



"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PACHUCA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**“Diseño y construcción del sistema de lubricación para una
máquina tribológica”**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN
INGENIERÍA MECÁNICA PRESENTA:

Ing. Daniel Agustín Sánchez Ramos

DIRECTOR DE TESIS:

Dra. Marisa Moreno Ríos

SINODALES:

Dr. Luis Manuel Palacios Pineda

Dr. Edgar Ernesto Vera Cárdenas

96 páginas

Pachuca de Soto, Hidalgo a 12 de noviembre del 2020.





Instituto Tecnológico de Pachuca

"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Pachuca, Hidalgo, 18/Septiembre/2020
OFICIO No. DEPI-051-20

**C. ING. DANIEL AGUSTÍN SÁNCHEZ RAMOS
PRESENTE**

La que suscribe, jefa de la División de Estudios de Posgrado e Investigación, le comunica que los miembros de la Comisión Revisora, designada por el Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica para examinar su Tesis:

Diseño y construcción del sistema de
lubricación para una máquina tribológica

se han reunido, y después de intercambiar opiniones manifiestan su aprobación de la Tesis, en virtud que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes y, en consecuencia, se autoriza su impresión.

Sin otro particular por el momento, quedo de Usted.

ATENTAMENTE

El Hombre Alimenta el Ingenio en Contacto con la Ciencia

**M. A. C. ELODIA CLAUDIA GUERRERO ORTIZ
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

C.p. Archivo
ECGO/LMPP



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PACHUCA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN





Instituto Tecnológico de Pachuca

"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

División de Estudios de Posgrado e Investigación
Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica
ACTA

Siendo las 13:00 horas del 15 de febrero de 2020, reunidos en el aula S10, el Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica manifiesta la APROBACIÓN del tema de Tesis: Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica, con el siguiente contenido:

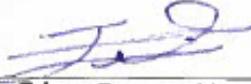
Resumen/Abstract
Nomenclatura
Contenido
Índice de cuadros, gráficas y figuras.
1. Introducción
2. Antecedentes
3. Marco Teórico
4. Materiales y métodos
5. Resultados y discusión
Conclusiones
Bibliografía
Apéndices

Para cubrir el requisito correspondiente a la Tesis para que el Ing. Daniel Agustín Sánchez Ramos obtenga el grado de Maestro en Ingeniería Mecánica, bajo la dirección de la Dra. Marisa Moreno Ríos, profesora de la Maestría en Ingeniería Mecánica de la División de Estudios de Posgrado e Investigación.

ATENTAMENTE

El Hombre Alimenta el Ingenio en Contacto con la Ciencia

EL CONSEJO DE POSGRADO

 _____ Dr. Edgar Ernesto Vera Cárdenas	 _____ Dra. Marisa Moreno Ríos	 _____ Dr. Luis Manuel Palacios Pineda
 _____ Dra. Enka Osiris Ávila Dávila	 _____ Dr. Ignacio Ramírez Vargas	 _____ Dr. Hugo Francisco Abundis Fong



Agradecimientos

A mi director de tesis Dra. Marisa Moreno Ríos por la dedicación y su valioso apoyo en la asesoría para el desarrollo de esta tesis.

Al Dr. Walter Tuckart por la estancia académica en La Universidad Nacional del Sur del departamento de ingeniería del grupo de tribología.

A mis sinodales Dr. Luis Manuel Palacios Pineda y Dr. Edgar Ernesto Vera Cárdenas por la atención y los importantes consejos para la mejora de esta tesis.

Al Dr. José Reyes Gasga, Técnico Pablo López del Instituto de Física de la UNAM y la Ing. Ana María García Mercado del IT Pachuca, por su apoyo en la realización de las pruebas.

A todos los Doctores del Consejo de posgrado por haber colaborado en mi formación profesional.

A mis padres, hermano y tíos por su apoyo incondicional y sus sabios consejos tanto en los momentos difíciles de mi vida estudiantil como personal.

A mis compañeros de maestría y amigos por el gran apoyo que me brindaron.

Se agradece al TecNM, Proyecto 6787.18-P por el apoyo para el desarrollo del presente trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada durante el periodo de estudios de maestría en el cual desarrolle la presente tesis de investigación.

Índice General.

Índice de figuras.	I
Índice de tablas	IV
Índice de ecuaciones	V
Simbología.....	VI
Resumen.	VII
Abstract.....	VIII
1. Introducción.....	1
2. Marco teórico.....	4
2.1 Teoría de lubricación	6
2.2 Sistemas de lubricación.	7
2.3 Tipos de Lubricación.	9
2.3.1 Lubricación Mixta.	10
2.3.2 Lubricación Elastohidrodinámica.	10
2.3.3 Lubricación Hidrodinámica.....	10
2.4 Tipos de Lubricantes.....	10
2.5 Viscosidad.....	11
2.6 Métodos experimentales o tribómetros.....	12
2.7 Estado del arte.....	13
3. Metodología.....	18
3.1 Identificación del problema.	20
3.2 Determinación de los requerimientos y expectativas del proyecto.....	20
3.3 Determinación de la importancia relativa de los requerimientos y expectativas del proyecto.	21
3.4 Estudio comparativo.	22
3.5 Traducir los requerimientos y expectativas en términos mensurables de ingeniería..	23
3.6 Establecimiento de metas de diseño.	24
3.7 Diseños conceptuales.....	26

3.7.1 Clasificación de los requerimientos del proyecto.	26
3.7.2 Funciones Técnicas.	27
3.7.3 Definición del modelo funcional.....	27
3.7.4 Generación de alternativas.	28
3.7.5 Evaluación de alternativas.....	29
3.8 Diseño a detalle.....	29
3.9 Modelo de manufactura.	30
3.10 Dibujos a detalle.	30
3.10.1 Despiece del módulo.	30
3.10.2 Depósito base	31
3.10.3 Depósito de la bomba.	31
3.10.4 Depósito proveedor.	31
3.10.5 Soporte.	31
3.10.6 Base del soporte.	31
3.10.7 Bomba.	32
4. Equipo tribológico.	35
4.1 Proceso de manufactura	35
4.2 Accesorios y proceso de filtrado.....	37
4.3 Montaje del módulo.	39
4.3.1 Revisión de los depósitos.	39
4.3.2 Revisión de las primeras pruebas con el módulo.	39
4.4 Costos de los componentes	43
5. Pruebas de funcionamiento.....	44
5.1 Materiales de probetas.	45
5.2 Resultados.....	47
5.2.1 Coeficiente de fricción.....	47
5.2.2 Desgaste de perno y disco.....	50
Conclusiones.....	52
Trabajos futuros.....	53

Referencias	54
Anexo 1. Dibujos de Detalle.....	57
Anexo 2. Análisis modal de la máquina perno sobre disco.....	63
Anexo 3. Plan de limpieza del módulo.....	75
Anexo 4. Trabajos realizados	77

Índice de figuras.

Figura 1. Función del lubricante [8].	6
Figura 2. Engrasador [9].	7
Figura 3. Engrase por anillo [10].	7
Figura 4. Engrase con baño de aceite [9].	8
Figura 5. Engrase por bomba de aceite [11].	8
Figura 6. Engrase por borboteo [9].	8
Figura 7. Lubricación a) perfecta, b) mixta, c) seca [12].	9
Figura 8. Curva de Stribeck [13].	9
Figura 9. Viscosidad en flujo laminar [14].	11
Figura 10. Esquema de equipo bola sobre plano, dónde se aprecia la manera de colocar el lubricante [15].	14
Figura 11. Lubricación en zona de contacto de una "micro máquina"[17].	14
Figura 12. Lubricante sobre zona de contacto en riel [18].	15
Figura 13. Sistema de lubricación a) Cámara, b) Módulo [18].	15
Figura 14. Prueba bloque sobre anillo lubricación solida [19].	16
Figura 15. Modelado de la pieza [21].	16
Figura 16. Simulación de contactos [21].	16
Figura 17. Lubricación estacionaria [22].	17
Figura 18. Lubricación a bordo [22].	17
Figura 19. Etapas de la Metodología [23].	18
Figura 20. Proceso de Metodología Q.F.D.	19
Figura 21. Despliegue de funciones de calidad.	25
Figura 22. Metodología de la fase conceptual [23].	26
Figura 23. Función de la Caja negra [23].	27
Figura 24. Caja Transparente [23].	27
Figura 25. Funciones del módulo de lubricación [23].	28
Figura 26. Matriz de alternativas.	28
Figura 27. Transición del modelo funcional al modelo de manufactura [23].	29
Figura 28. Despiece del módulo.	30
Figura 29. Altura de bombeo.	32

Figura 30. Máquina perno sobre disco.	35
Figura 31. Material P.L.A [32].	36
Figura 32. Impresora 3-D del laboratorio de posgrado del IT Pachuca.	36
Figura 33. Impresión de componente en 3D.....	37
Figura 34. Mangueras del depósito.	38
Figura 35. Malla [36].....	38
Figura 36. Piso del depósito base.	39
Figura 37. Caja de depósito base.	39
Figura 38. Primer montaje del módulo.	40
Figura 39. Módulo montado en el equipo para prueba.	41
Figura 40. Disco después de prueba lubricada.	41
Figura 41. Lubricación en pruebas.	41
Figura 42. Conexión de manguera base.....	42
Figura 43. Montaje final del módulo.	42
Figura 44. Montaje del módulo.	42
Figura 45. Prueba en operación con lubricación con agua.	44
Figura 46. Prueba en operación con lubricación con aceite.	44
Figura 47. Dimensiones del perno.	45
Figura 48. Dimensiones del disco.....	45
Figura 49. Formación de la gota de aceite.....	46
Figura 50. Formación de la gota de agua.	47
Figura 51. Prueba en seco 10 min.	48
Figura 52. Lubricación con aceite 10 min.	48
Figura 53. Lubricación con agua 10 min.....	49
Figura 54. Lubricación con aceite 30 min.	49
Figura 55. Lubricación con agua 30 min.	50
Figura 56. Desgaste del disco lubricación con aceite.	50
Figura 57. Desgaste del disco lubricación con agua.....	51
Figura 58. Desgaste del perno lubricación con aceite.	51
Figura 59. Desgaste del perno lubricación con agua.	51

Anexo 1. Dibujos de Detalle

Figura 1. Piso del depósito base.	57
Figura 2. Caja del depósito base.	58
Figura 3. Depósito de la bomba.	59
Figura 4. Soporte.	60
Figura 5. Depósito proveedor.	61
Figura 6. Base del soporte.	62

Anexo 2. Análisis modal de la máquina perno sobre disco

Figura 7. Malla del brazo en Ansys.	63
Figura 8. Fuerzas en el brazo.	63
Figura 9. Deformación con un disco.	64
Figura 10. Movimiento en el eje "Z" en la primera frecuencia 85.678[Hz].	64
Figura 11. Movimiento en el eje "Y" en la segunda frecuencia 89.067[Hz].	65
Figura 12. Deformación con dos discos.	65
Figura 13. Movimiento en el eje "Z" en la primera frecuencia 82.479[Hz].	66
Figura 14. Movimiento en el eje "Y" en la segunda frecuencia 90.167[Hz].	66
Figura 15. Deformación con tres discos.	67
Figura 16. Movimiento en el eje "Z" en la primera frecuencia 66.852 [Hz].	67
Figura 17. Movimiento en el eje "Y" en la segunda frecuencia 69.498 [Hz].	67
Figura 18. Deformación con cuatro discos.	68
Figura 19. Movimiento en el eje "Z" en la primera frecuencia 61.03 [Hz].	68
Figura 20. Movimiento en el eje "Y" en la segunda frecuencia 63.487 [Hz].	69
Figura 21. Deformación con cinco discos.	69
Figura 22. Movimiento en el eje "Z" en la primera frecuencia 56.4441 [Hz].	70
Figura 23. Movimiento en el eje "Y" en la segunda frecuencia 58.762 [Hz].	70
Figura 24. Deformación con seis discos.	71
Figura 25. Movimiento en el eje "Z" en la primera frecuencia 52.687 [Hz].	71
Figura 26. Movimiento en el eje "Y" en la segunda frecuencia 54.914 [Hz].	71
Figura 27. Deformación con siete discos.	72
Figura 28. Movimiento en el eje "Y" en la primera frecuencia 49.532 [Hz].	72

Figura 29. Movimiento en el eje "Y" en la segunda frecuencia 51.695 [Hz].....	73
Figura 30. Deformación con ocho discos.	73
Figura 31. Movimiento en el eje "Z" en la primera frecuencia 46.822 [Hz].....	74
Figura 32. Movimiento en el eje "Y" en la segunda frecuencia 48.943 [Hz].....	74

Anexo 3. Plan de limpieza del módulo

Figura 33. Paño limpiador.	75
Figura 34. Aire comprimido.	76
Figura 35. Limpiapipas.....	76

Índice de tablas.

Tabla 1. Importancia relativa.....	21
Tabla 2. Estudio comparativo.	23
Tabla 3. Tabla de términos mesurables.	24
Tabla 4. Evaluación de alternativas.....	29
Tabla 5. Tipos de aceites.	34
Tabla 6. Propiedades de la junta [30].	37
Tabla 7. Primeras pruebas.	40
Tabla 8. Costos.	43
Tabla 9. Pruebas para validación del módulo.....	44
Tabla 10. Propiedades de las probetas.....	46

Anexo 2. Análisis modal de la máquina perno sobre disco

Tabla 1. Frecuencias naturales con un disco.	64
Tabla 2. Frecuencias naturales con dos discos.	65
Tabla 3. Frecuencias naturales con tres discos.	66
Tabla 4. Frecuencias naturales con cuatro discos.....	68
Tabla 5. Frecuencias naturales con cinco discos.....	69
Tabla 6. Frecuencias naturales con seis discos.....	70
Tabla 7. Frecuencias naturales con siete discos.	72
Tabla 8. Frecuencias naturales con ocho discos.	73
Tabla 9. Velocidades que pueden causar resonancia.....	74

Índice de ecuaciones.

Ecuación 1	11
Ecuación 2	12
Ecuación 3	32
Ecuación 4	33
Ecuación 5	33

Simbología.

Símbolo.	Descripción.	Unidad.
μ	Coefficiente de fricción.	Adimensional
T	Esfuerzo cortante.	Pa
F	Fuerza.	N
A	Área.	M ²
γ	Peso específico.	N/m ²
ρ	Densidad.	Kg/m ²
Ra	Rugosidad media.	μm
ν	Viscosidad cinemática.	m ² /s
ρ	Densidad.	N/m ³
g	Gravedad.	m/s ²
Q	Caudal.	m ³ /s
γ	Peso específico.	N/m ³
η	Eficiencia de la bomba.	%
Pb	Potencia teórica.	W
Pr	Potencia de la bomba.	W

Resumen

En la actualidad hay diferentes tipos de máquinas tribológicas, algunas de estas no cuentan con un sistema o módulo para la realización de pruebas de desgaste lubricadas, debido a que los módulos para lubricar son muy costosos para adquirirlos y montarlos en la máquina, por lo que los usuarios optan por una lubricación de forma manual con la ayuda de técnicas rudimentarias, por ello es necesario diseñar e implementar el módulo de lubricación, con los requerimientos necesarios y deseados, junto con la teoría de desgaste, fricción y lubricación para su correcto uso y mantenimiento, de manera que se pueda analizar y estudiar la respuesta tribológica de materiales a diferentes condiciones y con diferentes tipos de aceites.

El diseño de dicho módulo se realizó mediante la metodología Quality Function Deployment (QFD) para el cumplimiento satisfactorio del proyecto, la manufactura se hizo mediante manufactura aditiva con una impresora 3-D, con ácido poliláctico (PLA) como materia prima. Con el módulo fabricado se realizó una serie de pruebas de desgaste para validar el funcionamiento y la eficiencia del mismo.

Palabras clave: Desgaste, Lubricación, Máquina tribológica, Módulo.

Abstract

Nowadays there are different types of tribological machines, some of these do not have a system or module to carry out lubricated wear tests, due the fact that the lubrication modules are very expensive to acquire and mount them on the machine, so the users use instead manual lubrication with the help of rudimentary techniques, because of this it is necessary to design and implement the lubrication module, with the desired and necessary requirements, together with the theory of friction, lubrication and wear for its correct use and maintenance, so that the tribological response of materials to different conditions and different types of oils can be studied.

This module was designed using the Quality Function Deployment (QFD) methodology for the satisfactory fulfillment of the project, The manufacturing was done through additive manufacturing with a 3-D printer, with polylactic acid (PLA) as raw material. With the manufactured module, a series of wear tests were carried out to validate the operation and efficiency.

Keywords: Lubrication, Module, Tribological machine, Wear.

1. Introducción

Las máquinas tribológicas replican el movimiento relativo que ocurre entre superficies en interacción esto permite caracterizar valores como el coeficiente de fricción, el tipo de desgaste que ha predominado, la presencia de partículas de desgaste en el fluido lubricante, etc.

Analizar mediante diferentes pruebas tribológicas los materiales de algún sistema mecánico, máquina o equipo permite mejorar su calidad, elegir materiales con mayor resistencia al desgaste y fricción, aumentar la vida útil, esto se ve reflejado en la reducción de costos de producción y mantenimiento, lo que genera a un ahorro económico tanto al productor como al consumidor.

En la actualidad la adquisición de equipos tribológicos nuevos no es costoso debido a los altos costos y a la amortización constante, por ello es indispensable dar impulso a la creatividad y desarrollo de tecnologías de origen nacional para la construcción de diferentes configuraciones de equipos que permitan abastecer los laboratorios que se dedican al estudio de fenómenos tribológicos.

