

**INFLUENCIA DE LA LUBRICACIÓN EN LA FIABILIDAD Y DISPONIBILIDAD
DE PIEZAS DE DESGASTE EN LA INDUSTRIA**

Autor
JUAN DANILO MÁRQUEZ FLÓREZ

**INGENIERÍA MECATRÓNICA
DEPARTAMENTO MMI
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA**

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
VILLA DEL ROSARIO, DICIEMBRE 2022**

**INFLUENCIA DE LA LUBRICACIÓN EN LA FIABILIDAD Y DISPONIBILIDAD
DE PIEZAS DE DESGASTE EN LA INDUSTRIA**

Autor

JUAN DANILO MÁRQUEZ FLÓREZ

Director

JAIR ELIAS ARAUJO VARGAS

Ingeniero Mecatrónico

Magister en Controles Industriales

**INGENIERÍA MECATRÓNICA
DEPARTAMENTO MMI
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA**

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
VILLA DEL ROSARIO, DICIEMBRE 2022**

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

DEDICATORIA

El fruto del resultado de este trabajo a toda mi familia especialmente a mis padres que fueron y seguirán siendo mi mayor motivación para seguir creciendo. Gracias por enseñarme a enfrente la adversidad en lugar de perder la cabeza o morir en el intento.

AGRADECIMIENTOS

Quiero darle las gracias a la Universidad de Pamplona por permitirme ser parte de esta gran familia, también doy gracias a mi director de trabajo de grado Jair Elías Araujo Vargas por acompañarme en el proceso de la realización del trabajo.

Agradezco también al cuerpo de docente perteneciente al programa Ingeniería Mecatrónica en especial a los docentes de los últimos semestres por todos sus consejos y enseñanzas muy útiles para la vida.

CONTENIDO

Pág.

GLOSARIO.....	14
RESUMEN DEL PROYECTO.....	15
INTRODUCCIÓN.....	16
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.....	17
2. OBJETIVOS	18
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	18
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3. PRIMER CAPITULO	19
3.1. MARCO TEÓRICO	19
3.1.1. TRIBOLOGÍA	19
3.1.1.1. TRIBOLOGÍA Y LUBRICACIÓN ¿EN QUE CONSISTE?	19
3.1.1.2. SIGNIFICADO DE LA TRIBOLOGÍA EN LA INDUSTRIA	20
3.1.1.3. APLICACIÓN INDUSTRIAL DE LA TRIBOLOGÍA	20
3.1.2. LUBRICACIÓN	21
3.1.2.1. BREVE RECORDATORIO HISTÓRICO	21
3.1.2.2. OBJETIVOS Y CAMPOS DE APLICACIÓN.....	22
3.1.2.3. TIPOS DE LUBRICACIÓN	23
3.1.2.4. ESTABILIDAD DE LA LUBRICACIÓN.....	24
3.1.2.5. MATERIA PRIMA PARA LUBRICANTES	25
3.1.2.5.1. TIPOS DE BASES.....	25
3.1.2.5.2. ADITIVOS.....	28
3.1.2.6. PROPIEDADES GENERALES DE LOS LUBRICANTES	31
3.1.2.6.1. PROPIEDADES FÍSICAS.....	32
3.1.2.5.2. PROPIEDADES SUPERFICIALES	34
3.1.2.5.3. CARACTERÍSTICAS DE UN LUBRICANTE	37
3.1.2.5.4. PROPIEDADES GENERALES DE LOS LUBRICANTES INDUSTRIALES	38
3.1.2.7. TIPOS DE LUBRICANTES	38
3.1.2.7.1. ACEITES LUBRICANTES	38
3.1.2.7.2. GRASAS	40
3.1.2.7.3. PASTAS LUBRICANTES.....	44
3.1.2.7.4. ANTICORROSIVOS	46
3.1.2.7.5. LACAS	46
3.1.2.7.6. RECUBRIMIENTOS.....	47

3.1.2.8. PERDIDA DE UTILIDAD DE UNA MAQUINA POR MALA LUBRICACIÓN	47
3.2. ESTADO DEL ARTE	48
3.2.1. EFECTO ELECTROQUÍMICO EN LA LUBRICACIÓN LIMITE DEL ADITIVO ZDDP MEZCLADO CON CARBONATO DE PROPILENO/SUCCINATO DE DIETILO	48
3.2.2. UN MODELO DE ELEMENTOS FINITOS EFICIENTE EN 3D PARA SIMULAR LA FATIGA POR CONTACTO RODANTE EN CONDICIONES DE ALTA CARGA	48
3.2.3. COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO DEL REVESTIMIENTO LASER AUTOLUBRICANTE BASADO EN MoS ₂ PARA SU USO EN APLICACIONES DE ALTA TEMPERATURA	49
3.2.4. EVALUACIÓN COMPARATIVA DE VARIOS MODELOS CONSTITUTIVOS DE MATERIALES PARA TRIBOLOGÍA, DESGASTE Y OTRAS SIMULACIONES DE DEFORMACIÓN MECÁNICA DE Ti ₆ Al ₄ V	50
3.2.5. HACIA UN MOTOR DE PLÁSTICO: TRIBOLOGÍA A BAJA TEMPERATURA DE POLÍMEROS EN DESLIZAMIENTO ALTERNATIVO	50
3.2.6. INFLUENCIA DE LA FORMA DEL HOYUELO EN LA FORMACIÓN DE TRIBOPELÍCULAS Y PROPIEDADES TRIBOLÓGICAS DE SUPERFICIES TEXTURIZADAS BAJO LUBRICACIÓN TOTAL Y ESCASA	51
3.2.7. UN ESTUDIO DE DINÁMICA MOLECULAR SOBRE LA LUBRICACIÓN CON AGUA DEL DESLIZAMIENTO DE PTFE CONTRA EL COBRE.....	51
3.2.8. MODELOS ESTOCÁSTICOS PARA LUBRICACIÓN TURBULENTO DE RODAMIENTO CON SUPERFICIES RUGOSAS.....	52
3.2.9. SOBRE LA TEMPERATURA DE FLASH BAJO LA CONDICIÓN DE FALTA DE LUBRICACIÓN DE UN CONTACTO DE LÍNEA.....	52
3.2.10. UN MODELO DE DESGASTE PARA CONTACTOS DE ENGRANAJES RECTOS	53
3.2.11. SOBRE LA DINÁMICA DE UN CONTACTO DE RODILLOS LUBRICADOS	53
3.2.12. CARACTERÍSTICAS DE LUBRICACIÓN Y CARGA DE RODAMIENTOS DE RODILLOS CILÍNDRICOS CON DESALINEACIÓN Y MODIFICACIONES DE RODILLOS	53
3.2.13. ANÁLISIS DE LUBRICACIÓN ELASTOHIDRODINÁMICA MIXTA TRANSITORIA EN MECANISMOS DE TORNILLO DE RODILLOS PLANETARIOS	54
3.2.14. INVESTIGACIÓN DINÁMICA Y MEDIDAS PALIATIVAS PARA EL FENÓMENO DE DESLIZAMIENTO DE RODAMIENTOS LUBRICADOS BAJO CARGA LIGERA.....	54
3.2.15. ANÁLISIS DE LUBRICACIÓN MIXTA DE HUSILLO DE RODILLOS PLANETARIOS	55
3.2.16. RIGIDEZ DE CONTACTO LÍNEA FINITA BAJO LUBRICACIÓN ELASTOHIDRODINÁMICA CONSIDERANDO MODELOS DE FUERZA LINEALES Y NO LINEALES	55
3.2.17. ESTUDIO SOBRE EL RENDIMIENTO DE LA LUBRICACIÓN HIDRODINÁMICA Y LA REDUCCIÓN DE LA FRICCIÓN DE ENGRANAJES RECTOS CON TEXTURA DE RANURA.....	56
3.2.18. OPTIMIZACIÓN DE LA LUBRICACIÓN DEL REDUCTOR CON UN SISTEMA NEURAL P DE PICOS DE OPTIMIZACIÓN.....	56
3.2.19. ANÁLISIS DE LUBRICACIÓN POR INYECCIÓN DE ACEITE DE UN SISTEMA SILENCIOSO DE TRANSMISIÓN POR CADENA	57
3.2.20. UN MARCO INTEGRADO DE VOLUMEN FINITO PARA LA LUBRICACIÓN ELASTOHIDRODINÁMICA TÉRMICA.....	57
3.2.21. EL EFECTO DE LA VISCOELASTICIDAD DEL FLUIDO EN CONTACTOS LUBRICADOS EN PRESENCIA DE CAVITACIÓN	58
3.2.22. EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE LUBRICACIÓN DEL COMPRESOR ROTATIVO A TEMPERATURA AMBIENTE ALTA EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE LUBRICACIÓN DEL COMPRESOR ROTATIVO A TEMPERATURAS AMBIENTE ALTA	59

3.2.23. EVALUACIÓN DE LA LUBRICACIÓN Y LA VIDA ÚTIL A LA FATIGA DE RODAMIENTOS DE RODILLOS CILÍNDRICOS DE ALTA VISCOSIDAD BAJO DESALINEACIÓN	60
3.2.24. DESGASTE POR OXIDACIÓN EN CONTACTOS LUBRICADOS.....	60
3.2.25. EL EFECTO DE LAS MEZCLAS DE ADITIVOS DE PARTÍCULAS EN EL DESEMPEÑO TRIBOLÓGICO DE OS LUBRICANTES LÍQUIDOS IÓNICOS A BASE DE FOSFONIO	61
3.2.26. FRICCIÓN ULTRABAJA DE GEL A BASE DE ALBAHACA EN PRESENCIA DE ETANOL COMO LUBRICANTE VERDE PARA APLICACIONES BIOMÉDICAS	61
3.2.27. EXPLORACIÓN DEL MECANISMO DE LUBRICACIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE CeO ₂ DISPERSADAS EN ACEITE DE MOTOR POR FOSFATO DE BIS (2-ETILHEXILO) COMO NUEVO ADITIVO ANTIDESGASTE	62
3.2.28. UN NOVEDOSO MATERIAL DE LUBRICACIÓN INTELIGENTE INSPIRADO EN LOMBRICES DE TIERRA CON FUNCIÓN DE AUTORREPARACIÓN	62
3.2.29. INFLUENCIA DE LA LUBRICACIÓN LIQUIDA DE LA INTERFAZ EN LA TRIBOELECTRIFICACIÓN DEL PAR DE FRICCIÓN DE CONTACTO PUNTUAL	63
3.2.30. LUBRICACIÓN POR COMPRESIÓN ENTRE SOLIDOS BLANDOS: UN ESTUDIO NUMÉRICO....	63
3.3. MARCO NORMATIVO	64
3.3.1. ESPECIFICACIONES ISO	64
3.3.2. NORMAS ASTM	65

4. SEGUNDO CAPÍTULO.....68

4.1. OBJETIVO 1.....	68
4.1.1. QUE ES LA LUBRICACIÓN INDUSTRIAL.....	68
4.1.2. CUAL ES LA FUNCIÓN DE LA LUBRICACIÓN INDUSTRIAL	68
4.1.3. DONDE SE UTILIZAN LOS SISTEMAS DE LUBRICACIÓN INDUSTRIAL	69
4.1.4. MÉTODOS DE LUBRICACIÓN INDUSTRIAL	69
4.1.4.1. MÉTODO DE LUBRICACIÓN INDUSTRIAL MANUAL.....	70
4.1.4.2. MÉTODO DE LUBRICACIÓN CENTRALIZADA	71
4.1.4.3. MÉTODO DE LUBRICACIÓN AUTOMÁTICA	71
4.1.4.4. SISTEMA DE ENGRASE MANUAL	72
4.1.4.5. SISTEMA DE ENGRASE TOTALMENTE AUTOMÁTICO.....	73
4.1.5. OBJETIVOS FUNDAMENTALES DE LOS LUBRICANTES EN MAQUINARIAS INDUSTRIALES	74
4.1.6. CARACTERÍSTICA DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS LUBRICANTES EN MAQUINARIAS INDUSTRIALES	75
4.1.7. SELECCIÓN CORRECTA DE UN ACEITE INDUSTRIAL	76
4.1.7.1. SISTEMA ISO.....	76
4.1.7.1.1. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA ISO.....	78
4.1.7.1.2. CURVA CARACTERÍSTICA DE LOS ACEITES INDUSTRIALES	79
4.1.7.1.3. PASOS A TENER EN CUENTA EN LA SELECCIÓN DEL ACEITE INDUSTRIAL.....	81
4.1.7.1.4. MODIFICACIÓN DEL GRADO ISO DEL ACEITE DE ACUERDO CON LA TEMPERATURA AMBIENTE	81
4.1.7.2. EQUIVALENCIAS ENTRE DIFERENTES SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN DE LA VISCOSIDAD	82
4.1.9. EL IMPACTO DEL DESGASTE EN LOS MECANISMOS LUBRICADOS.....	84
4.1.9.1. tipos de desgaste	85
4.1.9.1.1. DESGASTE ADHESIVO.....	86

4.1.9.1.2.	DESGASTE EROSIVO	87
4.1.9.1.3.	DESGASTE ABRASIVO	88
4.1.9.1.4.	DESGASTE CORROSIVO	89
4.1.9.1.5.	DESGASTE POR FATIGA SUPERFICIAL.....	90
4.1.9.1.6.	DESGASTE POR CAVITACIÓN.....	91
4.1.9.1.7.	DESGASTE POR CORRIENTES ELÉCTRICAS.....	92
4.1.9.2.	CONSECUENCIAS DEL DESGASTE	93
4.1.10.	INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD EN EL DESGASTE DE LOS MECANISMO	93
4.1.10.1.	RUGOSIDAD	94
4.1.10.1.1.	TIPOS DE RUGOSIDADES	94
4.1.10.2.	AHORRO DE ENERGÍA POR MENOR FRICCIÓN EHL.....	95
4.1.10.3.	INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD EN LA FILTRACIÓN DEL ACEITE	95
5.	<u>TERCER CAPITULO.....</u>	96
5.1.	<u>OBJETIVO 2.....</u>	96
5.1.1.	MARCAS DE ACEITES	96
5.1.1.1.	SHELL.....	96
5.1.1.2.	MOBIL	106
5.1.1.3.	PETRONAS.....	109
5.1.1.4.	REPSOL	112
5.1.1.5.	SKF.....	115
5.1.2.	LUBRICANTES VIABLES EN LA INDUSTRIA.....	117
5.1.3.	MÉTODOS DE MANTENIMIENTO	117
5.1.3.1.	ANÁLISIS DE VIBRACIONES.....	117
5.1.3.2.	TERMOGRAFÍA INFRARROJA.....	118
5.1.3.3.	ULTRASONIDO.....	119
6.	<u>CUARTO CAPITULO</u>	123
6.1.	<u>OBJETIVO 3.....</u>	123
6.1.1.	RECOMENDACIONES USO DE LOS LUBRICANTES	123
6.1.2.	RECOMENDACIONES COMO ALMACENAR LOS LUBRICANTES.....	124
7.	<u>CONCLUSIONES</u>	125
	<u>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	126

FIGURAS

Pág.

Figura 1. Película de lubricante entre dos cuerpos en contacto	21
Figura 2. Un eje y su cojinete	22
Figura 3. Curva de Stribeck	24
Figura 4. Efecto de la viscosidad en la lubricación	25
Figura 5. Clasificación de los diferentes tipos de aceites básicos según API	39
Figura 6. Aditivos más comunes por tipo de aplicación	40
Figura 7. Grasas jabones simples.....	41
Figura 8. Grasa compleja de litio	41
Figura 9. Penetró	42
Figura 10. Bisulfuro de molibdeno	44
Figura 11. Teflón (PTFE)	45
Figura 12. Grafito	45
Figura 13. Desmoldante de Nitruro de Boro	46
Figura 14. Lubricante con mezcla de agua	67
Figura 15. Métodos de lubricación manual	70
Figura 16. Método de lubricación centralizada	71
Figura 17. Método de lubricación automática	72
Figura 18. Sistema de engrase manual	73
Figura 19. Sistema de engrase totalmente automático.....	74
Figura 20. Carta de conversión de la viscosidad a cualquier temperatura.....	77
Figura 21. ASTM D-341 VISCOSIDAD-TEMPERATURA.....	80
Figura 22. Relación entre el presupuesto de mantenimiento para lubricantes e impacto de los mismos en el gasto por averías	83
Figura 23. Averías en rodamientos	84
Figura 24. Desgaste abrasivo	87
Figura 25. Desgaste erosivo	88
Figura 26. Desgaste abrasivo	89
Figura 27. Desgaste corrosivo	90
Figura 28. Desgaste por fatiga superficial.....	91
Figura 29. Desgaste por cavitación.....	92
Figura 30. Desgaste por corrientes eléctricas.....	93
Figura 31. Rugosidades.....	94
Figura 32. Lubricante Shell Argina.....	96
Figura 33. Lubricante Shell Gadinia.....	97
Figura 34. Lubricante Shell corena	99
Figura 35. Lubricantes Shell diala.....	100
Figura 36. Lubricante Shell gadus	101
Figura 37. Lubricante Shell morlina	102
Figura 38. Lubricante Shell mysella.....	103
Figura 39. Lubricante Shell omala	103
Figura 40. Lubricante Shell risella.....	104
Figura 41. Lubricante Shell spirax.....	104

Figura 42. Lubricante Shell tellus.....	105
Figura 43. Lubricante Shell Tonna.....	105
Figura 44. Lubricante Shell turbo.....	106
Figura 45. Lubricantes Mobil SHC.....	107
Figura 46. Grasas industriales.....	107
Figura 47. Lubricante Mobil Teresstic.....	108
Figura 48. Lubricantes Mobil DTE.....	108
Figura 49. Lubricantes Mobil vacuoline.....	109
Figura 50. Lubricantes Petrona ato.....	110
Figura 51. Lubricantes Petronas chainsaw.....	110
Figura 52. Lubricantes Petronas circula.....	111
Figura 53. Lubricantes Petronas compresor A.....	112
Figura 54. Lubricantes Repsol motores hidráulicos.....	113
Figura 55. Lubricante Repsol para turbinas.....	114
Figura 56. Lubricantes Repsol grasas.....	115
Figura 57. Lubricantes SKF.....	116
Figura 58. Lubricantes SKF.....	116
Figura 59. Termografía Infrarroja.....	119
Figura 60. Ultrasonido.....	120

TABLAS

Pág.

Tabla 1. Comparación de las propiedades de las bases	27
Tabla 2. Ejemplos de aditivos usados en el petróleo	30
Tabla 3. Aditivos usados en las grasas lubricantes	30
Tabla 4. Aditivos usados en aceites lubricantes	31
Tabla 5. Especificaciones internacionales	37
Tabla 6. Penetración trabajada.....	43
Tabla 7. Clasificación ISO para los aceites industriales.....	78
Tabla 8. Equivalencias entre los diferentes sistemas de clasificación de la viscosidad	82
Tabla 9. Características Shell Argina S4 40	97
Tabla 10. Características Shell Gadinia S3 40.....	98
Tabla 11. Características Shell Corena	99
Tabla 12. Característica Shell Diala.....	100
Tabla 13. Características Shell Gadus.....	101
Tabla 14. Características Shell Morlina	102
Tabla 15. Comparación aceites	120
Tabla 16. Comparación hidráulicos.....	122

GRÁFICAS

Pág.

Gráfica 1. Comparación de aceites	121
Gráfica 2. Comparación de hidráulicos	122

GLOSARIO

ABRASIÓN: Desgaste de la superficie, producido por rayado continuo, usualmente debido a la presencia de material extraño como tierra, o partículas metálicas en el lubricante.

ABSORCIÓN: La asimilación de un materia en otro, en refinación del petróleo, el uso de un líquido abortivo para selectivamente remover componentes en un proceso de flujo.

ACEITE: Líquido grasoso, untoso de origen animal, vegetal, mineral o sintético.

ADHESIÓN: Contenedor en el que el fluido es almacenado bajo presión como una fuente de potencia líquida.

ADITIVOS: Compuesto que mejora algunas propiedades, o imparte nuevas propiedades al aceite básico.

CAVITACIÓN: Formación de una burbuja de aire o vapor debido a una reducción en la presión de un fluido.

COHESIÓN: Propiedad de una sustancia que causa que ésta resista su separación por medios mecánicos.

DEMULSIBILIDAD: Habilidad de un fluido que es insoluble en agua, para separarse del agua con la que ha sido mezclada en forma de emulsión.

DESGASTE: Pérdida de material de la superficie como resultado de una acción mecánica.

EMULSIBILIDAD: Habilidad de un fluido no soluble al agua de formar una emulsión con agua.

EROSIÓN: Remoción progresiva de la superficie de la maquinaria por cavitación, o por el efecto de las partículas a altas velocidades.

FLUIDO: Clasificación general incluyendo líquido y gases.

GRASA: Lubricante compuesto de un aceite o aceites, espesados con un jabón u otros.

INHIBIDOR: Cualquier sustancia que reduce o previene las reacciones químicas de corrosión o de oxidación.

LUBRICANTE: Sustancia que se interpone entre dos superficies en movimiento relativo con el propósito de reducir la fricción y el desgaste entre ellas.

MOTOR: Dispositivo que convierte la potencia fluida en fuerza mecánica y movimiento.

NAFTÉNICO: Tipo de fluido de petróleo derivado del petróleo nafténico, conteniendo una proporción alta de grupos metilenos de anillos cerrados.

REFRIGERANTE: Fluido utilizado para remover el calor.

RODAMIENTO: Balero antifricción que contiene elementos rodantes en la forma de bolas o rodillos, un soporte o guía en la que una flecha o eje es posicionado, con respecto a las otras partes de un mecanismo.

STOKE: Medida cinemática de la resistencia de un líquido a fluir definida por la relación de la viscosidad dinámica del fluido con su densidad.

VISCOSIDAD: Medida de la resistencia de un líquido a fluir.

RESUMEN DEL PROYECTO

Este proyecto tuvo como finalidad analizar la influencia de la lubricación en la fiabilidad y disponibilidad de piezas en la industria, para llevarlo a cabo analizaremos los problemas e inconvenientes que provoca una mala gestión de la lubricación. En algunos casos dados a cambios innecesarios de lubricantes, como en términos de cuidado de la maquinaria. Basado en el análisis de los compuestos que se encuentran en los lubricantes y a su vez comprender los problemas que pueden afectarlo, adicionalmente tener en cuenta que los lubricantes son el único elemento en contacto con todos los elementos rodantes.

Palabras claves:

Lubricación, desgaste, gestión, maquinaria, viscosidad, fricción, corrosión.

INTRODUCCIÓN

Los lubricantes industriales consisten en sustancias que se aplican para reducir la fricción y el desgaste de las superficies que se mueven periódicamente entre ellas. Esta es la función principal de los lubricantes, pero entre otras funciones, actúan como inhibidor de corrosión, sellador y agente de retención, refrigeración y evaluación de contaminantes en sistemas mecánicos.

Los aceites y grasas industriales son las formas más comunes de lubricantes líquidos y semisólidos, pero también se encuentran otras formas como lubricantes secos y lubricantes gaseosos.

En este trabajo se analizará las principales funciones de los lubricantes industriales, los diferentes tipos utilizados en la maquinaria industrial y los principales métodos de lubricación industrial.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, la demanda de maquinaria en los procesos industriales aumenta en proporción directa a los niveles de productividad, por lo tanto, la lubricación es uno de los temas más importantes para asegurar la fiabilidad y disponibilidad de los diferentes equipos en actividades diarias de producción industrial como lo pueden ser transmisiones mecánicas, motores, bombas, compresores. Todos estos sistemas requieren lubricación y son susceptibles de fallo tribológico dado por los elementos de desgaste de maquinaria.[1]

Las maquinas presentes en la industria requieren de un mantenimiento periódico el cual está determinado por las especificaciones del lubricante utilizado. En muchas de estas industrias no se tienen en cuenta estos mantenimientos predictivos por lo cual se producen fallos derivados de la ausencia de lubricación, mala elección de lubricantes y la conservación de estos mismos.

¿Por qué debemos considerar el correcto uso de los lubricantes en la industria ?

Debido a lo anteriormente mencionado se contempla la necesidad de establecer la correcta selección de los lubricantes, dependiendo del tipo de maquinaria a utilizar en la industria.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

- Analizar la influencia de la lubricación en la fiabilidad y disponibilidad de piezas de desgaste en la industria.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar el impacto de la lubricación en la fiabilidad y disponibilidad de piezas de desgaste en la industria.
- Comparar la influencia de los lubricantes en el mantenimiento con respecto a otros métodos de conservación de piezas en la industria
- Concluir el impacto de la lubricación en la fiabilidad y disponibilidad de piezas de desgaste en la industria.

3. PRIMER CAPITULO

3.1. MARCO TEÓRICO

3.1.1. TRIBOLOGÍA

Es la ciencia que estudia las superficies que interactúan en movimiento. Su nombre proviene del griego, significa “ciencia del roce” y abarca desde el desgaste, la fricción y la lubricación, hasta los aspectos del diseño relacionados con todo ello. La tribología, por tanto, tiene como finalidad el estudio de las propiedades de fricción y el comportamiento de desgaste de las superficies en movimiento relativo.[2]

El campo de la tribología es interdisciplinario, conformado por una serie de disciplinas científicas e ingenierías. Podemos dividir la materia en tres ramas interrelacionadas: la fricción, el desgaste y la lubricación. Entendemos por fricción, la resistencia al movimiento entre dos superficies en contacto lo que, en último término, puede producir el desgaste de los materiales, componentes y sistemas. No obstante, la tribología previene el desgaste y controla la fricción por medio de la lubricación. El lubricante crea una película protectora que reduce la fricción entre las superficies móviles en contacto.[2]

3.1.1.1. TRIBOLOGÍA Y LUBRICACIÓN ¿EN QUE CONSISTE?

La tribología utiliza lubricantes para reducir la fricción, evita el desgaste, proteger los equipos de la corrosión, controlar la temperatura y la contaminación, transmitir la energía y proporcionar un sello de fluido. Además de los lubricantes conocidos, como el aceite o la grasa, también existen lubricantes sólidos que pueden integrarse directamente en la estructura del material de los componentes, proporcionando una propiedad autolubrificante.[2]

Una pequeña cantidad de lubricación es suficiente para cambiar drásticamente la fricción entre las superficies. En algunos casos se genera una película muy fina de lubricación que se adhiere a las superficies creando una capa baja de fricción, lo que se conoce como fricción límite. Por el contrario, si la película es más gruesa y llega a separar completamente las dos superficies entre sí, se denomina fricción de película fluida, dando lugar a una fricción muy baja. La eficacia de un lubricante depende de su viscosidad, que puede cambiar en función de las condiciones de funcionamiento, y las propiedades de los materiales sobre los que se aplique. La ciencia tribológica tiene en cuenta todas las variables para lograr, de este modo, el equilibrio entre la reducción de la fricción por deslizamiento y una viscosidad demasiado alta.[2]

3.1.1.2. SIGNIFICADO DE LA TRIBOLOGÍA EN LA INDUSTRIA

La tribología es crucial para la maquinaria moderna que utiliza superficies rodantes y/o deslizantes. De acuerdo a algunos estimados, las pérdidas resultantes de la ignorancia en tribología en los Estados Unidos representan aproximadamente el 6% del total del producto bruto, y aproximadamente un tercio de los recursos energéticos existentes se pierden en forma de fricción. Por esto, la importancia de la reducción de la fricción y el desgaste para un ahorro de dinero y una confiabilidad a largo plazo de la maquinaria. Según Jost (1966,1976), el Reino Unido podría ahorrar aproximadamente 500 millones de libras al año, y los Estados Unidos llegarían a ahorrar hasta 16 billones de dólares al año utilizando mejores prácticas tribológicas. Este ahorro es significativo y puede obtenerse sin hacer gran inversión de capital.[3]

3.1.1.3. APLICACIÓN INDUSTRIAL DE LA TRIBOLOGÍA

Tradicionalmente, la tribología se aplica a los componentes deslizantes más comunes, como son los rodamientos, los engranes, las levas, los frenos y las juntas. Estos componentes se utilizan en una gran variedad de maquinarias que requieren algún movimiento de deslizamiento o de rotación. Sin embargo, el enfoque inicial se ha ido ampliando y extendiendo hacia otros ámbitos, como la nanotribología, encargada de estudiar los fenómenos a escala nanoscópica. Haciendo referencia a la industria del transporte, la investigación tradicional se centraba en la fiabilidad, pero actualmente el enfoque se ha ido desplazando hacia el consumo energético y El aumento de la eficiencia, lo que ha dado lugar a lubricantes más complejos.[2]

La tribología también desempeña un papel fundamental en el sector de la fabricación y desarrollo de materiales, especialmente en las operaciones de conformación de metales. Comprender el papel que juega la tribología en el proceso de fabricación, ya que contribuye a la identificación de fallos, el aumento de la productividad y a la reducción de los costes. Existen, además, multitud de campos donde la tribología presenta un papel fundamental y en pleno desarrollo como son:

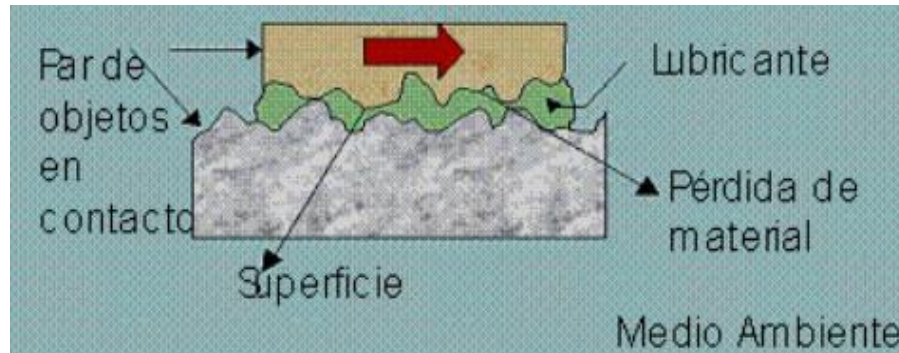
- **TRIBOLOGÍA VERDE:** Se ocupa de minimizar el impacto medioambiental al reducir las pérdidas tribológicas mediante el uso de tecnologías sostenibles.
- **TRIBOTRONICA:** Es una faceta de la investigación que combina elementos de máquinas y componentes electrónicos para crear sistemas tribológicos activos y aumentar la eficiencia y la vida útil de las máquinas.
- **TRIBOLOGÍA COMPUTACIONAL:** Modela el comportamiento de los sistemas tribológicos combinando varias disciplinas como la mecánica de contacto, la mecánica de la fractura y la dinámica de fluidos computacional.[2]

3.1.2. LUBRICACIÓN

3.1.2.1. BREVE RECORDATORIO HISTÓRICO

El propósito de la lubricación es la separación de dos superficies con deslizamiento relativo entre sí de tal manera que no se produzca daño en ellas: se intenta con ello que el proceso de deslizamiento sea con el rozamiento más pequeño posible. Para conseguir esto se intenta, siempre que se posible, que haya una película de lubricante de espesor suficiente entre las dos superficies en contacto para evitar el desgaste.[3]

Figura 1. Película de lubricante entre dos cuerpos en contacto



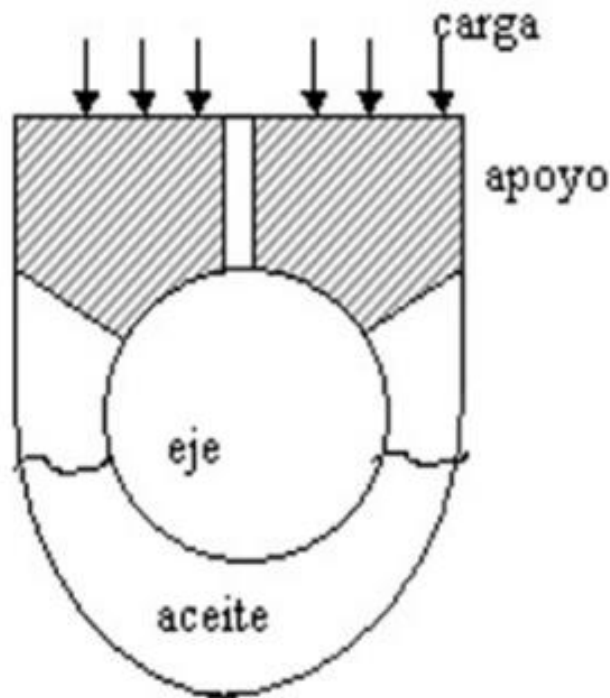
FUENTE: TRIBOLOGÍA: FRICCIÓN, DESGASTE Y LUBRICACIÓN, FELIPE DIAZ DEL CASTILLO RODRÍGUEZ

Históricamente, es interesante señalar que únicamente con la mejora de los procesos de fabricación de elementos metálicos (a partir de la revolución industrial) y el aumento de las velocidades de giro de ejes (por encima de las habituales de un carro o un molino) la lubricación hidrodinámica se convierte en el tipo normal de lubricación y empieza a ser estudiada.[3]

La lubricación con grasas (lubricante límite) recibió una atención especial desde hace ya muchos años. Un gran número de famosos investigadores realizó experimentos sobre lubricación: Leonardo da Vinci (1508), Amontons (1699), Euler (1748), Coulomb (1809). Amontons y Coulomb hallaron que la fuerza de fricción F que hay que vencer para mover un cuerpo respecto a otro es proporcional a la carga normal aplicada P : es decir existe una constancia de cociente P/F , llamado coeficiente de fricción. Los primeros trabajos sobre un eje con cojinetes trabajando en condiciones hidrodinámicas fueron realizado por Pauli (1849) y Hirn (1854).

