Velásquez” podrá reproducir mi producción intelectual en cualquier tipo de soporte y en más de un ejemplar, sin modificar su contenido, solo con propósitos de seguridad, respaldo y preservación.

Declaro que la producción intelectual es una creación de mi autoría y exclusiva titularidad, coautoría con titularidad compartida, y me encuentro facultado a conceder la presente licencia y, asimismo, garantizo que dicha producción intelectual no infringe derechos de autor de terceras personas.

La Universidad Andina “Néstor Cáceres Velásquez” consignará el nombre del y/o los autor(es) de la producción intelectual, y no le hará ninguna modificación más que la permitida en la licencia.

Autorizo su publicación (marque con una X)

☒ Sí, autorizo que se deposite inmediatamente.

☐ Sí, autorizo que se deposite a partir de la fecha (d/m/a): _____

☐ No autorizo.

b) Licencia CREATIVE COMMONS 4.0 INTERNACIONAL:

Si usted concede una licencia CREATIVE COMMONS sobre su producción intelectual, mantiene la titularidad de los derechos de autor de esta y, a la vez, permite que otras personas puedan reproducirla, comunicarla al público y distribuir ejemplares de esta, bajo las condiciones siguientes:

¿Quiere permitir usos comerciales de su producción intelectual?

Sí: significa que usted permite la reproducción, distribución y comunicación pública de la producción intelectual incluso con fines comerciales.

No: significa que usted permite la reproducción, y comunicación pública de la producción intelectual, pero sin fines comerciales.

☒ Sí autorizo

☐ No autorizo



Jurisdicción de su Licencia

Todas las licencias CREATIVE COMMONS son de ámbito mundial, sin embargo, usted puede elegir entre la opción “internacional” o una adaptada a su jurisdicción, como para el caso peruano.

La opción “internacional” emplea el lenguaje y la terminología de los tratados internacionales; en cambio, la adaptada a su jurisdicción, recoge las particularidades de la legislación peruana.

En consecuencia, **la opción “internacional” goza de una mayor eficacia a nivel mundial, gracias a que tiene jurisdicción neutral.** Mientras que la opción adaptada a la jurisdicción del Perú goza de una mayor eficacia ante los tribunales peruanos.

☒ Internacional

☐ Nacional

Línea de investigación: **TECNOLOGÍA E INGENIERÍA MECÁNICA – P18**

Firma de Autor



huella digital

17 de abril del 2026

Fecha