En este trabajo se desarrolla la construcción de un módulo de lubricación, el cual se aplicó en una configuración de máquina tribológica llamada perno disco (ASTM G99-17), con este módulo será posible efectuar pruebas de desgaste con una lubricación controlada, con la construcción del módulo se logra el auto equipamiento del laboratorio de posgrado del ITP con un producto de calidad.

La estructura de esta tesis está conformada por cinco capítulos, a lo largo del capítulo II se presenta una introducción al tema de lubricación, tipos y sistemas, las configuraciones de las máquinas tribológicas y la aplicación de lubricantes para diversos estudios.

El capítulo III, describe la metodología usada desde la etapa de comprensión del problema hasta la generación de planos a detalle.

El capítulo IV, explica el proceso de fabricación del módulo y el montaje en la máquina tribológica.

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

El capítulo V, muestra las pruebas realizadas con el módulo de lubricación para validar su funcionamiento.

Planteamiento del problema

Realizar pruebas tribológicas en condiciones lubricadas es de vital importancia para el análisis de la respuesta de los materiales bajo esta condición. La aplicación de lubricante se puede realizar de forma manual o por medio de espátulas, brochas, goteros, etc., técnicas con las cuales el control en la cantidad y frecuencia es bajo. Esto radica en la importancia de diseñar e implementar un sistema automático de lubricación que se pueda adaptar a diversas configuraciones, en el que se tenga mayor control sobre la lubricación.

Justificación

Debido a la necesidad de realizar pruebas tribológicas en condiciones lubricadas, se diseñará un módulo capaz de lubricar con repetibilidad y control para simular condiciones más cercanas a los sistemas reales, que se pueda implementar en diversos equipos tribológicos, considerando las condiciones que se requieren en las pruebas experimentales para lograr un mayor control y repetibilidad.

Objetivo

Diseñar y construir un módulo de lubricación automático para la realización de pruebas tribológicas que permita repetibilidad y control de la lubricación.

Objetivos específicos

1. Determinar el proceso de fabricación para que el módulo sea ligero con la ayuda de la metodología Q.F.D.
2. Proveer a las pruebas tribológicas una lubricación controlada.
3. Establecer un mantenimiento sencillo para su larga duración.
4. Diseñar sin formas complejas para un mantenimiento sencillo.
5. Determinar cómo filtrar las partículas desprendidas del material analizado del aceite.

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

Hipótesis

Al terminar y optimizar el diseño del sistema de lubricación, los análisis y pruebas en la máquina tribológica podrán ser más eficientes debido a la lubricación que ofrecerá. Los estudios serán más cercanos a los sistemas de lubricación que se quieren estudiar.

2. Marco teórico

Antes del nacimiento de la tribología como ciencia, no se había generalizado la disminución de la fricción y el desgaste como prácticas cotidianas, se pensaba en el término lubricación o ingeniería de lubricación. Con la tribología como ciencia se estudia la fricción y sus efectos asociados como el desgaste, tratando de prevenirlos con mejores diseños y prácticas de lubricación que toman en cuenta los siguientes aspectos:

- El diseño.
- Los materiales de las superficies en contacto.
- El sistema de aplicación del lubricante.
- El medio circundante.
- Las condiciones de operación.

El conocimiento de la tribología es extremadamente importante en numerosas aplicaciones industriales donde se requiere un movimiento relativo, por ejemplo, en la industria automotriz, industria aérea, vías de ferrocarril, máquinas automatizadas, etc.

Con la lubricación se busca reducir el coeficiente de fricción y de desgaste en los elementos que están en movimiento relativo, de esta manera disminuir el consumo de energía requerido para desplazar el sistema, por ejemplo, en un carro de pasajeros se utiliza un tercio de la energía del combustible para superar la fricción en el motor, transmisión, neumáticos y frenos [1]. En la minería, donde los materiales de roca pesada se extraen, se hacen añicos y se transportan, en este trabajo en general el 40% del consumo de energía se destina a superar la fricción, las pérdidas de energía debidas al desgaste son aproximadamente la mitad de las originadas por la fricción, debido a que las pérdidas de energía relacionadas con el desgaste incluyen la energía utilizada para producir piezas nuevas para el reemplazo de las piezas desgastadas y el tiempo de inactividad de los equipos, el costo de las piezas de desgaste en la minería es del mismo orden que los costos de mantenimiento [1].

De la misma manera se deben analizar los estudios y avances relacionados con la lubricación para poder estar a la vanguardia con posibles modificaciones para el futuro como el estudio

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

de las nanopartículas en el aceite de lubricación el cual se centró en los efectos que estas tienen en el rendimiento tribológico, se analizó la influencia de esas partículas sobre la fricción y el desgaste, esta revisión facilita la comprensión fundamental de la lubricación y permite diseñar y desarrollar nano lubricantes con un rendimiento tribológico superior [2].

Esta ciencia debería ser aplicada prácticamente en todas las piezas en movimiento para analizar los tipos de fallas de los elementos que componen una máquina, algunas de ellas de suma importancia para la vida diaria, resulta muy importante anticiparse a la ocurrencia de fallas para que se puedan evitar la mayor cantidad de problemas indeseados [3], con la lubricación adecuada se pueden disminuir este porcentaje de fallas, y mejorar así la vida útil de la máquina.

Por ejemplo, en las chumaceras hidrodinámicas se puede presentar un desalineamiento entre el eje y la chumacera, afectando las condiciones de lubricación hidrodinámica, esto es causado por inexactitudes, por un mal montaje, mal maquinado, flexibilidad del eje, etcétera. Este problema genera un cambio en la presión máxima, reduciendo el espesor de la película del lubricante [4], ocasionando fuerzas en el eje afectando su vida útil y aumentando el consumo de energía, con un diseño adecuado considerando el ángulo de desalineamiento, se mejora la lubricación disminuyendo las fallas.

La interacción entre el pistón y la camisa representa el 38% de pérdidas total por fricción del motor [5], esto implica que un tercio de la energía del combustible se usa para superar la fricción del motor [1], analizando el aceite lubricante usado se pueden reconocer posibles causas de desgaste antes de que ocurran fallas mayores aumentando la vida útil de los componentes y del motor.

En el caso de un automóvil, el lubricante es de vital importancia para el automóvil ya que tiene varias funciones como crear una película fluida entre los componentes de carga como rodamientos, engranajes, pistones etc., formando una película química para evitar daño por el contacto entre superficies, produce enfriamiento y transporta los residuos de material fuera del sistema [6]. Aplicando nueva tecnología para reducir fricción las pérdidas se podrían reducir el consumo de energía un 18% en un plazo de 5-10 años y en un 61% en un plazo de 15-25 años [1], impactando así en un ahorro económico y de combustible, reduciendo las emisiones de CO₂.

2.1 Teoría de lubricación

El término lubricación se aplica a dos situaciones diferentes: lubricación sólida y lubricación con película fluida (líquida o gaseosa), un lubricante sólido es cualquier material utilizado como polvo sobre una superficie para proporcionar protección contra daños durante un movimiento relativo al reducir la fricción y el desgaste [7], los lubricantes sólidos se utilizan para aplicaciones en las que se produce cualquier contacto deslizante, por ejemplo, un rodamiento que funciona a altas cargas y bajas velocidades, la lubricación con película fluida es una película de fluido entre las superficies en movimiento evitando el contacto sólido-sólido, proporcionando una fricción y desgaste bajos como se muestra en la figura 1, el fluido puede ser líquido o gaseoso, incluso una gruesa capa de aire puede ser un buen método de lubricación [7].

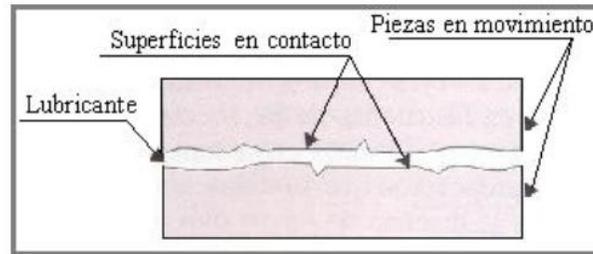


Figura 1. Función del lubricante [8].

Debido a las notorias pérdidas derivadas de la fricción presente en distintos tipos de configuraciones mecánicas nace la necesidad de implementar un agente que reduzca estas pérdidas, que aumente la vida útil de los elementos y prevenir el desgaste prematuro. Los lubricantes pueden disminuir la temperatura de funcionamiento de los elementos en movimiento, actúa como disipador de calor, evita el calentamiento al impedir el contacto directo entre componentes, por otra parte, absorbe el calor y lo disipa en intercambiadores cediéndolo a la atmósfera, el lubricante mejora el rendimiento de las configuraciones mecánicas en los que se suministra al reducir el consumo de energía ya sea eléctrica, energía mecánica, etc., ya que reduce el desgaste por fricción, abrasión y corrosión.

2.2 Sistemas de lubricación

Existen diferentes sistemas de distribución de lubricante dependiendo del desplazamiento del lubricante por el sistema o elemento generando una película a cada una de las piezas en movimiento y evitar el desgaste prematuro algunos ejemplos son:

- Engrasadores: son depósitos donde se coloca el lubricante para que llegue a los componentes de las máquinas en movimiento como se muestra en la figura 2. Pueden ser simples, de bola, de mecha etc. [9]



Figura 2. Engrasador [9].

- Engrase por anillo y cámara de grasa: en este sistema se sumerge parcialmente un anillo en un depósito de aceite el cual al girar se impregna de aceite, llevándolo a la parte superior del árbol donde se desliza a lo largo del casquillo [9], como se muestra en la figura 3.

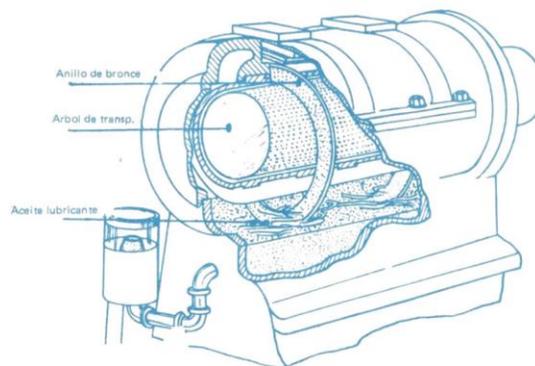


Figura 3. Engrase por anillo [10].

- Engrase con baño de aceite: en una caja cerrada con aceite conteniendo dentro el mecanismo que se va a engrasar, las piezas que giran van sumergidas parcialmente

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

en el aceite, al girar lo van recogiendo y comunicando a los otros elementos [9] como se muestra en la figura 4.

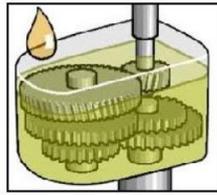


Figura 4. Engrase con baño de aceite [9].

- Engrase por bomba de aceite: en este sistema todo el lubricante que fluye por el mecanismo cae en un depósito de aceite en donde una bomba lo dispersa a todos los puntos que se deben lubricar, en algunos casos el aceite se puede filtrar [9]. Como se muestra en la figura 5.

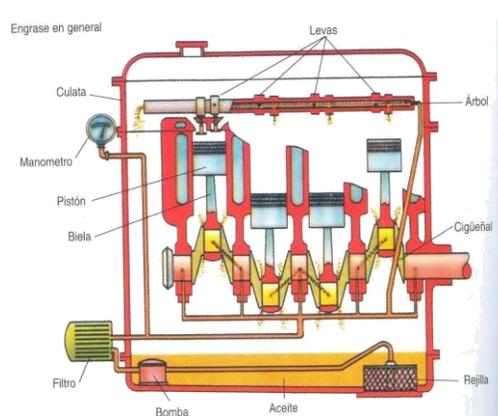


Figura 5. Engrase por bomba de aceite [11].

- Engrase por borboteo: una leva que gira recoge el aceite de un contenedor y lo introduce en el cojinete como se muestra en la figura 6.



Figura 6. Engrase por borboteo [9].

2.3 Tipos de Lubricación

Se pueden clasificar por la calidad del tipo de lubricación como se muestra en la figura 7.

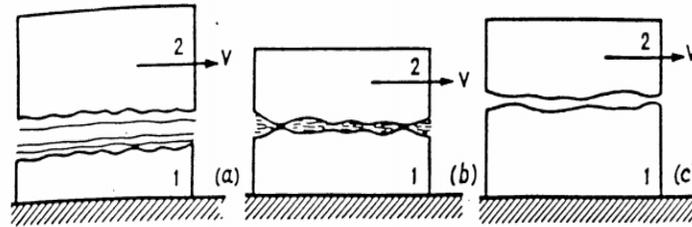


Figura 7. Lubricación a) perfecta, b) mixta, c) seca [12].

Lubricación perfecta: cuando ambas superficies están separadas por la intervención del lubricante y no se tocan durante el movimiento en ningún momento.

Lubricación mixta: cuando la película lubricante no impide totalmente el contacto entre componentes, de manera que en determinadas ocasiones ambos cuerpos chocan.

Lubricación límite o seca: cuando la película desaparece y los elementos mantienen un contacto permanente.

Para determinar la calidad y conocer el régimen de lubricación se puede ocupar la curva de Stribeck como se observa en la figura 8, la cual es una vista global de la variación del rozamiento en el rango completo de lubricación, incluyendo la lubricación hidrodinámica, mixta y límite. Se pueden predecir las transiciones desde la lubricación límite a la lubricación mixta y las transiciones desde la lubricación mixta a la lubricación elasto-hidrodinámica, por consiguiente, el régimen de lubricación en el que funciona un contacto determinado [13].

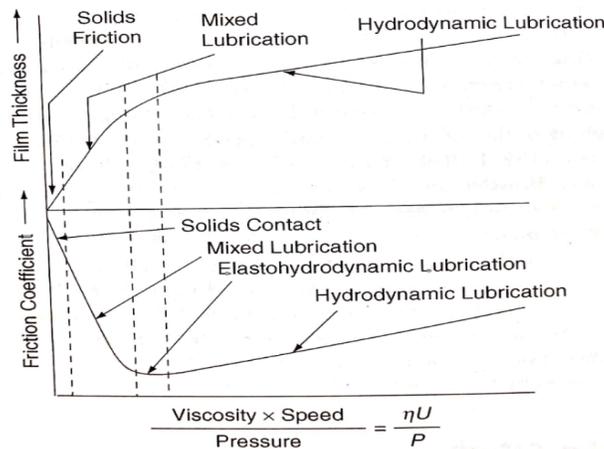


Figura 8. Curva de Stribeck [13].

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

En las máquinas es fundamental conocer el régimen de lubricación en el que trabajan para escoger la viscosidad adecuada del lubricante a usar, para evitar el desgaste y reducir el consumo energético.

2.3.1 Lubricación Mixta

En este caso se da cuando existe una deformación elástica en un elemento [8], se presenta una mínima capa de lubricante en las superficies de las partes en movimiento lo cual permite que se presente la interacción entre las piezas, en condiciones de operaciones normales el régimen debe desaparecer al principio del movimiento de lo contrario el lubricante se seleccionó mal o se contaminó con una sustancia de menor viscosidad.

2.3.2 Lubricación Elastohidrodinámica

Ocurre cuando las cargas y presiones en los elementos en movimiento son altas, como consecuencia se aumenta la viscosidad del lubricante y se generan deformaciones plásticas en las superficies de los elementos [8].

2.3.3 Lubricación Hidrodinámica

El flujo de lubricante que separa las superficies de los elementos en movimiento es constante separándolas de manera adecuada evitando los contactos entre ellas, este régimen es considerado la lubricación ideal, ya que proporciona baja fricción y mínimo desgaste [7].

2.4 Tipos de Lubricantes

Existen distintas sustancias de lubricantes según su presentación y composición se pueden clasificar en:

- Líquidos: Son los de uso más frecuente y los que se basan en fracciones de petróleo refinado. Los lubricantes líquidos de petróleo son los de uso más extenso, debido a su adaptabilidad a la mayoría de los equipos existentes o por su disponibilidad a un costo moderado.
- Sólidos: Son lubricantes que a pesar de que se encuentran en fase sólida, son capaces de reducir la fricción entre dos superficies que se deslizan entre sí reduciendo el esfuerzo cortante, son capaces de brindar lubricación a temperaturas superiores a las que pueden operar los líquidos y lubricantes basados en aceites [7].

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

- Aceites animales, vegetales y de pescado: Los aceites grasos se obtienen a partir de la extracción de los aceites de diversas fuentes vegetales y de la grasa de los animales domésticos y también del pescado. Su característica común se basa en su estructura química glicérica.

2.5 Viscosidad

La viscosidad es una propiedad que describe la resistencia del líquido al flujo y deformación, entre más oposición al movimiento más viscoso es el líquido, es independiente a la densidad y es inversamente proporcional a la temperatura, esto quiere decir que la viscosidad disminuye con el aumento de la temperatura, debido a que la cohesión de las moléculas se vuelve débil, permitiendo así que se desplace con mayor rapidez, la viscosidad suele representarse mediante la letra griega “ μ ” para la lubricación dinámica y mediante la letra “ ν ” en el caso de la lubricación cinemática [7]. Esta propiedad se ilustra en la figura 9, suponiendo flujo laminar y que el fluido en contacto con las placas tiene la velocidad de éstas.

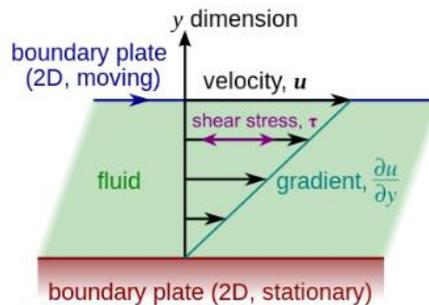


Figura 9. Viscosidad en flujo laminar [14].

La ecuación 1 es la expresión matemática que pone en manifiesto la ley de Newton de la viscosidad.

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \dots \text{Ecuación 1}$$

Donde:

τ = esfuerzo cortante

μ = viscosidad.