Estos trabajos fueron analizados por el científico ruso Petroff en 1883. Tower entre 1883 y 1885 demostró que se generaban en este tipo de cojinetes unas presiones elevadas: este hecho fue explicado en 1886 por Reynolds que demostró que era necesaria una forma convergente en la película para que se generara un aumento de presión.[3]

Figura 2. Un eje y su cojinete



FUENTE: TRIBOLOGÍA: FRICCIÓN, DESGASTE Y LUBRICACIÓN, FELIPE DIAZ DEL CASTILLO RODRÍGUEZ

3.1.2.2. OBJETIVOS Y CAMPOS DE APLICACIÓN

El objetivo de la lubricación es reducir el rozamiento, el desgaste y el calentamiento de las superficies en contacto de piezas con movimiento relativo.

Los principales campos de aplicación son:

- Cojinetes del cigüeñal y bielas de un motor (vida de miles de km)
- Cojinetes de turbinas de centrales (fiabilidad de 100%)

Los factores a considerar en diseño son técnicos y económicos

- Cargas aplicadas y condiciones de servicio
- Condiciones de instalación y posibilidad de mantenimiento.
- Tolerancias de fabricación y funcionamiento; vida exigida.

- Costo de instalación y mantenimiento

El estudio de la lubricación está basado en la:

- Mecánica de fluidos
- Termodinámica y transmisión de calor
- Mecánica de sólidos, materiales [3]

3.1.2.3. TIPOS DE LUBRICACIÓN

Pueden distinguirse tres formas distintas

- **Lubricación hidrodinámica**
 - Las superficies están separadas por una película de lubricante que proporciona estabilidad.
 - No se basa en introducir lubricante a presión, exige un caudal de aceite, la presión se genera por movimiento relativo.
 - Se habla de lubricación de película gruesa, fluida, completa o perfecta.
- **Lubricación límite**
 - La película del lubricante es tan fina que existe un contacto parcial metal-metal. La acción resultante no se explica por la hidrodinámica.
 - Puede pasarse de lubricación hidrodinámica a límite por caída de la velocidad, aumento de la carga o disminución del caudal de aceite.
 - En este tipo de lubricación más que la viscosidad del lubricante es más importante la composición química.
 - Al proyectar un cojinete hidrodinámico hay que tener en cuenta que en el arranque puede funcionar en condiciones de lubricación límite.
- **Lubricación hidrostática:**
 - Se obtiene introduciendo a presión el lubricante en la zona de carga para crear una película de lubricante.
 - No es necesario el movimiento relativo entre las superficies.
 - Se emplea en cojinetes lentos con grandes cargas que pueden emplearse aire o agua como lubricante.[3]

Figura 3. Curva de Stribeck



FUENTE: INFLUENCIA DE TEXTURAS SUPERFICIALES ACONDICIONADAS EN EL DESEMPEÑO DE COJINETES PLANOS OPERANDO EN CONDICIONES HL. SUAREZ-BUSTAMANTE, TORO-BOTERO, VÉLEZ-RESTREPO

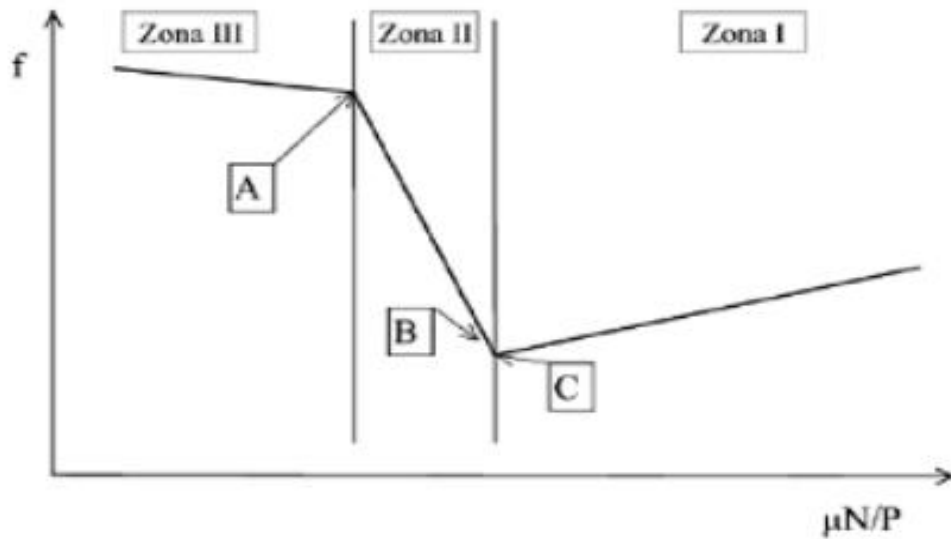
3.1.2.4. ESTABILIDAD DE LA LUBRICACIÓN

Entre 1900 y 1902 Stribeck realiza experimentos sistemáticos para medir en cojinetes en función de la velocidad de giro -N-, de la carga por unidad de área proyectada -P- y de la viscosidad. Son la base de la teoría de Sommerfeld.

Puede dividirse en tres zonas:

- **Zona I:** Lubricación hidrodinámica y elastohidrodinámica. Las superficies del cojinete están perfectamente separadas con una película gruesa de fluido: no hay contacto directo entre las superficies que deslizan y por tanto prácticamente no hay desgaste. A medida que la viscosidad disminuye, decrece la película hasta el punto C.
- **Zona II:** Lubricación mixta o elastohidrodinámica parcial.
- **Zona III:** Lubricación límite.

Figura 4. Efecto de la viscosidad en la lubricación



FUENTE: WIDMAN INTERNATIONAL SRL

Se puede deducir:

Estando en la zona I, a medida que la viscosidad disminuye también decrece el espesor de la película hasta el punto C. Una mayor disminución de la viscosidad hace que pasemos al punto B en el que se produce contacto ocasional entre las dos superficies debido a que la película es de un muy pequeño espesor: el rozamiento en B y C es prácticamente igual, aunque en B la viscosidad del fluido es menor la resistencia al desplazamiento se debe en este caso al contacto entre las asperezas.[4]

3.1.2.5. MATERIA PRIMA PARA LUBRICANTES

3.1.2.5.1. TIPOS DE BASES

BASE MINERAL

1. Destilación a presión atmosférica: Se separa del petróleo todas aquellas fracciones de baja volatilidad, que constituyen los combustibles conocidos como nafta, queroseno y gasoil.
2. Destilación al vacío: El petróleo crudo es reducido, siendo destilado al vacío. Se generan distintas fracciones de destilación conocidas como "cortes" de características diferentes.
3. Refinación con furfural: La refinación con furfural constituye la primera etapa del proceso y tiene por objeto el extraer mediante este solvente los hidrocarburos aromáticos que no poseen propiedades lubricantes.

4. Desparafinado: Este proceso elimina los componentes parafinados para que los lubricantes sean líquidos a temperaturas bajas (hasta aproximadamente -10°C). Esto se realiza mediante la extracción con una mezcla de solventes, enfriamiento y filtración de las parafinas cristalizadas.
5. Hidrotratamiento catalítico: también denominado hidrocracked, se lleva a cabo mediante el tratamiento de los aceites desaromatizados y desparafinados con el objeto de aumentar la resistencia a la oxidación y estabilidad de los mismos (esto último se consigue eliminando los compuestos nitrogenados). Una medida de la calidad y el grado de refinación es el color de aceite mineral base. Se puede afirmar que, para aceites de la misma viscosidad, cuanto menor el color mejor es su refinación. Si la destilación no ha sido buena, el grado de parafinicidad, naftenicidad, y aromaticidad modifican las propiedades del lubricante.[5]

BASES HYDROCRACKED

Son el resultado de un complejo proceso de hidrogenación catalítico. Este moderno sistema obtiene unos excelentes resultados en la mejora de viscosidad de las bases minerales. También son denominadas como bases minerales “No Convencionales”. Comparados con aceites minerales clásicos que son Monogrado, los aceites “Hydrocracked”, ofrecen grandes ventajas, ya que son multigrado y mucho más resistentes a la oxidación. Es un excelente producto para producir aceites de alta calidad con un costo reducido. [5]

BASES SINTÉTICOS

Son aquellos obtenidos únicamente por síntesis química, ya que no existen en la naturaleza. Una de las grandes diferencias de los aceites sintéticos frente a los minerales es que presentan una estructura molecular definida y conocida, así como propiedades predecibles, fruto de esta información. Los productos que hasta hoy se conocen como lubricantes sintéticos pueden ser ubicados entre alguna de las siguientes familias citadas a continuación:

1. **PAO:** “PolyAlphaOlefines”, son el resultado de una química del etileno que consiste en la reacción de polimeración de compuestos olefínicos. Son multigrado según la clasificación SAE para motor y cajas de cambio, y su punto de congelación es muy bajo. También son conocidos como hidrocarburos de síntesis, por ser “construidos” artificialmente con productos procedentes del crudo petrolífero. Se aplican en aceites de uso frigorífico por su propiedad de continuar fluidos a muy baja temperatura. Si comparamos éste con un aceite mineral tiene un mayor índice de viscosidad y una mejor resistencia a la oxidación.
Untuosidad, que es la capacidad de adherirse formando una capa limite continua sobre metales de Hierro (Fe) y Aluminio (Al). Elimina el tiempo de formación de película, reduciendo el desgaste producido en ese momento.

Posee propiedades “autolimpiantes”, ya que es capaz de evitar la formación de depósitos adheridos en las paredes internas del motor. Poseen también excelente resistencia a altas temperaturas y altísima biodegradabilidad, por lo tanto, no rompe el equilibrio ecológico ya que son absorbidos por las colonias bacterias sin causarles daño. Su grado de degradación biológica en estado puro y nuevo es cercano a 100%. Son usados en aceites para compresor, en aceites hidráulicos y en aceites de transmisión.[5]

2. **ESTERES ORGÁNICOS:** Se obtienen también por síntesis, es decir, de forma artificial, pero sin la participación de productos petrolíferos. Al contrario de las bases anteriormente mencionadas, los Esteres son producto de la reacción de esterificación entre productos de origen vegetal, tales como alcoholes y ácidos grasos de origen vegetal. Son multigrado y tienen un poder lubricante extraordinario.

ESTERES FOSFÓRICO: Son producto de la reacción de óxidos fosfóricos y alcoholes orgánicos. Su alto costo hace que su uso quede restringido a los fluidos hidráulicos resistentes al fuego en aplicaciones muy específicas. Tienen un muy buen poder lubricante y antidesgaste. [5]

Tabla 1. Comparación de las propiedades de las bases

Base Propiedades	Mineral	Hidrocrack	P.A.O	Ester
Viscosidad	Monogrado	Multigrado	Multigrado	Multigrado
Índice de viscosidad	Bajo 100	Bueno 120-150	Bueno 120-150	Muy bueno 130-160
Punto de congelación	Débil -10/-15	Débil -15/-25	Excelente -40/-60	Excelente -40/-60
Resistencia a la oxidación	Buena	Buena	Muy buena	Excelente
Volatilidad	Media	Media	Excelente	Excelente
Untuosidad	No	No	No	Si
Biodegradabilidad	No	No	No	Si

FUENTE: REPOSITORIO UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL

3.1.2.5.2. ADITIVOS

Los aditivos son sustancias químicas que se añaden en pequeñas cantidades a los aceites lubricantes para proporcionales o incrementarles propiedades, o para suprimir o reducir otras que le son perjudiciales.

ADITIVOS DESTINADOS A RETARDAR LA DEGRADACIÓN DEL LUBRICANTE

- **Aditivos anticorrosivos y antioxidantes:** Para proteger contra la corrosión a los materiales sensibles, por una parte, y por otra para impedir las alteraciones internas que pueda sufrir el aceite por envejecimiento y oxidación, se ha acudido a la utilización de aditivos anticorrosivos y antioxidantes.
- **Aditivos detergentes-dispersantes:** Estos aditivos tienen la misión de evitar que el mecanismo lubricado se contamine aun cuando el lubricante lo esté. La acción de estos dispersantes es evitar acumulaciones de los residuos, los cuales se forman durante el funcionamiento de la máquina o motor y mantenerlos en estado coloidal de suspensión por toda la masa del aceite.
- **Aditivos antidesgaste:** Cuando el aceite fluye establemente lubricando cremalleras, bielas, bombas de aceite y camisas de pistones, o cuando las partes a lubricar operan parcial o totalmente bajo condiciones de lubricación límite, los aditivos antidesgaste son necesarios.
- **Agentes alcalinos:** Estos agentes neutralizan los ácidos provenientes de la oxidación del aceite de forma tal que no pueden reaccionar con el resto del aceite o la máquina.
- **Agentes antiemulsificadores:** Son aquellos agentes que reducen la tensión interfacial de manera que el aceite puede dispersarse en agua. En la mayor parte de las aplicaciones de lubricación la emulsificación es una característica indeseable. Sin embargo, existen aplicaciones en las cuales los aceites minerales están compuestos de materiales emulsificantes que los hacen miscibles en agua. Los llamados aceites solubles usados con refrigerantes y los lubricantes usados en operaciones de maquinarias dependen de agentes emulsificantes para su exitosa aplicación como fluido de corte.[5]

ADITIVOS MEJORADORES DE LAS CUALIDADES FÍSICAS DEL ACEITE LUBRICANTE

- **Aditivos mejoradores de índice de viscosidad:** El proceso de trabajo de estos aditivos puede explicarse como: en presencia de bajas temperaturas las moléculas de estas sustancias se contraen ocupando muy poco volumen y se dispersan en el aceite en forma de minúsculas bolitas dotadas de una gran movilidad. Cuando se eleva la temperatura, las moléculas de la masa de aceite aumentan de velocidad que se oponen al movimiento molecular del

aceite base, lo cual se traduce en un aumento de la viscosidad de la mezcla.[5]

MEJORADORES DEL PUNTO DE FLUIDEZ Y CONGELACIÓN

Los mismos aditivos mejoradores o elevadores del índice de viscosidad se emplean para favorecer el punto de congelación y, en consecuencia, el de fluidez. Se aplican principalmente a los aceites parafínicos, ya que la parafina por su elevado punto de congelación es la principal productora de la falta de fluidez de los aceites, formando aglomeraciones y solidificaciones al descender la temperatura.

- **Aditivos antiespumantes:** La presencia de cuerpos extraños en el aceite tales como gases, con temperaturas inferiores de los 100°C, producen lo que los aceites minerales puros de por sí no pueden cortar la formación de espumas debido al gran espesor que les da la película lubricante. Estas burbujas o espumas permanentes producen el paso de aceite por los conductos, tal como ocurre en los mecanismos con mandos hidráulicos. Los aditivos antiespumantes tienen la misión de evitar estas burbujas y en la mayor parte de los casos actúan adelgazando la envoltura de la burbuja del aire, hasta su rotura modificando tensiones superficiales e interfaciales de la masa de aceite.
- **Aditivos mejoradores de la oleosidad:** Se entiende por oleosidad la adherencia del aceite a las superficies metálicas de lubricar, debido en gran medida a la polaridad molecular contenida, que por razón de su estructura se fijan fuertemente a dichas superficies.
- **Aditivos de extrema presión:** Para los aceites de equipos mecánicos sometidos a muy altas presiones, se emplean los aditivos EP (extrema presión), que disminuye el desgaste de las superficies metálicas de deslizamiento, favoreciendo la adherencia del lubricante. Estos aditivos, reaccionan químicamente y forman capas mono y polomoleculares que se reconstruyen constantemente en los sitios de altas presiones por efectos de la fricción. De esta manera impiden el contacto metal-metal, evitando los rompimientos o soldaduras de los mismos. Estos aditivos no siempre están exentos de producir ligeras corrosiones, debido a la acción química que ejercen.
- **Aditivos para aumentar la rigidez dieléctrica:** Casi siempre estos productos cumplen simultáneamente la doble misión de dieléctricos y la de proporcionar longevidad a los lubricantes usados para fines de lubricación y funcionamiento de los transformadores eléctricos.[5]

Tabla 2. Ejemplos de aditivos usados en el petróleo

Ejemplos de aditivos usados en el petróleo combustible residual		
Tipo Aditivo	Composición Química	Motivos para su uso
Inhibidor de corrosión	Naftenatos metálicos	Reduce corrosión y formación de depósitos
Dispersante	Naftenatos de alquil	Para dispersar
Agente superficial activo	Jabones de amoniaco	Suspenden el agua en el aceite
Agente anti-escorificador	Óxidos metálicos	Limpia paredes y turbinas
Mejorador de combustión	Acetilos metálicos	Cataliza la combustión

FUENTE: LUBRICACIÓN DE MAQUINARIA – ELEMENTOS DE MAQUINAS

Tabla 3. Aditivos usados en las grasas lubricantes

Ejemplos de aditivos usados en las grasas lubricantes		
Tipo Aditivo	Composición química	Objeto
Agente espesador	Jabones metálicos	Retiene fluidos por absorción
Materiales de relleno	Óxidos metálicos	Aumenta volumen de la grasa
Inhibidor de oxidación	Fenibela-naltilamino	Impide la oxidación
Desactivador metálico	Mercaptobenzotiazclo	Impide efectos catalíticos de metales
Inhibidor de corrosión	Sulfonato de amoniaco	Suspende la corrosión
Agente antidesgaste	Bisulfuro de dibensilo	Reduce desgaste
Agente contra presiones extremas	Naftenado de plomo	Reduce fricción
Mejorador de punto de goteo	Jabones grasos	Aumenta el punto de goteo
Estabilizador	Esteres de ácidos grasos	Aumenta temperatura para el uso
Agente espesador	Polbutilenos	Suministra adherencia en superficies metálicas

FUENTE: LUBRICACIÓN DE MAQUINARIA – ELEMENTOS DE MAQUINAS

Tabla 4. Aditivos usados en aceites lubricantes

Ejemplos de aditivos usados en aceites lubricantes		
Tipo Aditivo	Composición química	Objeto
Mejor índice de viscosidad	Polímeros de metacrilatos	Reduce actividad en el cambio de viscosidad con la temperatura
Deprimiento punto de fluides	Naftalena alquilatada	Reduce punto fluidez del aceite
Detergente dispersante	Productos de alquil P_2S_5 sulfonatos de metal, alquilpoliámido, fenolatos de alquil metálicos	Conserva los insolubles en suspensión, mantiene limpieza.
Inhibidor de oxidación	Diaquilditiofosfato de zinc	Demorar la oxidación en aceites
Inhibidor de herrumbre	Alquilaminos	Impide herrumbre en metales ferrosos adhesión
Inhibidor de corrosión	Sulfonatos básicos de metales	Impide ataque de materiales ácidos a metal
Agente contra presiones extremas	Olefinos sulfurados. Parafinas clorinadas	Impide se adhieran las superficies metálicas
Inhibidor de espuma	Polimero de silixón	Reduce tendencia a formar espuma
Agente anti rayado y antidesgaste	Sales metálicas de fosfato de alquil ácido	Suministra pulido químico y reduce desgaste

FUENTE: LUBRICACIÓN DE MAQUINARIA – ELEMENTOS DE MAQUINAS

3.1.2.6. PROPIEDADES GENERALES DE LOS LUBRICANTES

Los principales fabricantes de maquinaria y equipos en general exigen que los lubricantes que se deben utilizar en sus fabricados, cumplan ciertas especificaciones y exigencias acordes con la severidad de las condiciones de diseño y servicio de sus máquinas. Con el fin de unificar criterios, distintas corporaciones y organismos han desarrollado procedimientos de ensayo normalizado, capaz de medir las propiedades del lubricante en cuanto a su calidad, identificación, detección de adulteraciones y contaminaciones, así como vigilancia de su comportamiento en servicio.[5]

3.1.2.6.1. PROPIEDADES FÍSICAS

- **Color y fluorescencia:** Estas características carecen de valor como criterio de evaluación de los aceites terminados, ya que pueden ser modificados o enmascarados por los aditivos. Sin embargo, hace unos años los usuarios daban una gran importancia al color de los aceites, como indicativo de un mejor o peor grado de refinado, y por otro lado la fluorescencia se tomaba como indicativa del origen del crudo. Así la fluorescencia azulada caracterizaba a los aceites artificiales y la fluorescencia verde a los parafínicos. [5]
- **Densidad:** La densidad de los aceites lubricantes está relacionada con la naturaleza del crudo y el punto de destilación de la fracción, para fracciones equivalentes los aceites parafínicos son de menor densidad y los aromáticos los de mayor densidad, correspondiendo a los tipos nafténicos las densidades intermedias. [5]
- **Viscosidad:** La propiedad física más importante de un lubricante líquido es su viscosidad. En términos sencillos, la viscosidad de un líquido puede definirse como la resistencia a fluir y como una medida del rozamiento entre sus moléculas. Como la resistencia a fluir depende de las fuerzas intermoleculares que se desarrollan en el interior del líquido, es de éstas de quien dependerá finalmente la resistencia mecánica observada cuando se hace deslizar una capa de líquido sobre otra capa adyacente de este mismo líquido. Por ello se comprende fácilmente que la viscosidad de un fluido tan complejo como un aceite mineral puede verse modificada considerablemente, por una parte, por las variaciones internas de su composición y estructura, determinadas por el origen del petróleo crudo y su proceso de refinado, y por otra parte las condiciones externas tales como la temperatura y la presión, que pueden influir sobre las fuerzas moleculares. [5]
- **Índice de viscosidad:** Es el valor que indica la variación de la viscosidad de un aceite frente a la acción de la temperatura. Para hallar el índice de viscosidad se compara la variación de viscosidad que ha sufrido un aceite a dos temperaturas distintas y fijas, casi siempre 100°F (38°C) y 210°F (99°C). Se ha establecido una escala convencional que va de 0 a 100, donde los aceites que tiendan a 0 representan los de mayor variación y son poco estables y los cercanos a 100 son más estables. [6]
Se han logrado por medio de aditivos, índices de viscosidad superiores a 100 y se consideran estos aceites como inafectados por la temperatura.
- **Untuosidad:** Se entiende por untuosidad la adherencia del aceite a las superficies a lubricar. Es una propiedad de acción física, la cual, aunque siempre es de interés, tiene su máximo exponente en la lubricación de motores de vehículos y de cojinetes sometidos a frecuentes paradas y arrancadas.[6]

- **Viscosidad absoluta o viscosidad dinámica:** Para la medida de la viscosidad se utiliza muy diversos tipos de aparatos llamados viscosímetros, que se diferencian entre sí por la forma que se determina la viscosidad, siendo sus distintos grupos los siguientes:
 1. Medición de la velocidad del flujo del aceite a través de un tubo capilar (viscosímetro cinemáticas) o de un tubo corto u orificio (viscosímetro Saybolt).
 2. Medición del tiempo de desplazamiento de un objeto sólido a través del aceite (viscosímetro de caída de bolas).
 3. Medición del efecto de cizallas que se produce en un aceite entre dos superficies sujetas a un movimiento relativo (viscosímetros rotativos). [5]
- **Rigidez dieléctrica:** Esta propiedad viene determinada por la tensión en la que se produce un arco eléctrico permanente entre dos electrodos sumergidos en el aceite, en las condiciones normalizadas del ensayo y utilizando un aparato llamado puntero metro. Este valor se expresa en KV/cm.
 Este ensayo orienta sobre las cualidades de aislamiento eléctrico de los aceites, que disminuyen con la presencia de contaminantes tales como el agua, polvo, suciedad, barros, etc.
 No solamente en el campo de los aceites dieléctricos, la rigidez dieléctrica tiene si significación, sino también en el de los aceites de compresores frigoríficos, ya que dicha característica se ve muy afectada por la presencia de traza de humedad.[5]
- **Puntos de fluidez y congelación:** Es aquella constante que indica cuál es la mínima temperatura a la que fluye el aceite por los circuitos de lubricación, es decir el aceite a bajas temperaturas se va volviendo más viscoso, hasta que llega el momento en que deja de fluir. Esta característica se debe tener en cuenta principalmente en aceites que van a lubricar mecanismos que trabajan a bajas temperaturas, por ejemplo, máquinas frigoríficas.
 Si se continúa enfriando el aceite, casi inmediatamente se produce la congelación total, punto éste que se conoce como congelación.[6]
- **Punto de inflamación y combustión:** El punto de inflamación de un aceite lo determina la temperatura mínima a la cual los vapores desprendidos por un aceite se inflaman en presencia de una llama o chispa que va saltando casi de un modo continuo.
 El punto de inflamación tiene una importancia vital en aquellos mecanismos donde el aceite trabaja a elevadas temperaturas: por ejemplo, motores de combustión interna en los que se requieren puntos de inflamación superiores a 215°C. En cambio, para lugares donde la temperatura sea la ambiental o ligeramente superior, esta característica no tiene interés alguno, ya que todos los aceites superan en mucho a dicha temperatura.
 Si se prosigue calentando el aceite al llegar a una temperatura de 20°C o 30°C superior al punto de inflamación, los vapores desprendidos ya no arden

momentáneamente, sino de un modo continuando; este fenómeno se conoce con el nombre de punto de combustión. [6]

- **Acidez:** Es el porcentaje de ácidos libres que un aceite contiene. Dichos ácidos siempre son perjudiciales tanto para el lubricante como para los metales con los que están en contacto. No es aceptable un aceite que arroje un porcentaje de acidez superior al 0.25%. [6]
- **Índice de acidez:** Es el número de miligramos de potasa cáustica necesarios para neutralizar la acidez libre de un gramo de grasa o aceite.[6]
- **Porcentaje en cenizas:** Las impurezas siempre son indeseables en los aceites. En la mayor parte de los casos, proceden de los álcalis utilizados en la refinación y que no han sido después completamente eliminados, o bien provienen de desprendimiento de impurezas o costras de los conductos por los que atraviesa durante todo el ciclo.
Los aceites con porcentajes de cenizas superiores a un 0.02% no son recomendables para lugares finamente ajustados y revolucionados. [6]
- **Residuos carbonos:** Es la tendencia a la formación de carbón en los aceites que han de trabajar en lugares que, por su alta temperatura se queman.
Los porcentajes de carbón admisibles en los aceites lubricados son de 0.1 hasta 0.9%. [6]

3.1.2.5.2. PROPIEDADES SUPERFICIALES

- **Tensión interfacial:** Cuando se ponen en contacto dos líquidos que no son miscibles, se crea una interfase, el grado de resistencia que ofrece ambos líquidos a su separación se define como tensión interfacial. Los factores que influyen sobre la tensión interfacial son los siguientes:
 - La naturaleza química de los líquidos en contacto.
 - La temperatura, si la miscibilidad de los líquidos en contacto aumenta con la temperatura el valor de la tensión interfacial disminuye.
 - La presencia de cuerpos polares rebaja la tensión interfacial.
 - La tensión interfacial se utiliza como indicativo de la presencia o ausencia de compuestos polares unas muy bajas concentraciones, como es el caso de ciertos contaminantes, aditivos, o productos de la degradación del propio aceite. Por ello dicho valor se considera de importancia en el caso de los aceites de turbinas y dieléctricos, siguiéndose su evolución durante su servicio. Variándose esta característica de forma inversa con el índice de acidez del aceite.[5]
- **Formación de espuma:** La espuma es una aglomeración de burbujas de aire u otro gas, separados por una fina capa de líquido que persiste en la superficie. Suele formarse por agitación violenta del líquido.
La tendencia a la formación de espuma y la persistencia de esta se determina insuflando aire seco en aceite. El volumen de espuma obtenido durante el

ensayo determina la tendencia a la formación de espuma del aceite. Al cabo de un tiempo de reposo se vuelve a medir el volumen, y así se determina la estabilidad de la espuma. La espuma provoca problemas en los sistemas hidráulicos y de lubricación:

- Comportamiento errático de mandos hidráulicos.
- Cavitación en bombas.
- Derrames en depósitos.
- Oxidación prematura del aceite.
- Corrosión interna de elementos del sistema.
- Fallos en cojinetes (por falta de lubricación).
- Disminución de la capacidad refrigerante del aceite.
- Disminución de la capacidad de disolución del aceite.
- Flotación de pequeñas partículas de lodo presentes en el aceite.

La estabilidad de la espuma se ve favorecida por el aumento de la viscosidad del aceite, la presencia de compuestos polares en el mismo. Por el contrario, la temperatura elevada del aceite y la presencia de aditivos antiespumantes en el aceite reducen la tendencia a la formación de espuma.[5]

- **Punto de fluidez:** El punto de fluidez de un aceite lubricante es la mínima temperatura a la cual este fluye sin ser perturbado bajo la condición específica de la prueba. Los aceites contienen ceras disueltas que cuando son enfriados se separan y forman cristales que se encadenan formando una estructura rígida atrapando al aceite entre la red. Cuando la estructura de la cera está lo suficientemente completa el aceite no fluye bajo las condiciones de la prueba. La agitación mecánica puede romper la estructura cerosa, y de este modo tener un aceite que fluye a temperaturas menores a su punto de fluidez. En ciertos aceites sin ceras, el punto de fluidez está relacionado con la viscosidad.