$\frac{dv}{dy}$ = deformación del fluido.

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

La ley establece que el esfuerzo cortante tangente a la dirección del flujo es proporcional a la relación de la velocidad respecto a la distancia, en la ecuación 2 se expresa la ecuación para el cálculo del esfuerzo cortante.

$$\tau = \frac{F}{A} \dots \text{Ecuación 2}$$

Donde:

τ = esfuerzo cortante.

F= fuerza aplicada.

A= Área de aplicación de la fuerza.

Las unidades con las que se expresa la viscosidad absoluta μ son las siguientes:

N.s/ m ² = Pa. s	libras. s / in ² = Reynolds
dina. s / cm ² = Poise	1 Reynolds = 6.9 106 centipoises.

2.6 Métodos experimentales o tribómetros

Con base en el conocimiento de la fricción, desgaste y lubricación hay equipos en laboratorios, para simular las situaciones particulares a analizar, resolver y mejorar las condiciones de operación, evaluar los lubricantes y materiales.

Las maquinas tribológicas tienen diferentes configuraciones, algunas están definidas por normas, entre las más representativas se encuentran:

- Cuatro bolas: Prueba para generar condiciones en las que una película de lubricante pierde sus propiedades mecánicas y físicas. (ASTM D2783 - 19) [15].
- Impacto de partículas sólidas: Prueba de erosión utilizando chorros de gas (ASTM G76-18) [15].
- Cilindros cruzados: Evaluación de resistencia al desgaste deslizante después de un cierto número de ciclos (ASTM G83-96) [15].
- Bola sobre piso: Método de prueba estándar para el desgaste deslizante de reciprocidad lineal (ASTM G133-05) [15].

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

- Bloque sobre anillo: Prueba que genera el desgaste adhesivo de los materiales contra un disco de acero (ASTM G77-17) [15].
- Perno sobre disco: Su propósito es generar el desgaste deslizante de un perno sobre disco giratorio (ASTM G99-17) [15].
- Resistencia a la corrosión de materiales. (ASTM G98-17) [15].

La compra de estos equipos es muy costosa si se desea adquirir alguno de ellos y los complementos para las máquinas, como un sistema de lubricación. El uso de los tribómetros es indispensable en los laboratorios para poder realizar estudios sobre la resistencia de los materiales e identificar las propiedades de los lubricantes en general.

Con anterioridad se han realizado diferentes estudios, análisis y pruebas en máquinas tribológicas con el fin de caracterizar los materiales que están en contacto, el fluido lubricante utilizado, el estudio de los parámetros químicos, físicos y morfológicos involucrados.

2.7 Estado del arte

Una parte esencial de los estudios es evaluar aceites, grasas, o modificadores, simular condiciones de frecuencia y cantidad de aplicación de lubricantes utilizados, analizar regímenes o estudiar la respuesta tribológica de materiales a diferentes condiciones y tipos de grasas o aceites.

Como ya se mencionó los sistemas de lubricación de las máquinas tribológicas son generalmente módulos que, en el caso de equipos comerciales, se venden por separado lo que resulta en una gran inversión para realizar pruebas bajo esta condición.

En máquinas construidas en instituciones educativas o de investigación, el sistema de lubricación generalmente se improvisa o se usan materiales u objetos con los cuales se aplica el lubricante de forma manual, sin un control eficiente y exacto en cuanto a cantidad o frecuencia.

Generalmente cuando se trata de colocar cantidades determinadas de lubricante se usan jeringas, espátulas, brochas, etc., donde la posibilidad de variación en la cantidad o frecuencia es muy alta. Otro aspecto del que depende el método de aplicación es la presentación del lubricante, ya sea en grasa o aceite.

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

A continuación, se presentan ejemplos de aplicación de lubricantes para diversos estudios, donde se muestran las diversas maneras y diferentes escalas de aplicar el lubricante.

Cuando se realizan pruebas con lubricantes, éste se coloca generalmente en el área de contacto, como se puede observar en la figura 10 que corresponde a una imagen del trabajo simulado de bola sobre plano para evaluar la tracción y el frenado, en este el lubricante se coloca mediante una pipeta, la cantidad de aceite colocada es de $1\mu\text{l}$ con margen de error de $\pm 0.04\mu\text{l}$ aproximadamente [16].

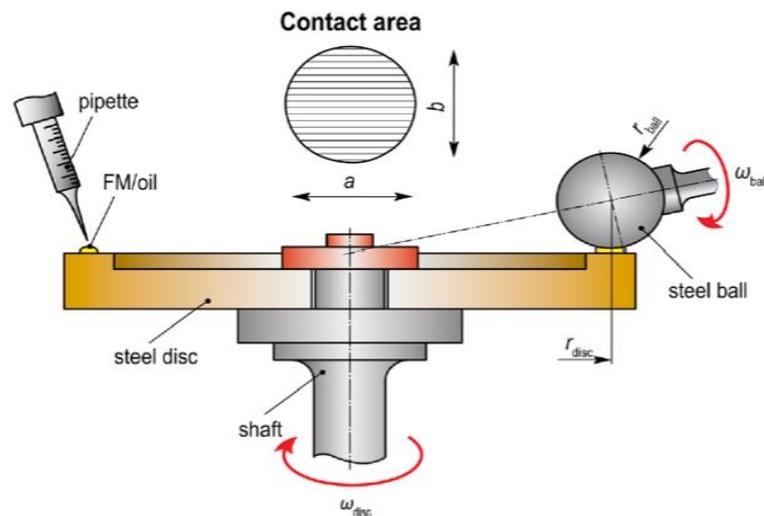


Figura 10. Esquema de equipo bola sobre plano, dónde se aprecia la manera de colocar el lubricante [15].

En la investigación sobre lubricación en micro máquinas [17], se lubrican la zona de contacto mediante un dispensador de $80\mu\text{m}$ de diámetro como se muestra en la figura 11.

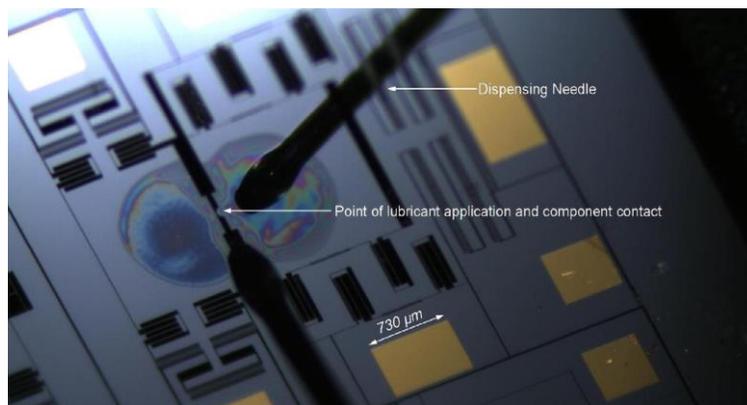


Figura 11. Lubricación en zona de contacto de una "micro máquina"[17].

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

A una escala mayor y con aplicación en campo, se tiene la evaluación que se realizó sobre el efecto de la contaminación por lubricante en un riel [18], la cantidad de lubricante fue de 3 ml aproximadamente esparcido manualmente en una zona de contacto de 126 mm de longitud, como se puede observar en la figura 12.

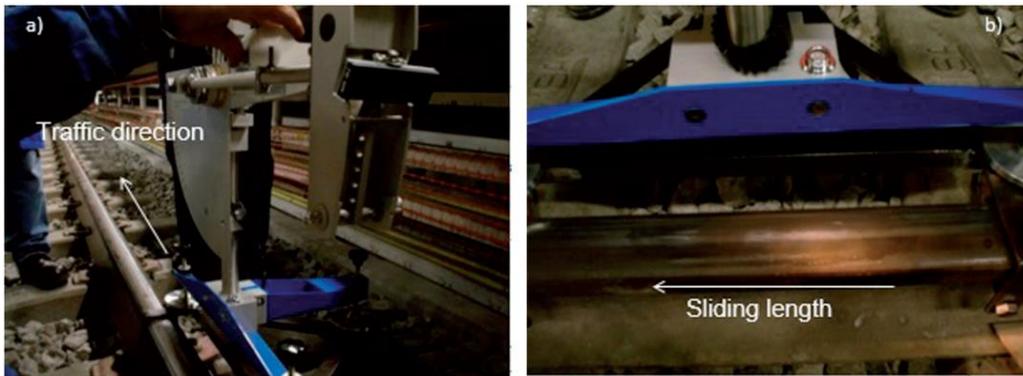


Figura 12. Lubricante sobre zona de contacto en riel [18].

En la figura 12 se ilustra cómo la aplicación del lubricante al riel no es precisa, debido a las adversidades del campo donde se realizaban, se puede constatar que un módulo de lubricación controlada se podría aplicar en este tipo de estudios para realizar trabajos con mejores y eficientes resultados.

En anteriores trabajos se ilustran la necesidad de un módulo específico de lubricación para la máquina de discos encontrados, el cual tenía dos configuraciones de mezcla de 50% agua y 50% aceite, otra de 80% de agua y 20% de aceite [19] como se muestra en la figura 13.

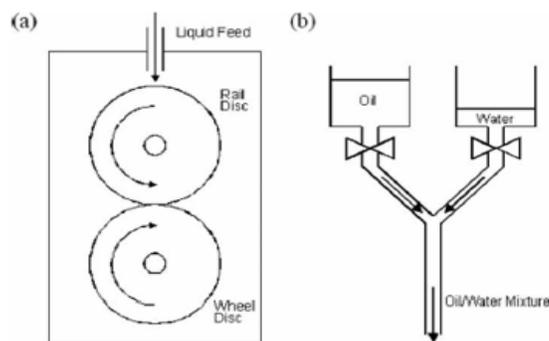


Figura 13. Sistema de lubricación a) Cámara, b) Módulo [18].

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

Se investigaron diferentes tipos de lubricación como, el polímero que se analizó en diferentes composiciones, en una máquina bloque sobre anillo (ASTM G77-17) [15] como se muestra en la figura 14, la presión de contacto entre el polímero y el anillo de acero es de 4MPa.

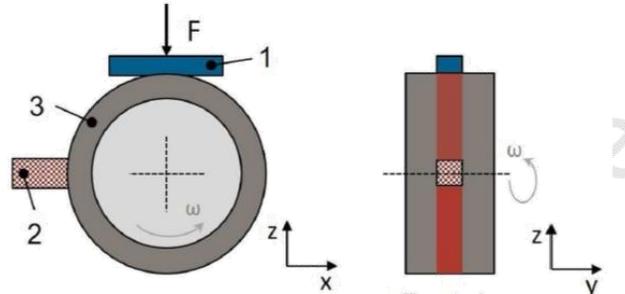


Figura 14. Prueba bloque sobre anillo lubricación sólida [19].

Los resultados demostraron que dependiendo del tipo de polímero puede ser un excelente candidato al lubricante sólido en pruebas de acero/acero en condiciones secas, lo que puede servir como reemplazo de aceites y grasas para una amplia variedad de aplicaciones [20].

Hay casos que no se pueden estudiar mediante la observación de la prueba, como la eficiencia de la penetración del lubricante en un contacto, para eso se desarrollan modelos de elementos finitos (FE) como se muestra en la figura 15, en el que mediante el acoplado euleriano lagrangiano (CEL) se desarrollan modelos en el programa ABAQUS para simular el contacto de un cilindro con un plano.

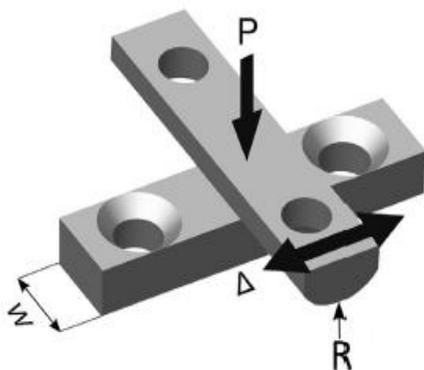


Figura 15. Modelado de la pieza [21].

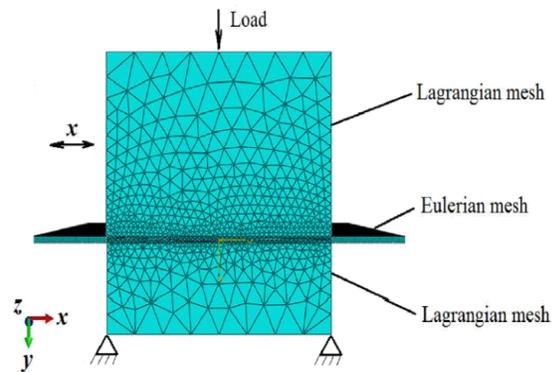


Figura 16. Simulación de contactos [21].

En la figura 16 se muestra la simulación del contacto entre los sólidos y el lubricante determinando los coeficientes de fricción y desgaste, se comparan los resultados con

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

observaciones experimentales y se llegó a la conclusión de que la lubricación reduce el desgaste por *fretting* y fricción efectivamente en contactos no-conformables, pero tiene menos efectos en contactos conformables [21].

Los métodos para lubricar un sistema son variados y se ven afectados por las condiciones ambientales, como el caso de poder lubricar el contacto de la rueda de un tren con el riel, en la figura 17 se muestra un ejemplo de un sistema de lubricación estacionaria en dónde la aplicación del lubricante es en el riel mediante unas válvulas, en la figura 18 se muestra un ejemplo de aplicación a bordo de lubricante a sólido sobre la rueda del tren.



Figura 17. Lubricación estacionaria [22].



Figura 18. Lubricación a bordo [22].

En ambos casos se busca reducir los mecanismos que se producen por la fricción y el desgaste, para que la vida útil de los materiales sea mayor y se reduzcan los costos de mantenimiento.

3. Metodología

La metodología debe plantear los pasos a seguir para que se pueda llevar a cabo el desarrollo del módulo, desde su etapa de comprensión del problema hasta la generación de toda la información necesaria y minuciosamente detallada que haga factible su fabricación, uso, conservación y retiro [23].

Previo al inicio del proyecto se identificó la necesidad de un módulo de lubricación para pruebas tribológicas. Como se expuso en el capítulo anterior, muchos de los ensayos en laboratorio requieren de una lubricación correcta para poder simular condiciones más cercanas a las reales y evaluar los resultados.

Existen diferentes tipos de configuraciones geométricas de máquinas tribológicas, estas configuraciones sirven para llevar a cabo pruebas tribológicas en áreas donde se presentan deficiencias y fallas, que son frecuentemente encontradas en las pruebas de desgaste.

A continuación, se proponen alternativas para el desarrollo del proyecto, se evaluarán para llegar a una propuesta de solución del objetivo general y de los objetivos específicos, definiendo el módulo para que sea posible su manufactura, tomando en cuenta los materiales, las formas, las dimensiones, tolerancias, recubrimientos.

Por lo anteriormente mencionado se estructura la metodología, se aplicará el despliegue de funciones de calidad, por sus siglas en ingles se le conoce como Quality Function Deployment (QFD) como se muestra en la figura 19.

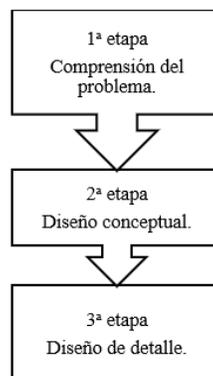


Figura 19. Etapas de la Metodología [23].

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

Planteando los pasos a seguir para llegar a una solución de la metodología se estructura el proceso y se aplican los conocimientos previamente adquiridos, como se observa en la figura 20.

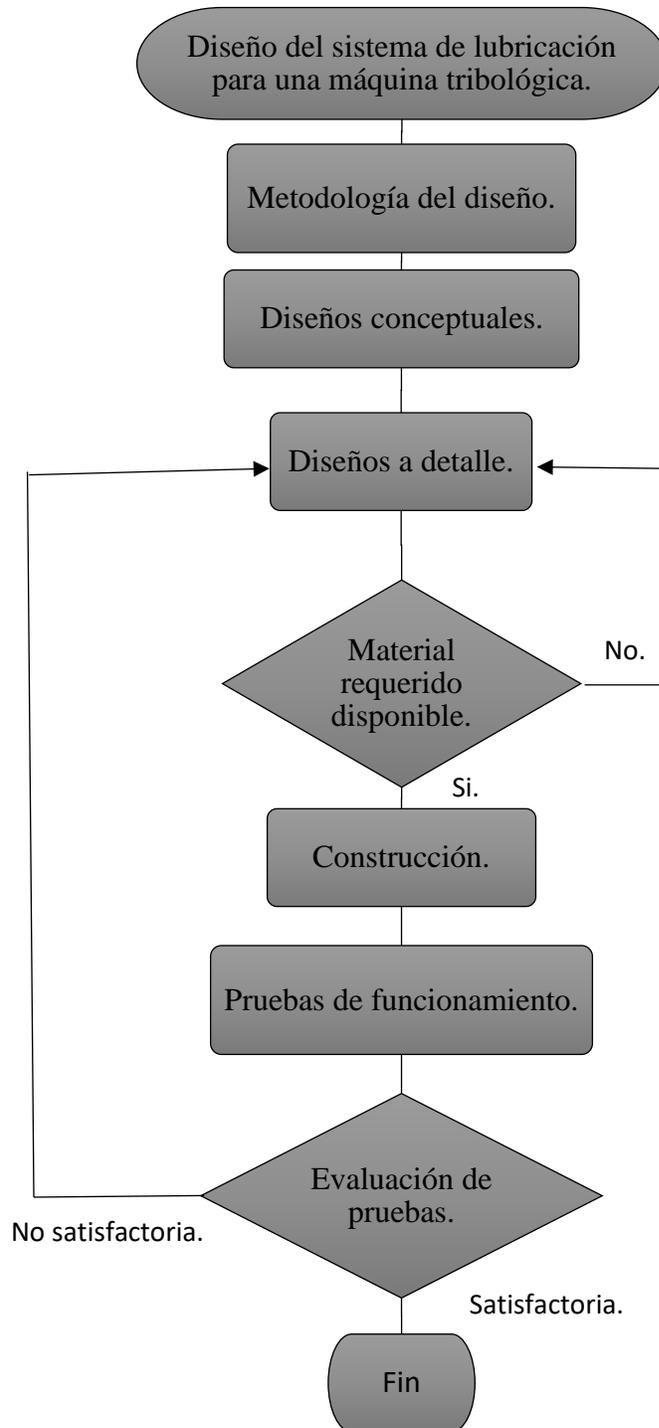


Figura 20. Proceso de Metodología Q.F.D.