En los aceites la viscosidad aumenta progresivamente a medida que la temperatura disminuye hasta llegar a un punto en que no se observa ningún flujo existente. Desde el punto de vista del consumidor la importancia del punto de fluidez de un aceite depende enteramente del uso que va a dársele al aceite.[5]

- **Cenizas sulfatadas:** En un aceite lubricante las cenizas sulfatadas es el residuo en porcentaje que permanece una vez quemada una muestra de aceite. El residuo inicial es tratado con ácido sulfúrico y se quema el residuo tratado. Es una medida de los componentes no combustibles que contiene el aceite.

Los aceites minerales puros no contienen materiales que forman cenizas. Gran cantidad de los aditivos utilizados en los lubricantes contienen componentes metalo-orgánicos los cuales forman un residuo en la prueba de cenizas sulfatadas de tal manera que la concentración de estos componentes es aproximadamente indicada por la prueba. Por consiguiente, durante la

fabricación la prueba es un método de asegurarse que los aditivos han sido incorporados.

Con aceites usados, un incremento de cenizas sulfatadas usualmente indica la presencia de contaminantes tales como polco, suciedad, partículas de desgaste y posiblemente contaminantes. [5]

- **Punto de inflamación y fuego:** Cuando hablamos de punto de inflamación se hace referencia a la temperatura a la cual el aceite desprende suficientes vapores que se inflaman cuando una llama abierta es aplicable. Cuando la concentración de vapores en la superficie es lo suficientemente grande a la exposición de una llama, resultará fuego tan pronto como los vapores se enciendan. Cuando una prueba de este tipo es realizada bajo ciertas condiciones específicas, la temperatura a la cual esto sucede se denomina PUNTO DE INFLAMACIÓN. La producción de vapores a esta temperatura no son lo suficiente para causar una combustión sostenida y, por ende, la llama desaparece. Sin embargo, si el calentamiento continúa se obtendrá una temperatura a la cual los vapores serán liberados lo suficientemente rápido para soportar la combustión.
- **Punto de fuego o combustión:** El punto de inflamación de aceites nuevos varia con viscosidad – aceites de alta viscosidad tiene altos puntos de inflamación. Estos puntos están también afectados por el tipo de crudo. Aceites nafténicos tienen menores puntos de inflamación que aceites paraafínicos de viscosidad similar.
- **Índice de neutralización y saponificación:** El índice de neutralización de un lubricante es la cantidad en miligramos de hidróxido de potasio necesarios para neutralizar el ácido libre contenido en gramo de aceite a la temperatura ambiente.
El índice de saponificación (Is) indica la cantidad en miligramos de hidróxido de potasio necesarios para la saturación de los ácidos libre y combinados obtenidos en un gramo de aceite, es decir para la neutralización de los ácidos y la saturación de los ésteres.[5]
- **Índice de alquitrán y de alquitrización:** El índice de alquitrización se usa en procesos de envejecimiento artificial para establecer la predisposición del aceite a formar sustancias alquitranosas a temperaturas elevadas y en contacto con el aire. En aceites en uso, se comprueba con ello su grado de desgaste o envejecimiento.[5]
- **Emulsionabilidad del aceite:** Una de las propiedades de los lubricantes para cilindros y turbinas a vapor, es la de su tendencia a formar emulsiones o mezclas intensas y duraderas con el agua.[5]

3.1.2.5.3. CARACTERÍSTICAS DE UN LUBRICANTE

- **El grado**
 - Se define por la clasificación SAE (Sociedad de los ingenieros del Automóvil)
 - Se caracteriza por la viscosidad en frío y en caliente del lubricante; dos números separados por la letra “W” (Winter=Invierno) dan el grado.
 - El primer número, seguido de una W representa la viscosidad en frío: 5W, 0W. Cuanto más pequeño es el número, más fluido será el aceite en frío y facilitará el arranque.
 - El segundo número representa la viscosidad en caliente: 20, 30, 40. Cuanto más alto sea el número más viscoso será el aceite en caliente.
- **Viscosidad SAE**
 - La viscosidad mide la resistencia a fluir de un líquido. El lubricante es más fluido en caliente y más viscoso en frío.
 - La utilización de lubricantes fluidos en frío permite reducir los desgastes al arrancar gracias a una lubricación rápida de todas las piezas del motor.

Se obtienen a partir de las especificaciones internacionales y por las aprobaciones de los constructores. En la [tabla 5](#) se tienen especificaciones internacionales que garantizan un nivel de prestaciones mínimas de un lubricante.[5]

Tabla 5. Especificaciones internacionales

FLUIDEZ	0W	5W	10W	15W	20W
VISCOSIDAD	SAE 60	SAE 50	SAE 40	SAE 30	SAE 20

FUENTE: REPOSITORIO UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL

- **API (American Petroleum Institute)** Con el fin de facilitar una correcta elección del lubricante que mejor responda a las exigencias específicas de los diversos tipos de motores y servicios, el API, estableció una clasificación de los aceites en dos tipos: aceites para motores nafteros y aceites para motores diesel¹.
 - La letra S identifica a aceites para motores nafteros y la letra C a los destinados a motores gasoleros.
 - Las segundas letras indican las exigencias en servicio o el grado de desempeño. Comienza por la A para el menos exigido continuando en orden alfabético a medida que aumenta la exigencia.

Se trata de una clasificación abierta, pues se van definiendo nuevos niveles de desempeño para nuevos diseños de motores. [5]

3.1.2.5.4. PROPIEDADES GENERALES DE LOS LUBRICANTES INDUSTRIALES

- **Propiedades físicas y químicas de los lubricantes industriales**

- Viscosidad adecuada en función del quipo.
- Estabilidad a la oxidación.
- No corrosivo.
- Propiedades antiespumantes.
- Propiedades antiherrumbe.

Lubricación manual o engrase perdido

- Viscosidad adecuada en función al equipo
- Alto índice de viscosidad
- Baja compresibilidad
- Estabilidad a la oxidación
- Buenas propiedades separación del agua
- Buenas propiedades eliminación del aire
- En casos que se requiera características E.P

3.1.2.7. TIPOS DE LUBRICANTES

3.1.2.7.1. ACEITES LUBRICANTES

Es uno de los tipos de lubricantes más utilizados en la industria. Existen diferentes tipos de aceites básicos y de ahí se desglosa un sinnúmero de aplicaciones para las cuales pueden ser usados. Según la API (Instituto Americano del Petróleo) existen 5 grupos de aceites lubricantes los cuales son:

- **GRUPO I:** Es el grupo más básico de aceites derivados del petróleo y es el que tiene menos calidad. Cada vez se utiliza menos estos aceites debido a sus pobres características de lubricación. Tienen solventes, impurezas y alto porcentaje de azufre ($>0.03\%$) que son indeseadas en la lubricación. También cuenta con $<90\%$ de moléculas saturadas.
- **GRUPO II:** Es mejor que el grupo I. Consiste en un aceite hidro-procesado en donde le quitan algunas impurezas. Tienen menos porcentaje de azufre ($<0.03\%$) que son y cuenta con $>90\%$ de moléculas saturadas.
- **GRUPO III:** Tiene mayores características lubricantes que el grupo I y II. Este tipo de aceites son sometidos a presiones y temperaturas para perfeccionarlos. Es por eso por lo que tienen índices de viscosidad más altos

que los anteriores grupos lo que los hace que soporten mejor la oxidación y temperaturas.

- **GRUPO IV:** Son los comúnmente conocidos como PAOs (polialfaolefina). La materia prima, gas etileno, proviene de la parte de los gases ligeros que suben a través de las bandejas en el proceso de la extracción del petróleo. De ahí se incorpora el gas etileno a una planta química en donde el lubricante es diseñado por el hombre y es por eso de sus altas características lubricantes.
- **GRUPO V:** Son todos los aceites sintéticos que no provienen de la extracción de petróleo. Normalmente vienen de los animales, plantas o alcoholes y son sometidos a estructuras sinterizadas. Hay varios tipos y dependiendo de la aplicación es su recomendación de uso: Diesteres, Poliolesteres, Poliglicoles, Esteres fosfatados, Siliconas, Esteres perfluorados. [7]

Figura 5. Clasificación de los diferentes tipos de aceites básicos según API

CATEGORÍA		ÍNDICE DE VISCOSIDAD	DERIVADOS	SATURADOS	AZUFRE
Grupo I	Refinación por solvente	80 - 120	Petróleo	<90%	>0.03%
Grupo II	Hidro-procesado	80 - 120	Petróleo	>90%	<0.03%
Grupo III	Hidrocarburos sintetizados	>120	Petróleo	>90%	<0.03%
Grupo IV	Reacción química sintetizadas	>140	Sintéticos Polialfaolefinas (PAO) GTL de gas a líquido derivados del gas natural	Sintéticos	
Grupo V	Sintéticos Diferentes del PAO	>140	Sintéticos Otros	Sintéticos	

FUENTE: INTERLUB

Al momento de realizar una buena recomendación en la elección de un lubricante debemos tener en cuenta lo siguiente:

- Motores de combustión interna
- Fluidos de transmisión automática
- Turbinas
- Sistemas hidráulicos: Resistentes al fuego o antidesgaste
- Reductores
- Engranajes abiertos
- Fluidos de corte

- Compresores
- Formulación de grasas [7]

También se debe considerar una activación correcta para cada tipo de aplicación.

Figura 6. Aditivos más comunes por tipo de aplicación

	Motor	Fluidos de transmisión automática	Turbinas/ R&O/ Fluidos hidráulicos	Fluidos Hidráulicos Antidesgaste	Fluidos Hidráulicos resistentes al fuego	Lubricantes Metal Mecánicos	Engranajes	Grasas
Mejoradores de Índice de Viscosidad (IV)	o	o		+–			o	
Detergentes	o	+–		+–				+–
Dispersantes	o	o		+–				
Agentes anti-desgaste	o	+–		o	o		o	o
Anti-oxidantes	o	o	o	o			o	o
Inhibidores de corrosión	o	o	o	o	o	o	o	o
Anti-espumantes	o	o	o	o			o	
Aditivos de extrema presión (EP)		o			+–	o	o	+–
De activadores metálicos			o	o		+–	+–	+–
De presiones de punto de congelación	o	o	o	o	+–		o	

FUENTE: INTERLUB

3.1.2.7.2. GRASAS

Las grasas lubricantes tienen 3 compuestos principales:

- Aceite base
- Aditivos
- Espesante

El espesante sirve para darle su estructura a la grasa y dependiendo de la cantidad de este es la dureza de la grasa (Grado NLGI). Existen varios tipos de espesantes que pueden ser base jabón o inorgánicos y dependiendo del tipo espesante varía las principales propiedades de las grasas.[7]

- **JABONES SIMPLES:** Litio, calcio, aluminio, bario o sodio.

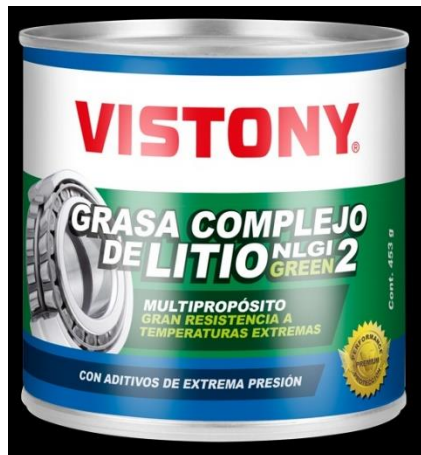
Figura 7. Grasas jabones simples



FUENTE: KIB AUTOPARTES

- **JABONES COMPLEJOS:** Complejo sulfonato de calcio, complejo de litio y complejo de aluminio.

Figura 8. Grasa compleja de litio



FUENTE: VISTONY TECNOLOGÍA EN LUBRICACIÓN

- **OTROS:** Bentonitas, poliureas, poliurea-aluminio, silicón y PTFE.

Las grasas pueden ser utilizadas en una variedad de aplicaciones:

- Rodamientos
- Acoplamientos

- Cables
- Engranajes abiertos
- Reductores cuando son expuestos a altas temperaturas y se requiere el formado de un sello
- Entre otras [7]

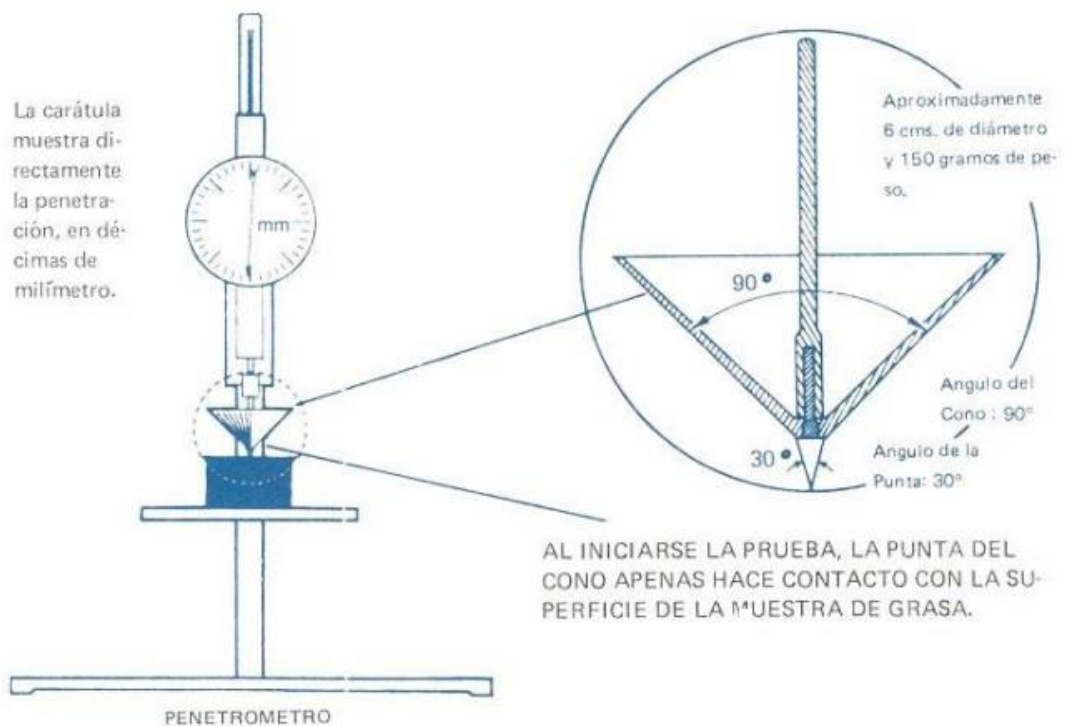
3.1.2.7.2.1. CARACTERÍSTICAS DE LAS GRASAS

Las principales características de las grasas son:

1. Consistencia

Es el grado de dureza o resistencia a la penetración. Generalmente depende de los elementos que la componen, de la cantidad, y del proceso de elaboración. La consistencia se mide con el Penetró (Figura 9)

Figura 9. Penetró



FUENTE: LUBRICACIÓN DE MAQUINARIA – ELEMENTOS DE MAQUINAS

El ensayo se reduce a dejar el penetrómetro sobre la superficie de la grasa, sin más fuerza que la de su propio peso y durante 25seg. Se observa en la carátula lo que ha penetrado en décimas de milímetro. Esta prueba se realiza a una temperatura estándar de 25°C. El peso del penetrómetro es de 150 gramos de peso.

La ASTM (American Society Testing Materials) Sociedad Americana para prueba de materiales y la NLGI (National Lubricating Grease Institute) Instituto Nacional de Grasas, determinan la penetración en la [tabla 6](#).

Tabla 6. Penetración trabajada

GRADO NLGI		PENETRACIÓN TRABAJADA
0	Semifluida	355-385
1	Muy blanda	310-340
2	Blanda	265-295
3	Mediana	220-250
4	Dura	175-205
5	Muy dura	130-160
6	Extradura	85-115

FUENTE: LUBRICACIÓN DE MAQUINARIA – ELEMENTOS DE MAQUINAS

La estabilidad de una grasa es la constante que determina el comportamiento del producto en lo referente a la separación del jabón y del aceite ante las duras agresiones de temperatura, velocidad y presión, que deben soportar durante su trabajo o bien durante el almacenaje prolongado.

El fenómeno de no estabilidad se aprecia por la formación de una capa superficial de aceite líquido sobre la masa total de la grasa. Son poco estables las grasas a base de calcio.[6]

2. **Reversibilidad:** Se entiende por reversibilidad en una grasa la propiedad de recuperar su estructura primitiva una vez separados el aceite y el jabón por acción de una elevada temperatura y velocidad. Es casi una propiedad imprescindible en las grasas destinadas a la lubricación de rodamientos. [6]
3. **Punto de fusión y de gota:** Es la temperatura en la cual una grasa deja de comportarse como tal y se transforma en un aceite y un jabón ambos

por separado. Si se prosigue calentando la fluodificación se irá incrementando hasta que se desprenda una gota. [6]

4. **Adherencia o pegajosidad:** La adherencia de una grasa la determina casi exclusivamente la clase de jabón empleado. Las grasas fibras presentan mayor adherencia que las mantequillosas. Esta propiedad es importante cuando se trata de engrasar sistemas muy revolucionados. [6]

3.1.2.7.3. PASTAS LUBRICANTES

Al igual que las grasas, las pastas se componen de aceites bases, aditivos y espesantes. La gran diferencia es que las pastas tienen gran cantidad de sólidos lubricantes. Una grasa puede contener lubricantes sólidos, pero estos no exceden del 5% ya que una cantidad mayor puede dañar los componentes a los que estaría destinados a lubricar. Comúnmente estas pastas lubricantes tienen como uso las siguientes aplicaciones:

- Sellos
- Anti-aferrante
- Ensamblajes
- Aplicaciones de alta temperatura arriba de los 350°C [7]

Estos son algunos sólidos lubricantes:

- **BISULFURO DE MOLIBDENO (MoS₂):** Baja el coeficiente de fricción amortigua vibraciones y soporta temperaturas de hasta 375°C. [7]

Figura 10. Bisulfuro de molibdeno



FUENTE: DIRECT INDUSTRY

- **POLITETRAFLUOROETILENO (PTFE):** También conocido como teflón, es un aditivo anti-desgaste. Aprobado como grado alimenticio y soporta temperaturas de hasta 250°C. [7]

Figura 11. Teflón (PTFE)



FUENTE: BRIEND

- **GRAFITO:** Es un aditivo anti-desgaste y da capacidad de carga, baja el coeficiente de fricción, es eficiente en ambiente húmedos y soporta temperaturas de hasta 600°C. [7]

Figura 12. Grafito



FUENTE: WURTH

- **COBRE, NÍQUEL Y NITRURO DE BORO:** Soportan temperaturas de hasta 1000°C [7]

Figura 13. Desmoldante de Nitruro de Boro



FUENTE: GRAINGER

3.1.2.7.4. ANTICORROSIVOS

Los anticorrosivos están diseñados para evitar la oxidación de los componentes mecánicos en donde son aplicados. Normalmente la mayoría de los lubricantes cuentan con propiedades anticorrosivas, pero los que son considerados exclusivamente como anticorrosivos no suelen tener protección antidesgaste.

Dentro de las aplicaciones más importantes es la protección de los equipos expuestos a condiciones severas como el almacenamiento en exteriores y presencia de entornos corrosivos

La mayoría de los OEM de equipos, engranes y rodamientos entregan sus productos con algún tipo de anticorrosivo ya aplicado para evitar cualquier daño con la exposición al medio ambiente. [7]

3.1.2.7.5. LACAS

Una laca es un lubricante líquido que al secarse deja una película lubricante seca. Esta película es a base de sólidos como el bisulfuro de molibdeno o el grafito. Estas son algunas características que tendrá esa película lubricante dentro del componente:

- Evitar la fricción
- Disminuir el coeficiente de fricción
- Repeler el polvo
- Acciones deslizantes ante algunos contaminantes

En algunos casos puede ser utilizado en aplicaciones expuestas a temperatura. La desventaja es en ambientes húmedos en donde tiende a lavarse. Estos mismos pueden ser utilizados en cadenas, cables, guías deslizantes.[7]

3.1.2.7.6. RECUBRIMIENTOS

Los lubricantes secos que actúan como si fueran una pintura en los componentes. Tienen lubricantes sólidos que hace la función de antifricción y forman una película que perdura. Además, son utilizados como lubricación de por vida en algunos componentes automotrices.[7]

3.1.2.8. PERDIDA DE UTILIDAD DE UNA MAQUINA POR MALA LUBRICACIÓN

Una lubricación deficiente conlleva una mayor fricción, un incremento de la temperatura de operación y una deficiente limpieza de la zona de trabajo; todo ello incrementando la probabilidad de reducir la utilidad de la máquina, con el coste operativo y económico que ello conlleva.

Hay que tener en cuenta ciertos aspectos de la lubricación para evitar o reducir los modos de fallo:

- Lubricación excelente.
- Contenido controlado de aditivos para evitar corrosión.
- Protección contra la herrumbre (agua).
- Viscosidad adecuada en operación.
- Viscosidad adecuada en frío para momentos de arranque.
- Baja formación de espuma.
- Estabilidad a la oxidación.
- Adhesión a los componentes para proteger ante la corrosión.
- Demulsibilidad para separar el agua y aceite de la manera más eficiente para facilitar drenaje.[1]

3.2. ESTADO DEL ARTE

3.2.1. EFECTO ELECTROQUÍMICO EN LA LUBRICACIÓN LÍMITE DEL ADITIVO ZDDP MEZCLADO CON CARBONATO DE PROPILENO/SUCCINATO DE DIETILO

El objetivo de este estudio es encontrar potenciales superficiales apropiados bajo los cuales la formación de tribofima ZDDP pueda promoverse eficientemente con bajas concentraciones de ZDDP. En primer lugar, se investigó el rendimiento de lubricación límite de la bola de ZrO_2 y la placa de acero AISI 52100 en carbonato de propileno (PC)/succinato de dietilo (DES) mezclado con diferentes concentraciones de ZDDP. Con el aumento de las concentraciones de ZDDP, el coeficiente de fricción y el volumen de desgaste disminuyó y el tribofima cubrió regiones más amplias dentro de las cicatrices de desgaste. En segundo lugar, se estudió el rendimiento de la lubricación límite del mismo tribosistema bajo diferentes potenciales de superficie con una concentración de ZDDP relativamente baja. El coeficiente de fricción y desgaste disminuyó y el área cubierta por la tribopelícula aumentó junto con la elevación de los potenciales superficiales, lo que es similar a los resultados de las pruebas de concentración mencionadas anteriormente. En tercer lugar, la diferencia de estructuras químicas de tribofilm ZDDP bajo diferentes potenciales de superficie se caracterizó por TEM, EDS y XPS. Finalmente, el mecanismo del electroquímico sobre la formación de tribopelícula ZDDP. Se consideró que los efectos de los potenciales aplicados sobre la adsorción del aditivo ZDDP y sobre la energía de activación de las reacciones electroquímicas en la superficie del acero son las razones de los resultados del experimento electro-triboquímico observado. [8]

3.2.2. UN MODELO DE ELEMENTOS FINITOS EFICIENTE EN 3D PARA SIMULAR LA FATIGA POR CONTACTO RODANTE EN CONDICIONES DE ALTA CARGA

Los objetivos de esta investigación fueron desarrollar un modelo de elementos finitos elástico-plástico eficiente en 3D para caracterizar el comportamiento de fatiga por contacto de rodadura del acero endurecido a altas cargas (~ 5 GPa) y corroborar los resultados analíticos y experimentales. El modelo FE eficiente desarrollado para esta investigación se combinó con la mecánica de daño continuo para simular la fatiga por contacto rodante (RCF). El nuevo enfoque computacionalmente eficiente desarrollado utiliza la malla de Delaunay para reducir el número de elementos sin comprometer la precisión de la distribución de la tensión inducida durante una pasada de contacto rodante. Para validar el enfoque recientemente desarrollado, los resultados obtenidos del modelo 3D actual para el contacto de la línea se corroboraron con los resultados publicados

anteriormente. Las vidas de fatiga obtenidas del nuevo modelo son consistentes con las predicciones del modelo publicadas anteriormente y las observaciones empíricas. Con el fin de simular la RCF para condiciones de alta carga, se implementó en el modelo el aumento en el ancho de contacto observado en los experimentos y, en consecuencia, la disminución en la presión de contacto con los ciclos de carga. Además, la ley de evolución del daño fue modificada para incorporar los esfuerzos residuales de compresión inducidos por la deformación plástica. La vida L10 y la dispersión en las vidas de fatiga obtenidas del modelo se correlacionaron bien con los resultados experimentales. Como parte de esta investigación, se diseñó y desarrolló un ensayo de prueba de rodamientos de empuje (TBTA) para simular RCF. Los experimentos RCF se realizaron en probetas planas de acero AISI 52100 endurecido a altos niveles de tensión de contacto (5 GPa) para inducir la deformación plástica. Los resultados demostraron que el ancho de contacto aumentó a medida que aumentaron los ciclos debido a la acumulación de deformación plástica. Los resultados del modelo FE corroboran bien con los resultados experimentales obtenidos de TBTA. [9]

3.2.3. COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO DEL REVESTIMIENTO LASER AUTOLUBRICANTE BASADO EN MoS₂ PARA SU USO EN APLICACIONES DE ALTA TEMPERATURA

Muchos procesos de conformado a alta temperatura (HT) requieren el uso de lubricantes sólidos para controlar la fricción y reducir el desgaste. En un intento por eliminar la necesidad de una lubricación sólida en aplicaciones deslizantes a alta temperatura, se prepararon recubrimientos autolubricantes a base de níquel con la adición de Ag y MoS por medio de revestimiento láser en sustratos de acero inoxidable.

El comportamiento de los revestimientos láser resultantes se evaluó minuciosamente hasta 600 °C, incluido el comportamiento de oxidación y la prueba tribot de vaivén utilizando diferentes geometrías de contra cuerpo (bola y pasador plano). Los recubrimientos autolubricantes mostraron menor fricción que la aleación de referencia no modificada en todas las temperaturas probadas, además de una estabilidad microestructural significativa después de una exposición prolongada a altas temperaturas. También se encontró que la adición de lubricantes sólidos a los revestimientos era beneficiosa en términos del desgaste del contra cuerpo en HT, ya que no se pudo medir ninguna pérdida de material para las bolas de rodamiento después de la prueba a 600 °C contra los revestimientos autolubricantes, a pesar de la ablandamiento significativo experimentado por el acero para cojinetes AISI 52100 en HT. [10]

3.2.4. EVALUACIÓN COMPARATIVA DE VARIOS MODELOS CONSTITUTIVOS DE MATERIALES PARA TRIBOLOGÍA, DESGASTE Y OTRAS SIMULACIONES DE DEFORMACIÓN MECÁNICA DE Ti₆Al₄V

El uso de una aleación de titanio alfa-beta (HCP-BCC multifase) , Ti₆Al₄V, es omnipresente en una amplia gama de aplicaciones de ingeniería. La década anterior de investigación de análisis de elementos finitos en varias aleaciones de titanio para numerosas biomédicas. Especialmente en el campo de la ortopedia ha dado lugar al desarrollo de más de media docena de modelos materiales constitutivos, sin que exista comparación entre ellos. Parte de este problema surge de la complejidad de desarrollar una subrutina de material definida por el usuario vectorizada (VUMAT) y las diferentes condiciones (velocidad de deformación, temperatura y composición del material) en las que estos modelos se informan experimentalmente. Este documento examina la literatura existente para revisar estos modelos y proporciona una evaluación comparativa cuantitativa contra el modelo de material tabulado y un modelo de ley de potencia de Ti₆Al₄V tomando el caso de prueba de una simulación de corte y tracción uniaxial. [11]

3.2.5. HACIA UN MOTOR DE PLÁSTICO: TRIBOLOGÍA A BAJA TEMPERATURA DE POLÍMEROS EN DESLIZAMIENTO ALTERNATIVO

Se han realizado estudios tribológicos fundamentales de una gama de polímeros de ingeniería , incluido un tereftalato de polítrimetileno (PTT) de origen biológico, a bajas temperaturas (12C°y -8C°). El objetivo del estudio era reemplazar una interfaz de sellado de politetrafluoroetileno (PTFE)/revestimiento de aluminio pulido convencional con una combinación de polímeros, dentro de un motor Dearman. El motor Dearman es un motor de pistón novedoso impulsado por la expansión de un fluido criogénico, ya sea nitrógeno líquido o aire líquido, para producir refrigeración y energía combinadas sin emisiones. Se utilizó un tribómetro para simular las condiciones del motor.

La eficacia de los polímeros en relación con el punto de referencia de aluminio pulido se evaluó en términos de una capa de transferencia de material proyectada. Su magnitud se determinó utilizando una combinación de microscopio electrónico de barrido (SEM)/espectroscopía de rayos X de dispersión de energía (EDS) y curvas de Abbott-Firestone, un descriptor de la textura de la superficie. Se introduce el concepto de un exceso de fricción, correlacionado con la severidad del desgaste medido en la muestra de PTFE.