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

Para la primera etapa del proyecto se aplica la metodología QFD en los siguientes pasos:

1. Identificación del problema
2. Determinación de los requerimientos y expectativas del proyecto
3. Determinar la importancia relativa de los requerimientos y expectativas del proyecto
4. Efectuar un estudio comparativo
5. Traducir los requerimientos y expectativas en términos mensurables de ingeniería
6. Establecer metas de diseño

A continuación, se desarrollan los pasos mencionados para el análisis del sistema de lubricación de una máquina tribológica.

3.1 Identificación del problema

Es necesario diseñar un módulo de lubricación capaz de suministrar una cantidad precisa de lubricante, es claro que los institutos de investigación dedicados al desarrollo de equipo tribológico constantemente evolucionan en este tipo de productos, cada vez es más importante el estudio del desgaste por lo que es necesario el desarrollo de un módulo de lubricación de diseño propio e insumos nacionales que se comercialice a fin de abaratar su precio en casas de comercio internacionales.

3.2 Determinación de los requerimientos y expectativas del proyecto

La principal necesidad de las máquinas tribológicas es el módulo de lubricación para la realización de pruebas, con las cuales se ampliará el campo de estudio de la tribología. Se conocen las necesidades para la realización de pruebas que sean cercanas a las reales y se establecen los siguientes requerimientos y expectativas para el cumplimiento del proyecto.

Las expectativas del proyecto son:

- A. Que el módulo pueda lubricar con eficiencia.
- B. Que tenga un contenedor para el lubricante a usar.
- C. Que pueda ser usada en más de una configuración de máquina tribológica.
- D. Que recircule el aceite.
- E. Que pueda filtrar el aceite.

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

Los requerimientos deseables son:

- A. Que sea de fácil operación.
- B. Que cada uno de los componentes se pueda fabricar con la mejor calidad.
- C. Que no se diseñen formas complejas.
- D. Que sea compacto.
- E. Que tenga una vida larga de operación.

3.3 Determinación de la importancia relativa de los requerimientos y expectativas del proyecto

Para poder determinar la importancia de los requerimientos es necesario establecer los puntos que son de vital importancia, sin ellos el producto o diseño de este no podría considerarse satisfactorio. Así hay puntos vitales, hay requerimientos que admiten cierta flexibilidad, de manera que su cumplimiento puede ser parcial. En caso de que se incumplan totalmente, se podría considerar que el resultado es insatisfactorio.

La escala de los requerimientos se hace comparando cada uno de los que demande contra todos los demás [23] como se puede observar en la tabla 1.

La importancia relativa es calculada por la siguiente expresión:

$Ir = (\Sigma / \Sigma_{total}) \times 100$ donde:

Ir=Porcentaje en importancia.

Σ = Sumatoria de la importancia.

	A	B	C	D	E	$\Sigma (+)$	Ir (%)
A	0	+	-	-	+	2	20
B	-	0	+	+	+	3	30
C	-	+	0	+	+	3	30
D	-	+	-	0	-	1	10
E	-	-	+	-	0	1	10
						$\Sigma=10$	100

Tabla 1. Importancia relativa.

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

De los resultados obtenidos de la tabla 1, se pueden ordenar los requerimientos de acuerdo con su grado de importancia, como se muestra a continuación:

- | | |
|--|-----|
| A. Que cada uno de los componentes se pueda fabricar con la mejor calidad. | 30% |
| B. Que no se diseñen formas complejas. | 30% |
| C. Que sea de fácil operación. | 20% |
| D. Que tenga una vida larga de operación. | 10% |
| E. Que sea compacto. | 10% |

En los resultados obtenidos se puede observar que hay dos parejas de requerimientos con el mismo grado de importancia, por lo tanto es recomendable no anticipar ni uno ni otro, solamente son considerados con la misma importancia para el diseño de la máquina.

3.4 Estudio comparativo

Este punto consiste en estudiar las máquinas disponibles en el mercado para determinar en qué grado cumplen con los requerimientos y expectativas. El grado de satisfacción que cubre el producto es evaluado por el siguiente sistema de calificación:

- 1: El diseño no cumple en absoluto con el requerimiento
- 2: El diseño cumple ligeramente con el requerimiento.
- 3: El diseño cumple medianamente con el requerimiento.
- 4: El diseño cumple casi en su totalidad con el requerimiento.
- 5: El diseño cumple totalmente con el requerimiento.

La evaluación proporcionará una adecuada referencia de cómo se percibe la calidad de los productos [23].

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

La tabla 2 muestra el estudio comparativo de las principales funciones del módulo de lubricación diseñado por Anton Paar [24] y las que debe poseer el módulo propuesto.

NÚMERO DE REQUERIMIENTO	REQUERIMIENTOS	IR (%)	PRODUCTO DE REFERENCIA
1	A		5
2	B		5
3	C		1
4	D		5
5	E		4
6	A	20	4
7	B	30	5
8	C	30	4
9	D	10	4
10	E	10	5

Tabla 2. Estudio comparativo.

3.5 Traducir los requerimientos y expectativas en términos mensurables de ingeniería

La metodología busca integrar los requerimientos con el proceso de diseño, convirtiendo un lenguaje que en gran porcentaje es subjetivo, en otro que sea concreto y pueda medirse. En consecuencia, esta metodología traduce los términos subjetivos a objetivos y esto a su vez a términos que en ingeniería se llama “especificaciones de diseño”, como se puede observar en la tabla 3.

Requerimientos deseados.	Términos Mensurables.	Unidad de Medición.
A) Que sea de fácil operación	Apriete y afloje de los elementos rápido.	Newtons
	Equipo de control.	
	Componentes ligeros.	Kg
	Materiales.	

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

B) Que cada uno de los componentes se pueda fabricar con la mejor calidad.	Acabados Superficiales.	μm
	Técnicos Capacitados.	
	Taller mecánico.	
	Tolerancias no cerradas.	IT
	Especificaciones claras de las piezas a realizar.	Normas ISO.
C) Que no se diseñen formas complejas.	Forma de cada pieza.	
	Dimensiones.	M^3
D) Que sea compacto.	Volumen.	M^3
	Peso.	Kg
	Ergonómico.	
E) Que tenga una larga vida de operación.	Mantenimiento.	
	Calibración.	
	Vida útil.	hrs.

Tabla 3. Tabla de términos mesurables.

3.6 Establecimiento de metas de diseño

Esto consiste en establecer las metas de diseño, cada una de ellas debe expresar una característica mensurable que debe tener el producto.

El establecimiento de las metas se debe hacer tomando en cuenta:

- Los requerimientos.
- Las características de otros productos.

Esta etapa se trata de aprovechar la comprensión del despliegue de funciones de calidad de productos que cumplan con los requerimientos de calidad, que se fijaron mediante el QFD en él, se plantea el desarrollo de ideas fundamentales del producto.

Es importante generar más de una sola idea, debido a que es probable que se llegue a una equivocación con una sola, si se cuenta con más ideas el margen de equivocación disminuye. Esta es una de las etapas donde se requiere de mayor creatividad en el diseño, para que el producto adquiera originalidad dependiendo de las decisiones seleccionadas y esto determine el costo del producto.

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

La información generada anteriormente se debe de integrar al gráfico de funciones de calidad el cual se muestra en la figura 21.

La casa de decisiones consiste básicamente en qué se desea y cómo se puede satisfacer, en la parte superior de la casa se encuentran los requerimientos de diseño, si existe alguna correlación entre ellos se demuestra arriba, se determina si la dirección de mejora de los requerimientos de diseño crece, decrece o no.

En la zona central se registra la relación que existe entre los requerimientos del proyecto y los requerimientos de diseño, en caso de no tener relación se deja el espacio en blanco [23].

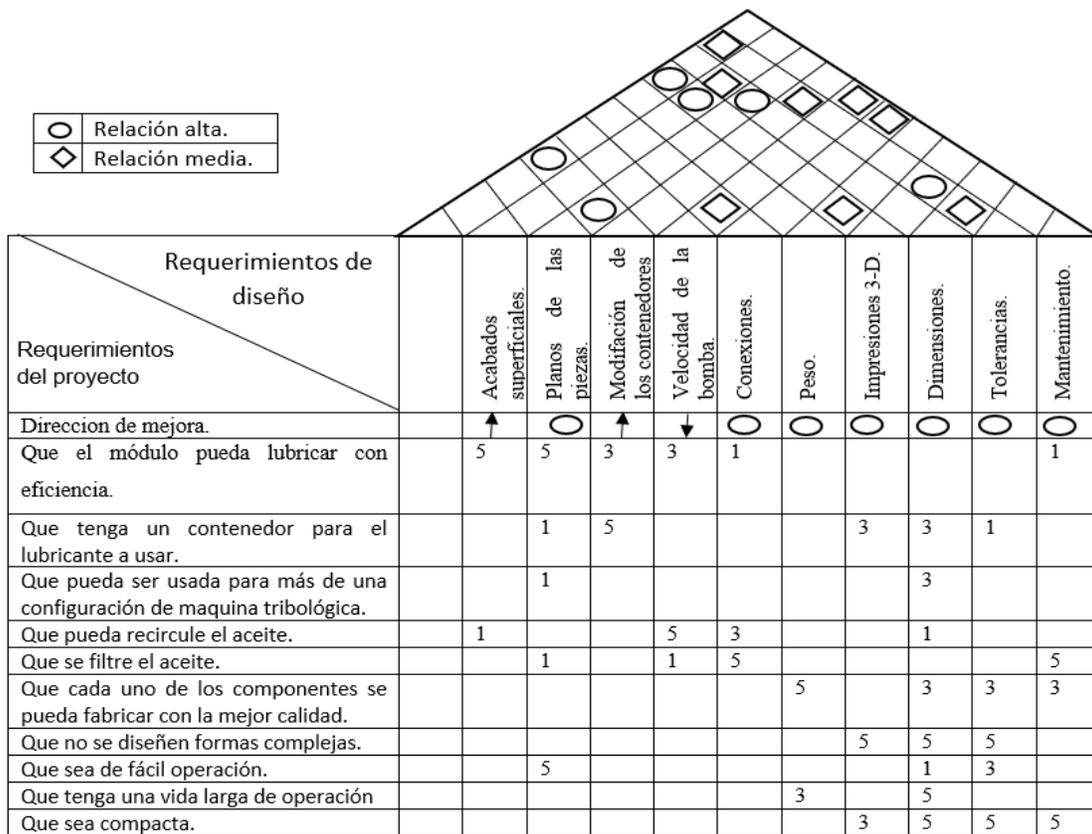


Figura 21. Despliegue de funciones de calidad.

5	Fuerte relación entre requerimientos.
3	Media relación entre requerimientos.
1	Débil relación entre requerimientos.

3.7 Diseños conceptuales

Para el desarrollo del diseño conceptual es necesario tener identificadas todas las funciones que debe de realizar el módulo de lubricación, para que pueda cumplir con los requerimientos deseados [23].

En esta etapa se aprovecha la comprensión de las funciones de calidad que se identificaron mediante el QFD para generar conceptos de productos que cumplan con los requerimientos deseados, en donde se plantea el desarrollo de las ideas del proyecto.

La metodología de la fase conceptual es una abstracción que se puede representar a diferentes niveles de algo que se podría convertir en un producto, algunos de los conceptos se van generando en una forma natural, a medida que se desarrolla el QFD. La fase conceptual se representa de manera esquemática en la figura 22.

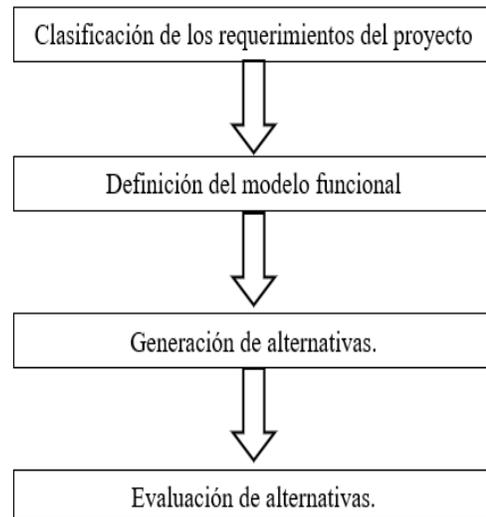


Figura 22. Metodología de la fase conceptual [23].

3.7.1 Clasificación de los requerimientos del proyecto

Consiste en establecer el enlace entre la primera etapa del proceso de diseño (aplicación del QFD) y la etapa conceptual, para esto se requiere revisar los resultados de la casa de calidad y la comprensión completa de las metas de diseño, se debe describir el objetivo de manera que se incluya la función global de servicio del producto e identificar los límites del sistema. La función global es diseñar un módulo de lubricación, que realice un recirculamiento del lubricante mientras este se filtra para eliminar los residuos de la prueba y se aplique a la prueba para poder emular las condiciones lo más reales posible.

3.7.2 Funciones Técnicas

Hasta ahora se han mencionado las características y objetivos que debe de cumplir el módulo, se genera una caja negra donde se establecen las entradas luego la función y después las salidas de la función, como se muestra en la figura 23, después se genera una caja transparente donde se despliegan las subfunciones para satisfacer los requerimientos como se muestra en la figura 24.

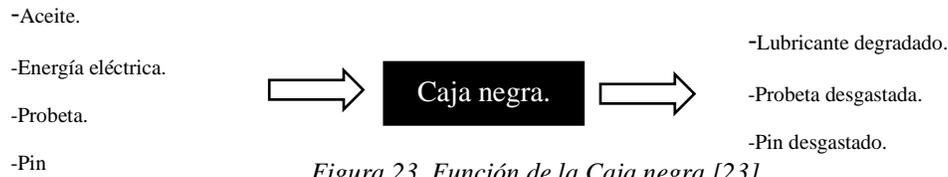


Figura 23. Función de la Caja negra [23].

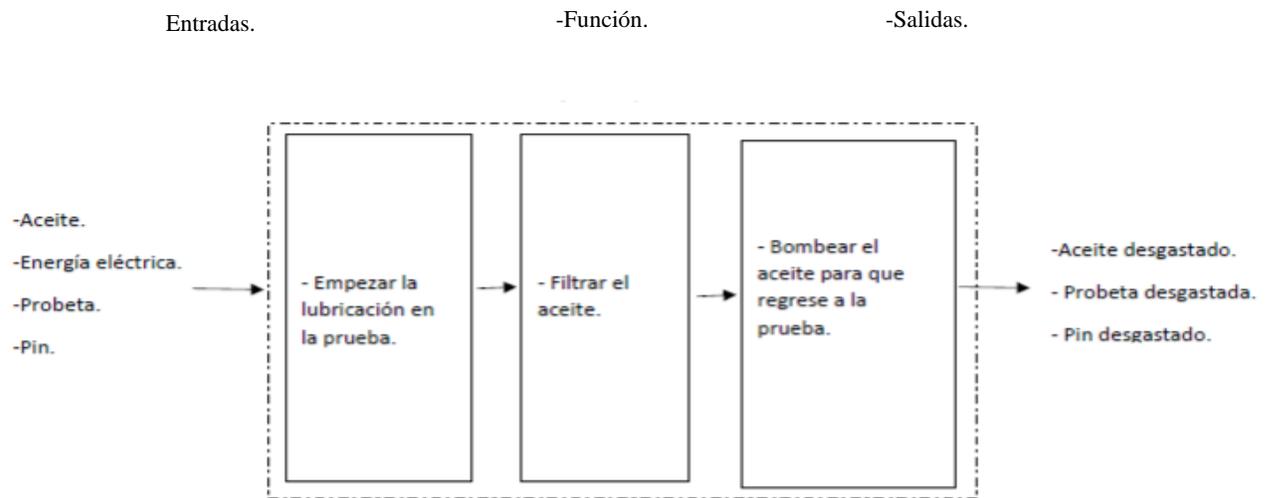


Figura 24. Caja Transparente [23].

3.7.3 Definición del modelo funcional

Consiste en definir el modelo funcional del producto, esto consiste en determinar qué funciones son necesarias para satisfacer los requerimientos del proyecto, jerarquizar las diferentes funciones, determinar la relación que debe haber entre ellas y describir esto gráficamente [23], la construcción del modelo puede ser de manera intuitiva o de manera sistemática. El método conocido como análisis funcional descendente, se basa en una sucesión de diagramas, desde lo más general hasta lo más particular (perno-disco), en la figura 25 se muestra al diagrama describiendo las funciones del módulo de lubricación.

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

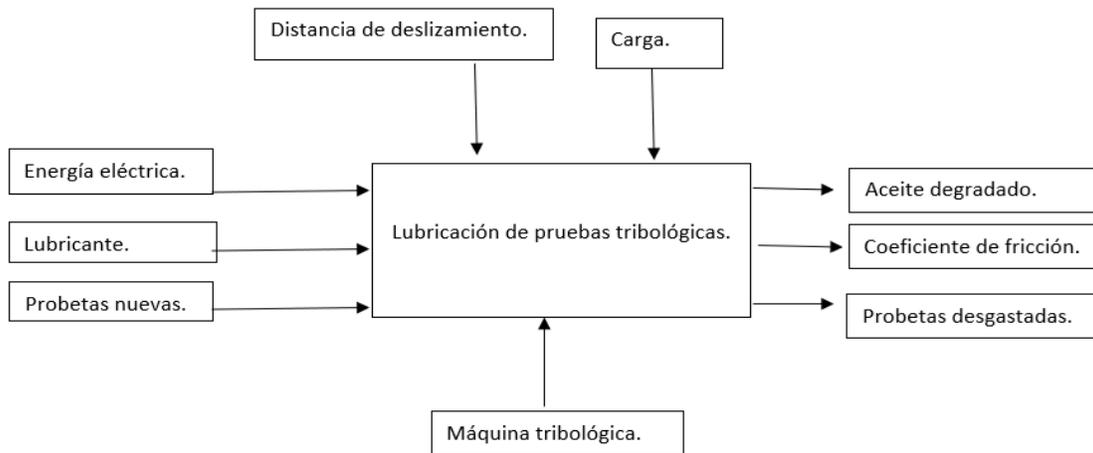


Figura 25. Funciones del módulo de lubricación [23].

3.7.4 Generación de alternativas

La estrategia por seguir en este punto consiste en generar la mayor cantidad de conceptos. Hay diferentes maneras de iniciar, se puede comenzar de manera intuitiva planificando algunas soluciones y organizándolas para evaluarlas posteriormente con el propósito de ampliar las posibles soluciones, este trabajo se basa en la técnica de brainstorm (lluvia de ideas), se generan muchas ideas con el fin de obtener una lista de ideas bien encaminadas. En la figura 26 se muestra la matriz de la generación y selección de las alternativas para el módulo.

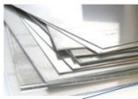
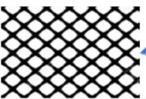
MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN.	Aluminio. 	Acero. 	Polímero. (PLA) 
MÉTODO DE FILTRADO.	Malla. 	Filtro. 	
BOMBA.	2.5 W 	6.5 W 	8 W 
REGULADOR DE CAUDAL.	Estrangulador de caudal. 	Válvula reguladora 	
TIPO DE JUNTA.	Neopreno. 	Elastómero. 	Junta. 

Figura 26. Matriz de alternativas.

3.7.5 Evaluación de alternativas

El objetivo de la evaluación es distinguir el mejor concepto de diseño de los que se generaron previamente, con el fin de invertir la menor cantidad de recursos para decidir cuál es el concepto más apto que en la etapa de diseño a detalle, se desarrollará hasta convertirlo en el producto definitivo [23] como se muestra en la tabla 4.

Requerimientos.	Peso.	Alternativas.					
		1		2		3	
		Calificación.	Total.	Calificación.	Total.	Calificación.	Total.
Que el módulo pueda lubricar con eficiencia.	.3	9	2.7	9	2.7	8	2.4
Que tenga un contenedor para el lubricante a usar.	.1	9	.9	9	.9	9	.9
Que pueda ser usada para más de una configuración de maquina tribológica.	.3	8	2.4	5	1.5	4	3.2
Que pueda dar la cantidad necesaria del lubricante.	.2	7	1.4	8	1.6	9	1.8
Que sea de fácil operación.	.1	9	.9	5	.5	4	.4

Tabla 4. Evaluación de alternativas.

3.8 Diseño a detalle

Para la transformación del concepto en un objeto físico se debe de pasar por la transformación del modelo funcional en un modelo geométrico y este a su vez en un modelo de manufactura en este último paso es donde se obtiene el objeto físico, como se observa en la figura 27.

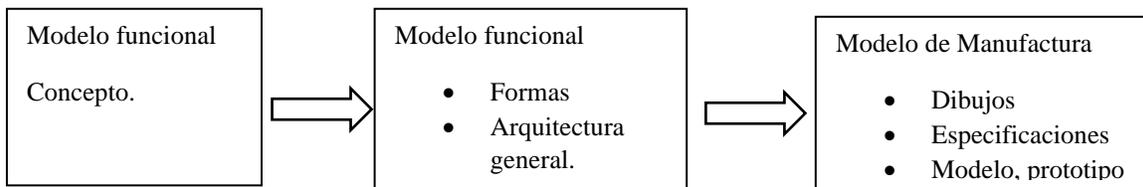


Figura 27. Transición del modelo funcional al modelo de manufactura [23].

El lenguaje utilizado alcanza su máximo refinamiento, debe de expresarse de forma clara y precisa para que la información generada se pueda transmitir sin confusiones a los pasos siguientes de manufactura, ensamble, calidad, etc. Todas las decisiones que se tomen son

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

seguidas por verificación y corrección sucesiva hasta que alcanza los requerimientos deseados.

3.9 Modelo de manufactura

Se expresan las características contenidas en los dibujos a detalle del módulo que permiten la fabricación del producto, los materiales que se emplearán en su fabricación, condiciones de manejo, los cuidados que se deben de tener para su ensamble, las condiciones de inspección y pruebas funcionales para lograr un producto de calidad.

3.10 Dibujos a detalle

La información contenida en esta etapa debe ser lo suficientemente clara y completa para que la fabricación se realice sin ambigüedad y conforme a lo previsto durante el proceso de diseño [23]. A continuación, se detallan los componentes para el módulo y su funcionamiento.

3.10.1 Despiece del módulo

En la figura 28 se ilustra el montado del módulo sobre la máquina perno sobre disco, con todos sus componentes.

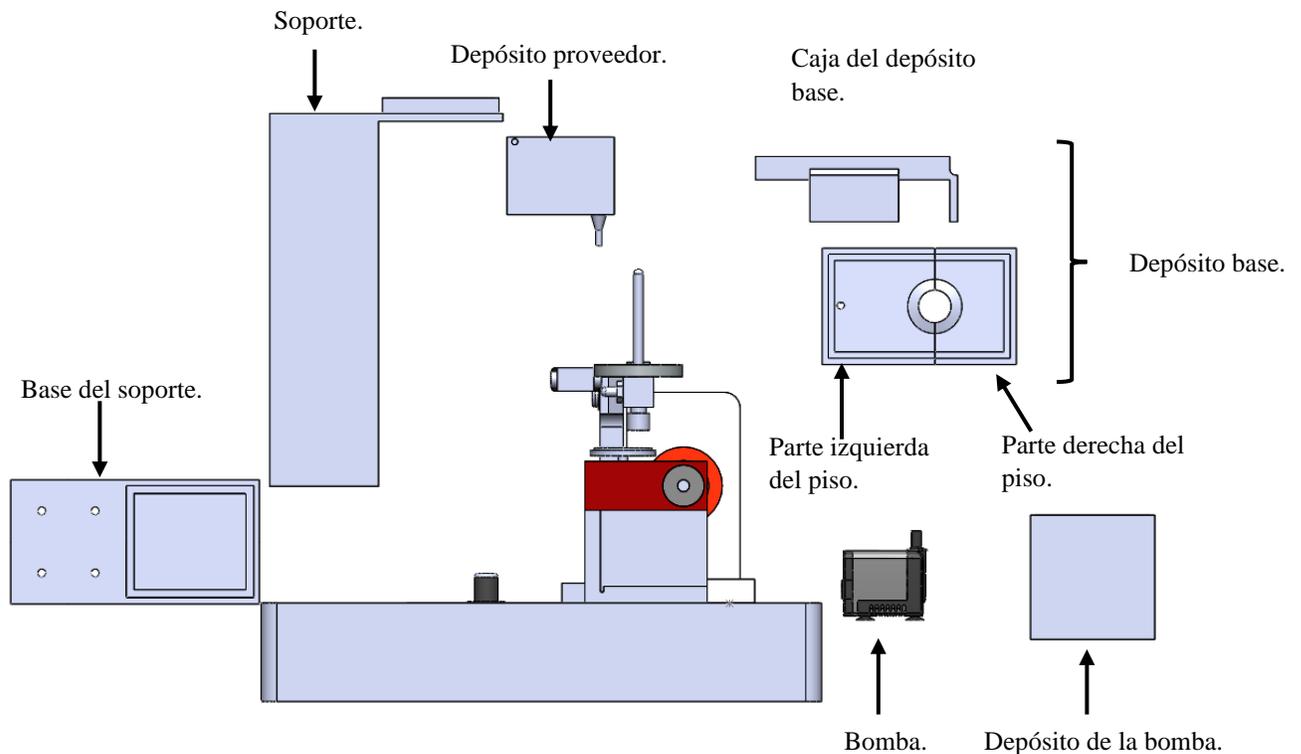


Figura 28. Despiece del módulo.

3.10.2 Depósito base

Este depósito es un elemento muy importante, este es el primer depósito el cual recibe todo el lubricante de la prueba con todas las impurezas que desprende la prueba, con el plano inclinado de 2 grados todo el lubricante es decantado por gravedad al segundo depósito, tiene una pestaña en donde va el eje de la pieza a analizar para que no se vierta en otro lado el lubricante, está dividido en dos para su mejor manejo al inicio y final de la prueba, ver anexo 1.

3.10.3 Depósito de la bomba

En este segundo depósito es donde estará colocada la bomba sumergible, el lubricante será ingresado mediante una manguera desde el primer depósito, el lubricante que llega estará filtrado por una malla que se encuentra en la manguera, después de que el lubricante ingresa a la bomba será nuevamente filtrado gracias a los filtros con los que cuenta la bomba, ver anexo 1.

3.10.4 Depósito proveedor

Este depósito está a 24 cm de altura desde la base de la maquina tribológica y cuenta con un plano inclinado de 5 grados con la finalidad de que abastezca por gravedad a la prueba con el lubricante ya filtrado, está sostenido mediante un soporte, el lubricante llega mediante el arreglo de redes de mangueras y la bomba del segundo depósito, ver anexo 1.

3.10.5 Soporte

El propósito del soporte es tener elevado y sostenido el tercer depósito para poder abastecer de lubricante a la prueba, el soporte cuenta con una muesca para que se coloque el tercer depósito y permanezca en su lugar, ver anexo 1.

3.10.6 Base del soporte

La función de la base es brindar estabilidad al soporte, cuenta con 4 orificios para poner fijarla a la máquina perno sobre disco mediante tornillos, cuenta con una muesca para colocar el soporte y de esta manera se asegura que no tenga movimientos los cuales pueden llegar a afectar a la realización de las pruebas, ver anexo 1.

3.10.7 Bomba

La bomba utilizada es una bomba sumergible, estará ubicada en el segundo depósito para poder bombear el aceite al tercer depósito, esta bomba tiene un caudal de 600 L/H, 110 V 60 HZ con un consumo de 8 W.

Es importante clasificar los tipos de fluidos que se puedan utilizar en las pruebas lubricadas en función de la capacidad de la bomba.

Para el cálculo de la potencia de la bomba se utilizó la ecuación número 3, se ocupó la densidad del aceite con el que se contaba en el laboratorio Dexron III, para cajas de transmisión de los automóviles la cual es de 0.87 g/cm³.

Para calcular la eficiencia de la bomba, primero se calcula la potencia con agua como fluido, La potencia útil de la bomba se calcula con la ecuación 3[25], el caudal esta dado por el fabricante de la bomba.

$$P_b = \gamma * H * Q \dots \text{Ecuación 3}$$

Donde:

γ = Peso específico del agua (N/m³).

H= altura de bombeo (m).

Q= Caudal de la bomba (m³/s).

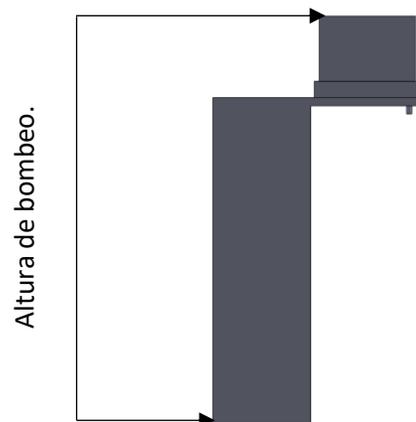


Figura 29. Altura de bombeo.

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

Los fluidos con los que se van a trabajar en las pruebas son agua y aceite Dexron III, para el cálculo de la potencia útil primero se ocupa la ecuación 4 [25] para determinar el peso específico.

$$\gamma = \rho * g \dots \text{Ecuación 4}$$

Donde:

ρ = Densidad.

g = Gravedad.

$$\gamma = 998 * 9.81 = 9790.3 \text{ N/m}^3$$

Con el peso específico se ocupa la ecuación 3 para obtener la potencia.

$$P_b = (9790.3)(.25)(0.0016667) = 4.07 \text{ W}$$

Con la potencia útil y la potencia teórica dada por el fabricante, se obtiene la eficiencia con la ecuación 5 [25].

$$\eta = \left(\frac{P_b}{P_r} \right) * 100 \dots \text{Ecuación 5}$$

Donde:

P_b = Potencia teórica (W).

P_r = Potencia de la bomba (W).

$$\eta = (4.07/8) * 100 = 50.9 \%$$

Ahora se calculó la densidad, la potencia y la eficiencia con las ecuaciones 3,4 y 5 con aceite Dexron III como fluido, como se muestra a continuación.

$$\gamma = 870 * 9.81 = 8534.7 \text{ N/m}^3$$

$$P_b = (8534.7)(.25)(0.0016667) = 3.55 \text{ W}$$

$$\eta = (3.55/8) * 100 = 44.45\%$$

En la tabla 5 se presenta la eficiencia de la bomba con diferentes tipos de aceites para transmisión de embragues hidráulicos automatizada por solenoides electrónicos, estos

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

lubricantes soportan altas y bajas temperaturas, así como altas presiones, son muy importantes debido a que disipan calor, reducen la fricción y el desgaste entre los componentes [7].

Aceite	Densidad Kg/m ³	Eficiencia de la bomba.	Viscosidad 40 (cts)	Viscosidad 100 (cts)
Dexron III	870	44.45%	41	8
Dexron VI	843	43%	29.5	5.53
Dexron I	846	43.2%	36.3	7.4
Mercon V	846	43.2%	36.3	7.4
Mercon IV	850	43.42%	35.3	7.4
Mercon X	850	43.42%	35.3	7.4
ffl2	840	42.9%	36.3	
cvt	845	43.17%	36.4	7.5

Tabla 5. Tipos de aceites.

4. Equipo tribológico

El equipo se montó y probó en la máquina perno sobre disco (ASTM G99-17), el equipo consiste en un brazo de palanca (1) que sujeta al perno (2) manteniéndolo en contacto con el disco (3), la carga (4) se puede variar al aplicar peso hasta de 1 kg al final del brazo. El disco se sujeta por medio de un tornillo y el movimiento se aplica por medio de un motor de velocidad variable (5). La fuerza de fricción que se genera entre el disco y el perno se mide y registra mediante una celda de carga (6) y un programa de adquisición de datos como se observa en figura 30.

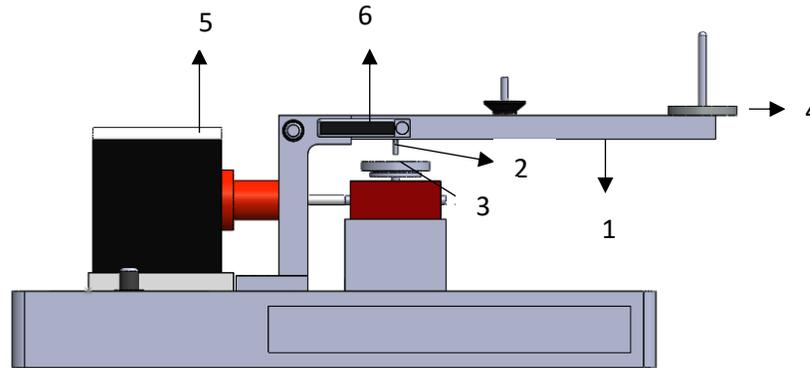


Figura 30. Máquina perno sobre disco.

4.1 Proceso de manufactura

Debido al espacio de trabajo del primer depósito el cual es de milímetros como se muestra en el anexo 1, se opta por una manufactura aditiva mediante el proceso de modelado por deposición fundida (FDM), conocido como impresión en 3D para alcanzar la precisión deseada en las medidas, el material de elaboración es ácido poliláctico (PLA), un termoplástico biodegradable el cual está hecho a base de almidón de maíz o caña de azúcar como se ilustra en la figura 31, con una densidad de 1.24 g/cm^3 (ASTM D792), la temperatura de impresión es de $210 \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$, con una dureza de 85 Sh D (ASTM D2240), tiene un módulo elástico en flexión: 3600 MPa (ISO 178) [32].

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica



Figura 31. Material P.L.A [32].

La manufactura aditiva comienza con el modelado en CAD y se guarda en formato Standard Triangle Language (STL), para que el software ULTIMAKER CURA pueda abrir el archivo, en este software se coloca la pieza, se ajusta la posición en la que será elaborada, de manera que se genera el código G para indicar a la impresora 3-D las operaciones que debe de realizar, la impresión de los componentes del módulo se realizó en una impresora Createbot Max II como se muestra en la figura 32, cuenta con doble extrusor, con una área de impresión de 28 x 25 x 40 cm, cama caliente, rollos en el interior, el gabinete de operación es completamente cerrado proporcionando una estabilidad térmica constante [29].

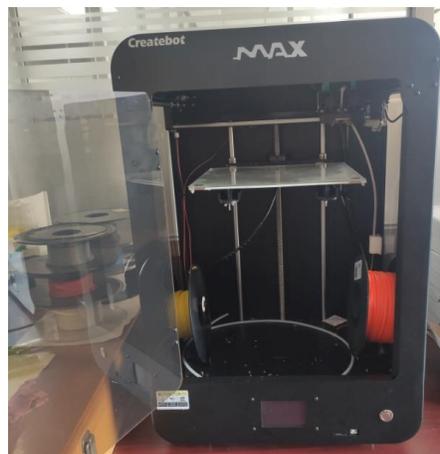


Figura 32. Impresora 3-D del laboratorio de posgrado del IT Pachuca.