Para el motor, un bajo coeficiente de fricción (CoF) conduce a pérdidas parásitas reducidas y un desgaste bajo garantizará que se mantenga la integridad del sello del pistón y, por lo tanto, la capacidad de sellado del motor. La transferencia de material, generalmente del sello al revestimiento, se detectó en todas las muestras,

excepto en las muestras de polioximetileno (POM) sin pulir y de aluminio sin pulir. Estas dos combinaciones tenían los sobreimpulsos por fricción más bajos y los niveles más bajos de desgaste. Estas son propiedades que también se relacionaron con una baja rugosidad superficial y un bajo gradiente del rango intercuartílico de la curva de Abbott-Firestone. Estos materiales superaron a la combinación de sello/revestimiento de referencia y el POM ofrece el potencial para una cámara de expansión totalmente polimérica. [12]

3.2.6. INFLUENCIA DE LA FORMA DEL HOYUELO EN LA FORMACIÓN DE TRIBOPELÍCULAS Y PROPIEDADES TRIBOLÓGICAS DE SUPERFICIES TEXTURIZADAS BAJO LUBRICACIÓN TOTAL Y ESCASA

Las condiciones de lubricación tienen influencias significativas en la formación de tribopelículas y luego afectan el comportamiento tribológico. En este trabajo se midió la influencia de la formación de tribopelículas en el comportamiento tribológico de superficies texturizadas con formas ovales utilizando un tribómetro pin-on-plate. Los resultados muestran que, bajo lubricación completa, la película de aceite adsorbida controló el comportamiento de fricción y desgaste de los tribopares acero/acero, pero bajo lubricación insuficiente, la formación de una tribopelícula influyó significativamente en el comportamiento tribológico. Las superficies texturizadas apropiadas con hoyuelos en forma ovalada contribuyen a obtener excelentes propiedades antifricción y antidesgaste comportamiento. Sin embargo, las proporciones excesivamente altas del eje mayor al menor del óvalo pueden dar como resultado tensiones de contacto altas que pueden destruir la tribopelícula. [13]

3.2.7. UN ESTUDIO DE DINÁMICA MOLECULAR SOBRE LA LUBRICACIÓN CON AGUA DEL DESLIZAMIENTO DE PTFE CONTRA EL COBRE

Los modelos tribológicos del deslizamiento de PTFE contra la capa de cobre (Cu) bajo fricción seca y lubricación con agua se desarrollaron mediante una simulación de dinámica molecular (MD) para examinar el coeficiente de fricción y el proceso de desgaste desde una perspectiva atómica, respectivamente. El coeficiente de fricción medio del PTFE en la etapa estable disminuyó de 0,189 a 0,064 después de la lubricación con agua. La lubricación con agua redujo drásticamente el desgaste del PTFE en comparación con la fricción seca. Las interacciones moleculares entre las moléculas de PTFE, las moléculas de agua y los átomos de Cu se interpretaron analizando las variaciones de la función de distribución del radio (RDF), las concentraciones relativas y la velocidad en la dirección del espesor. Los

mecanismos de lubricación por agua se discutieron mediante el seguimiento de las variaciones de temperatura y energía potencial durante el proceso de fricción. [14]

3.2.8. MODELOS ESTOCÁSTICOS PARA LUBRICACIÓN TURBULENTA DE RODAMIENTO CON SUPERFICIES RUGOSAS

El modelo de lubricación turbulenta utilizado actualmente que considera los efectos de la rugosidad de la superficie solo puede manejar las superficies rugosas isotrópicas y no puede manejar las superficies rugosas con propiedades direccionales. En este trabajo, basado en el método estocástico y el modelo turbulento Ng-Pan, se derivan los modelos estocásticos de lubricación turbulenta de superficie rugosa longitudinal unidimensional, superficie rugosa transversal unidimensional y superficie rugosa isotrópica. El rendimiento de lubricación turbulenta de una chumacera con superficie rugosa isotrópica se calcula mediante el modelo de lubricación turbulenta estocástica. Los resultados están en buen acuerdo con los datos experimentales correspondientes. Además, los modelos de lubricación estocástica turbulenta propuestos también son adecuados para partes de pares de fricción tales como cojinetes lisos y cojinetes de empuje. [15]

3.2.9. SOBRE LA TEMPERATURA DE FLASH BAJO LA CONDICIÓN DE FALTA DE LUBRICACIÓN DE UN CONTACTO DE LÍNEA

Para investigar el efecto de la severidad de la falta de entrada en la temperatura de flash, que dicta la falla por rozamiento, se desarrolla un modelo de lubricación elastohidrodinámica mixta térmica para contactos de línea que operan bajo la condición de falta de lubricación. Utilizando una ecuación newtoniana de Reynolds generalizada, se incorpora la dependencia de la viscosidad del lubricante con la tasa de corte, así como con la presión y la temperatura, para el modelado adecuado y preciso del comportamiento tribológico en condiciones de alto deslizamiento. Se emplea un parámetro de fracción de película en la ecuación de Reynolds para incluir la descripción de inanición y cavitación. Considerando diferentes condiciones de operación y rugosidad de la superficie, Se realiza un estudio paramétrico para mostrar una relación asintótica entre la temperatura del flash y la severidad de la inanición de entrada.[16]

3.2.10. UN MODELO DE DESGASTE PARA CONTACTOS DE ENGRANAJES RECTOS

Este estudio propone un modelo de desgaste para contactos de engranajes rectos. Se diseña una formulación de transferencia de calor para evaluar la temperatura total del engranaje, con flujo de calor por fricción producido a partir del análisis de lubricación elastohidrodinámica mixta térmica (EHL). A cambio, la temperatura general se retroalimenta al modelo EHL para determinar el comportamiento tribológico dentro de la zona de contacto, incluida la temperatura de flash. Después de que la temperatura a granel se estabiliza, los componentes a granel y flash se agregan para llegar a la temperatura total de la superficie, cuyo máximo se compara con un límite de rozamiento para la determinación de fallas. Utilizando el modelo, se realiza un conjunto de simulaciones para demostrar las influencias de la rugosidad de la superficie y la velocidad de rotación en la carga de rozamiento. [17]

3.2.11. SOBRE LA DINÁMICA DE UN CONTACTO DE RODILLOS LUBRICADOS

Este estudio propone un modelo dinámico de contacto de un rodillo lubricado, centrándose en la excitación de la superficie del hoyo/defecto. La fluctuación de la fuerza de contacto causada por la variación periódica de la topografía de la superficie se usa para determinar los desplazamientos dinámicos y las velocidades de los cuerpos de contacto. Estas respuestas, a su vez, afectan el grosor y el flujo de la película de lubricación, afectando la presión de contacto y, en consecuencia, la fuerza de contacto que se requiere en el análisis dinámico. Se muestra que, a medida que crece el tamaño de la picadura, el incremento de la aceleración aumenta, por lo tanto, se puede utilizar como un indicador efectivo para la ocurrencia de fallas por picadura. Además, una comparación de la presión de contacto entre la simulación dinámica y su contraparte cuasiestática apunta a la importancia de las respuestas dinámicas en la descripción del comportamiento tribológico. [18]

3.2.12. CARACTERÍSTICAS DE LUBRICACIÓN Y CARGA DE RODAMIENTOS DE RODILLOS CILÍNDRICOS CON DESALINEACIÓN Y MODIFICACIONES DE RODILLOS

Se desarrolla un nuevo modelo para rodamientos de rodillos cilíndricos, capaz de manejar situaciones de lubricación y desalineación de manera determinista, mediante el acoplamiento de un modelo cuasiestático y un solucionador EHL de

contacto de línea finita. Los resultados numéricos de la carga interna, la presión y el espesor de la película entre los rodillos y las pistas de rodadura, así como la rigidez de los rodamientos, se obtienen con diferentes configuraciones de juegos diametrales, velocidades, viscosidad del lubricante, ángulos de desalineación y modificaciones del perfil de los rodillos. Se revela que si los rodamientos de rodillos funcionan con holguras nulas o negativas, la zona cargada se expande y se pueden producir cargas adicionales por lubricación debido a restricciones geométricas a los rodillos, especialmente en condiciones de carga ligera y alta velocidad. El perfil logarítmico de los rodillos tolera mejor la desalineación que el perfil dub-off o corona.[19]

3.2.13. ANÁLISIS DE LUBRICACIÓN ELASTOHIDRODINÁMICA MIXTA TRANSITORIA EN MECANISMOS DE TORNILLO DE RODILLOS PLANETARIOS

Los estudios previos de lubricación para tornillos de rodillos planetarios (PRSM) se concentran principalmente en condiciones de estado estable sin tener en cuenta el ángulo de arrastre. Sin embargo, PRSM siempre opera en situaciones transitorias con frecuentes procesos de inicio y apagado. En este documento, la distribución desigual de la fricción, la influencia del ángulo de la hélice en las propiedades lubricantes y el comportamiento transitorio en la interfaz rodillo-tornillo se analizan exhaustivamente en función del modelo EHL mixto transitorio, que considera la rugosidad real tridimensional (3D) mecanizada y el arrastre arbitrario. velocidad. Los resultados muestran que un ángulo de hélice más pequeño es beneficioso para mejorar el rendimiento de la lubricación. Aumento de la velocidad de rotación y disminución de la carga axial puede moderar la distribución desigual de la fricción. Además, una aceleración angular relativamente grande puede aumentar el espesor de la película y reducir la fricción en el estado de apagado. El modelo de simulación numérica se puede utilizar como una herramienta de optimización de diseño para el PRSM. [20]

3.2.14. INVESTIGACIÓN DINÁMICA Y MEDIDAS PALIATIVAS PARA EL FENÓMENO DE DESLIZAMIENTO DE RODAMIENTOS LUBRICADOS BAJO CARGA LIGERA.

El fenómeno de deslizamiento ocurre durante la operación del rodamiento bajo carga liviana debido al error de diseño, lo que intensificará el daño de la superficie y provocará ruido y vibraciones anormales. En este estudio se establece un modelo de dinámica de deslizamiento de rodamientos lubricados considerando las interacciones entre el rodillo y las pistas, así como la jaula. El efecto del lubricante sobre las características dinámicas del rodamiento se caracteriza por la rigidez del

aceite lubricante, el espesor de la película central, el coeficiente de fricción variable en el tiempo entre el rodillo y la pista, las resistencias al flujo de paso de los rodillos y los pares de resistencia. Además, el contacto no lineal y las deformaciones de la estructura de los rodillos están formulados. Para mitigar el fenómeno de deslizamiento del rodillo bajo carga ligera, se analiza el efecto del número de rodillos, el radio interior del rodillo hueco, la densidad y viscosidad del lubricante, el ajuste de interferencia y la carga radial. Los resultados indican que el fenómeno de patinaje del rodillo es inducido por las menores fuerzas de fricción tangencial entre rodillo y la pista, y mayores resistencias al flujo de paso de los rodillos. Es útil intensificar las interacciones en la interfaz entre los rodillos y la pista o/y disminuir la resistencia de funcionamiento reduciendo el número de rodillos, disminuyendo la densidad del lubricante o eligiendo la viscosidad correcta del lubricante. Además, el efecto del ajuste de interferencia y el aumento de la carga radial es significativo bajo la premisa de no cambiar los parámetros de diseño del rodamiento. [21]

3.2.15. ANÁLISIS DE LUBRICACIÓN MIXTA DE HUSILLO DE RODILLOS PLANETARIOS

Se propone el modelo de lubricación mixta del husillo de rodillos planetarios considerando la carga de contacto, la geometría de contacto de la rosca, la rugosidad de la superficie y los efectos transitorios. Se discuten las influencias de la velocidad de rotación del tornillo, la carga axial y la rugosidad de la superficie en la lubricación. El aumento de la velocidad de rotación tiene un efecto significativo en la lubricación de las áreas de contacto. A medida que aumenta la velocidad, aumenta el espesor de la película, mientras que el coeficiente de fricción y la relación del área de contacto disminuyen, y el modo de lubricación cambia de mixto a película completa. A medida que aumenta la carga, la relación película-espesor disminuye mientras que el coeficiente de fricción y la tensión máxima de von Mises subsuperficial aumentan. El mecanizado de alta precisión puede mejorar la lubricación al reducir adecuadamente la rugosidad de la superficie mecanizada, lo que aumentaría el espesor de la película y disminuiría la relación del área de contacto. [22]

3.2.16. RIGIDEZ DE CONTACTO LÍNEA FINITA BAJO LUBRICACIÓN ELASTOHIDRODINÁMICA CONSIDERANDO MODELOS DE FUERZA LINEALES Y NO LINEALES

El objetivo de este estudio es analizar la rigidez del contacto de línea finita bajo lubricación elastohidrodinámica (EHL) con aproximaciones de fuerza lineales y no lineales. La solución numérica del contacto de línea finita se compara con resultados experimentales de interferometría óptica. Se evalúan cuatro tipos de

perfiles: rodillo no perfilado, rodillo abombado, perfil dub-off y perfil logarítmico. Para cada tipo de rodillo, los valores de geometría varían para identificar el comportamiento de los parámetros de fuerza de contacto reducida. Los resultados del modelo de fuerza mostraron una buena correspondencia con la solución numérica del contacto EHL. [23]

3.2.17. ESTUDIO SOBRE EL RENDIMIENTO DE LA LUBRICACIÓN HIDRODINÁMICA Y LA REDUCCIÓN DE LA FRICCIÓN DE ENGRANAJES RECTOS CON TEXTURA DE RANURA

Ruedas dentadas son ampliamente utilizados en la industria aeroespacial, energía y otros campos debido a sus ventajas de diseño y fabricación convenientes. Sin embargo, en el proceso de transmisión de engranajes rectos, el desgaste de la superficie del diente y la adhesión son propensos a fallar, lo que afecta seriamente la vida útil de la transmisión de engranajes. Con el fin de minimizar el desgaste por fricción durante la transmisión por engranajes, en este artículo se propone una textura superficial del diente de tipo ranura. Los parámetros de tamaño del núcleo de la textura del surco se optimizan a través de la simulación de fluidos CFD (Dinámica de fluidos computacional) y los experimentos del proceso de rodillos cilíndricos de textura del surco. Los engranajes con textura de ranura se preparan utilizando la tecnología de procesamiento láser y se realizan pruebas comparativas de desgaste por fricción. Los resultados experimentales muestran que las tasas de área de daño máxima y mínima de los engranajes rectos con textura de ranura son, respectivamente, un 84,8% y un 84,9% inferiores a los de los engranajes rectos sin textura de ranura. La capacidad antiadherente también mejora significativamente en los engranajes con textura de ranura. Además, el promedio coeficiente de fricción de los engranajes rectos con textura de ranura se reduce significativamente, lo que reduce efectivamente la lubricación y la fricción en los engranajes rectos. [24]

3.2.18. OPTIMIZACIÓN DE LA LUBRICACIÓN DEL REDUCTOR CON UN SISTEMA NEURAL P DE PICOS DE OPTIMIZACIÓN

Es muy difícil mejorar la eficiencia y la precisión de la lubricación del reductor debido a la limitación del método de simulación tradicional. En este documento, primero se establece un modelo de optimización con múltiples parámetros para reflejar la relación entre la pérdida por agitación y los parámetros optimizados del reductor de desarrollo de rodillos de alta precisión y sin holgura (ZHPRER). Luego, se aplica un sistema P neuronal de picos de optimización (OSNPS) para optimizar el modelo multiparamétrico. Finalmente, se utiliza un análisis de simulación (el método semiimplícito de partículas en movimiento, MPS) para verificar la exactitud de los

resultados de optimización. Los resultados experimentales muestran que el modelo de optimización multiparámetro y OSNPS son efectivos y precisos para resolver el problema de optimización multiparámetro de ZHPREER por el método MPS. [25]

3.2.19. ANÁLISIS DE LUBRICACIÓN POR INYECCIÓN DE ACEITE DE UN SISTEMA SILENCIOSO DE TRANSMISIÓN POR CADENA

Las investigaciones anteriores sobre la lubricación con aceite se han centrado principalmente en los sistemas de transmisión por engranajes. Ha habido poca investigación sobre la lubricación por inyección de los sistemas silenciosos de transmisión por cadena. En este estudio, se establece un modelo 3D de alta fidelidad de un sistema silencioso de transmisión por cadena y se verifica la estabilidad del modelo mediante un análisis de simulación. Utilizando el método semiimplícito de partículas en movimiento (MPS), la distribución del campo de flujo del sistema de transmisión por cadena silenciosa bajo el acoplamiento de múltiples campos se obtiene a través de la simulación conjunta con RecurDyn y Particleworks. Se investigan los efectos de los parámetros clave, incluida la velocidad de la rueda dentada, la cantidad de inyección, la viscosidad del lubricante y los ángulos de inyección, en el rendimiento de lubricación del sistema silencioso de transmisión por cadena. [26]

3.2.20. UN MARCO INTEGRADO DE VOLUMEN FINITO PARA LA LUBRICACIÓN ELASTOHIDRODINÁMICA TÉRMICA

Los avances recientes en métodos y recursos computacionales han impulsado estudios numéricos para explorar técnicas novedosas para resolver problemas de lubricación elastohidrodinámica térmica (TEHL). Los códigos comerciales como los que cuentan con el enfoque de dinámica de fluidos computacional (CFD) han ganado mucha atención en el campo de la tribología debido a la capacidad de abordar las limitaciones impuestas por la ecuación de Reynolds. suposiciones y aptitud en el modelado de geometrías complejas. Sin embargo, el costo computacional en el que incurre el software CFD es significativamente alto debido a las ecuaciones de gobierno involucradas al resolver el problema más general. La presente contribución propone un marco integrado de volumen finito para resolver problemas de TEHL para predecir el rendimiento de lubricación de contactos no conformes. Los efectos del flujo de fluidos se consideran a través de la ecuación de Reynolds generalizada con lap- θ Modelo de cavitación de conservación de masa de Elrod-Adams para garantizar la conservación del caudal másico en todo el dominio lubricado. El comportamiento térmico de la película lubricante se predice mediante la solución de la ecuación de conservación de la energía con las condiciones de contorno apropiadas para las interfaces fluido-sólido. Los nuevos métodos de

solución iterativa particionada se integran en el marco para manejar las fuertes no linealidades y mejorar la convergencia del sistema acoplado de ecuaciones. Se presentan casos térmicos e isotérmicos y se comparan con los resultados generados por los solucionadores de CFD existentes y otros datos experimentales para validar el marco propuesto. [27]

3.2.21. EL EFECTO DE LA VISCOELASTICIDAD DEL FLUIDO EN CONTACTOS LUBRICADOS EN PRESENCIA DE CAVITACIÓN

En este trabajo estudiamos la influencia de la viscoelasticidad de fluidos en el desempeño de contactos lubricados en presencia de cavitación. Se han realizado varios estudios de lubricantes viscoelásticos, pero ninguno de ellos ha considerado la posibilidad de la presencia de cavitación. Para describir el efecto de la viscoelasticidad, usamos el modelo Oldroyd-B. Suponiendo que el producto entre ϵ , es decir, la relación entre las escalas de longitud vertical y horizontal, y el número de Weissenberg (Wi), es decir, la relación entre el tiempo de relajación del polímero y la escala de tiempo de flujo, es pequeño, podemos linealizar las ecuaciones de película delgada viscoelástica, siguiendo el enfoque iniciado por "Tichy, J., 1996, Non-Newtonian lubricación con el modelo de convección de Maxwell". En consecuencia, el orden cero en Wi corresponde a una ecuación de Reynolds modificada para describir también la cavitación de la película a través del modelo de conservación de masa de Elrod-Adams. Consideramos el flujo de lubricantes viscoelásticos usando: (i) un perfil de coseno que representa una geometría no envuelta de cojinete liso, y (ii) un perfil de bolsillo para modelar una superficie texturizada en contactos lubricados. La introducción de viscoelasticidad disminuye la longitud de la región cavitada en el perfil de coseno debido al aumento de la distribución de presión dentro de la película. En consecuencia, la capacidad de carga aumenta con Wi hasta en un 50% en las condiciones más favorables, lo que confirma la influencia beneficiosa de los polímeros en los rodamientos. Por otro lado, para el perfil embolsado, los resultados muestran que la carga puede aumentar o disminuir a mayor Wi dependiendo de la posición de la textura en el contacto. El problema del flujo comprimido entre dos placas también se modela para lubricantes viscoelásticos considerando una superficie superior oscilante. Para esta configuración se observa una reducción de la carga al aumentar Wi debido al tiempo adicional necesario para reformar la película a Wi alto. Además, si aumentan los efectos viscoelásticos, la región de cavitación se ensancha hasta alcanzar un valor de Wi para el cual no se produce una reformación completa de la película después de la ruptura inicial de la película. [28]

3.2.22. EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE LUBRICACIÓN DEL COMPRESOR ROTATIVO A TEMPERATURA AMBIENTE ALTA EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE LUBRICACIÓN DEL COMPRESOR ROTATIVO A TEMPERATURAS AMBIENTE ALTA

El propano se ha sugerido como uno de los fluidos de trabajo alternativos para acondicionadores de aire en áreas de clima cálido debido a sus excelentes propiedades ambientales y su temperatura de descarga más baja, aunque todavía existe preocupación por su inflamabilidad. También se debe enfatizar la condición de lubricación del sistema de cojinetes del rotor porque una carga más pesada y una viscosidad más baja en el cárter de aceite podrían afectar la confiabilidad del compresor rotativo a temperatura ambiente alta. En este estudio, para obtener la entrada de la simulación, las presiones dinámicas y la viscosidad de un acondicionador de aire R290 se miden experimentalmente en varias condiciones. Sobre estas bases, las características de lubricación se simulan numéricamente acoplando la ecuación dinámica del cigüeñal y la ecuación de Reynolds modificada de la película de aceite utilizando el método de elementos finitos. Los resultados muestran que la carga en el cigüeñal a menos de 50 °C es el doble que a 30 °C, mientras que la viscosidad del cárter de aceite inferior disminuye de 1,89 a 1,59 mPa·s. Los resultados de la simulación implican que el espesor mínimo de la película de aceite se redujo a 0,44 μm a 50 °C, en los que la fuerza de contacto de la aspereza alcanza un máximo de 3 N cuando la rugosidad media aritmética es de 0,2 μm . La fuerza de contacto de la aspereza aumentaría significativamente a 174 N si la rugosidad de la superficie es de 0,6 μm y se alcanza el régimen de lubricación límite. Se recomiendan estrategias para aumentar la viscosidad del cárter de aceite para evitar el desgaste adhesivo en este caso. en el que la fuerza de contacto de la aspereza alcanza un máximo de 3 N cuando la rugosidad media aritmética es de 0,2 μm . La fuerza de contacto de la aspereza aumentaría significativamente a 174 N si la rugosidad de la superficie es de 0,6 μm y se alcanza el régimen de lubricación límite. Se recomiendan estrategias para aumentar la viscosidad del cárter de aceite para evitar el desgaste adhesivo en este caso. en el que la fuerza de contacto de la aspereza alcanza un máximo de 3 N cuando la rugosidad media aritmética es de 0,2 μm . La fuerza de contacto de la aspereza aumentaría significativamente a 174 N si la rugosidad de la superficie es de 0,6 μm y se alcanza el régimen de lubricación límite. Se recomiendan estrategias para aumentar la viscosidad del cárter de aceite para evitar el desgaste adhesivo en este caso. [29]

3.2.23. EVALUACIÓN DE LA LUBRICACIÓN Y LA VIDA ÚTIL A LA FATIGA DE RODAMIENTOS DE RODILLOS CILÍNDRICOS DE ALTA VISCOSIDAD BAJO DESALINEACIÓN

Este documento desarrolló un modelo acoplado, incorporando el modelo cuasiestático, el modelo de fatiga y el modelo de lubricación mixta, para investigar el efecto del ángulo de desalineación en rodamientos de rodillos cilíndricos de alta velocidad. El modelo se verifica mediante la comparación con los resultados de la literatura publicada. Luego, se lleva a cabo un análisis paramétrico. Los resultados muestran que a medida que aumenta la desalineación, la distribución de la carga básicamente no cambia, pero la vida de fatiga del rodamiento de rodillos disminuye debido a la variación de la presión de contacto, y el momento de inclinación del par de contacto de un solo rodillo aumenta. Además, el diseño óptimo del perfil de los rodillos debe considerar el efecto de la lubricación para mejorar la vida de fatiga de los rodamientos de rodillos. En general, la caída de copa óptima es demasiado pequeña según el diseño de la técnica de corte. [30]

3.2.24. DESGASTE POR OXIDACIÓN EN CONTACTOS LUBRICADOS

Este estudio examina la influencia de la atmósfera de gas inerte en el comportamiento de desgaste de los contactos de acero contra acero lubricados por dos fluidos a base de hidrocarburos, isooctano y hexadecano. Se encuentra que para ambos fluidos, el desgaste y la fricción media en atmósferas de nitrógeno y argón son considerablemente menores que en aire seco. A medida que aumenta el contenido de oxígeno en el nitrógeno, aumentan la fricción media y el desgaste, hasta nivelarse por encima del 10% de oxígeno (una presión parcial de 10 kPa). El análisis Raman de las superficies frotadas muestra la presencia de una película de carbón en las superficies frotadas con gas inerte y con bajo contenido de O.

Estos hallazgos indican que el modelo prevaleciente de desgaste por oxidación en contactos lubricados, que establece que el desgaste es mayor en aire que en gas inerte debido a la corrosión por oxígeno, es en gran medida incorrecto. En cambio, el efecto nocivo del oxígeno en el desgaste lubricado se debe principalmente a que previene la formación de una película límite lubricante a base de carbono que se genera a partir de fluidos a base de hidrocarburos en superficies de acero en contacto con gas inerte.

La capacidad de los combustibles y lubricantes orgánicos para formar películas a base de carbono sobre superficies de acero en contacto con atmósferas inertes puede proporcionar un mecanismo para reducir la fricción y el desgaste de los componentes de las máquinas lubricadas con combustible y aceite. El estudio también proporciona una plataforma desde la cual diseñar formulaciones de lubricantes para uso en atmósferas inertes.[31]

3.2.25. EL EFECTO DE LAS MEZCLAS DE ADITIVOS DE PARTÍCULAS EN EL DESEMPEÑO TRIBOLÓGICO DE LOS LUBRICANTES LÍQUIDOS IÓNICOS A BASE DE FOSFONIO

Los líquidos iónicos (IL) representan una nueva clase de lubricantes ecológicos que muestran una lubricación en comparación con los lubricantes convencionales. Además, los aditivos de partículas sólidas, en particular las partículas sólidas laminares para mejorar las propiedades tribológicas de los aceites base, son bien conocidos. En la investigación actual, se agregaron varios tamaños, formas y tipos de partículas sólidas laminares y nanotubos de carbono de pared múltiple en los IL basados en fosfonio. Las propiedades tribológicas de estas mezclas de lubricantes se evaluaron mediante una prueba pin-on-disk. Se reveló que, dentro de los IL, el tamaño de las partículas era independiente del material de las partículas, donde las partículas de tamaño nanométrico mostraron propiedades tribológicas mejoradas. La influencia de los aditivos de partículas se modeló empíricamente mediante una función fractal utilizando dimensiones fractales basadas en el tamaño de las partículas y la rugosidad de la superficie. [32]

3.2.26. FRICCIÓN ULTRABAJA DE GEL A BASE DE ALBAHACA EN PRESENCIA DE ETANOL COMO LUBRICANTE VERDE PARA APLICACIONES BIOMÉDICAS

La superlubricidad es un enfoque ideal para salvar la vida útil de los dispositivos médicos desde el punto de vista de la tribología. Recientemente, se demostró que el gel de semilla de albahaca (BDG) es un candidato potencial con fricción ultrabaja. En el documento, el coeficiente de fricción de BSG se reduce significativamente mediante la introducción de etanol. Los resultados indican que las moléculas de etanol ingresan a la red BSG, lo que contribuye a transformar la estructura suelta de las nanoláminas de polisacáridos en una estructura integrada. Por lo tanto, se mejora la resistencia mecánica de la capa de adsorción, lo que evita que la película de lubricación se destruya durante el proceso de deslizamiento y, por lo tanto, reduce la pérdida de fricción. Tal superlubricidad macroscópica del lubricante BSG.etanol demuestra un potencial prometedor en aplicaciones biomédicas como catéteres y tubos gástricos. [33]

3.2.27. EXPLORACIÓN DEL MECANISMO DE LUBRICACIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE CeO_2 DISPERSADAS EN ACEITE DE MOTOR POR FOSFATO DE BIS (2-ETILHEXILO) COMO NUEVO ADITIVO ANTIDESGASTE

Los aceites de motor energéticamente eficientes son necesarios para el transporte sostenible utilizando vehículos y las compañías petroleras pretenden fabricar aceites lubricantes con aditivos más efectivos. Este artículo investigó el mecanismo de lubricación de nanopartículas de óxido de cerio (CeO_2) dispersadas en un aceite de motor totalmente sintético (5w30) por fosfato de bis (2-etilhexilo) (HDEHP). Las pruebas tribológicas se realizaron utilizando un tribómetro basado en ASTM G181 para imitar el entorno del tribosistema de revestimiento anular. Los resultados mostraron que el 2 mejoró las propiedades antifricción y antidesgaste. Características de las superficies de fricción en un 12-21% y 62-80%, respectivamente, en contra de los resultados obtenidos con el aceite 5w-30. El microscopio electrónico de barrido de emisión de campo en profundidad, el espectrómetro de dispersión de energía y los análisis de espectrometría de fotoelectrones de rayos X de las superficies desgastadas después de la lubricación evidenciaron la producción de una tribopelícula, inducida por adsorción física y reacciones triboquímicas. De manera concisa, este estudio demuestra el rendimiento tribológico superior del nanolubricante CeO_2 y brinda información para desarrollar aceites lubricantes y mejorar la economía de combustible en los motores de los vehículos. [34]

3.2.28. UN NOVEDOSO MATERIAL DE LUBRICACIÓN INTELIGENTE INSPIRADO EN LOMBRICES DE TIERRA CON FUNCIÓN DE AUTORREPARACIÓN

El desgaste es inevitable durante el proceso de fricción de los materiales. Aquí, inspirados en organismos como las lombrices de tierra, hemos desarrollado un material novedoso que puede repararse después del desgaste. El material de autorreparación se fabricó mediante la inyección de un material de cambio de fase en la matriz porosa para formar un compuesto, que puede liberar espontáneamente el medio interno y formar una capa lubricante estable. Cuando la capa lubricante está desgastada, el medio interno puede liberarse continuamente a la superficie bajo estimulación térmica, debido a las propiedades solidificables/líquidas del medio interno, que logran la autorreparación de la capa lubricante dañada. El compuesto preparado no solo proporciona múltiples autocuraciones y lubricación inteligente propiedades, pero también mantienen una fricción estable debido a la presencia de la capa lubricante. [35]

3.2.29. INFLUENCIA DE LA LUBRICACIÓN LÍQUIDA DE LA INTERFAZ EN LA TRIBOELECTRIFICACIÓN DEL PAR DE FRICCIÓN DE CONTACTO PUNTUAL

La triboelectrificación ocurre típicamente en el proceso de fricción . En este estudio, investigamos el efecto de lubricantes líquidos de varias polaridades en la triboelectrificación en un par de fricción que consta de una bola de acero y bloques de fluoruro de polivinilideno . Los resultados revelaron que los alcanos y los alquenos mejoraron la triboelectrificación. Al agregar PAO 4, el coeficiente de fricción se redujo considerablemente y la corriente de cortocircuito pudo generarse de manera estable durante mucho tiempo. Con el aumento de la viscosidad de PAO, la señal triboeléctrica disminuyó gradualmente. Este estudio reveló que el lubricante apropiado y la cantidad de líquido puede aumentar el tamaño de la señal triboeléctrica para lograr una salida estable durante mucho tiempo. [36]

3.2.30. LUBRICACIÓN POR COMPRESIÓN ENTRE SÓLIDOS BLANDOS: UN ESTUDIO NUMÉRICO

Apretar una película lubricante entre sólidos viscoelásticos es un proceso con muchas aplicaciones, que van desde la biomecánica hasta la ingeniería industrial. El problema se aborda mediante una estrategia numérica innovadora que combina un solucionador de diferencias finitas para la dinámica de fluidos lubricantes y un enfoque de elementos de contorno, que proporciona el campo de deformación en el sólido. Los resultados muestran marcadas diferencias en comparación con la lubricación elasto-hidrodinámica clásica (EHL): la presión y el espesor de la película dependen, de hecho, del material viscoelástico relajación, alcanzando su punto máximo en los dos bordes del área de contacto lubricada. Esto implica, también para los valores de espesor mínimo y central, tendencias dependientes del tiempo que se desvían significativamente de la solución EHL y, por lo tanto, señalan la necesidad de tener en cuenta la reología viscoelástica real de los sólidos lubricados. [37]

3.3. MARCO NORMATIVO

Para el marco normativo se mencionarán algunas especificaciones ISO y normas ASTM donde aparecerán los controles que se realizan en un aceite, en los elementos de las líneas que los mueven, filtran o transportan, así como las medidas para asegurar que los análisis se realizan de forma correcta y con los aparatos correctamente calibrados.