La manufactura de los depósitos se realiza con base en los dibujos de detalle como se muestra en la figura 33, este proceso consiste en depositar el PLA fundido mediante el extrusor, el cual lo va aplicando progresivamente por capas sobre una cama caliente [28]. Los depósitos 1 y 3 tienen conexiones para mangueras por las cuales se traslada el lubricante entre los depósitos.

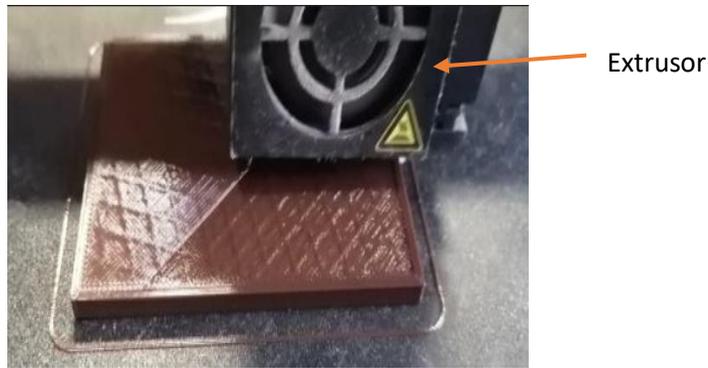


Figura 33. Impresión de componente en 3D.

El depósito base está diseñado en dos partes para poder ajustarse al eje rotacional de la máquina sin impedir o entorpecer su funcionamiento como se muestra en el plano 1 del anexo 1, también cuenta con una caja que mantiene fijo el piso del depósito y contiene el lubricante para que no se desborde. El ensamble de las dos partes del piso se colocará un elastómero de silicona, para proporcionar sellado a temperatura ambiente aportando adhesión entre las partes, formando una junta flexible con resistencia química a los lubricantes, las propiedades generales del material se muestran en la tabla 6.

Dureza Shore A, ASTM D2240	30 ± 5
Resistencia a la tracción N/mm ²	1.4
Peso específico @ 20°C	1.31

Tabla 6. Propiedades de la junta [30].

4.2 Accesorios y proceso de filtrado

Para el funcionamiento del módulo se requiere de una interconexión entre los depósitos para transportar el lubricante de manera segura y se efectuó la recirculación del lubricante, este funcionamiento se realizará mediante 3 mangueras de silicona con un diámetro exterior de 4 mm y un diámetro interior de 2 mm, en la manguera dosificadora se colocará un microgotero el cual proporciona un goteo de hasta 32 gotas por minuto, cada 20 gotas suministradas en la prueba es equivalente a 1 ml [31].

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

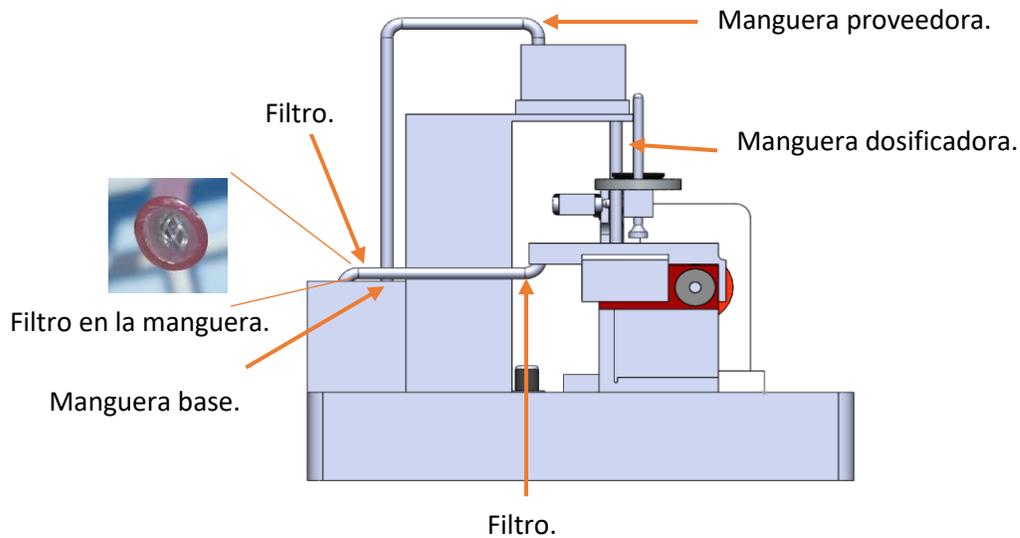


Figura 34. Mangueras del depósito.

Para el proceso de filtrado se coloca en la manguera base y proveedora una malla de acero como se muestra en la figura 36, al principio y al final de cada una como se muestra en la figura 35 con la finalidad de que el lubricante pueda seguir su curso, pero las partículas mayores a 0.250 mm sean filtradas, la malla que se usará será de número 60 dadas las especificaciones por la norma (ASTM E11-17) [12]. Se escogió este tipo de malla dado que la abertura de los orificios es de 0.250 mm, ideal para poder ajustarla a las mangueras y que cuando pueda llegar a haber acumulación de partículas no presente problemas en el paso del lubricante

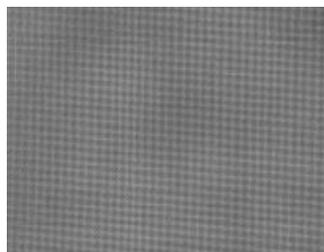


Figura 35. Malla [36].

4.3 Montaje del módulo

4.3.1 Revisión de los depósitos

Después de que se fabricaron las piezas para el módulo se procede a colocar cada una de las partes sobre la máquina tribológica perno sobre disco, se verifica que cada una entre de manera correcta y que sean las medidas correctas, cuando las dos partes del piso del depósito base sean unidas con el elastómero se examina que no se tengan fugas como se muestra en las figuras 36 y 37.

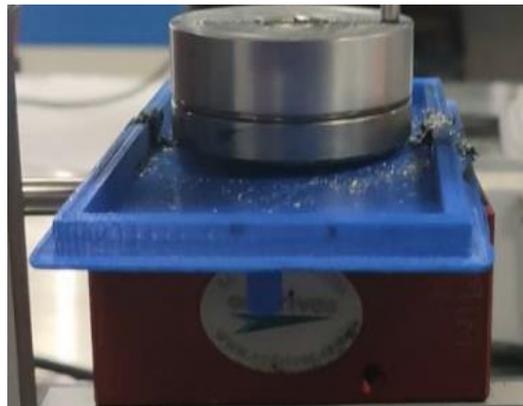


Figura 36. Piso del depósito base.



Figura 37. Caja de depósito base.

4.3.2 Revisión de las primeras pruebas con el módulo

El módulo se monta sobre la máquina perno sobre disco como se muestra en la figura 38, se verificó que no existan fugas, que todos los depósitos se acoplan bien, se comprobó que no existe ninguna interrupción del módulo con la prueba y se confirmó que lubriqué en la zona deseada, una vez realizada la revisión se conectan las mangueras base, proveedora y dosificadora para que se pueda efectuar la recirculación del lubricante.

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica



Figura 38. Primer montaje del módulo.

Cuando se verifica que no tiene deficiencias el módulo, se corrobora que el módulo pueda lubricar de manera eficiente y precisa en diferentes tiempos de lubricación, por ello se realizaron tres pruebas de desgaste con probetas de metal con el módulo funcionando, los parámetros de las pruebas se muestran en la tabla 7.

Prueba	Frecuencia de lubricación.	Tiempo (minutos)	Desplazamiento (metros)	Fluido
1	30 s.	5	28	agua
2	60 s.	10	56	agua
3	90 s.	25	140	agua

Tabla 7. Primeras pruebas.

La finalidad de estas pruebas es verificar que se cumplan las características deseadas del sistema tales como facilitar las pruebas tribológicas, verificar la recirculación del aceite como se muestra en las figuras 39,40,41,42.

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica



Figura 39. Módulo montado en el equipo para prueba.

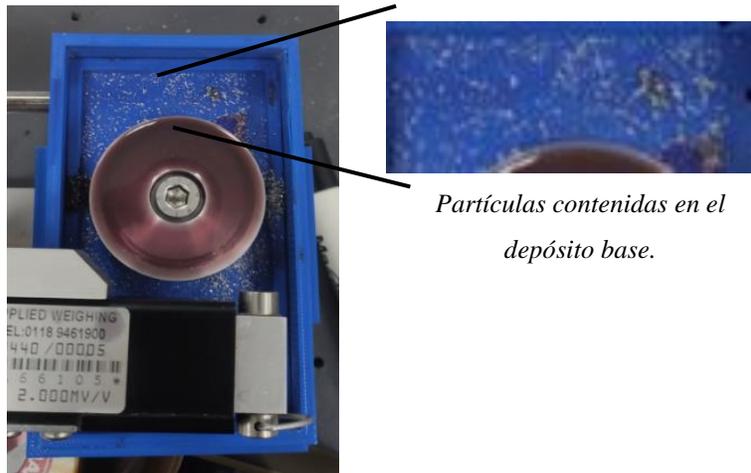


Figura 40. Disco después de prueba lubricada.

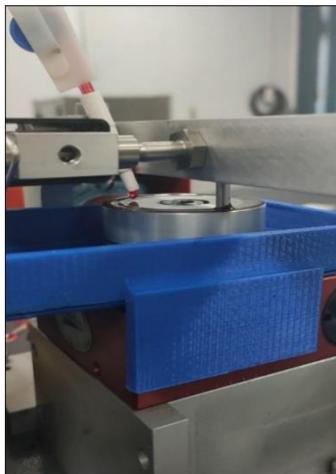


Figura 41. Lubricación en pruebas.

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

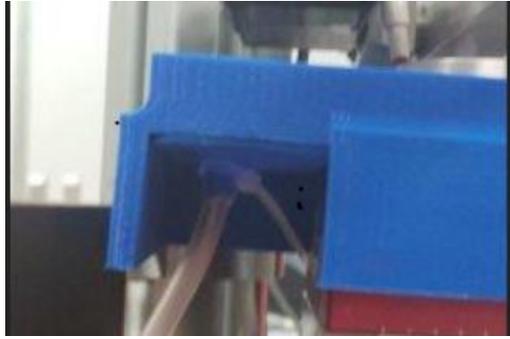


Figura 42. Conexión de manguera base.

Al comprobar que el módulo cumple con las características deseadas y no genera ninguna interferencia en la realización de las pruebas se hace el montaje final sobre la máquina perno sobre disco como se muestra en las figuras 43 y 44, para el correcto uso del módulo y que su vida útil sea prolongada se propone un manual de limpieza del módulo como se muestra en el anexo 3.



Figura 43. Montaje final del módulo.

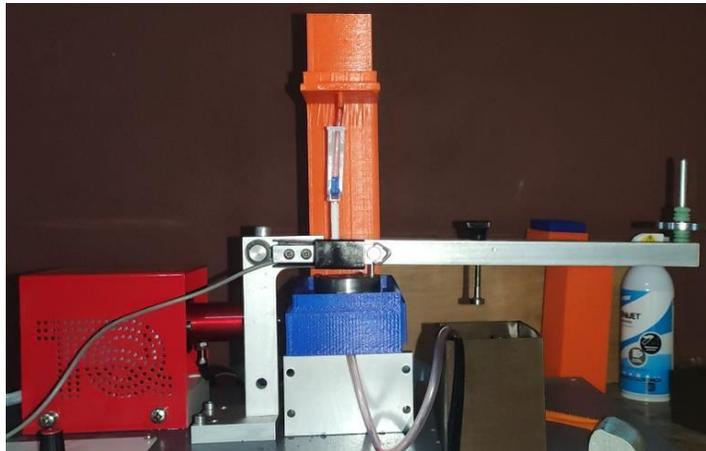


Figura 44. Montaje del módulo.

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

4.4 Costos de los componentes

Se cuantifican todos los elementos para la elaboración de módulo de lubricación, de manera unitaria y total como se muestra en la tabla 8, en dónde se enlistan los recursos que se destinaron para la manufactura y ensamble, generando el presupuesto total del módulo.

CONCEPTO DE GASTO	Unidades	Precio \$
PLA	2	600
Silicona	1	300
Paño limpiador	3	180
Aceite ATF Dexron III	1	400
Lijas	2	10
Guantes	1	120
Acetona	1	20
Aire comprimido	1	100
Bomba	2	220
Mangueras	6	20
Desengrasante	1	100
Regulador de caudal	1	50
Mano de obra y diseño	80 hrs	8000
Total		\$10,120

Tabla 8. Costos.

5. Pruebas de funcionamiento

Se realizaron 4 pruebas para validar el funcionamiento del módulo en la máquina perno sobre disco como se muestra en las figuras 45 y 46, en la tabla 9 se muestran los parámetros de las pruebas.

Prueba	Fluido.	Frecuencia de lubricación.	Tiempo (min).	Viscosidad (cSt)
1	Aceite.	1 gota por minuto.	30	33 - 38 (ASTM D-445)
2	Aceite.	1 gota por minuto.	10	33 - 38 (ASTM D-445)
3	Agua.	1 gota por minuto.	30	1
4	Agua.	1 gota por minuto.	10	1

Tabla 9. Pruebas para validación del módulo.

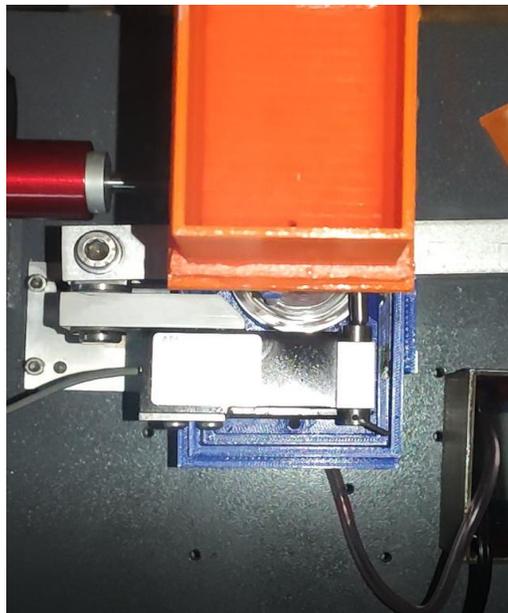


Figura 45. Prueba en operación con lubricación con agua.

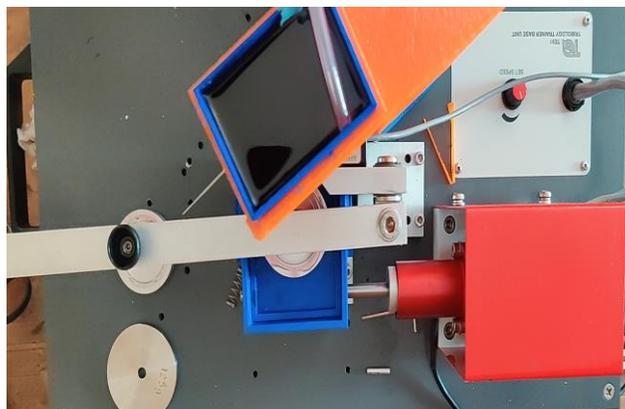


Figura 46. Prueba en operación con lubricación con aceite.

5.1 Materiales de probetas

Para las pruebas tribológicas se manufacturo el perno con una aleación de Al-Mg y el disco se realizó de una barra de acero AISI 1018 CD. Las dimensiones se muestran en las figuras 47 y 48.

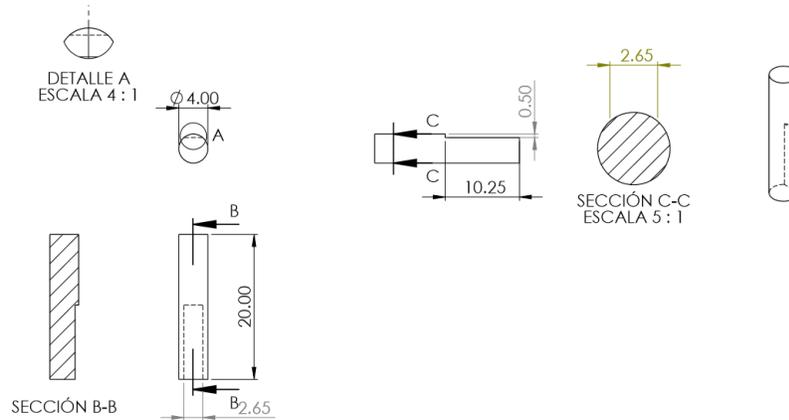


Figura 47. Dimensiones del perno.

Las aleaciones aluminio-magnesio tienen un amplio rango de aplicaciones debido a sus buenas propiedades mecánicas [33], la aleación es ampliamente usada en aplicaciones en ambientes salinos y alcalinos debido a que es resistente ya que el material es más anódico gracias al magnesio, su rango de aplicación es amplio, especialmente en la industria automotriz y marítima [34].

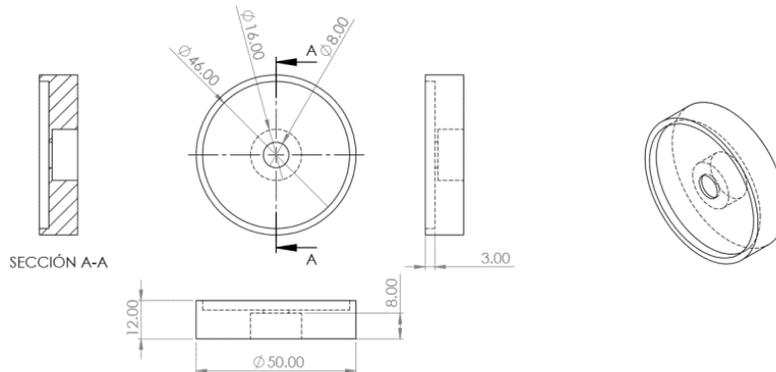


Figura 48. Dimensiones del disco.