3.3.1. ESPECIFICACIONES ISO

- **ISO 2941:** Elementos filtrantes - verificación del índice de presión de colapso/ruptura.
- **ISO 2942:** Elementos filtrantes – verificación de la integridad de fabricación y determinación del primer punto de burbuja.
- **ISO 2943:** Elementos filtrantes – verificación de la compatibilidad del material con los fluidos.
- **ISO 3722:** Contenedores para muestras de fluido – métodos de limpieza de habilitación y control.
- **ISO 3724:** Elementos filtrantes – determinación de la resistencia a la fatiga del caudal utilizando un contaminante formado por partículas.
- **ISO 3968:** Filtros – evaluación de la presión diferencial de la resistencia a la fatiga del caudal utilizando un contaminante formado por partículas.
- **ISO 4021:** Extracción de muestras de fluido de líneas de un sistema de funcionamiento.
- **ISO 4405:** Determinación del nivel de contaminación formada por las partículas mediante el método gravimétrico.
- **ISO 4406:** Método para codificar el nivel de contaminación por partículas sólidas.
- **ISO 4407:** Determinación de la contaminación formada por partículas mediante el método de conteo utilizando un microscopio óptico.
- **ISO 10949:** Directrices para conseguir y controlar la limpieza de componentes que van de la fabricación a la instalación.
- **ISO 11170:** Elementos filtrantes – secuencia de pruebas para verificar las características de rendimiento.
- **ISO 11171:** Calibrado de contadores automáticos de partículas para líquidos.
- **ISO 11500:** Determinación de la contaminación formada por partículas mediante el conteo de partículas automático utilizando el principio de extinción de luz.
- **ISO 11943:** Métodos de calibrado y validación de sistemas de conteo de partículas automáticos en línea.

- **ISO 16889:** Elementos filtrantes – método de evaluación por recirculación del rendimiento de filtrado de un elemento filtrante.
- **ISO 18413:** Limpieza de componentes – documento de inspección y principios relacionados con la recogida de contaminante, análisis y recopilación de datos.
- **ISO 23181:** Elementos filtrantes – determinación de la resistencia a la fatiga del caudal utilizando fluidos de alta viscosidad.
- **ISO 4406:** Tabla de códigos de limpieza para aceites, combustibles, etc.
- **SAE ARP4205:** Elementos filtrantes: método para evaluar la eficiencia dinámica con un caudal cíclico.
- **SAE J300:** Determinación de viscosidad de aceites para motores. [38]

3.3.2. NORMAS ASTM

- **ASTM D-86:** Características de destilación.
- **ASTM D-92:** Puntos de inflamación y combustión.
- **ASTM D-93:** Punto de inflamación en vaso cerrado.
- **ASTM D-94:** Índice de saponificación.
- **ASTM D-95:** Determinación del agua, por destilación en productos petrolíferos.
- **ASTM D-96:** Determinación de agua y sedientos por centrifugación en productos petrolíferos.
- **ASTM D-97:** Punto de congelación.
- **ASTM D-130:** Corrosión al cobre.
- **ASTM D-189:** Residuo carbonoso.
- **ASTM D-217:** Penetración a 60 golpes.
- **ASTM D-240:** Potencia calorífica.
- **ASTM D-322:** Dilución.
- **ASTM D-445:** Viscosidad cinemática, viscosidad cinemática fuel.
- **ASTM D-482:** Cenizas.
- **ASTM D-566:** Punto de gota.
- **ASTM D-664:** Índice de acidez por potenciometría.
- **ASTM D-665:** Características preventivas contra la herrumbre de aceites de turbina.
- **ASTM D-874:** Cenizas sulfatadas.
- **ASTM D-892:** Espumas
- **ASTM D-893:** Insolubles en pentano y tolueno.
- **ASTM D-943:** Ensayo oxidación 2000 h.
- **ASTM D-974:** Índice de acidez por colorimetría.
- **ASTM D-1298:** Peso específico.

- **ASTM D-1401:** Desemulsionabilidad.
- **ASTM D-1500:** Color.
- **ASTM D-2266:** Medida de las características preventivas de desgaste en grasa. Método 4 bolas.
- **ASTM D-2270:** Índice de viscosidad.
- **ASTM D-2272:** RPVOT
- **ASTM D-2500:** Punto de nube.
- **ASTM D-2596:** Medidas de las propiedades EP de grasas. Método 4 bolas.
- **ASTM D-2783:** Índice carga-desgaste. Medida de las características preventivas del desgaste. Método 4 bolas.
- **ASTM D-2893:** Ensayo de oxidación por aceites lubricantes con características EP.
- **ASTM D-2896:** Reserva alcalina.
- **ASTM D-2982:** Glicol en aceites de motor.
- **ASTM D-3427:** Desaireación.
- **ASTM D-3828:** Punto de inflamación.
- **ASTM D-4172:** Medida de las características preventivas de desgaste en aceite. Método 4 bolas.
- **ASTM D-4737:** Índice de cetano.
- **ASTM D-4868:** Potencia calorífica.
- **ASTM D-5185:** Determinación por ICP.
- **ASTM D-5771:** Punto de nube (automático).
- **ASTM D-5950:** Punto de congelación.
- **ASTM D-6184:** Separación de aceite en grasas lubricantes.
- **ASTM D-6304:** Humedad, método coulométrico.
- **ASTM E-70:** Determinación del ph de disoluciones acuosas con electrodo de vidrio. [38]

Es importante tener en cuenta que uno de los primeros análisis que podemos realizar al aceite nosotros mismos es una manera de observación que nos puede dar una gran cantidad de información. En primer lugar, el color del aceite en comparación con el aceite nuevo, un color más oscuro de lo normal en el aceite nos puede indicar que el aceite ha sufrido una contaminación o que se ha oxidado. Mientras que un color más claro o blanquecino nos puede indicar que el aceite tiene agua.

ver si el aceite contiene una gran cantidad de agua es bastante fácil dado que el agua y el aceite formarán dos fases inmiscibles, por lo que se puede ver que hay dos capas bien diferenciadas de líquidos; pero cantidades de agua menos elevadas emulsionan con el aceite y producen los típicos colores blanquecinos propios de este tipo de contaminación. La presencia de agua en el aceite puede ser debida a fallos en la estanqueidad del circuito. [38]

Figura 14. Lubricante con mezcla de agua

03/09/2014				
Ref. Muestra:	901793			
Serv. Máquina:				
Serv. aceite:				
Cambio aceite:	No			
Cambio filtro:	No			
Estado				
Aspecto (Adim)	Turbio			
Contenido en agua por KF Vol. (%)	5.19			
Nitracion (ABS/cm)	< 1			



FUENTE: GUIMERMO DIAS POVEDANO

Para llevar a cabo el análisis de la [figura 14](#) se hace uso de la norma ASTM D-95 la cual se encarga de determinar la cantidad de agua presente en el aceite. Este análisis es uno de los más importantes, ya que el contenido de agua es uno de los factores más perjudiciales para los aceites. El agua que no es miscible con el aceite promueve la ruptura de la película lubricante y reduce significativamente el rendimiento del aceite. También acelera el envejecimiento porque oxida muchos de sus componentes. Igualmente puede dañar la propia máquina, ya que el agua provoca oxidación y corrosión en las piezas metálicas.

4. SEGUNDO CAPÍTULO

4.1. OBJETIVO 1

4.1.1. QUE ES LA LUBRICACIÓN INDUSTRIAL

La lubricación industrial es un método basado en sustancias aceitosas o grasosas que se aplican a las piezas mecánicas en movimiento, como engranes y cojinetes, para reducir la fricción y el desgaste. El lubricante industrial especialmente actúa como una interfaz entre dos superficies, lo que permite un movimiento suave y eficiente. El 80% de los fallos de las máquinas son consecuencia de una mala lubricación, por lo que la lubricación industrial se ha convertido poco a poco en una de las tareas clave del departamento de mantenimiento industrial.

A pesar de esta observación de los expertos, menos del 5% del presupuesto mundial de mantenimiento se dedica a lubricantes industriales. La lubricación adecuada y controlada le brinda una ventaja competitiva, aumenta la seguridad del personal de planta y mantenimiento, y ayuda a proteger el medio ambiente.[39]

4.1.2. CUAL ES LA FUNCIÓN DE LA LUBRICACIÓN INDUSTRIAL

Los sistemas de lubricación industrial distribuyen el lubricante a las partes móviles en contacto de la máquina.

Al final, los lubricantes reducen la fricción entre los elementos de la máquina que se deslizan o ruedan, como los engranajes, los ejes, los cojinetes, las cadenas, las matrices, los tornillos, los cilindros, las válvulas, los cables, entre otros componentes de la maquinaria y los equipos industriales, con el fin de evitar el desgaste, la generación de calor y los fallos prematuros, así como para prolongar la vida útil de los elementos de la maquinaria.

Además, la lubricación industrial puede funcionar como un refrigerante que evita la expansión térmica, que en consecuencia degrada la precisión de los componentes de la maquinaria.

En resumen, las funciones destacadas que puede realizar un lubricante industrial son:

- Reducir el desgaste y la deformación de la superficie, al evitar el contacto directo entre las superficies de rozamiento.
- Cubrir la superficie de contacto de los rodamientos con una película de aceite adecuada para prolongar la vida útil del rodamiento.
- Absorber los impactos.
- Refrigerar las superficies de contacto mediante la reducción de la pérdida de energía en forma de calor.

- Frenar el óxido y la corrosión de las superficies metálicas y ayudar a mantener los residuos y contaminantes fuera del sistema.
- Atenuar el consumo de energía.
- Controlar la expansión y la contracción de los metales de la maquinaria debido al calor por convección local.
- Simplificar en gran medida el mantenimiento y los costes de funcionamiento de la máquina.[39]

4.1.3. DONDE SE UTILIZAN LOS SISTEMAS DE LUBRICACIÓN INDUSTRIAL

En el mantenimiento industrial de los activos de una planta de producción, la lubricación industrial es una de las áreas principales a tener en cuenta en el día a día.

Los lubricantes industriales se utilizan para una amplia gama de propósitos y el tipo de lubricante industrial que se utilice dependerá en gran medida del tipo de máquina a utilizar, de su aplicación específica entre otros factores.

La diversidad de sistemas de lubricación industrial va desde las pistolas de engrase de accionamiento manual hasta los sistemas automatizados y centralizados de distribución del lubricante industrial.

Los lubricantes industriales pueden utilizarse en cualquier industria y en cualquier aplicación que utilice maquinaria mecánica compuesta por piezas móviles.

Estos son algunos ejemplos de industrias donde la lubricación es un elemento clave:

- **Industria textil:** Para máquinas de teñir, motores y vaporizadores.
- **Industria automotriz:** Para optimización de motores y la reducción del ruido, la vibración y la dureza.
- **Industria energética:** Para palas de turbinas, cojinetes de generadores y sistemas hidráulicos.
- **Industria naval:** Para sistemas de engranajes, compresores y turbinas.
- **Industria médica:** Para ventiladores y bombonas de gas. [39]

4.1.4. MÉTODOS DE LUBRICACIÓN INDUSTRIAL

Los sistemas de lubricación industria son un componente esencial para las industrias en las que la automatización y la maquinaria son importantes.

En estos casos, se pueden aplicar diferentes métodos de lubricación industrial para alinear el sistema de lubricantes adecuado para la aplicación de lubricantes correctos.

En algunos casos, es difícil elegir el método que mejor se adapte a los requisitos y procesos que se requieran, por lo que se analizan diferentes métodos y se aplican de forma específica tras una inspección adecuada.

Es importante asegurarse de que se elige el método adecuado para que los resultados sean eficientes y se pueda aplicar la lubricación que corresponde.

No cabe duda de que el campo de la lubricación ha evolucionado, pero sigue dividido entre las técnicas antiguas y los procesos más innovadores. La evolución de las técnicas también está provocando cambios en el mantenimiento de la maquinaria industrial.

Entre los métodos de lubricación industrial que se aplican en las plantas de producción destacamos. [39]

4.1.4.1. MÉTODO DE LUBRICACIÓN INDUSTRIAL MANUAL

Es el sistema básico de lubricación utilizado en las fábricas. Es sin duda, el método de lubricación más barato y el que requiere un menor equipamiento posible.

Es el método de lubricación más sencillo y tradicional. Es la técnica más antigua que a menudo se lleva a cabo en el mantenimiento programado. Esto ayuda a proporcionar una flexibilidad para elegir el lubricante necesario.

Este método lo lleva a cabo un trabajador de mantenimiento. En la práctica, se desplaza a los puntos que hay que lubricar, con una pistola de engrase manual.

Esta herramienta se compone de una bomba que se carga mediante cartuchos o grasa a granel, así como de una boquilla de engrase que permitirá inyectar la grasa directamente en el lugar necesario. Las limitaciones de este sistema son que el margen de error humano sigue siendo alto. [39]

Figura 15. Métodos de lubricación manual



FUENTE: SICMA21

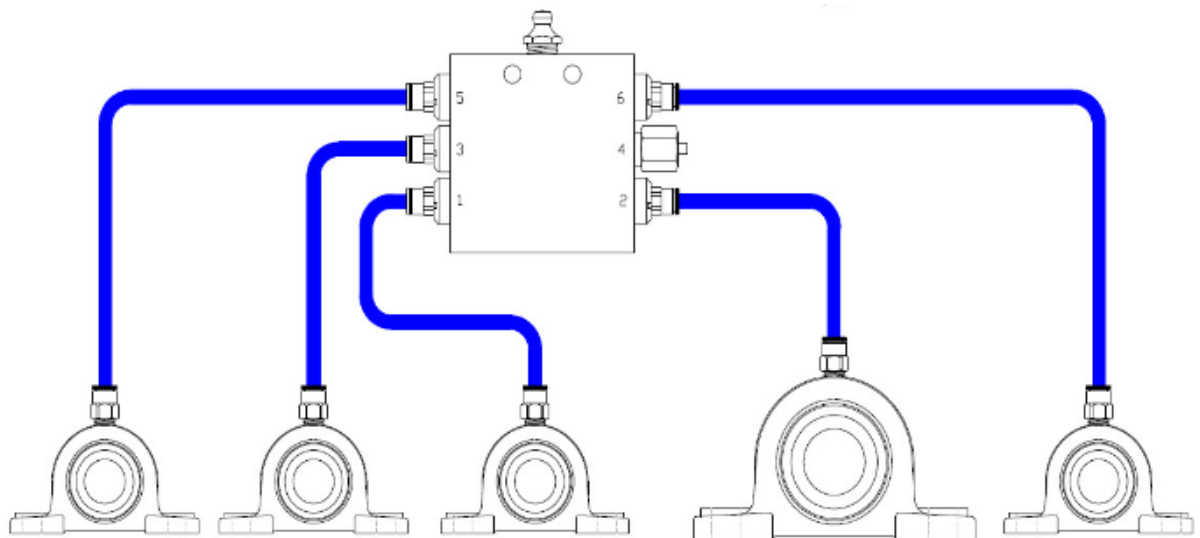
4.1.4.2. MÉTODO DE LUBRICACIÓN CENTRALIZADA

Este método de lubricación ha ido sustituyendo la lubricación manual. De hecho, es una herramienta utilizada en la industria para distribuir una cantidad precisa de lubricante a lugares determinados en momentos definidos.

Este sistema funciona mediante un programados. De esta forma, los inyectores están programados para suministrar una cantidad de lubricante en un intervalo establecido.

A la vez, una bomba se activa y hace que el lubricante fluya hacia los puntos deseados a través de un sistema de dosificación. [39]

Figura 16. Método de lubricación centralizada



FUENTE: RIVI TECHNICAL GROUP

4.1.4.3. MÉTODO DE LUBRICACIÓN AUTOMÁTICA

Es un proceso diseñado para lubricar un solo punto de lubricación o varios. El lubricador automático debe diseñarse como un consumible listo para usar que se instala directamente en la maquina industrial.

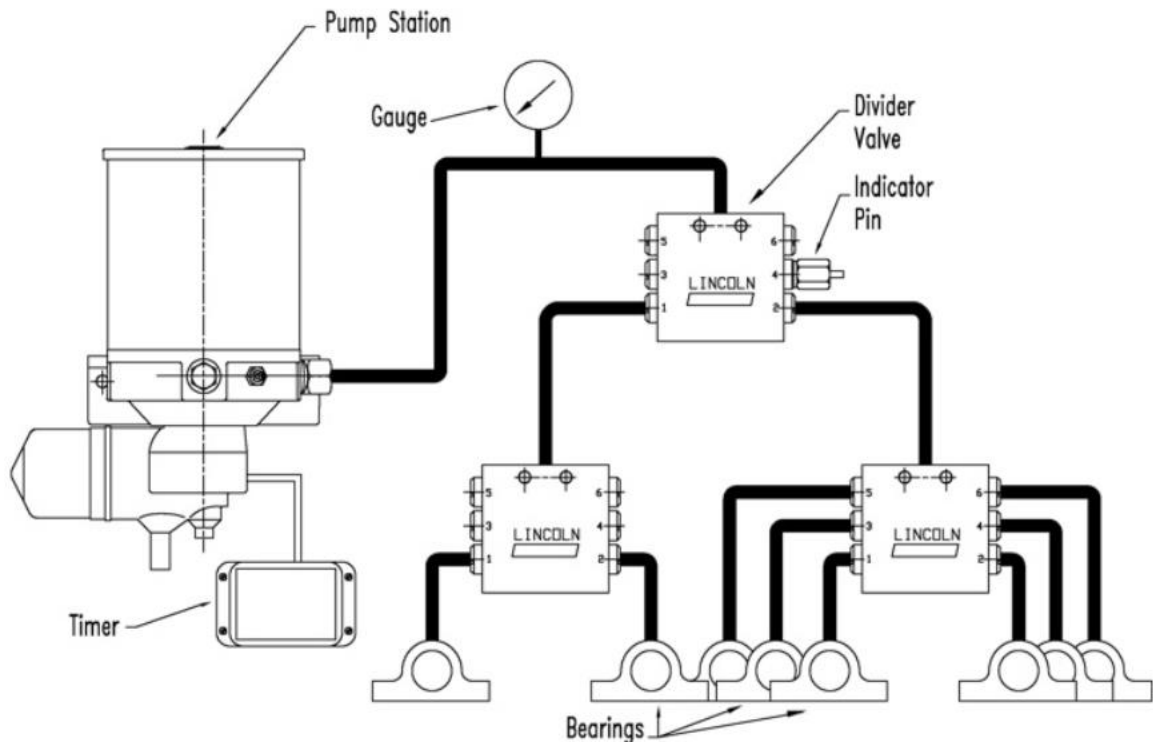
Todo lo que se necesita para montar este sistema es el propio consumible y un sencillo adaptador para acoplarlo al punto de lubricación deseado.

El proceso proporciona una dosis constante de lubricante y, por tanto, mantiene un nivel de lubricación estable.

Este proceso es adecuado para solucionar problemas de lubricación complejos, como la lubricación de puntos de difícil acceso o que pueden representar un peligro

para las personas. Mediante la presión de un eyector, el consumible puede fijarse a diferentes distancias. [39]

Figura 17. Método de lubricación automática



FUENTE: EKIP

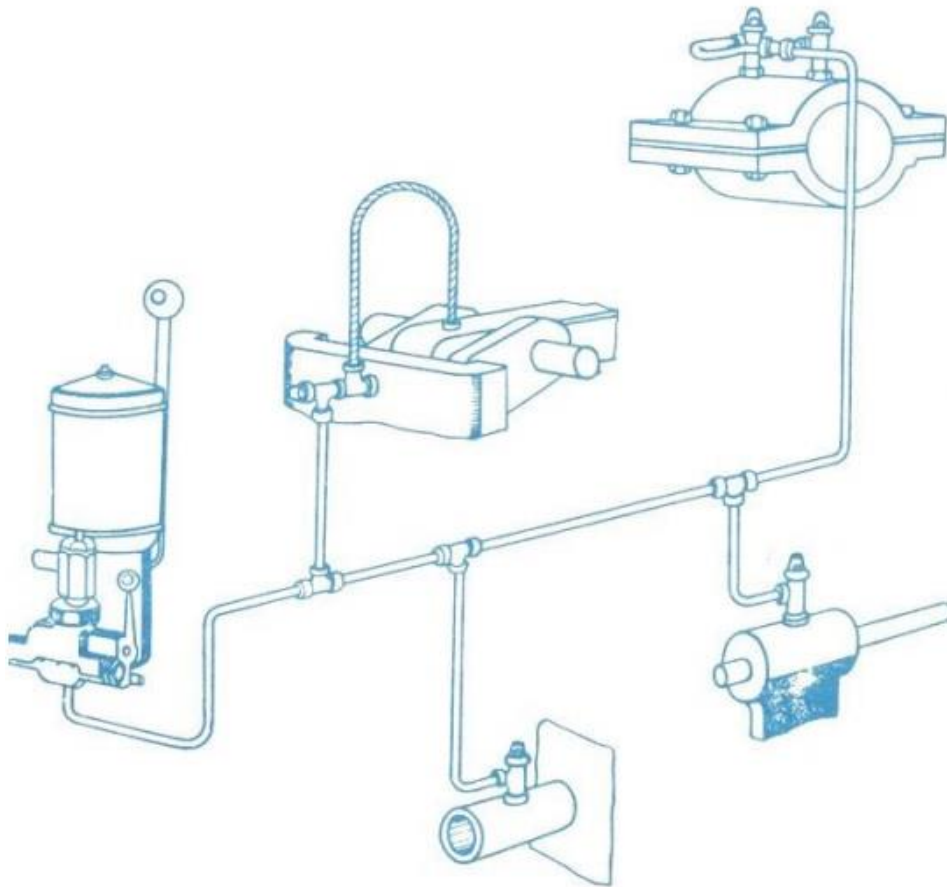
4.1.4.4. SISTEMA DE ENGRASE MANUAL

Es un sistema particular y tiene válvulas individuales, conectadas a una línea sencilla a un extremo del sistema, automáticamente suministran a cada cojinete una determinada cantidad de grasa.

Cada válvula tiene un indicador que le señala al operador cuando la lubricación es completa.

En la mayoría de los casos, las válvulas pueden enroscarse en los cojinetes directamente, lo que hace posible un descargue positivo de la grasa en el cojinete. El sistema manual de engrase se usa cuando los cojinetes no requieren más de una o dos lubricadas en una jornada de operación. [6]

Figura 18. Sistema de engrase manual



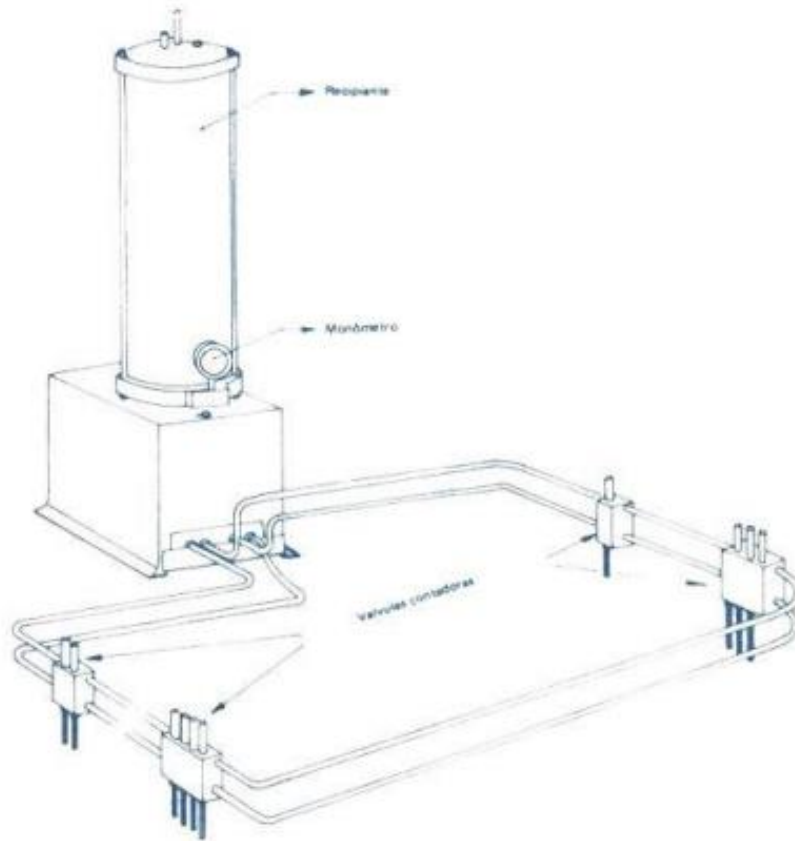
FUENTE: LUBRICACIÓN DE MAQUINARIA – ELEMENTOS DE MAQUINAS

4.1.4.5. SISTEMA DE ENGRASE TOTALMENTE AUTOMÁTICO

Este sistema es generalmente empleado donde los cojinetes tienen altas temperaturas y presiones, y requieren una frecuente aplicación de grasas para asegurar un buen funcionamiento.

El sistema automático se usa para máquinas mezcladoras, en fábricas de caucho, plásticos y máquinas de servicio pesado que requieren los mejores métodos de lubricación para obtener el máximo de producción al mínimo de tiempo consumido.

Figura 19. Sistema de engrase totalmente automático



FUENTE: LUBRICACIÓN DE MAQUINARIA – ELEMENTOS DE MAQUINAS

4.1.5. OBJETIVOS FUNDAMENTALES DE LOS LUBRICANTES EN MAQUINARIAS INDUSTRIALES

Los lubricantes son utilizados en la industria como respuesta a una serie de objetivos que permiten que la fabricación de piezas y el funcionamiento de maquinarias sea lo más óptimo posible.

En primer lugar, permiten reducir la fricción entre las partes metálicas de una pieza, motor y/o maquinaria.

En este sentido crea una capa o película separadora cuya función es la de evitar que las piezas se pulan entre ellas, evitando así el desgaste.

En segundo lugar, los lubricantes cumplen con el objetivo de refrigerar efectivamente las piezas metálicas, ya que tienen la capacidad de absorber el calor que se produce durante el funcionamiento de las maquinarias.

En tercer lugar, los lubricantes en la industria de maquinarias previenen la formulación de depósitos de partículas, lo que les permite mantenerlas en

suspensión. De esa misma forma evita que se acumulen y formen óxido en las piezas.

En cuarto lugar, tienen la función de transmisión de fuerza, como en el caso de los aceites hidráulicos. [40]

4.1.6. CARACTERÍSTICA DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS LUBRICANTES EN MAQUINARIAS INDUSTRIALES

En el sector industrial los lubricantes, como se ha visto hasta ahora, son capaces de ayudar a que las paredes interiores de los equipamientos se mantengan protegidas, con la finalidad de evitar deformaciones y malos funcionamientos.

Una de las señales de que una pieza mecánica cuenta con un buen lubricante es la ausencia de sonido mientras actúa, ya que cuando una máquina gripa se acerca a un estado de inutilidad, por esto es importante que se mantengan lubricados correctamente.

Por otra parte, la ausencia o la deficiencia de lubricantes es un equipamiento, cuando se mueve a gran velocidad, lo expone a soldaduras debido al calor que genera y acumula, esto hace que se destruya y quede inhabilitado de manera irreversible.

Es por ello que en el sector industrial los lubricantes tienen una gran demanda y quienes establecen negocios de ventas de este tipo de lubricantes podrían contar con un gran nicho de comercialización. Solo necesitaría contar con un proveedor de buen nivel, que sea capaz de mantener un stock de lubricantes que pueda ofrecer a sus clientes.

Además, los lubricantes son buscados para garantizar el buen funcionamiento de las maquinarias industriales por que entre sus características está la de evitar la acumulación de impurezas debido al desgaste mecánico.

De manera que los lubricantes actúan como el cosechador perfecto para la atracción de residuos que, de otra forma. Podrían dañar el buen funcionamiento de las máquinas industriales.

Como se ha dicho anteriormente, el aceite actúa como sangre del motor, y de las piezas de maquinarias industriales. Ya que es capaz de darle fuerza y de mantenerlo limpio y renovado.

Por otra parte, el lubricante también actúa como un indicador para saber si la máquina tiene sus órganos internos, esto es sus piezas, en buen estado. Ya que con observar el lubricante de la maquinaria se puede determinar si se está realizando la función, si las piezas se mantienen limpias y protegidas. [40]

4.1.7. SELECCIÓN CORRECTA DE UN ACEITE INDUSTRIAL

La lubricación adecuada de los mecanismos del equipo puede ayudar a lograr la vida útil prevista, garantizar la disponibilidad del equipo durante períodos prolongados y minimizar las pérdidas debido a los costos de lubricación y mantenimiento y la pérdida de ganancias. Por lo tanto, es muy importante que los responsables de lubricar los equipos y los responsables de administrar y actualizar los programas de lubricación pueden seleccionar el aceite o la grasa correctos según las recomendaciones del fabricante del equipo. Se basa en parámetros de diseño mecánico como la carga, la velocidad, la temperatura y el entorno en el que operará el equipo. [41]

Las instalaciones industriales, independientemente de su tamaño, deben utilizar lubricantes industriales. En equipos industriales, el uso de lubricantes automotrices no necesariamente significa una falla catastrófica del mismo, sino una vida significativamente reducida, como cuando se utilizan aceites para motor de combustión interna (incluidos los agentes de limpieza), pueden ocurrir problemas que dejen la máquina inoperable.

Para compresores alternativos con dos o más etapas en los cuales la presencia de agua puede llegar a ser crítica dando lugar al emulsionamiento del aceite automotor o en equipo rotativos donde en lugar de utilizar un aceite industrial, por ejemplo, de un grado ISO 100 se utiliza un SAE 90 o un 140. Para este último caso si la viscosidad es demasiado alta, la pérdida de energía debido a la fricción del fluido aumentará significativamente, la temperatura de funcionamiento aumentará y la oxidación del aceite y la expansión del sello de aceite se acelerarán.