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

El acero AISI 1018 CD (ASTM A 108-18) [15] es un acero de bajo-medio carbono, fabricado mediante un proceso de estirado en frío el cual le otorga una mayor dureza y resistencia a la tensión en comparación con el acero comercial, se utiliza en componentes de maquinaria debido a su facilidad para conformarlo y soldarlo [35].

Las pruebas se realizaron dentro de un rango de 3-5m/s (100 RMP) lo que equivale aproximadamente a 22 y 66 m de deslizamiento, se realizó un estudio de frecuencias modales con el software Workbench 2019 R2, con los diferentes tipos de peso que se pueden ocupar en las pruebas, para evitar que las revoluciones del motor entren en resonancia con el brazo de aplicación de la máquina perno sobre disco previniendo que este efecto perjudique a los resultados de las pruebas, como se muestra en el anexo 2. La fuerza de fricción fue monitoreada y registrada durante toda la prueba. La carga normal aplicada entre el perno y el disco fue de 15.62 N, las superficies de contacto del perno y del disco se prepararon con lijas de carburo de silicio P240, P400, P600, P800, P1000, P1200 y P2500. Las características mecánicas de ambos materiales se muestran en la tabla 10.

Probeta	Material	Dureza	Rugosidad Ra
Perno	Aleación Al-Mg	186.1 HV 1.825 GPa	0.80 μm
Disco	Acero AISI 1018 CD	209 HV 2.05 GPa	0.20 μm

Tabla 10. Propiedades de las probetas.

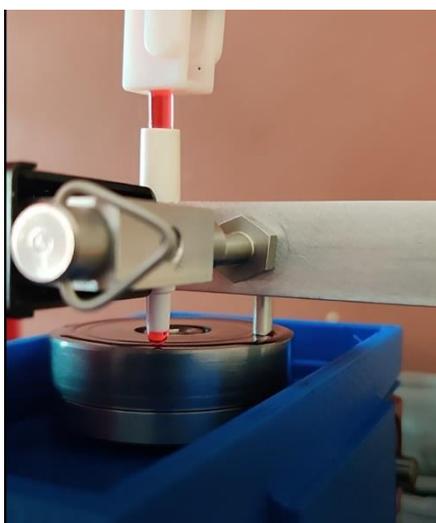


Figura 49. Formación de la gota de aceite.



Figura 50. Formación de la gota de agua.

Para cada ensayo fueron monitoreadas los parámetros de humedad y temperatura, al finalizar cada una de las pruebas se limpiaron las probetas con un paño, acetona y aire comprimido, en las figuras 49 y 50 se muestra la formación de la gota de los lubricantes durante las pruebas.

5.2 Resultados

5.2.1 Coeficiente de fricción

En la figura 51 se puede observar el coeficiente de fricción en condición seca, el cual presenta un comportamiento abrupto en los primeros 153 segundos esto se debe a interacción entre las micro asperezas de los materiales generando coeficiente mayor a .9, después las superficies se acoplan al movimiento produciendo un coeficiente de fricción en el rango de .5 a .4, lo que corresponde a una prueba antes realizada en el trabajo de la construcción de una máquina tribológica perno sobre disco [37].

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

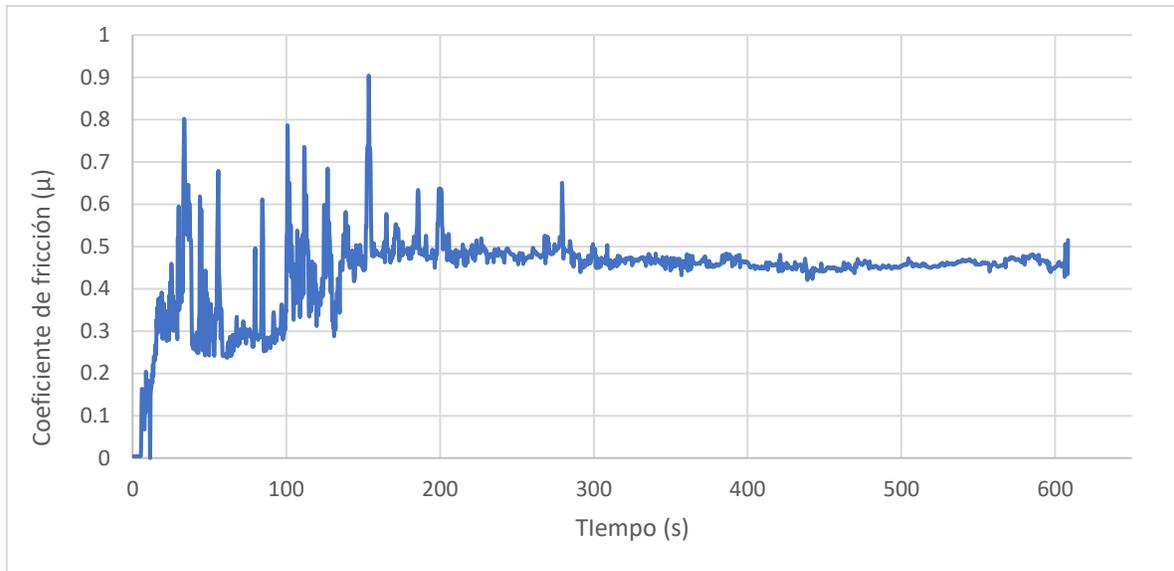


Figura 51. Prueba en seco 10 min.

El coeficiente en la figura 52 tiene un valor máximo de 0.053 y un mínimo de 0.029 con un comportamiento constante entre ese rango, en la figura 53 el coeficiente tiene un valor de 0.12 a .7 este valor disminuye después de 60 segundos a un rango de .8 a .5 durante el resto de la prueba.

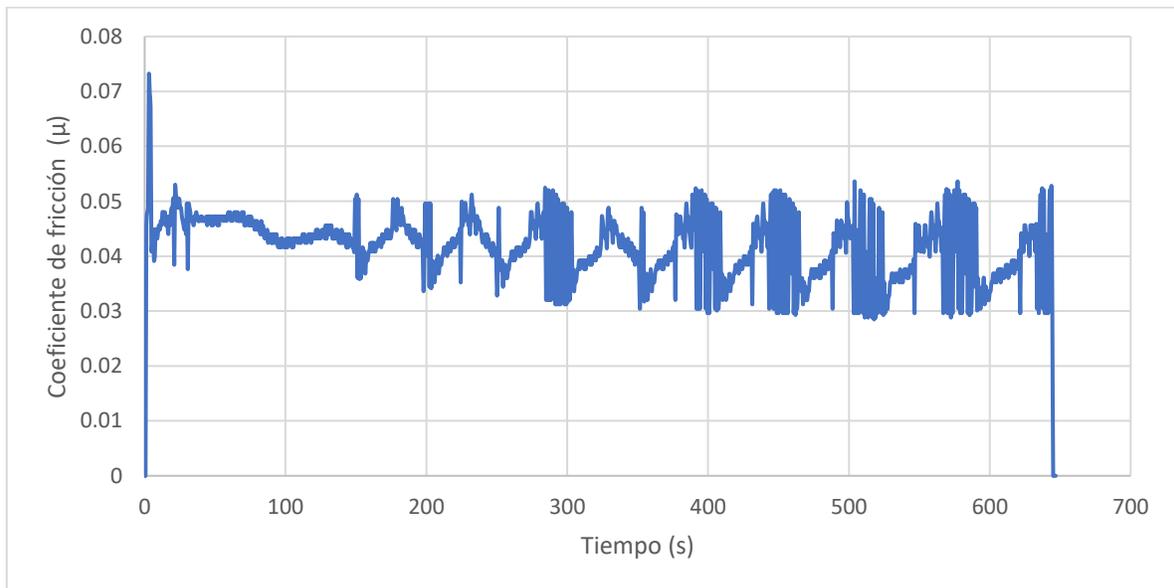


Figura 52. Lubricación con aceite 10 min.

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

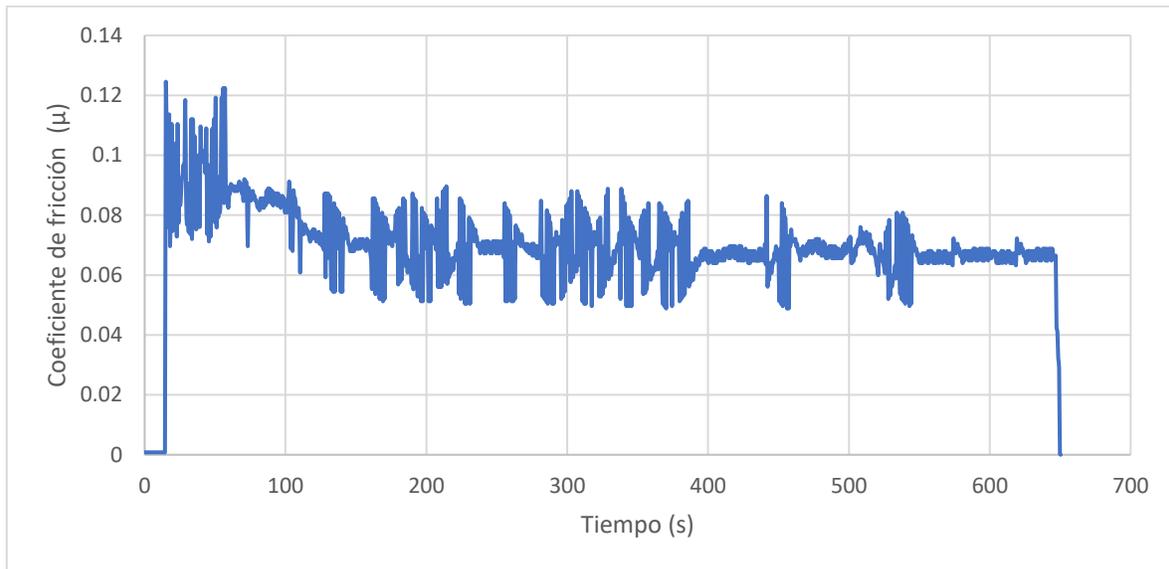


Figura 53. Lubricación con agua 10 min.

El coeficiente en la figura 54 tiene un valor entre .07 y .04 estable durante la prueba, en la figura 55 el coeficiente tiene un comportamiento muy abrupto en el rango de 0.1 y 0.05.

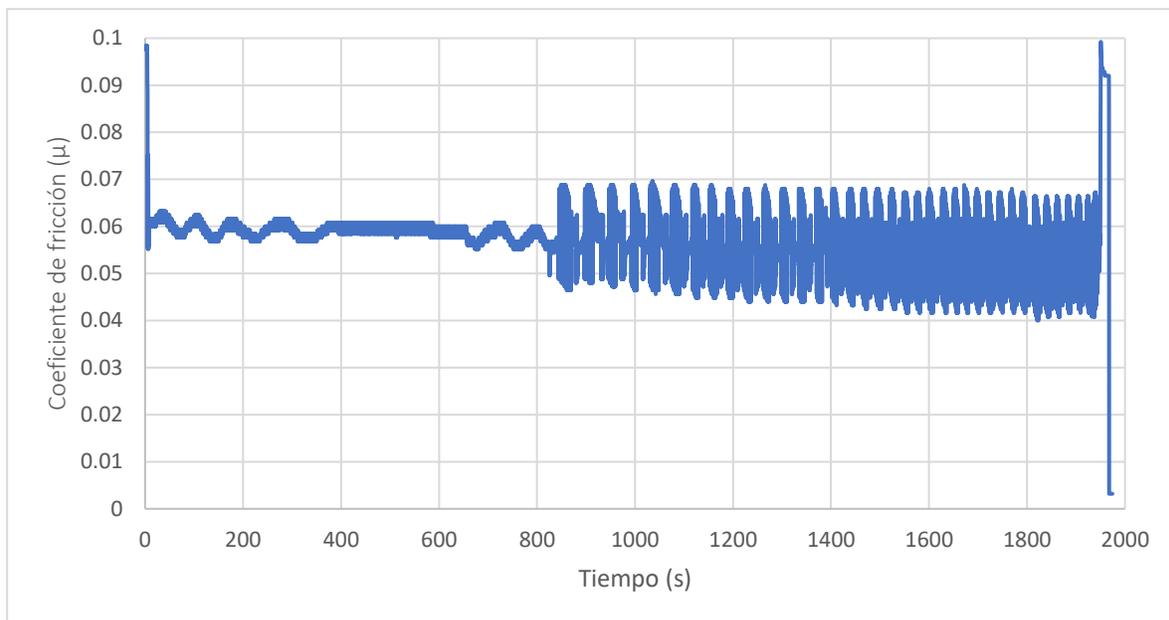


Figura 54. Lubricación con aceite 30 min.

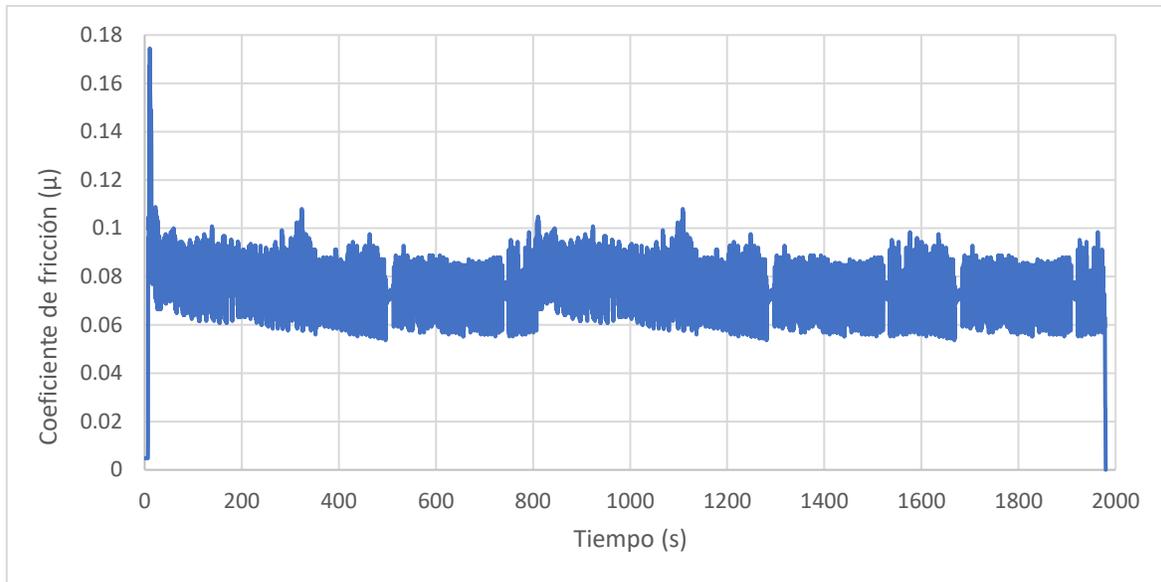


Figura 55. Lubricación con agua 30 min.

Mediante las gráficas se demuestra que el módulo suministro de manera eficiente el lubricante (aceite Dexron III y agua), para cada una de las pruebas realizadas reduciendo los coeficientes de fricción en comparación con la prueba realizada en seco.

5.2.2 Desgaste de perno y disco

Se compararon las probetas después de la realización de las pruebas, en la prueba de duración de 30 min, en las figuras 57 y 58 se muestran los discos después de la prueba, las figuras 59 y 60 muestran los pernos desgastados, se puede observar que hubo menos desgaste en las probetas lubricadas por aceite que en las lubricadas por agua.



Figura 56. Desgaste del disco lubricación con aceite.

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica



Figura 57. Desgaste del disco lubricación con agua.



Figura 58. Desgaste del perno lubricación con aceite.



Figura 59. Desgaste del perno lubricación con agua.

Conclusiones

Se utilizó la metodología Despliegue de funciones de calidad (QFD) como base para el diseño del módulo de lubricación, diseñando un módulo básico y sencillo que se puede adaptar a diferentes equipos tribológicos, el módulo se fabricó por manufactura aditiva mediante la técnica de modelado por deposición fundida (FDM), con una impresora 3-D Createbot Max II utilizando filamento de material PLA, el módulo se logró fabricar con un costo de \$10,120.

Se montó el módulo en un equipo tribológico perno sobre disco (ASTM G99) para realizar pruebas en condición lubricada de forma continua y controlada, el equipo se validó realizando pruebas con aceite Dexron III y agua para probar que no existan fugas de lubricante, y las partículas desprendidas de la prueba sean contenidas en el depósito base para su posterior análisis.

Se realizaron pruebas con períodos de duración de 10 a 30 minutos para comprobar el funcionamiento de la bomba, así como la adecuada recirculación del fluido, las gráficas demuestran que la lubricación fue constante durante toda la prueba reduciendo los coeficientes de fricción.

Trabajos futuros

Como trabajos futuros se propone realizar más pruebas lubricadas con el módulo de manera que, se determinen en donde puede ocurrir una falla por el uso y el desgaste continuo, de esa manera reemplazar la pieza y trazar un plan de mantenimiento para reducir las inactividades del módulo.

El módulo puede ser probado en otro tipo de configuraciones de máquina tribológicas, para que se valide el funcionamiento y eficiencia del módulo con los parámetros de las pruebas a realizar.