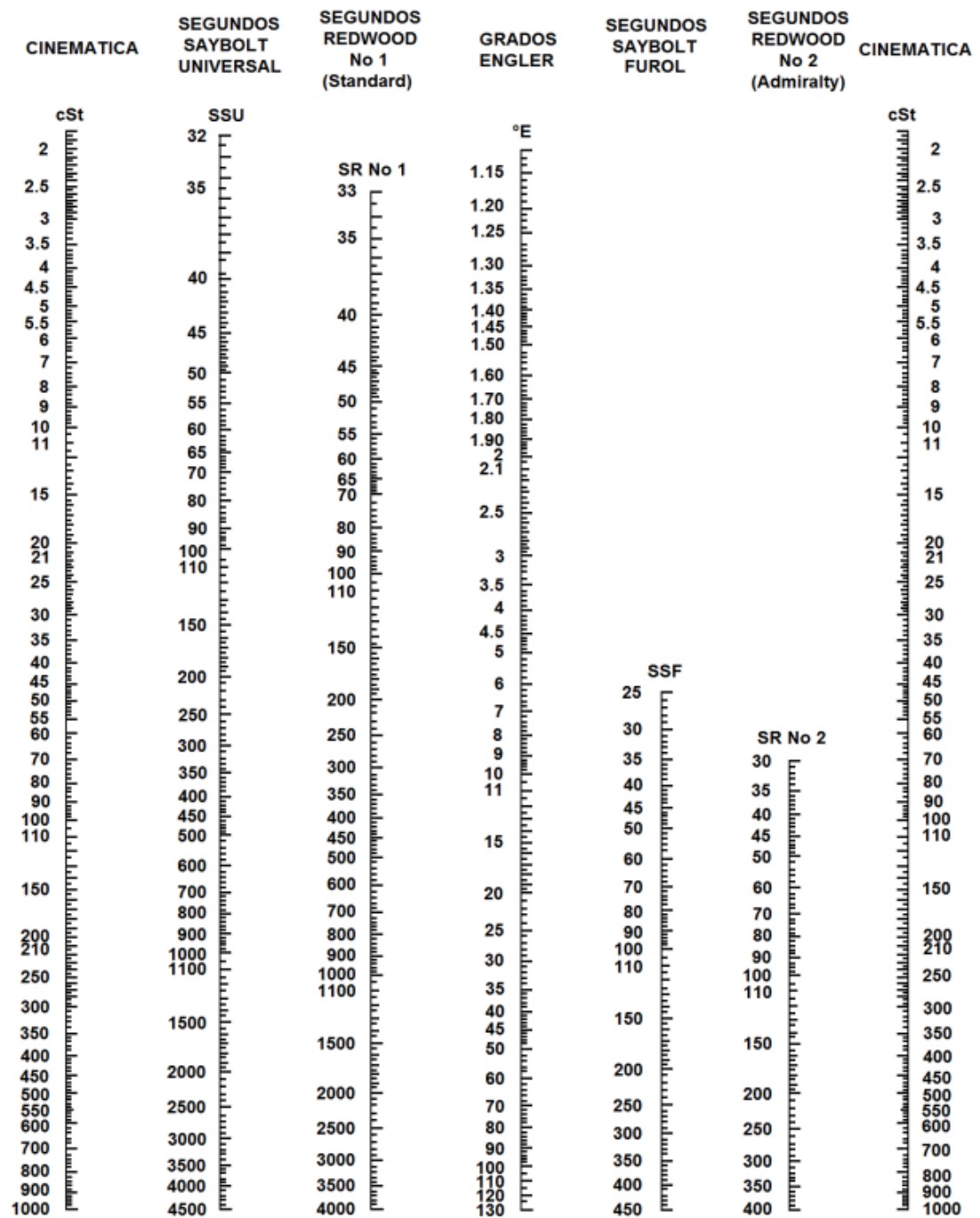
Además, los aceites automotrices son de 1.5 a 2 veces más caros que los aceites industriales, lo que genera costos adicionales para lubricar la maquinaria rotativa en las fábricas. Por lo tanto, al momento de lubricar maquinaria industrial o prescribir un aceite clasificado SAE para su lubricación, se recomienda encontrar y utilizar el equivalente en el sistema ISO de la tabla 8. [41]

4.1.7.1. SISTEMA ISO

La organización Internacional para la Estandarización (ISO) estableció desde 1975 el sistema ISO para especificar la viscosidad de los aceites industriales, pero solo hasta 1979 fue puesta en práctica por la mayoría de los fabricantes de lubricantes. El sistema ISO clasifica la viscosidad de los aceites industriales en cSt a 40°C, mediante un número estándar que se coloca al final del nombre del aceite industrial. Este sistema reduce las posibilidades de que el usuario se equivoque en la selección del aceite a utilizar o que mezcle lubricantes de diferentes viscosidades; facilita además hallar de manera inmediata el equivalente en viscosidad de un aceite con otro puesto que el nombre del aceite debe traer al final el grado ISO correspondiente.[41]

En la [figura 20](#) nos permite pasar de un sistema de unidades de viscosidad a otro.

Figura 20. Carta de conversión de la viscosidad a cualquier temperatura



FUENTE: TRIBOLOGÍA Y LUBRICACIÓN. PEDRO A. AGUILLÓN C.

Entonces, por ejemplo, si se tiene un aceite de la marca Shell Tellus 68 y se sabe que este fabricante utiliza la clasificación ISO para aceites industriales, el aceite Tellus número 68 lo que indica que tiene una viscosidad de 68cSt a 40°C .

En la [tabla 7](#) se especifican los diferentes grados de viscosidad en el sistema ISO; los grados básicos de viscosidad están comprendidos entre el 2 y el 68, los siguientes grados ISO después del 68 se obtienen añadiendo uno o dos ceros a partir del 10 hasta llegar al 1500. El límite mínimo y máximo de un grado ISO es el 10% de dicho grado. [41]

Tabla 7. Clasificación ISO para los aceites industriales

GRADO ISO	LÍMITES DE VISCOSIDAD							
	cSt/40°C		cSt/100°C		SSU/100°F		SSU/210°F	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
2	1.98	2.42			32.8	34.4	-	-
3	2.88	3.52			36.0	38.2	-	-
5	4.14	5.06			40.4	43.5	-	-
7	6.12	7.48			47.2	52.0	-	-
10	9.00	11.00			57.6	65.3	34.6	35.7
15	13.50	16.50			75.8	89.1	37.0	38.3
22	19.80	24.20			105.0	126.0	39.7	41.4
32	28.80	35.20			149.0	182.0	43.0	45.0
46	41.40	50.60			214.0	262.0	47.1	49.9
68	61.20	74.80			317.0	389.0	52.9	56.9
100	90.00	110.00			469.0	575.0	61.2	66.9
150	135.00	165.00			709.0	871.0	73.8	81.9
220	198.00	242.00			1047.0	1283.0	90.4	101.0
320	288.00	352.00			1533.0	1881.0	112.0	126.0
460	414.00	506.00			2214.0	2719.0	139.0	158.0
680	612.00	748.00			3298.0	4048.0	178.0	202.0
1000	900.00	1100.00			4864.0	5975.0	226.0	256.0
1500	1350.00	1650.00			7865.0	9079.0	291.0	331.0

FUENTE: TRIBOLOGÍA Y LUBRICACIÓN. PEDRO A. AGUILLON C.

4.1.7.1.1. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA ISO

Algunos aspectos importantes que es necesario tener en cuenta con la clasificación ISO son:

- Únicamente clasifica la viscosidad de los aceites industriales
- Estandariza la viscosidad del aceite en cSt a 40°C

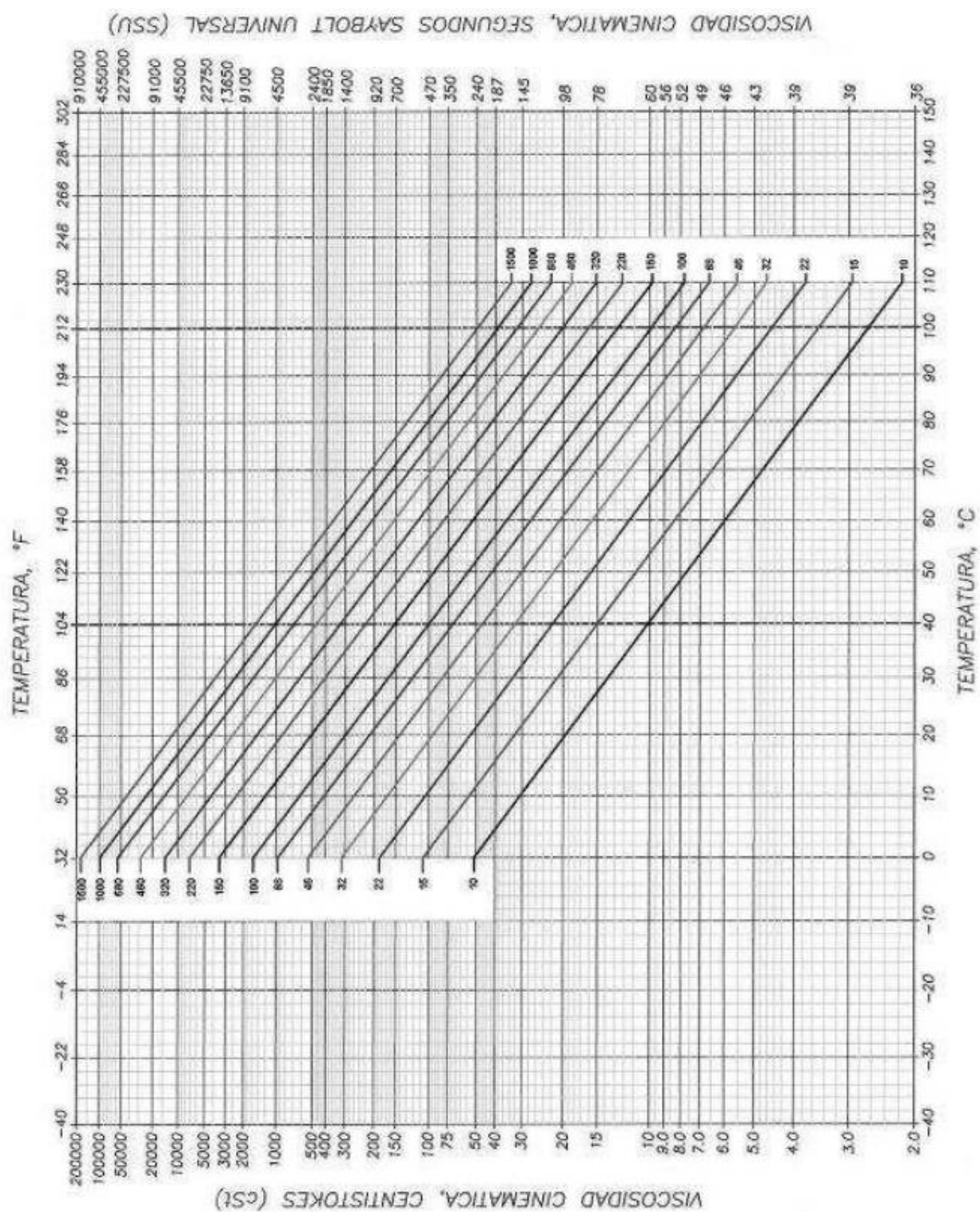
- Sólo se relaciona con la viscosidad del aceite industrial y no tiene nada que ver con su calidad.
- El grado ISO aparece al final del nombre del aceite industrial, cualquiera que sea su marca. [41]

4.1.7.1.2. CURVA CARACTERÍSTICA DE LOS ACEITES INDUSTRIALES

En la [figura 21](#), se tiene la curva característica de viscosidad–temperatura para cualquier aceite industrial derivado del petróleo, entre un grado ISO 10 y 1500, con un índice de viscosidad (IV) entre 80 y 95. En la escala vertical de la izquierda se da la viscosidad del aceite en cSt y en la escala horizontal inferior, la temperatura en °C y en °F respectivamente. Para hallar el grado ISO correspondiente a un aceite industrial se ubica la viscosidad del aceite en cSt en la escala vertical de la izquierda y se traza una horizontal hasta que corte la vertical correspondiente a la temperatura dada; el punto de intersección de las líneas trazadas puede coincidir con alguna de las curvas que aparecen en la [figura 20](#), en cuyo caso, el número que la identifica sería el grado ISO del aceite industrial correspondiente; en caso contrario, se selecciona la curva más cercana al punto. [41]

Si el punto de intersección queda ubicado en la mitad de dos curvas se selecciona la curva de mayor grado ISO. En este caso, el desgaste erosivo de los elementos lubricantes puede aumentar ligeramente por la fricción excesiva del fluido, pero el desgaste adhesivo que puede ocurrir si se elige la curva de aceite del grado ISO más bajo no ocurre. El aumento de la temperatura y el aumento del consumo de energía no son importantes al elegir la clase ISO más alta. [41]

Figura 21. ASTM D-341 VISCOSIDAD-TEMPERATURA



FUENTE: TRIBOLOGÍA Y LUBRICACIÓN. PEDRO A. AGUILLON C.

4.1.7.1.3. PASOS A TENER EN CUENTA EN LA SELECCIÓN DEL ACEITE INDUSTRIAL

Siempre que se hace la selección del aceite para un equipo industrial se debe tener presente que se debe utilizar un aceite de especificación ISO y que cualquier recomendación que se dé, se debe llevar a este sistema. Los siguientes son los pasos que es necesario tener en cuenta en la selección del aceite para un equipo industrial:

- Consultar en el catálogo del fabricante del equipo, las recomendaciones del aceite que se debe utilizar.
- Seleccionar el grado ISO del aceite requerido a la temperatura de operación en los mecanismos lubricados, teniendo en cuenta la temperatura ambiente.
- Seleccionar un aceite industrial, en la misma marca que el lubricante que se está utilizando en la empresa.
- Aplicarle el aceite al equipo rotativo, teniendo en cuenta los procedimientos establecidos.[41]

4.1.7.1.4. MODIFICACIÓN DEL GRADO ISO DEL ACEITE DE ACUERDO CON LA TEMPERATURA AMBIENTE

Cuando la temperatura de operación o la temperatura ambiente en la cual va a trabajar el equipo rotativo es diferente al rango especificado por el fabricante, es necesario modificar el grado ISO del aceite requerido, ya que de lo contrario se presentarán los siguientes problemas en los mecanismos lubricados:

- Si la temperatura ambiente real es menor que la que tuvo en cuenta el fabricante el equipo rotativo en sus cálculos, la viscosidad del aceite seleccionado aumentará por encima del valor requerido, dando lugar a problemas de desgaste erosivo, altas temperaturas de operación, y mayor consumo de energía por exceso de fricción fluida en los mecanismos lubricados.
- Si la temperatura ambiente real es mayor que la que tuvo en cuenta el fabricante del equipo rotativo en sus cálculos, la viscosidad del aceite seleccionado disminuirá por debajo del valor requerido, dando lugar a problemas de desgaste adhesivo, altas temperaturas de operación, y mayor consumo de energía por fricción sólida en los mecanismos lubricados. [41]

4.1.7.2. EQUIVALENCIAS ENTRE DIFERENTES SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN DE LA VISCOSIDAD

Muchos fabricantes de maquinaria industrial brindan sus especificaciones de lubricación en sistemas de clasificación de viscosidad distintos al ISO, y esto por lo tanto obliga a encontrar la clase de viscosidad correspondiente en ese sistema. [41]

Tabla 8. Equivalencias entre los diferentes sistemas de clasificación de la viscosidad

GRADO ISO	GRADO ASTM	GRADO AGMA	GRADO SAE			
			MOTOR		ENGRANAJES	
			Unigrado	Multigrado	Unigrado	Multigrado
10						
15	75					
22	105		0w, 5w		75w	
32	150		10w			
46	215	1	10, 15w			
68,68EP	315	2, 2EP	20w, 20	10w30, 20w20	80, 80w	
100,100EP	465	3, 3EP	25w, 30	5w50, 15w40		
150,150EP	700	4, 4EP	40	15w50, 20w40		
220,220EP	1000	5, 5EP	50		90	85w90
320,320EP	1500	6, 6EP				85w140
460,460EP,460C	2150	7, 7EP, 7C			140	
680,680EP,680C	3150	8, 8EP, 8C				
1000,1000EP, 1000C	4650	9, 9EP, 9C				
1500,1500EP, 1500C	7000	10, 10EP, 10C			250	

FUENTE: TRIBOLOGÍA Y LUBRICACIÓN. PEDRO A. AGUILLON C.

NOTAS:

1. Cuando se calcula el grado ISO equivalente de un aceite Unigrado para motores de combustión interna su IV puede ser menor o igual a 95; si es de especificación w debe ser mayor de 95 y si es multigrado, debe estar por encima de 110. Cuando se trate de aceites para engranajes se procede de la misma manera.
2. La C en los aceites especificados en el sistema ISO o AGMA significa compuesto o aceites con aditivos a base de ácidos grasos para condiciones

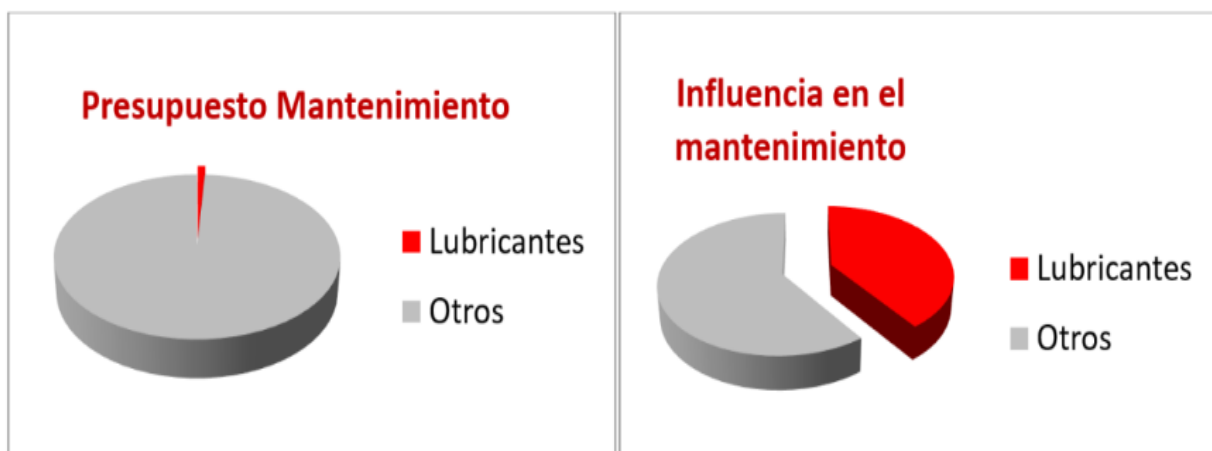
de lubricación EHL donde la temperatura de la carcasa del componente es menor o igual a 50°C

3. Cuando el fabricante recomienda el tipo de aceite a utilizar en cualquier sistema de unidades de viscosidad, referenciados a una temperatura específica, es necesario hallar el grado ISO correspondiente, para lo cual es necesario, en primer lugar, convertir las unidades de viscosidad dadas en cSt y, en segundo lugar, con las unidades de viscosidad en cSt a cualquier temperatura, se halla el grado ISO correspondiente.[41]

4.1.8. IMPORTANCIA DE LA LUBRICACIÓN EN LA INDUSTRIA

Por lo general en la industria solo el 1% del presupuesto de mantenimiento se invierte en la lubricación y una ínfima parte de ese presupuesto se dedica a un mantenimiento predictivo adecuado para el ejercicio de esta parte tan importante del trabajo de los equipos rotativos. Esto genera conflictos al considerar el volumen de fallos que se producen en los activos de una empresa derivados de la ausencia de lubricación, de la mala elección de aceites y del estado de conservación del mismo. [38]

Figura 22. Relación entre el presupuesto de mantenimiento para lubricantes e impacto de los mismos en el gasto por averías



FUENTE: TEROTECNIC INGENIERÍA PREDICTIVA

Como se evidencia en la [figura 22](#), la influencia de la lubricación en la vida útil de los equipos rotativos es muy importante y podemos cuidarla con una gestión adecuada del ciclo completo del lubricante.

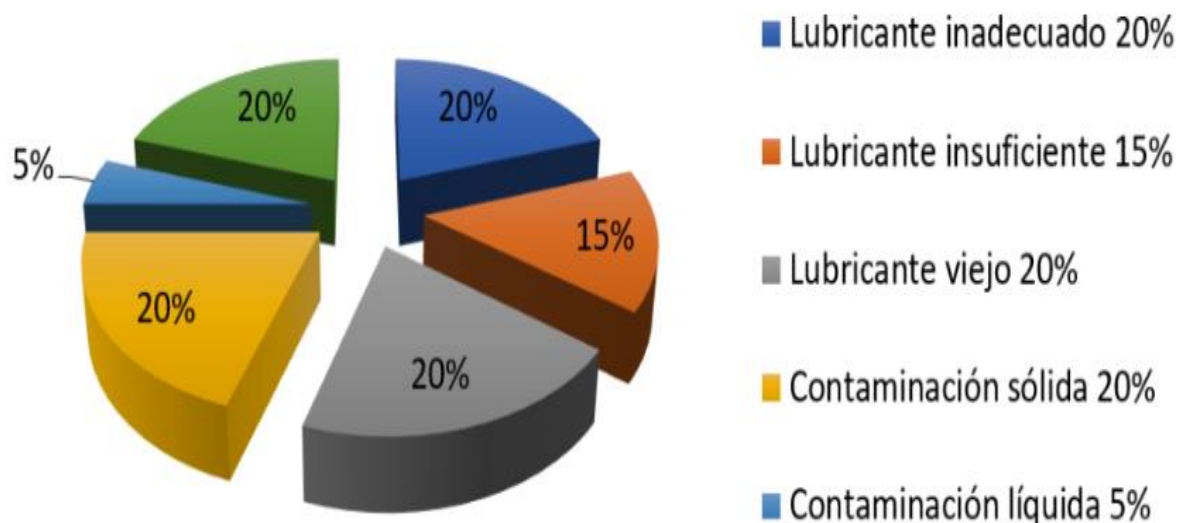
- Buena elección para la aplicación para la que se elija.
- Formato de compra y almacenamiento adecuado del lubricante

- Aplicación de las técnicas adecuadas para una buena lubricación.
- Y la implementación de un plan de mantenimiento predictivo basado en el análisis de los lubricantes.[38]

Este tipo de gestión reducirá considerablemente las averías, el consumo de lubricantes y la cantidad de energía y bajará considerablemente el gasto de mantenimiento en la industria.

Por supuesto, se refiere a máquinas rotativas basadas en rodamientos y cojinetes lubricado. En la [figura 23](#) se puede ver como la lubricación afecta a los rodamientos en particular. [38]

Figura 23. Averías en rodamientos



FUENTE: TEROTECNIC INGENIERÍA PREDICTIVA

4.1.9. EL IMPACTO DEL DESGASTE EN LOS MECANISMOS LUBRICADOS

El desgaste, cualquiera que sea la forma como se presente es sinónimo de improductividad y se define como: “Pérdida de material entre dos superficies que se encuentran en movimiento relativo y que se manifiesta por su funcionamiento errático, siendo necesario en la mayoría de los casos sacar de servicio el equipo rotativo del cual hacen parte esencial, y cambiarle las piezas defectuosas”. Las causas del desgaste no siempre se pueden determinar, conllevando a que en muchos casos sea imposible determinarlas aun cuando el mecanismo se haya lubricado correctamente.

El desgaste, cualquiera que sea la causa, se define como la degradación causada por la fuerza de las interacciones de la rugosidad de la superficie que, en última instancia, conducen al contacto de metal con metal entre las superficies de un mecanismo en movimiento relativo. Este tipo de desgaste puede ser severo, causando que las piezas de la máquina pierdan tolerancias y que los mecanismos funcionen de manera errática o fallen catastróficamente, dejándolos inutilizables, lo que resulta en daños costosos y daños extensos al sistema de producción de una empresa.

En cualquier caso, el desgaste mecánico es indeseable, pero, aunque se controlen las causas que lo provocan, la fatiga del material no se puede evitar y, por tanto, es inevitable. Esta es una propiedad inherente del material y el mecanismo debe ser reemplazado. Si desea que sus máquinas funcionen con la máxima productividad, asegúrese de que los componentes que las componen se reemplacen debido a la fatiga y no a uno de muchos tipos de desgaste que pueden ocurrir durante el servicio.[41]

4.1.9.1. TIPOS DE DESGASTE

Las superficies de los mecanismos lubricados de una máquina se pueden desgastar por las siguientes causas:

- Tipo de lubricante utilizado y a su tiempo de servicio.
- Contaminantes presentes en el aceite cuyo origen puede ser de ellos mismos o de fuentes externas.
- Fallas intempestivas del sistema de lubricación.
- Sobrecargas debidas a problemas mecánicos u operacionales.
- Selección incorrecta del equipo rotativo para el tipo de trabajo que va a desarrollar, a un mal diseño o al empleo de materiales inadecuados para las condiciones de operacionales de máquina.

En cualquier caso, el desgaste mecánico es indeseable, pero, aunque se controlen las causas que lo provocan, la fatiga del material no se puede evitar y, por tanto, es inevitable. Esta es una propiedad inherente del material y el mecanismo debe ser reemplazado. Si se desea que las máquinas funcionen con la máxima productividad, asegúrese de que los componentes que las componen se reemplacen debido a la fatiga y no a uno de los muchos tipos de desgaste que pueden ocurrir durante el servicio. [41]

Los tipos de desgaste más comunes en orden de importancia son:

- Adhesivo
- Erosivo
- Abrasivo
- Corrosivo

- Fatiga superficial
- Cavitación
- Corrientes eléctricas

4.1.9.1.1. DESGASTE ADHESIVO

El desgaste adhesivo es el más crítico ya que en la mayoría de los casos da lugar a la falla catastrófica del mecanismo lubricado quedando inservible y causando altas pérdidas en el proceso productivo. Se presenta como resultado del contacto metal-metal entre las superficies del mecanismo lubricado debido al adelgazamiento de la película lubricante en el caso de lubricación fluida ya sea por la presencia de contaminantes en el aceite (agua, gases, combustibles, etc.) o a un bajo nivel de aceite, baja viscosidad o baja presión en el sistema de lubricación; un alto nivel de aceite, una alta viscosidad y una alta presión en el sistema de lubricación también pueden dar lugar al desgaste adhesivo debido a que el exceso de fricción fluida en el aceite incrementa la temperatura de operación, haciendo que las superficies metálicas sometidas a fricción se dilaten y rocen, rompiendo en un momento dado la película límite. En la lubricación EHL el desgaste adhesivo se debe al rompimiento de película límite formada por el aditivo EP del lubricante utilizado.

En el desgaste adhesivo, las superficies de metal ásperas se fusionan. Esto se debe a que no existe un elemento de fricción intermedio que los separe, como una película límite formada por aceite o grasa en la lubricación líquida, o aditivos EP en la lubricación EHL. Además, a medida que la carga transmitida por el mecanismo sigue actuando, rompe y separa partículas o fragmentos metálicos de varios tamaños. La energía liberada eleva la temperatura de funcionamiento, lo que hace que las interfaces de metal con metal se acerquen, lo que finalmente bloquea el mecanismo y detiene la máquina. [41]

Figura 24.Desgaste abrasivo



FUENTE: GESTIÓN Y ANÁLISIS DE FALLAS

4.1.9.1.2. DESGASTE EROSIVO

El desgaste erosivo es la pérdida lenta de material en las rugosidades de las dos superficies que se encuentran en movimiento relativo como resultado del impacto de partículas sólidas o metálicas en suspensión en un aceite que fluye a alta presión de un tamaño mucho menor que el mínimo espesor de la película lubricante. Incluso si las partículas son pequeñas, cuando entran en la región de alta presión, no siguen el movimiento lineal y son perturbadas por colisiones con irregularidades, superficie, hasta que finalmente da lugar a la separación del material, perfectamente limpia incluso cuando el aceite circula a baja presión y cumple con las normas de limpieza ISO 4406 según el tipo de mecanismo a lubricar. Al no haber aceite, siempre se presenta un lento desgaste erosivo. El desgaste erosivo se puede presentar también, ya sea en lubricación fluida o EHL, como resultado del empleo de un aceite de una viscosidad mayor que la requerida debido a que el exceso de capas en la película lubricante “barren” la capa límite que se encuentra adherida a las superficies metálicas haciendo que dichas capas las desgasten por erosión. En condiciones turbulentas dentro de la película lubricante, se produce un desgaste por erosión a medida que la película lubricante se mueve contra la rugosidad. Esto puede deberse al uso de un aceite con un índice de viscosidad bajo, lo que reduce significativamente la viscosidad del aceite a la temperatura de funcionamiento del equipo. [41]

Figura 25. Desgaste erosivo



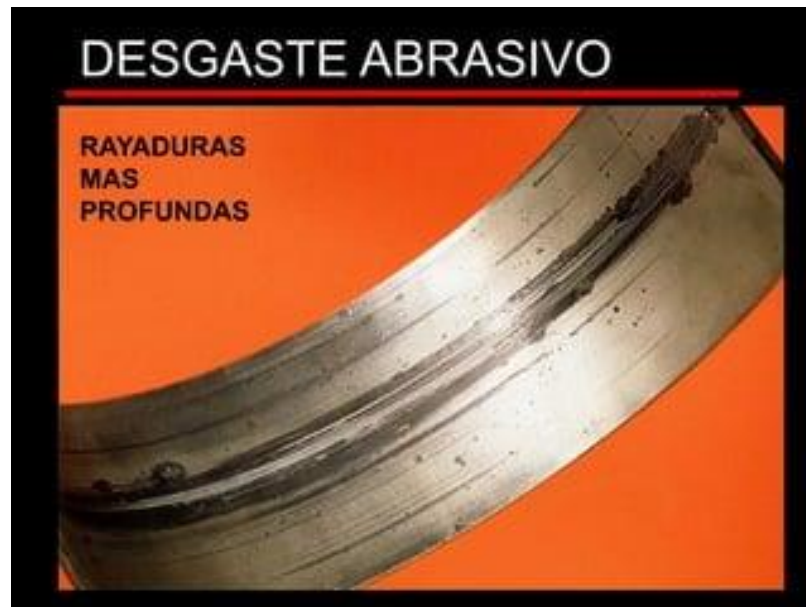
FUENTE: ECURED

4.1.9.1.3. DESGASTE ABRASIVO

El desgaste abrasivo es consecuencia de la presencia de partículas sólidas o metálicas de un tamaño igual o mayor que el espesor mínimo de la película lubricante y de la misma dureza o superior a la de las superficies metálicas del mecanismo lubricado; el desgaste es mayor en la superficie más blanda. Las partículas sólidas como el silicio provocan un importante desgaste debido a la alta dureza de este material. Cuando partículas del mismo tamaño que el espesor mínimo de la película lubricante se encuentra entre dos superficies, “ruedan”, desalojando la película límite y eliminando material de ambas superficies.

Cuando son de mayor tamaño se fracturan dando lugar a partículas del mismo tamaño que el mínimo espesor de la película lubricante y de un tamaño menor que propician el desgaste erosivo de dichas superficies de la película lubricante y de un tamaño menor que proporcionan el desgaste erosivo de dichas superficies metálicas o el abrasivo si la carga que actúa sobre el mecanismo se incrementa o la viscosidad del aceite se reduce ya sea por contaminación con agua o con aceites de menor viscosidad.[41]

Figura 26. Desgaste abrasivo



FUENTE: GESTIÓN Y ANÁLISIS DE FALLAS

4.1.9.1.4. DESGASTE CORROSIVO

El desgaste corrosivo puede ser consecuencia del ataque químico de los ácidos débiles que se forman en el proceso de degradación normal del aceite, de la contaminación de éste con agua o con ácidos del medio ambiente o de los ácidos fuertes debidos a la descomposición del aceite cuando está sometido a altas temperaturas; en el primer caso el desgaste corrosivo es lento mientras que en el segundo es crítico siendo por lo tanto la situación que más se debe controlar; tanto los ácidos débiles como los fuertes dan lugar a la formación de ácido sulfúrico. El desgaste corrosivo se presenta primero como una decoloración amarillenta, luego rojiza de la superficie metálica, seguida del desprendimiento de pequeñas partículas, que se van acumulando y eventualmente provocan erosión y desgaste de la superficie de fricción, dejando grietas que eventualmente podrían romper la pieza.

El desgaste corrosivo se presenta primero como una decoloración amarillenta, luego rojiza de la superficie metálica, seguida del desprendimiento de pequeñas partículas, que se van acumulando y eventualmente provocan erosión y desgaste de la superficie de fricción, dejando grietas que eventualmente podrían romper la pieza. [41]

Figura 27. Desgaste corrosivo



FUENTE: NORIA

4.1.9.1.5. DESGASTE POR FATIGA SUPERFICIAL

El desgaste por fatiga superficial es el único tipo de desgaste que no se puede evitar y el cual finalmente hace que el componente lubricado se tenga que cambiar. Se presenta como resultado de los esfuerzos cíclicos de tensión y compresión que genera la carga al actuar en el punto donde se forma la película lubricante que en el caso de la lubricación fluida hace que las crestas de las rugosidades traten de aplastarse sin tocarse dando lugar a un ciclo de compresión y de tensión que termina deformando plásticamente las rugosidades causando su rotura iniciándose de esta manera el “ojo” de fatiga o grieta incipiente que da lugar a un incremento localizado del esfuerzo, que cada vez se hace más crítico por la falta de área hasta que finalmente la velocidad de propagación es tan alta que ocasiona la fractura del componente. [41]

El desgaste por fatiga superficial anormal, se debe a la disminución del espesor de la película lubricante, y las causas más comunes son:

- Contaminación del aceite con agua.
- Inestabilidad del índice de viscosidad del aceite.
- Cambio de aceite, por encima del nivel máximo permisible de oxidación.
- Uso de un aceite de grado ISO menor que el requerido.
- Uso de un aceite sin aditivos antidesgaste.
- Incremento en la temperatura de operación como resultado de: desalineamiento, desbalanceo mecánico, sobrecargas operacionales, falta

de enfriamiento, ajuste demasiado forzado tanto en la pista interna o externa del rodamiento, holgura excesiva entre el aro exterior y el alojamiento o entre el aro interior y el eje.

Figura 28. Desgaste por fatiga superficial



FUENTE: SEDISA SAC

4.1.9.1.6. DESGASTE POR CAVITACIÓN

Es el fenómeno que se presenta cuando las burbujas de vapor de agua que se forman en el aceite, al circular éste a través de una región donde la presión es menor que su presión de vapor, “explotan” al llegar nuevamente a una región de mayor presión como resultado del cambio de estado de vapor a líquido. Si las burbujas “explotan” cerca de las superficies metálicas darán lugar a presiones localizadas muy altas que ocasionarán picaduras en dichas superficies.[41]

Figura 29. Desgaste por cavitación



GESTIÓN Y ANÁLISIS DE FALLAS

4.1.9.1.7. DESGASTE POR CORRIENTES ELÉCTRICAS

Se presenta por corrientes eléctricas, cuyo origen pueden ser corrientes parásitas u otras fuentes externas, que pasan a través de los mecanismos de un componente equipo lubricado y cuya toma a tierra está defectuosa o no la tiene causando en ellos picaduras que los pueden dejar inservibles. Este puede ser el caso de los rodamientos de los motores eléctricos y de los cojinetes lisos de turbinas de vapor, gas, hidráulicas, generadores y compresores centrífugos. [41]

Figura 30. Desgaste por corrientes eléctricas



FUENTE: NSK AMÉRICAS

4.1.9.2. CONSECUENCIAS DEL DESGASTE

Los más importantes son:

- Movimiento errático de los mecanismos lubricados.
 - Altos valores de vibración e incremento en los niveles de ruido.
 - Elevadas temperaturas de operación.
 - Mayor consumo de repuestos por incremento del mantenimiento correctivo.
 - Reducción significativa de la producción por paros de maquinaria.
 - Mayor consumo de energía para realizar la misma cantidad de trabajo útil.
- [41]

4.1.10. INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD EN EL DESGASTE DE LOS MECANISMO

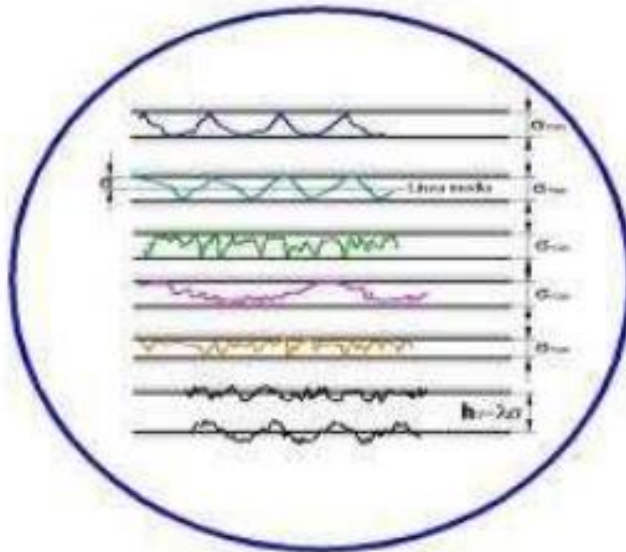
El tema de la rugosidad de las superficies sometidas a fricción corresponde al mundo de lo desconocido, ya que por lo regular el tamaño de las rugosidades de los mecanismos de las máquinas está por debajo de las 25 micras, dimensiones que el ojo humano, sin la ayuda del microscopio, nunca podría ver. Como a simple vista no se puede observar y evaluar la incidencia que tiene la rugosidad en el desgaste adhesivo, erosivo y abrasivo de los mecanismos lubricados, es muy poca

la atención que se le presta al tema de la rugosidad y por lo tanto la vida de los mecanismos se ve considerablemente reducida cuando en la práctica se cambia el valor estándar de la rugosidad especificada por el fabricante para un determinado tipo de mecanismo. En la práctica dicho desgaste adhesivo depende del tamaño, forma y concentración de las crestas y valles de las rugosidades.[41]

4.1.10.1. RUGOSIDAD

Mediante los métodos convencionales disponibles hoy en día de cepillado, pulido, maquinado, etc, no es factible obtener una superficie completamente lisa, por lo que microscópicamente presentan una forma rugosa muy irregular constituida por valles y crestas. Las rugosidades de las superficies metálicas pueden tener la misma altura entre las crestas, pero diferentes longitudes de onda o viceversa; en superficies de mecanismos que han estado trabajando la altura de las crestas puede variar entre 0,05 micras y 50 micras y la longitud de onda entre 0,5 micras y 5 micras.[41]

Figura 31. Rugosidades



FUENTE: TRIBOLOGÍA Y LUBRICACIÓN. PEDRO A. AGUILLON C.

4.1.10.1.1. TIPOS DE RUGOSIDADES

En el mecanizado de las superficies sometidas a fricción se pueden obtener básicamente dos tipos de rugosidades, las cuales dependen del tipo de mecanismo,

de las condiciones de lubricación (fluida o EHL) y de las condiciones operacionales bajo las cuales va a estar sometido dicho mecanismo. Los dos tipos de rugosidades son:

- **AGUDAS:** Se caracterizan porque su forma es triangular y la altura de las crestas y longitud de onda es aproximadamente igual.
- **DENTADAS:** Tienen la forma de dientes de engranajes y generan un menor consumo de energía en el momento de la puesta en marcha del mecanismo porque las crestas se entrelazan menos. [41]

4.1.10.2. AHORRO DE ENERGÍA POR MENOR FRICCIÓN EHL

El ahorro de energía por menos fricción en elementos de máquinas que trabajan bajo condiciones de lubricación fluida y EHL debe estar orientado teniendo en cuenta tanto la forma y altura promedio de la rugosidad de las superficies en movimiento relativo como del tipo de aditivo antidesgaste y de Extrema Presión que se van a utilizar.

En la práctica es muy difícil evaluar el ahorro de energía por menos fricción sólida en elementos de máquinas rotativas que trabajan bajo condiciones de lubricación fluida, ya que el tiempo que permanece dicho elemento trabajando bajo condiciones de fricción sólida es muy pequeño y solo se presenta en el momento de la puesta en marcha o cuando se detiene el mecanismo.[41]

4.1.10.3. INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD EN LA FILTRACIÓN DEL ACEITE

Entre más irregulares sean las superficies de los mecanismos que trabajan bajo condiciones de lubricación EHL, más desprendimiento de partículas metálicas se presentarán y mayores serán los niveles de desgaste erosivo y abrasivo en los mecanismos lubricados. Una rugosidad redondeada y del tamaño recomendado permitirá que no haya deslizamiento entre las crestas de las dos superficies sino rodadura minimizando el desgaste adhesivo. Sin embargo, si esto no se puede garantizar, es necesario en el desarrollo de los programas de filtración que se lleven a cabo en la empresa tener en cuenta los niveles de limpieza, de acuerdo con la Norma ISO 4406, con los cuales se deben trabajar los aceites en las máquinas que trabajan bajo condiciones EHL. Si en la práctica se conoce el valor de la rugosidad de las superficies de los mecanismos sometidos a fricción y está es del orden de las 5 micras, se puede trabajar el aceite con el nivel de limpieza recomendado por la Norma ISO 4406, si no, se debe trabajar el aceite con un código ISO menor que el especificado. [41]

5. TERCER CAPITULO

5.1. OBJETIVO 2

La cantidad de lubricantes que hay en el mercado actual son incontables por lo tanto nombraremos los más relevantes.

5.1.1. MARCAS DE ACEITES

5.1.1.1. SHELL

Los lubricantes Shell han sido diseñados y desarrollados con el fin de satisfacer las necesidades de cada tipo de industria. Se han obtenido por medio de la investigación en laboratorios de todo el mundo y cumplen con las exigencias de los principales fabricantes, proporcionando el máximo rendimiento. Entre las diferentes gamas de lubricantes, encontramos:

- **SHELL ARGINA Y GADINA:** Aceites lubricantes para motores de generadores eléctricos, diseñados para reducir al mínimo la acumulación de depósitos y mantener limpios los motores.
 - **ARGINA:** Diseñados para usarlo con combustibles pesados como fuelóleos de bajo y alto contenido en azufre, LSFO y HSFO [42]

Figura 32. Lubricante Shell Argina



FUENTE: RETIF OIL & FUEL

Tabla 9. Características Shell Argina S4 40

SHELL ARGINA S4 40	
PROTECCIÓN MOTOR	Contiene un alto nivel de detergencia el cual permite una excepcional limpieza del cárter.
EFICIENCIA	Posee una formulación de alta detergencia baja dispersancia.
APLICACIONES	Motores auxiliares y de propulsión industrial.
GRADO SAE	40
VISCOSIDAD CINEMÁTICA	40°C → 127 cSt 100°C → 13.7 cSt
ÍNDICE DE VISCOSIDAD	104
DENSIDAD	916 Kg/m ³
PUNTO DE INFLAMACIÓN	230°C
PUNTO DE FLUIDEZ	-9°C
CENIZAS SULFATADAS	5.0 %m/m

FUENTE: AUTOR

- **GADINIA:** Para motores de combustión de destilados y de biocombustibles líquidos. [42]

Figura 33. Lubricante Shell Gadinia



FUENTE: DESERTCART OMAN

Tabla 10. Características Shell Gadinia S3 40

SHELL GADINIA S3 40	
PROTECCIÓN MOTOR	Reduce la formulación de laca, lo que resulta en un mayor control del aceite
EFICIENCIA	Posee una mayor tolerancia a la sobrecarga del motor o la mala combustión.
APLICACIONES	Turbocompresores, bocinas llenas de aceite y paso variable.
GRADO SAE	40
VISCOSIDAD CINEMÁTICA	40°C → 128 cSt 100°C → 13.7 cSt
ÍNDICE DE VISCOSIDAD	103
DENSIDAD	890 kg/m ³
PUNTO DE INFLAMACIÓN	230°C
PUNTO DE FLUIDEZ	-21°C
CENIZAS SULFATADAS	1.5 %m/m

FUENTE: AUTOR

Estos aceites son adecuados para tres tipos de aplicaciones: motores de propulsión marítima, motores marinos auxiliares y generación eléctrica estacionaria. [42]

- **SHELL CORENA:** Aceites lubricantes para compresores con lo que mejora la protección contra el desgaste y la eficiencia del sistema. Dentro de esta gama se ha desarrollado el primer aceite de compresor sintético con tecnología GTL (gas-líquido) en la industria. [42]

Figura 34. Lubricante Shell corena



FUENTE: CHRISTIAN HUGHES

Tabla 11. Características Shell Corena

SHELL CORENA S4 R32	
DESEMPEÑO	Resistente a degradación térmica y química Resiste a la formación de depósitos en componentes rotativos.
EFICIENCIA	Proporciona intervalos de mantenimiento de aceite de 10000 horas cuando opera a de más de 100°C. Con temperaturas por debajo a 100°C puede extenderse hasta a 12000 horas para ciertas condiciones.
APLICACIONES	Para compresores de aire de tornillo rotativo o de paletas de una o dos etapas.
GRADO ISO	32
VISCOSIDAD CINEMÁTICA	40°C → 32 cSt 100°C → 5.9 cSt
ÍNDICE DE VISCOSIDAD	130
DENSIDAD	830 Kg/m ³
PUNTO DE INFLAMACIÓN	218°C
PUNTO DE FLUIDEZ	-48°C

FUENTE: AUTOR

- **SHELL DIALA:** Aceites lubricantes para transformadores, que ayudan a proteger los equipos y asegurar su eficiente funcionamiento. [42]

Figura 35. Lubricantes Shell diala



FUENTE: SHELL MÉXICO

Tabla 12. Característica Shell Diala

SHELL DIALA S4 ZX-I	
PROTECCIÓN TRANSFORMADOR	No es corrosivo para el cobre, sin la necesidad de pasivación ni otros aditivos.
EFICIENCIA	Posee propiedades viscosimétricas de baja temperatura las cuales aseguran la transferencia de calor adecuada, incluso de muy bajas temperaturas de arranque
APLICACIONES	Para transformadores y en la industria.
APARIENCIA EN EL ACEITE	Claro, libre de sedimentos y materia en suspensión
VISCOSIDAD CINEMÁTICA	40°C → 9.9 cSt -30°C → 523 cSt
DENSIDAD	805 kg/m ³
PUNTO DE INFLAMACIÓN	191°C
PUNTO DE FLUIDEZ	-42°C
VOLTAJE RUPTURA SIN TRATAR	70Kv
VOLTAJE RUPTURA DESPUÉS TRATAR	78kv

FUENTE: AUTOR

- **SHELL GADUS:** Grasas lubricantes de larga duración, que ofrecen mejor protección frente al desgaste. [42]

Figura 36. Lubricante Shell gadus



FUENTE: LUBRITEC

Tabla 13. Características Shell Gadus

SHELL GADUS S2 V100 3	
RENDIMIENTO	Soporta temperaturas hasta de 130°C
RESISTENCIA	A la formación de depósitos causados por la oxidación a altas temperaturas de funcionamiento.
APLICACIONES	Rodamientos normalmente lubricados con grasa, rodamientos del motor eléctrico, bombas de agua.
CONSISTENCIA NLGI	32
VISCOSIDAD CINEMÁTICA	40°C → 100 cSt 100°C → 11 cSt
TIPO DE JABÓN	Hidroxiestearato de Litio
TIPO ACEITE BASE	Mineral
PUNTO DE GOTEÓ	180°C

FUENTE: AUTOR

- **SHELL MORLINA:** Aceites lubricantes circulantes para rodamientos y cojinetes. Para este tipo de piezas, la lubricación uniforme es vital. [42]

Figura 37. Lubricante Shell morlina



FUENTE: SCL-LUBRICANTS

Tabla 14. Características Shell Morlina

SHELL MORLINA S1 B220	
PROTECCIÓN MOTOR	Características de separación de agua que ayudan a asegurar que las películas críticas de aceite se mantienen entre las partes altamente cargadas
EFICIENCIA	Se mezclan con bases de alta calidad, refinados con solventes que promueven la buena separación del agua y la liberación de aire.
APLICACIONES	Maquina con sistema de circulación, rodamientos lubricados con aceite, sistemas de engranajes industriales
GRADO ISO	220
VISCOSIDAD CINEMÁTICA	40°C → 220 cSt 100°C → 19.2 cSt
ÍNDICE DE VISCOSIDAD	95
DENSIDAD	887 kg/m ³
PUNTO DE INFLAMACIÓN	249°C
PUNTO DE CONGELACIÓN	-6°C

FUENTE: AUTOR

- **SHELL MYSELLA S7N ULTRA:** Aceites lubricantes para motores de gas de última generación. [42]

Figura 38. Lubricante Shell mysella



FUENTE: EUROSMAZ

- **SHELL OMALA:** Aceites lubricantes para engranes. [42]

Figura 39. Lubricante Shell omala



FUENTE: LUBRITEC

- **SHELL RISELLA X:** Aceites lubricantes de procesos. Son aceites blancos técnicos basados en la tecnología GTL de licuefacción de gas, con alto rendimiento en aplicaciones. [42]

Figura 40. Lubricante Shell risella



FUENTE: INDIAMART

- **SHELL SPIRAX:** Aceites lubricantes para ejes y transmisiones. Con esta línea se podrá mantener las transmisiones protegidas y con un funcionamiento eficiente. [42]

Figura 41. Lubricante Shell spirax



FUENTE: DETAILING

- **SHELL TELLUS:** Fluido hidráulico con nuevas tecnologías sintéticas para lograr una vida útil de los productos mayor. [42]

Figura 42. Lubricante Shell tellus



FUENTE: LUBRITEC

- **SHELL TONNA:** Aceites lubricantes para guías deslizantes. Diseñados especialmente para lubricar platinas, mesas y mecanismos de avance de máquinas herramientas. Este aceite cuenta con excelentes propiedades de fricción, buena adherencia y excelente rendimiento antidesgaste. [42]

Figura 43. Lubricante Shell Tonna



FUENTE: LUBRITEC

- **SHELL TURBO:** Aceites lubricantes para turbinas. [42]

Figura 44. Lubricante Shell turbo



FUENTE: SCL-LUBRICANTS

5.1.1.2. MOBIL

Mobil es una de las marcas líderes en el sector de los lubricantes para motor e industriales tras más de 90 años de trayectoria.

Mobil cuenta con lubricantes sintéticos y minerales, y con diversos grados de penetración NLGI y viscosidad. Están especialmente diseñados para proteger los equipos, proveer intervalos de lubricación más largos y permitir una operación segura en temperaturas altas o bajas, ambientales húmedos y con cargas altas. [42]

- **SINTÉTICOS MOBIL SHC:** Es una línea diseñada de lubricantes sintéticos para proteger equipos que funcionan en condiciones severas. Son utilizados para compresores. [42]

Figura 45. Lubricantes Mobil SHC



FUENTE: RYRLUBRICANTES

- **GRASAS INDUSTRIALES:** Especialmente diseñada para proveer un desempeño equilibrado en condiciones extremas. [42]

Figura 46. Grasas industriales



FUENTE: RYRLUBRICANTES

- **TERESSTIC SEERIES:** Están formulados con aceites base cuidadosamente seleccionados y aditivos altamente efectivos, incluyendo inhibidores de oxidación y de herrumbre y agentes antiespumantes. [42]

Figura 47. Lubricante Mobil Teresstic



FUENTE: RYRLUBRICANTES

- **MOBIL DTE:** Lubricantes de rendimiento supremo para sistemas de circulación diseñados para aplicaciones que incluyen equipos de turbinas de vapor e hidroturbinas. [42]

Figura 48. Lubricantes Mobil DTE



FUENTE: COMPAÑÍA DE LUBRICANTES

- **MOBIL VACUOLINE:** Es una serie de aceites de extra alta calidad para sistemas circulantes fundamentalmente destinado para la lubricación de cojinetes lisos. [42]

Figura 49. Lubricantes Mobil vacuoline



FUENTE: RYRLUBRICANTES

5.1.1.3. PETRONAS

Los lubricantes industriales de Petronas destacan por su alto rendimiento y protección de los equipos. Gracias a ellos se consigue reducir las interrupciones en los servicios, mejorando la fiabilidad de estos.

Entre las diferentes gamas de lubricantes Petronas de alto rendimiento, encontramos:

- **PETRONA ATO:** Aceites lubricantes para herramientas neumáticas. Formulados con aceites base minerales de alta calidad y aditivos avanzados antioxidantes, antiherrumbe, antidesgaste y antiespumantes. Ofrecen propiedades de humectación de los metales, antidesgaste, adhesividad y control de la bruma y la emulsión. [42]

Figura 50. Lubricantes Petrona ato



FUENTE: NEUMA

- **PETRONAS CHAINSAW:** Aceites lubricantes para motosierras, desarrollado para cadenas de corte y espadines. [42]

Figura 51. Lubricantes Petronas chainsaw



FUENTE: PLI PETRONAS

- **PETRONAS CIRCULA:** Aceites circulantes con una alta protección antidesgaste. Formulados con aceites base mineral seleccionados de alta calidad y mejorados con aditivos avanzados antidesgaste. [42]

Figura 52. Lubricantes Petronas circula



FUENTE: LUBRITEC

- **PETRONAS CIRCULA MILL:** Aceites circulantes de alto rendimiento. Están especialmente desarrollados para equipos de acerías, proporcionan una excelente demulsibilidad del agua y estabilidad de la espuma. [42]
- **PETRONAS CIRCULA MILL NT:** Aceites circulantes antidesgaste de alto rendimiento Premium. Especialmente desarrollados para el sistema de acerías sin torsión de Morgan. Aplicables en cojinetes antifricción y de deslizamiento con cargas pesadas, a altas velocidades y temperaturas. [42]
- **PETRONAS CIRCULA PM:** En este caso, estos aceites de alto rendimiento, están especialmente desarrollados para los sistemas de circulación de máquinas de papel. [42]
- **PETRONA CIRCULA SYN:** Aceites circulantes antidesgaste de rendimiento superior. Desarrollados especialmente para rodamientos de cilindros secadores de máquinas de papel y sistemas de engranajes de carga ligera. [42]
- **PETRONAS COMPRESOR A:** Diseñados para compresores de aire de alto rendimiento, con aceites base minerales de alta calidad seleccionados y mejorados con aditivos antioxidantes. [42]

Figura 53. Lubricantes Petronas compresor A



FUENTE: INDIAMART

- **PETRONAS COMPRESOR R:** Diseñados para ser utilizados en compresores de refrigeración, donde puede producirse el contacto accidental del aceite con los alimentos. [42]
- **PETRONAS GEAR:** Desarrollados para turbinas de viento y diversos tipos de engranajes industriales, con aceite base sintético de alto índice de viscosidad y mejorados con aditivos avanzados de extrema presión. [42]

5.1.1.4. REPSOL

Repsol es una de las marcas líderes a nivel internacional en lubricantes y combustibles. Desarrollan sus productos con las más avanzadas tecnologías y alta calidad para adaptarse a las necesidades de cada aplicación. [42]

- **MOTORES HIDRÁULICOS:** Especialmente diseñados para su utilización en circuitos hidráulicos, cuentan con propiedades antidesgaste, resistencia a la oxidación, protección contra la corrosión, separación de agua. [42]

Figura 54. Lubricantes Repsol motores hidráulicos



FUENTE: REPSOL MÉXICO

- **MOTORES DE CIRCULACIÓN:** Especialmente diseñada para la lubricación por circulación de cojinetes. Elaborados a partir de bases parafínicas, que les confieren buena resistencia a la oxidación y excelente desemulsibilidad. [42]
- **PARA ENGRANAJES:** Diseñados para aplicaciones en engranajes industriales con elevados requerimientos de transmisión de carga. Incorporan bases de alta calidad y aditivos que mejoran sus propiedades antiherrumbre, capacidad antiespumante y resistencia a la oxidación. [42]
- **PARA TURBINAS:** Protegen los equipos de la corrosión, el desgaste y minimizan la acumulación de depósitos y la formación de barnices. [42]

Figura 55. Lubricante Repsol para turbinas



FUENTE: LUBRICANTES EN OFERTA

- **PARA COMPRESORES:** Incluye aceites parafínicos altamente refinados y aceites de tecnología sintética de larga duración. [42]
- **PARA MAQUINARIA FRIGORÍFICA:** Diseñados para aplicaciones de frío doméstico e industrial. Tienen base mineral o sintética, y son compatibles con los principales gases refrigerantes. [42]
- **PARA TRANSMISIÓN DE CALOR:** Permiten una rápida transmisión de calor, generando una alta eficiencia energética. Además, tienen larga duración, debido a su resistencia a la degradación y formación de lodos. [42]
- **ACEITES DIELECTRICOS:** Para emplearlos como medio aislante en equipos eléctricos como transformadores. Por su calidad, han sido validados y utilizados ampliamente por diversas compañías eléctricas. [42]
- **PARA ENGRASE GENERAL:** Se presentan en diferentes grados de viscosidad y tienen alta untuosidad. Además, proporcionan alta protección y son excepcionales para aplicaciones de engrase a pérdida. [42]

Figura 56. Lubricantes Repsol grasas



FUENTE: REPSOL

- **PARA APLICACIONES ESPECIALES:** Específicamente pensados para la industria del metal. [42]

5.1.1.5. SKF

- **GRASAS SKF:** Podemos encontrar gradas para de aplicación en industria de la automoción, para grandes cargas y presión extrema, grasa biodegradable para rodamientos, grasas de alta viscosidad, grasas de baja fricción. [42]

Figura 57. Lubricantes SKF



FUENTE: SKF

- **ACEITES LUBRICANTES SKF:** Entre los que encontramos lubricantes compatibles con alimentos o aceites para cadenas. [42]

Figura 58. Lubricantes SKF



FUENTE: SKF

5.1.2. LUBRICANTES VIABLES EN LA INDUSTRIA

Para poder determinar si un lubricante es viable o no, se deben considerar varios aspectos al momento de realizar una correcta selección. Estos aspectos dependen de las especificaciones del fabricante del equipo que por lo general vienen estipuladas en los manuales de estos mismos, también es de suma importancia establecer los parámetros de trabajo ya que si se instala el equipo en una región donde la temperatura ambiente es superior a la temperatura de operación no es recomendable utilizar el lubricante indicado por el fabricante, esto podría traer consecuencias en la vida útil del lubricante.

Otro aspecto a tener en cuenta son los sistemas de carga de impacto los cuales deben utilizar aceite EP (extrema presión) para engranajes, de igual manera si presentan un alto deslizamiento como, por ejemplo, un sinfín corona requieren lubricantes con aditivos.

Por los aspectos mencionados anteriormente es prácticamente imposible poder determinar cuál lubricante es el más viable para evitar el desgaste de piezas en la industria, a lo cual como se mencionó anteriormente se da escogencia de estos mismo dependiendo de los equipos y factores externos en los que se van a instalar estos mismos.

5.1.3. MÉTODOS DE MANTENIMIENTO

Consiste en una serie de técnicas analíticas y mediciones realizadas con el fin de evaluar el estado de la máquina. [42]

5.1.3.1. ANÁLISIS DE VIBRACIONES

Se refiere al proceso de medir los niveles y frecuencias de vibración de la maquinaria industrial y usar esa información para determinar la “salud” de la máquina con sus componentes.

El análisis de vibraciones industriales es una herramienta utilizada para identificar, predecir y prevenir fallas en maquinaria rotativa. La adopción de esta tecnología mejora la confiabilidad de la máquina, mejora la eficiencia de la máquina y reduce el tiempo de inactividad, elimina fallas mecánicas o eléctricas.

Las técnicas de análisis de vibraciones ahora se utilizan en todas las industrias del mundo para detectar fallas en las máquinas, planificar las reparaciones de las máquinas y mantenerlas funcionando sin problemas durante el mayor tiempo posible.

Las vibraciones se producen cuando funcionan las maquinas. Estas vibraciones se pueden medir con un acelerómetro. Esto crea una señal de voltaje que es proporcional a la cantidad de vibración y la frecuencia de la vibración, o el número de veces que ocurre la vibración por segundo o minuto.

Esta señal de voltaje del acelerómetro está conectada a un colector de datos, que registra la señal ya sea como una forma de onda de tiempo (amplitud vs. tiempo), como una Transformada Rápida de Fourier (amplitud vs. frecuencia), o como ambas.

Los sensores están diseñados para resistir los duros entornos industriales y proporcionar mediciones críticas año tras año.

¿Por qué debemos aplicar el análisis de vibraciones?

Los datos analizados se utilizan para determinar la salud de la máquina e identificar cualquier problema inminente en la maquinaria, como desalineación, desequilibrio, un problema de cojinetes o lubricación, piezas deformadas, entre otras. [43]

5.1.3.2. TERMOGRAFÍA INFRARROJA

La medición de la temperatura se ha abordado como una cuestión importante cuando se genera calor por fricción o resistencia eléctrica. El aumento de la temperatura es el mayor enemigo de los aceites lubricantes y los componentes de transmisión de potencia, pero hoy en día, por medio de tecnología avanzada podemos utilizar la temperatura como instrumento de diagnóstico [44]

Las imágenes infrarrojas son producidas por el calor, y las partes más calientes muestran áreas problemáticas donde se está desgastando o donde hay una resistencia excesiva en el circuito eléctrico.

A través de la termografía infrarroja, se puede detectar puntos calientes en máquinas rotativas debido a:

- Sobrecalentamiento en rodamientos
- Sobrecarga en el eje de rotación
- Sistemas de refrigeración bloqueados
- Desgaste mecánico
- Conexiones sueltas o corroídas [44]

Figura 59. Termografía Infrarroja



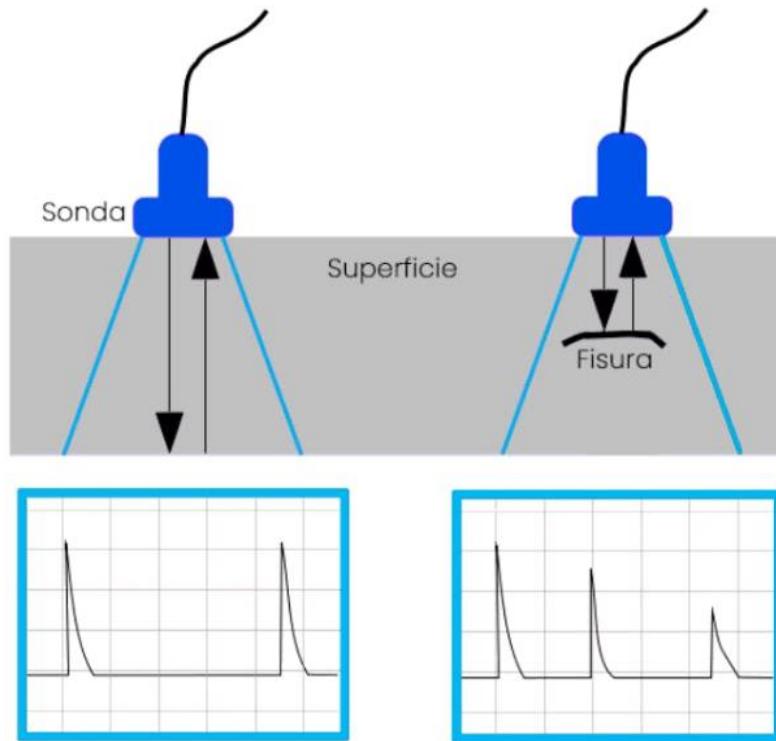
FUENTE: TRACTIAN

5.1.3.3. ULTRASONIDO

La prueba por ultrasonido es un método no destructivo que se utiliza principalmente para detectar bajas vibraciones, fugas y ruidos de rodamientos que emiten ondas ultrasónicas. Las frecuencias, o los tonos, que se utilizan para los ensayos por ultrasonidos son muchas veces superiores al límite de la audición humana, normalmente en el rango de 500 KHz a 20 MHz.

Este enfoque es muy eficaz para identificar los problemas iniciales en los elementos de los rodamientos, es rápido y económico y proporciona un diagnóstico primario para priorizar el análisis posterior utilizando otras técnicas, como el análisis de vibraciones. [44]

Figura 60. Ultrasonido



FUENTE: TRACTIAN

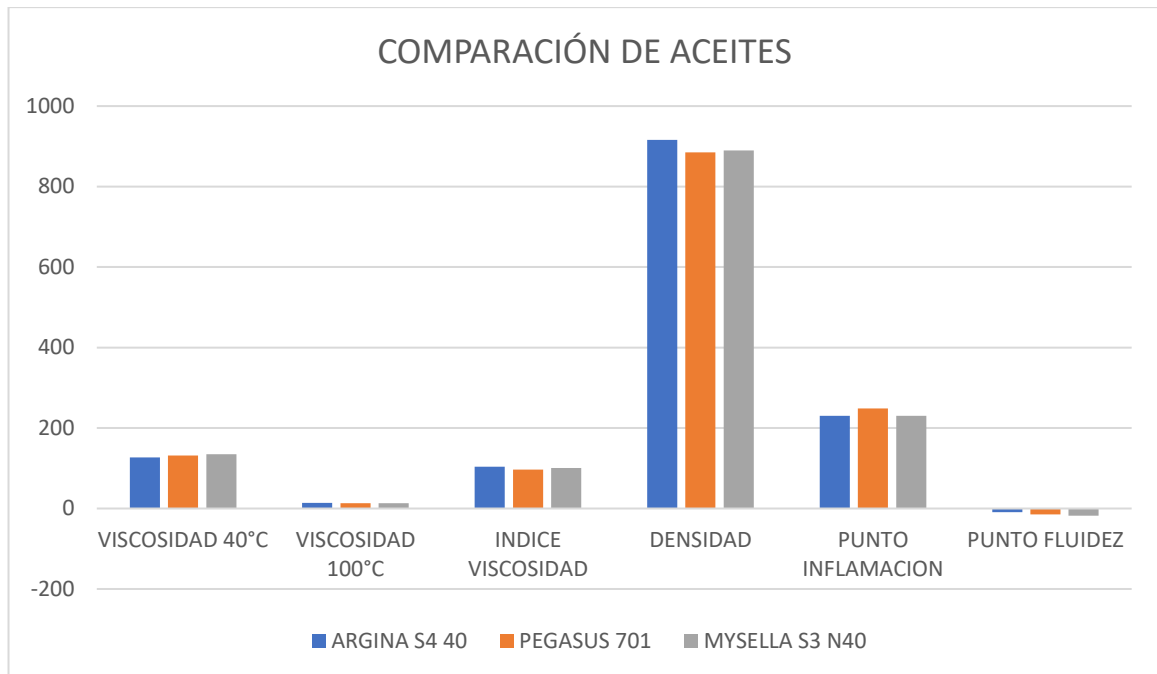
Del anexo 1 seleccionamos 3 aceites los cuales tienen el mismo grado SAE como se evidencia en la [tabla 15](#)

Tabla 15. Comparación aceites

	ARGINA S4 40	PEGASUS 701	MYSELLA S3 N40
GRADO SAE	40	40	40
VISCOSIDAD CINEMÁTICA 40°C	127 cSt	132 cSt	135cSt
VISCOSIDAD CINEMÁTICA 100°C	13.7cSt	13.5 cSt	13.5cSt
ÍNDICE VISCOSIDAD	104	97	101
DENSIDAD	916 kg/m3	885 kg/m3	890 kg/m3
PUNTO INFLAMACIÓN	230°C	249°C	230°C
PUNTO FLUIDEZ	(-9°C)	(-15°C)	(-18°C)

FUENTE: AUTOR

Gráfica 1. Comparación de aceites



FUENTE: AUTOR

A partir de la tabla 15 sin tener en cuenta las condiciones operacionales a las que se instaló el equipo se concluye que el aceite PEGASUS 701 de la marca MOBIL presenta mejores características a diferencia de los demás aceites analizados. Se tiene que el punto de inflamación del aceite PEGASUS 701 soporta temperaturas superiores a 240°C lo cual proporciona un gran margen de temperatura de operación del equipo en que se vaya a utilizar.

Otra característica que se resalta es la viscosidad a 100°C la cual es relativamente baja y esto influye a que no se presente demasiada resistencia al momento de fluir el aceite.

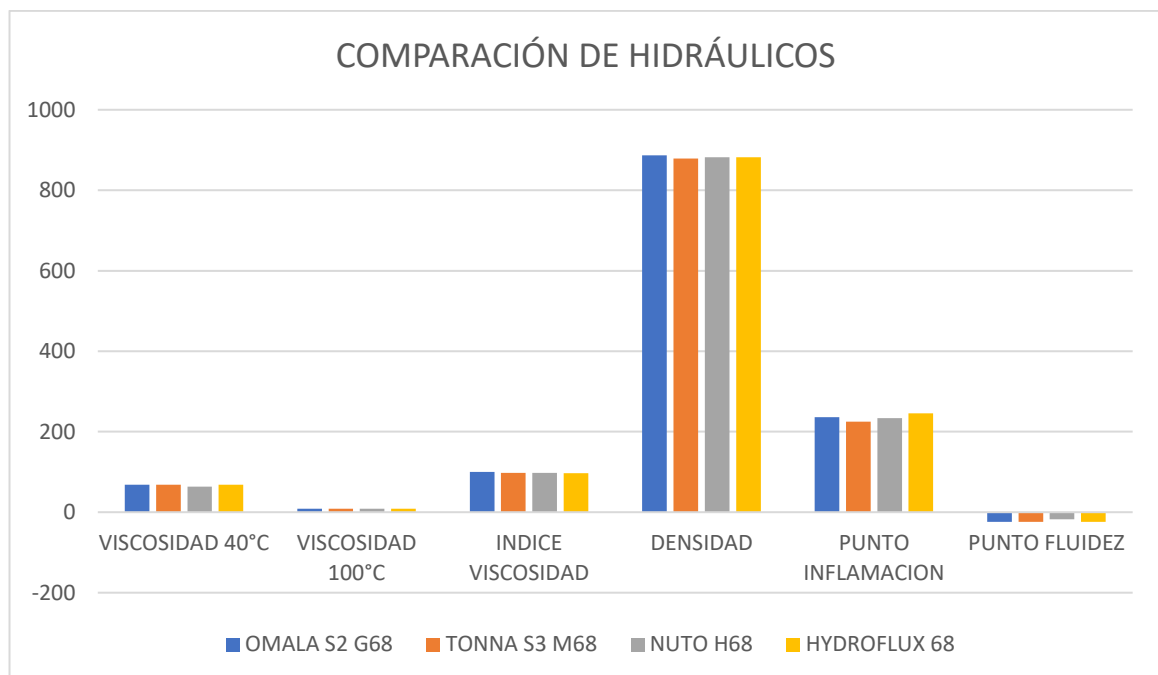
Del anexo 1 seleccionamos 4 hidráulicos los cuales poseen el mismo grado ISO como se evidencia en la [tabla 16](#).

Tabla 16. Comparación hidráulicos

	OMALA S2 G68	TONNA S3 M68	NUTO H68	HYDROFLUX 68
GRADO ISO	68	68	68	68
VISCOSIDAD CINEMÁTICA 40°C	68cSt	68cSt	63.3cSt	63.3cSt
VISCOSIDAD CINEMÁTICA 100°C	8.7cSt	8.6cSt	8.3cSt	8.6cSt
ÍNDICE VISCOSIDAD	100	98	98	97
DENSIDAD	887 kg/m3	879 kg/m3	882 kg/m3	882 kg/m3
PUNTO INFLAMACIÓN	236°C	225°C	234°C	246°C
PUNTO FLUIDEZ	(-24°C)	(-24°C)	(-18°C)	(-24°C)

FUENTE: AUTOR

Gráfica 2. Comparación de hidráulicos



FUENTE: AUTOR

Para los hidráulicos analizados en la tabla 16 se concluyó que las diferencias existentes entre ellos son muy mínimas por lo cual cualquiera de los hidráulicos mencionados se pueden escoger a base de criterio del jefe de mantenimiento o especificaciones puntuales del equipo.

6. CUARTO CAPITULO

6.1. OBJETIVO 3

6.1.1. RECOMENDACIONES USO DE LOS LUBRICANTES

Una de las cosas más importantes para cualquier propietario de una máquina es que el aceite es un fluido vital para el motor o equipo giratorio, ya que una lubricación adecuada puede evitar problemas importantes o malos funcionamientos del motor.

Mantener el motor en las mejores condiciones es uno de los beneficios más importantes de los aceites y grasas, por lo que a continuación se propondrán unos consejos para lubricación adecuado de un motor.

- No exceder los intervalos de cambio de aceite recomendado, ya que el aceite perderá sus propiedades y acumulará suficientes partículas de suciedad las cuales obstruirán los filtros, lo cual posiblemente causen desgaste y daños en las partes metálicas del motor.
- Revisar periódicamente que el nivel de aceite sea aceptable y no se queme, ya que esto indica que se requiere un cambio de aceite de emergencia antes de que genere consecuencias fatales para el motor.
- Elegir el tipo de aceite adecuado para cada motor, la mayoría de lubricantes contienen aditivos que se encargan de diferentes funciones, las cuales pueden servir de detergentes, dispersantes, reductores de fricción o agentes antidesgaste, por lo que se debe elegir una variante que lubrique correctamente el motor.
- Aunque en muchas situaciones se dice que los aceites son compatibles, es mejor no mezclar productos de diferentes marcas, aunque sean de la misma naturaleza, ya que es mejor usar una sola marca y seguir las recomendaciones del fabricante. Los aceites tienen aditivos añadidos y podemos buscar un producto que tenga los químicos para el equipo funcione correctamente.
- La elección del lubricante debe ser el recomendado por el fabricante o por el encargado del mantenimiento del equipo. Tener en cuenta que no se puede guiar por demás personas las cuales recomiendan algún lubricante ya que en todos los equipos los rendimientos de estos mismo pueden llegar a ser diferentes.

6.1.2. RECOMENDACIONES COMO ALMACENAR LOS LUBRICANTES

Los contaminantes y las temperaturas extremas pueden afectar la vida útil y las propiedades de almacenamiento de los lubricantes. Cuando se almacena tambores en los interiores, se debe asegurar de que queden guardados en lugares limpios y secos. Idealmente estos deben mantenerse a temperatura constante.

Al momento de asignar la instalación para el almacenamiento de los lubricantes se realizan las siguientes recomendaciones a tener en cuenta:

- Instalar repisas que protejan adecuadamente todos los contenedores y colocar baldes al lado. Estas áreas deben estar debidamente ventiladas.
- El área de almacenamiento no debe estar expuesta a contaminación externa como polvo, alta humedad o agua. Asegurarse de que el lugar donde se almacena el lubricante no esté conectado a desagües, alcantarillas o fuentes de agua.
- Utilizar un sistema de sellado apropiado para mayor protección. Designar áreas separadas en la instalación de inventario nuevo y existente para facilitar el majeo de los lubricantes.
- Asegurarse de que las etiquetas de los productos estén visibles para evitar el mal uso.
- Instalar señales de advertencia de no fumar y superficies antideslizantes para protecciones de los trabajadores.

7. CONCLUSIONES

El impacto de la lubricación en la prevención del desgaste de piezas en la industria se ha incrementado con el paso de los años, basado en la información recolectada se visualizó realmente el manejo de los lubricantes con respecto a su influencia en la fiabilidad y disponibilidad de piezas expuestas al desgaste.

Se debe tener en cuenta que la incorrecta selección del lubricante genera consecuencias catastróficas para el equipo al cuál se le éste realizando acciones de mantenimiento, una mala decisión de este tipo puede ocasionar desgaste y puede producir daños irreversibles.

Al momento de seleccionar un lubricante no debemos fijarnos en la cantidad de aditivos que contenga, debido a que esta cantidad no nos define la calidad del lubricante. La prioridad para la selección de este debe ser las especificaciones impartidas por el fabricante y para ciertos casos tener en cuenta factores externos como lo la temperatura ambiente.

Según el equipo a intervenir se debe planificar los mantenimientos a partir del lubricante utilizado ya que este debe ser reemplazado por tiempo de uso o por días de haberlo aplicado, dado que con el tiempo de estar sin uso estos se van decantando lo que a su vez incide para que sus propiedades se vayan perdiendo al punto que llegarán a producir daños si se utilizan de esa manera.

Se evidenció que el desgaste erosivo es el más peligroso al cual está expuesto una maquina como se evidencia en la [figura 26](#). Este tipo de desgaste se presenta por utilizar un aceite de mayor viscosidad que la requerida ya que eliminan la capa limite que esta adherida a las superficies metálicas de la máquina.

Una de las funciones que debe cumplir un lubricante es la de refrigerar por tal motivo es de suma importancia identificar los rangos de temperatura de trabajo, para realizar la correcta elección del lubricante ya que estos cuentan con un punto de inflamación que al momento de superarlo los lubricantes tienden a perder exponencialmente sus propiedades.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Guillermo Miró, “La influencia de la lubricación en los elementos de desgaste de maquinaria industrial”, abr. 21, 2021.
- [2] Infinitia industrial consulting, “Que es la tribología”, 2022.
- [3] M. I. en Felipe Díaz del Castillo Rodríguez, “TRIBOLOGÍA: FRICCIÓN, DESGASTE Y LUBRICACIÓN”.
- [4] Ing. Omar Linares O., “Tribología y Mantenimiento Proactivo”, mar. 11, 2022. <https://www.widman.biz/boletines/20.php> (consultado nov. 09, 2022).
- [5] Repositorio Universidad de Guayaquil, “TESINA 152”, Consultado: nov. 08, 2022. [En línea]. Available: <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/4483/1/TESINA%20152.pdf>
- [6] “ELEMENTOS DE MAQUINAS by Sistema Biblioteca SENA is licensed under a Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 3.0 Unported License. Creado a partir de la obra en”. [En línea]. Available: <http://biblioteca.sena.edu.co/>
- [7] Interlub SA de CV, “Tipos de lubricantes industriales básicos para una lubricación de alto desempeño”, oct. 2020.
- [8] H. Cao y. Meng, “Electrochemical effect on boundary lubrication of ZDDP additive blended in propylene carbonate / diethyl succinate”, *Tribol Int*, vol. 126, pp. 229–239, oct. 2018, doi: 10.1016/j.triboint.2018.05.025.
- [9] Z. Golmohammadi, A. Walvekar, y F. Sadeghi, “A 3D efficient finite element model to simulate rolling contact fatigue under high loading conditions”, *Tribol Int*, vol. 126, pp. 258–269, oct. 2018, doi: 10.1016/j.triboint.2018.05.029.
- [10] H. Torres, T. Vuchkov, M. Rodríguez Ripoll, y B. Prakash, “Tribological behaviour of MoS₂-based self-lubricating laser cladding for use in high temperature applications”, *Tribol Int*, vol. 126, pp. 153–165, oct. 2018, doi: 10.1016/j.triboint.2018.05.015.
- [11] C. Liu *et al.*, “Benchmarking of several material constitutive models for tribology, wear, and other mechanical deformation simulations of Ti6Al4V”, *J Mech Behav Biomed Mater*, vol. 97, pp. 126–137, sep. 2019, doi: 10.1016/j.jmbbm.2019.05.013.
- [12] I. M. N. Stead, D. G. Eckold, H. Clarke, D. Fennell, A. Tsolakis, y K. D. Dearn, “Towards a plastic engine: Low—temperature tribology of polymers in reciprocating sliding”, *Wear*, vol. 430–431, pp. 25–36, jul. 2019, doi: 10.1016/j.wear.2019.04.008.
- [13] Y. Xu *et al.*, “Influence of dimple shape on tribofilm formation and tribological properties of textured surfaces under full and starved lubrication”, *Tribol Int*, vol. 136, pp. 267–275, ago. 2019, doi: 10.1016/j.triboint.2019.03.047.
- [14] J. Song y G. Zhao, “A molecular dynamics study on water lubrication of PTFE sliding against copper”, *Tribol Int*, vol. 136, pp. 234–239, ago. 2019, doi: 10.1016/j.triboint.2019.03.070.
- [15] S. Zhu *et al.*, “Stochastic models for turbulent lubrication of bearing with rough surfaces”, *Tribol Int*, vol. 136, pp. 224–233, ago. 2019, doi: 10.1016/j.triboint.2019.03.063.

- [16] S. Li y D. Masse, "On the flash temperature under the starved lubrication condition of a line contact", *Tribol Int*, vol. 136, pp. 173–181, ago. 2019, doi: 10.1016/j.triboint.2019.03.038.
- [17] S. Li y A. Kahraman, "A scuffing model for spur gear contacts", *Mech Mach Theory*, vol. 156, feb. 2021, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.104161.
- [18] S. Li y A. Kolivand, "On the dynamics of a lubricated roller contact", *Mech Mach Theory*, vol. 153, nov. 2020, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.103959.
- [19] L. Qiu, S. Liu, X. Chen, y Z. Wang, "Lubrication and loading characteristics of cylindrical roller bearings with misalignment and roller modifications", *Tribol Int*, vol. 165, ene. 2022, doi: 10.1016/j.triboint.2021.107291.
- [20] G. Zhou, Y. Zhang, Z. Wang, y W. Pu, "Analysis of transient mixed elastohydrodynamic lubrication in planetary roller screw mechanism", *Tribol Int*, vol. 163, nov. 2021, doi: 10.1016/j.triboint.2021.107158.
- [21] Y. Liu, Z. Chen, Y. Li, y W. Zhai, "Dynamic investigation and alleviative measures for the skidding phenomenon of lubricated rolling bearing under light load", *Mech Syst Signal Process*, vol. 184, feb. 2022, doi: 10.1016/j.ymssp.2022.109685.
- [22] Z. Xie, Q. Xue, J. Wu, L. Gu, L. Wang, y B. Song, "Mixed-lubrication analysis of planetary roller screw", *Tribol Int*, vol. 140, dic. 2019, doi: 10.1016/j.triboint.2019.105883.
- [23] N. A. H. Tsuha y K. L. Cavalca, "Finite line contact stiffness under elastohydrodynamic lubrication considering linear and nonlinear force models", *Tribol Int*, vol. 146, jun. 2020, doi: 10.1016/j.triboint.2020.106219.
- [24] X. Chang *et al.*, "Study on hydrodynamic lubrication and friction reduction performance of spur gear with groove texture", *Tribol Int*, vol. 177, ene. 2023, doi: 10.1016/j.triboint.2022.107978.
- [25] X. Deng, J. Dong, S. Wang, B. Luo, H. Feng, y G. Zhang, "Reducer lubrication optimization with an optimization spiking neural P system", *Inf Sci (N Y)*, vol. 604, pp. 28–44, ago. 2022, doi: 10.1016/j.ins.2022.05.016.
- [26] J. Yang, Z. Feng, y X. Wang, "Oil injection lubrication analysis of a silent chain drive system", *Advances in Engineering Software*, vol. 172, oct. 2022, doi: 10.1016/j.advengsoft.2022.103210.
- [27] S. Ardah, F. J. Profito, y D. Dini, "An integrated finite volume framework for thermal elasto-hydrodynamic lubrication", *Tribol Int*, p. 107935, ene. 2022, doi: 10.1016/j.triboint.2022.107935.
- [28] S. S. Gamaniel, D. Dini, y L. Biancofiore, "The effect of fluid viscoelasticity in lubricated contacts in the presence of cavitation", *Tribol Int*, vol. 160, ago. 2021, doi: 10.1016/j.triboint.2021.107011.
- [29] C. Wang, J. Wu, Y. Du, y B. Lei, "Lubricating condition evaluation of the rotary compressor under high ambient temperature", *International Journal of Refrigeration*, vol. 118, pp. 220–229, oct. 2020, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2020.05.027.

- [30] H. Duan, J. Song, y Z. Wang, "Lubrication and fatigue life evaluation of high-speed cylindrical roller bearing under misalignment", *Math Probl Eng*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/2068924.
- [31] J. Zhang, S. Campen, J. Wong, y H. Spikes, "Oxidational wear in lubricated contacts – Or is it?", *Tribol Int*, vol. 165, ene. 2022, doi: 10.1016/j.triboint.2021.107287.
- [32] A. K. Kasar, C. J. Reeves, y P. L. Menezes, "The effect of particulate additive mixtures on the tribological performance of phosphonium-based ionic liquid lubricants", *Tribol Int*, vol. 165, ene. 2022, doi: 10.1016/j.triboint.2021.107300.
- [33] W. Liu, K. Wang, J. Song, L. Zhang, y. Liu, "Ultralow friction of basil-based gel in the presence of ethanol as a green lubricant for biomedical applications", *Tribol Int*, vol. 165, ene. 2022, doi: 10.1016/j.triboint.2021.107320.
- [34] M. K. A. Ali y H. Xianjun, "Exploring the lubrication mechanism of CeO₂ nanoparticles dispersed in engine oil by bis(2-ethylhexyl) phosphate as a novel antiwear additive", *Tribol Int*, vol. 165, ene. 2022, doi: 10.1016/j.triboint.2021.107321.
- [35] H. Ruan, Y. Zhang, Q. Wang, C. Wang, y T. Wang, "A novel earthworm-inspired smart lubrication material with self-healing function", *Tribol Int*, vol. 165, ene. 2022, doi: 10.1016/j.triboint.2021.107303.
- [36] X. Liu *et al.*, "Influence of interface liquid lubrication on triboelectrification of point contact friction pair", *Tribol Int*, vol. 165, ene. 2022, doi: 10.1016/j.triboint.2021.107323.
- [37] C. Putignano y A. Campanale, "Squeeze lubrication between soft solids: A numerical study", *Tribol Int*, vol. 176, dic. 2022, doi: 10.1016/j.triboint.2022.107824.
- [38] Guillermo Días Povedano, "La tribología y el análisis de los lubricantes industriales (parte 1)", feb. 08, 2021.
- [39] Sicma21, "LUBRICACION INDUSTRIAL: TODO LO QUE NECESITAS SABER", oct. 31, 2022. <https://www.sicma21.com/que-es-lubricacion-industrial/> (consultado nov. 14, 2022).
- [40] LUBRIBRAS, "IMPORTANCIA DE LA LUBRICACION EN MAQUINARIAS INDUSTRIALES", ago. 27, 2018. <https://www.lubribras.com.py/blog/importancia-lubricar-maquinarias-industriales> (consultado nov. 15, 2022).
- [41] C. R. Pedro Albarracin Aguillon, "TRIBOLOGÍA Y LUBRICACIÓN Dictado a: Servicio Nacional de Aprendizaje-SENA". [En línea]. Available: www.pedroalbarracinaguillon.com;
- [42] Mejores10, "MEJORES LUBRICANTES INDUSTRIALES", 2022. https://mejores10.es/mejores-lubricantes-industriales/#%C2%BFQue_tipos_de_lubricantes_industriales_existen (consultado nov. 17, 2022).
- [43] CENTRO DE FORMACION TECNICA PARA LA INDUSTRIA, "QUE ES Y COMO FUNCIONA EL ANALISIS DE VIBRACIONES", 2020. <https://www.cursosaula21.com/que-es-el-analisis-de-vibraciones/> (consultado nov. 17, 2022).

- [44] JEAN ROSALES, "LAS MEJORES TECNICAS DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO", abr. 2022, Consultado: nov. 17, 2022. [En línea]. Available: <https://traction.com/es/blog/tecnicas-de-mantenimiento-predictivo-utilizadas-en-la-industria>
- [45] J. R. LUIS TRISTANCHO Ingeniero Metalúrgico, M. Sc Profesor Auxiliar, y L. M. ADRIANA CAÑAS Ingeniero Metalúrgico, "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TRIBOMETRO DE CILINDROS CRUZADOS, BAJO NORMA TÉCNICA ASTM G83-96", *Scientia et Technica Año XIV*, vol. 38, 2008.
- [46] E. A. PÉREZ RUIZ Ingeniero Mecánico, P. Asistente, J. Garrido, y N. Graciano, "Temperature behavior of a mineral oil with castor oil like additive".
- [47] P. J. Blau, "Elevated-temperature tribology of metallic materials", *Tribol Int*, vol. 43, núm. 7, pp. 1203–1208, jul. 2010, doi: 10.1016/j.triboint.2010.01.003.
- [48] J. Antonio Echeverría *et al.*, "Artículo Original Evaluación de la gestión de la lubricación y los lubricantes Evaluation of lubrication and lubricants management Este documento posee una licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 internacional", vol. 22, núm. 3, pp. 121–126, 2019, [En línea]. Available: <http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu>
- [49] J. A. Echeverría *et al.*, "Artículo de investigación científica y tecnológica Gestión de riesgos en la lubricación y lubricantes de una flota de transporte Risk management in lubrication and lubricants of transport fleet Este documento posee una licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 internacional", *Ingeniería Mecánica*, vol. 23, núm. 2, pp. 603–1815, 2020, [En línea]. Available: <http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu>
- [50] G. González-Rey, "Artículo Original Influencia de la lubricación en la eficiencia de engranajes de tornillo sinfín Influence of oil lubrication on cylindrical worm gear efficiency", *Ingeniería Mecánica*, vol. 16, núm. 1, pp. 13–21, 2013, [En línea]. Available: <http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu>
- [51] I. I. Jose Manuel Arroyo-Fabars, D. I. Manuel Díaz-Velázquez, y D. I. Francisco Lafargue-Pérez, "Formulation of Lubricant Grease Using Like Dispersing Mean Jatropa Curcas L. Oil", pp. 92–99, 2014.
- [52] G. Capote, G. C. Mastrapa, y J. J. Olaya, "RESISTENCIA AL DESGASTE Y A LA CORROSIÓN DE RECUBRIMIENTOS DE DLC WEAR AND CORROSION RESISTANCE OF DLC COATINGS DEPOSITED ON AISI 304 AND AISI 1020 STEELS", 2015. [En línea]. Available: www.rlmm.org
- [53] M. Priest, "Optimisation of Piston Assembly Tribology for Automotive Applications".
- [54] L. I. Farfan-Cabrera, E. A. Gallardo-Hernández, M. Vite-Torres, y J. G. Godínez-Salcedo, "Influence of oxidation of automatic transmission fluids (ATFs) and sliding distance on friction coefficients of a wet clutch in the running-in stage", *Friction*, vol. 9, núm. 2, pp. 401–414, abr. 2021, doi: 10.1007/s40544-020-0406-z.
- [55] R.-R. Marco Antonio, O.-F. John Jairo, y T.-A. Vladimir Jesús, "Tribological Evaluation of Nbc and Vc Coatings on Steel AISI D2 Produced by the Thermo-Reactive Deposition Difusion Technique", núm. 2, pp. 287–294.

- [56] E. Pantaleón, D. K. Tanaka, y F. Bernardes, “ANALISE DAS VARIAÇÕES DO COEFICIENTE DE ATRITO E AS CORRELAÇÕES COM OS MECANISMOS DE DESGASTE ANALYSIS OF THE VARIATIONS OF THE COEFFICIENT OF FRICTION AND THE CORRELATIONS WITH THE WEAR MECHANISMS”, 2012.
- [57] J. C. Delgado, F. Saldivia, y S. Fygueroa, “Sistema para la determinación de la degradación del lubricante basado en el tratamiento digital de manchas de aceite de motores diesel Determination system of lubricant degradation based on digital image processing of oil spots in diesel engines”.
- [58] A. Dubois, M. Dubar, y L. Dubar, “Warm and hot upsetting sliding test: Tribology of metal processes at high temperature”, en *Procedia Engineering*, 2014, vol. 81, pp. 1964–1969. doi: 10.1016/j.proeng.2014.10.265.
- [59] F. Liu, G. Yi, W. Wang, Y. Shan, y J. Jia, “Tribological properties of NiCr-Al₂O₃ cermet-based composites with addition of multiple-lubricants at elevated temperatures”, *Tribol Int*, vol. 67, pp. 164–173, 2013, doi: 10.1016/j.triboint.2013.07.017.
- [60] Y. Xu, Z. Liu, K. D. Dearn, Y. Dong, T. You, y X. Hu, “Thermo-tribological behaviour of microgels for improved aqueous lubrication for steel/UHMWPE contact”, *Tribol Int*, vol. 130, pp. 63–73, feb. 2019, doi: 10.1016/j.triboint.2018.08.039.
- [61] X. Shi *et al.*, “Tribological behavior of TiAl matrix self-lubricating composites containing silver from 25 to 800°C”, *Wear*, vol. 303, núm. 1–2, pp. 486–494, jun. 2013, doi: 10.1016/j.wear.2013.04.009.
- [62] J. H. Ouyang, X. S. Liang, Z. G. Liu, Z. L. Yang, y J. Wang, “Friction and wear properties of hot-pressed NiCr-BaCr₂O₄ high temperature self-lubricating composites”, *Wear*, vol. 301, núm. 1–2, pp. 820–827, abr. 2013, doi: 10.1016/j.wear.2013.02.004.
- [63] X. Shi *et al.*, “Tribological behaviors of NiAl based self-lubricating composites containing different solid lubricants at elevated temperatures”, *Wear*, vol. 310, núm. 1–2, pp. 1–11, feb. 2014, doi: 10.1016/j.wear.2013.12.002.
- [64] A. Jackson y M. N. Webster, “The Role of Tribology Research in the Development of Advanced Lubricants”.
- [65] X. Shi *et al.*, “Synergetic lubricating effect of MoS₂ and Ti₃SiC₂ on tribological properties of NiAl matrix self-lubricating composites over a wide temperature range”, *Mater Des*, vol. 55, pp. 93–103, 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2013.09.072.
- [66] G. A. Holguín, M. F. Cano, A. Ruden, J. M. González, P. A. Jurado, y F. Sequeda, “ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS, TRIBOLÓGICAS Y SUPERFICIALES DE RECUBRIMIENTOS DUROS BASADOS EN TITANIO STUDY OF MECHANICAL, TRIBOLOGICAL AND SUPERFICIAL PROPERTIES OF HARD COATINGS BASED ON TITANIUM”, 2013. [En línea]. Available: www.rlmm.org
- [67] B. Li *et al.*, “Improved tribological performance of nickel based high temperature lubricating composites with addition of metallic oxides”, *Wear*, vol. 480–481, sep. 2021, doi: 10.1016/j.wear.2021.203938.

- [68] “El papel de la tribología en el mantenimiento de la industria 4.0”.
- [69] H. Liu, C. Zhu, Z. Sun, y C. Song, “Starved lubrication of a spur gear pair”, *Tribol Int*, vol. 94, pp. 52–60, feb. 2016, doi: 10.1016/j.triboint.2015.07.030.
- [70] M. K. A. Ali y H. Xianjun, “Exploring the lubrication mechanism of CeO₂ nanoparticles dispersed in engine oil by bis(2-ethylhexyl) phosphate as a novel antiwear additive”, *Tribol Int*, vol. 165, ene. 2022, doi: 10.1016/j.triboint.2021.107321.
- [71] A. K. Kasar, C. J. Reeves, y P. L. Menezes, “The effect of particulate additive mixtures on the tribological performance of phosphonium-based ionic liquid lubricants”, *Tribol Int*, vol. 165, ene. 2022, doi: 10.1016/j.triboint.2021.107300.
- [72] W. Liu, K. Wang, J. Song, L. Zhang, y. Liu, “Ultralow friction of basil-based gel in the presence of ethanol as a green lubricant for biomedical applications”, *Tribol Int*, vol. 165, ene. 2022, doi: 10.1016/j.triboint.2021.107320.
- [73] J. Zhang, S. Campen, J. Wong, y H. Spikes, “Oxidational wear in lubricated contacts – Or is it?”, *Tribol Int*, vol. 165, ene. 2022, doi: 10.1016/j.triboint.2021.107287.

ANEXOS

[Anexo1](#)