Referencias

1. Holmberg K, Andersson P, & Erdemir A. (2011) Global energy consumption due to friction in passenger cars. *Tribology International*. 47: 1-4.
2. Wei D, Bassem K, & Hong L. (2016) Roles of Nanoparticles in Oil Lubrication. *Tribology International*. 52: 1-8.
3. Medrano Z, Gómez J, Pérez C, & Vera M. (2016) Nueva metodología de diagnóstico de fallas en rodamientos en una máquina síncrona mediante el procesamiento de señales vibro acústicas empleando análisis de densidad de potencia. *Ingeniería Investigación y Tecnología*. XVII (1): 1-2.
4. García A, Flores L, & Montiel A. (2013) Investigación numérica de las condiciones de lubricación en chumaceras hidrodinámicas con el efecto del desalineamiento del eje. *Ingeniería Investigación y Tecnología*. XIV (1): 1-2.
5. Chao G, Qinghua S, Zhanqiang L, & Long C. (2019) Hydrodynamic lubrication analysis of two-dimensional section between piston skirt and textured cylinder wall considering slip boundary conditions. *Tribology International*. 140: 2-5.
6. Simon T, & Michael M. (2004). Automotive tribology overview of current advances and challenges for the future. *Tribology International*, 37, 1-2.
7. Bhushan, B. (1999). Principles and Applications of Tribology. (2nd Edition). Columbia: Wiley.
8. García R. (2016). Ingeniero Marino. (11 noviembre 2018), de: <https://ingenieromarinero.com/lubricantes-tribologia/>
9. Tecnología A. (2012). Tecnología. (11 noviembre 2018), de: <https://www.areatecnologia.com/mecanismos/lubricacion.html>
10. Angulo, A & Cardona, E. (2013). METALMECÁNICA AJUSTE Y MONTAJE DE MAQUINARIA ELEMENTOS DE MÁQUINAS 12. (1st Edition). Bogotá: Centro de Gestión de Mercados, Logística y TIC's SENA.
11. Sistema de lubricación. (2018). Sistema de Lubricación. (3 abril 2020), de <https://sites.google.com/site/stmalubricacionmelendez21020/>
12. Universidad de Madrid. Universidad Carlos III de Madrid. (11 noviembre 2018), de: http://ocw.uc3m.es/ingenieria-mecanica/tecnologia-de-maquinas/material-de-clase-1/lubricacion_apuntes_transp.pdf

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

13. Ghosh M, Majumdar B & Sarangi M. (2013). Theory of Lubrication. (1st ed.) San Bernardino: MC Graw Hill.
14. Changir, J. (2014). Instituto Universitario Carlos Soublette. (11 noviembre 2018), de: <http://termofluidoster386iunics.blogspot.com/2014/04/viscosidad.html>
15. ASTM international. (c 1996 - 2020). ASTM International. Retrieved 2 febrero 2019, from <https://www.astm.org/>
16. Galas R, Omasta M, Krupka I & Hartk M (2016). Laboratory investigation of ability of oil-based friction modifiers to control adhesion at wheel-rail interface. *Wear*, 368, 1-2.
17. Jonathan Y, Harikumar N, Satyanarayana A, & Sinha K. (2010). Localized lubrication of micromachines: A feasibility study on Si in reciprocating sliding with PFPE as the lubricant. *Wear*, 270(12), 2-3.
18. Moreno M, Gallardo E, Vite M, & Peña A Field and laboratory assessments of the friction coefficient at a railhead. *Journal of rail and rapid transit*, 230(1), 1-4.
19. Lewis R, Gallardo E, Hilton T & Armitage T (2009). Effect of oil and water mixtures on adhesion in the wheel/rail contact. *Journal of rail and rapid transit*, 223(1), 2-3.
20. Lin, L, Sun C, Emric S, Kopnarski M & Schlarb A (2020). Assessment of the lubrication ability of polymer materials in the fluid-free steel/steel tribosystem. *Wear*, 428(1), 4-6.
21. Qin W, Wang M, Sun W, Shipway P & Li X. (2019). Modeling the effectiveness of oil lubrication in reducing both friction and wear in a fretting contact. *Wear*, 426(1), 2-4.
22. Santa María, J. F. (2012). Development of a lubrication system for wear and friction control in wheel/rail interfaces. (1st Edition). Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
23. Watanabe J.R. (2000). Curso de diseño mecánico. (1st Edición). Ciudad de México: IPN ESIME SEPI.
24. Anton Paar. (c2020). Anton Paar. (3 marzo 2019), de: <https://www.anton-paar.com/us-en/>
25. Urbano A. (2012). Método práctico de obtención de potencia y eficiencias de unidades de bombeo en operación. *SciELO*, 33(3), 1-2.

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

26. Myshkin N.K, Petrokovets M.I, & Kovalev A.V (2005). Tribology of polymers: Adhesion, friction, wear, and mass-transfer. *Tribology International*, 38(1), 1-10.
27. Yezhe L, Zhu Y, & Olofsson U. (2015). Wear between wheel and rail: A pin-on-disc study of environmental Conditions and iron Oxides. *Wear*, 1(1), 1-8.
28. Yáñez, M. (2018). Generación de una metodología para el desarrollo de productos innovadores en la manufactura. (1st Edition). Ciudad de México: SEPI ESIME IPN.
29. Createbot. (c2020). CreatebotMéxico. (7octubre2020), de:
<https://createbot.mx/products/createbot-max-ii>
30. Permatex. (c 2020). Ficha técnica. Permatex, 1(1), 1-2.
31. Espinas J. (2020). El blog del terapeuta. (12 agosto 2020), from <https://guiaterapeutica.wordpress.com/2020/02/28/gotas-y-mas-gotas/>
32. Mastoner. (c 2020). Ficha técnica. Filamento PLA, 1(1), 1-2.
33. Mariusz Król, T. T. (2016). Structure and properties of aluminium–magnesium casting alloys after heat treatment. *Springerlink.com*, 10.
34. E.A. Starkejr., A. I. (2001). *Encyclopedia of Materials: Science and Technology* (Second Edition). Elsevier.
35. Vazbros. (c1998-2020). Vazbros Plásticos y metales industriales. Retrieved 13 septiembre 2020, from <https://www.vazbros.com/materiales/acero-aisi-sae-1018-cold-rolled/>
36. IcomallasSA. (c2016). ICOMallas. (9 abril 2020), de:
<http://www.icomallas.com/productos/mallas-tejidas>
37. Vásquez C, Irvin A. (2018). Evaluación tribológica de una grasa lubricante utilizada en curvas de sistemas ferroviarios. (Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica). Instituto Politécnico Nacional, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Zacatenco. México

Anexo 1. Dibujos de Detalle

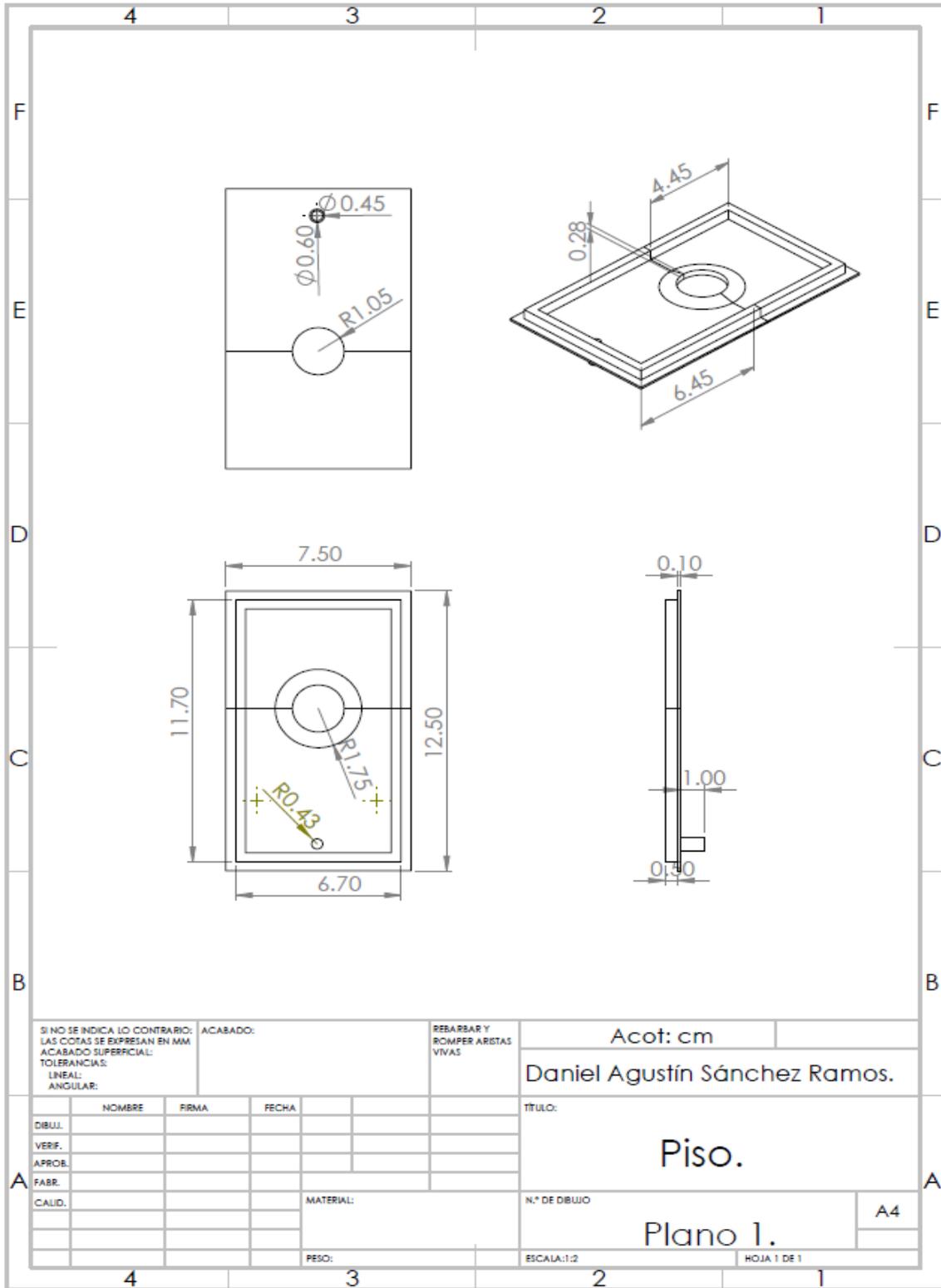


Figura 1. Piso del depósito base.

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

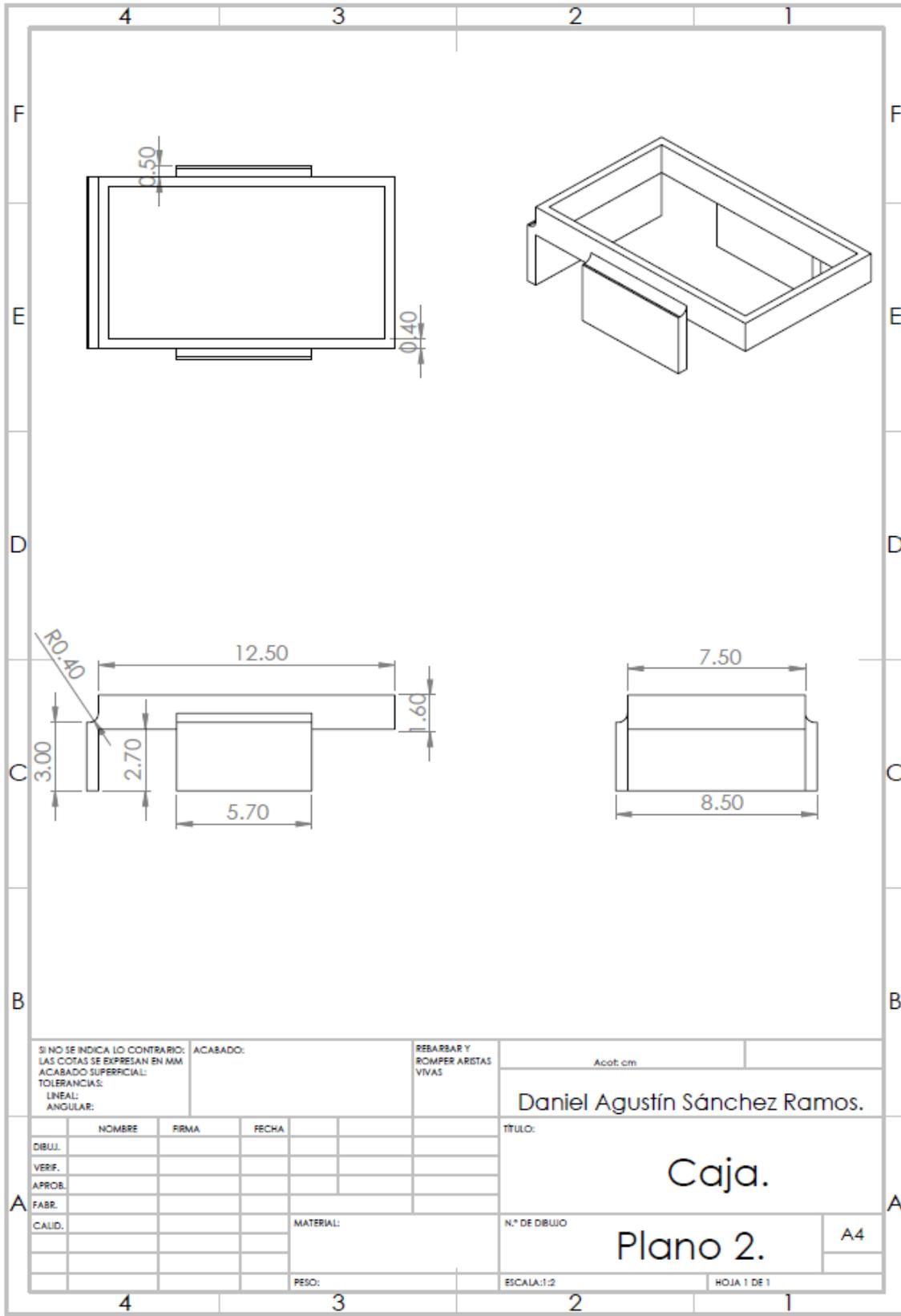


Figura 2. Caja del depósito base.

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

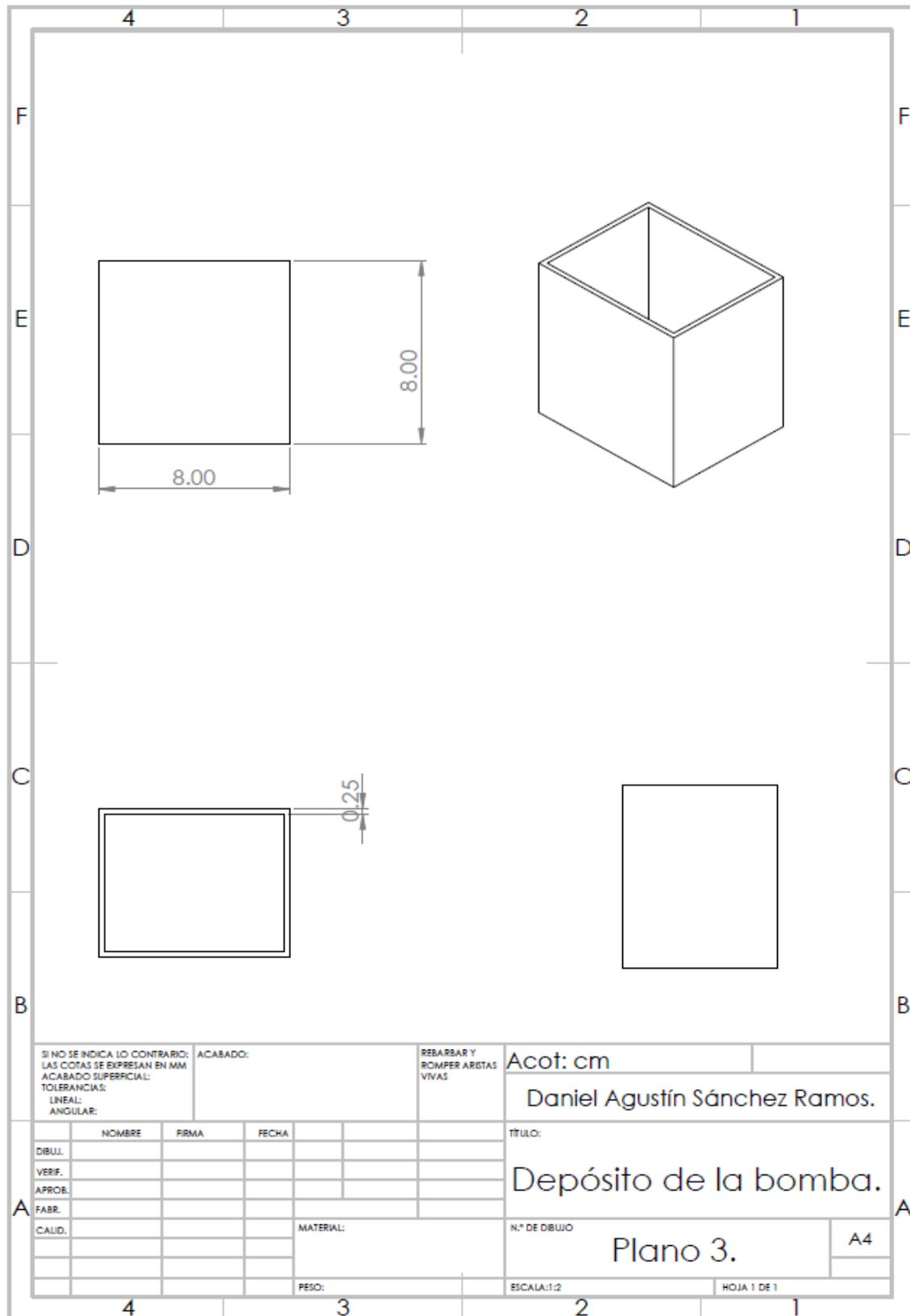


Figura 3. Depósito de la bomba.

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

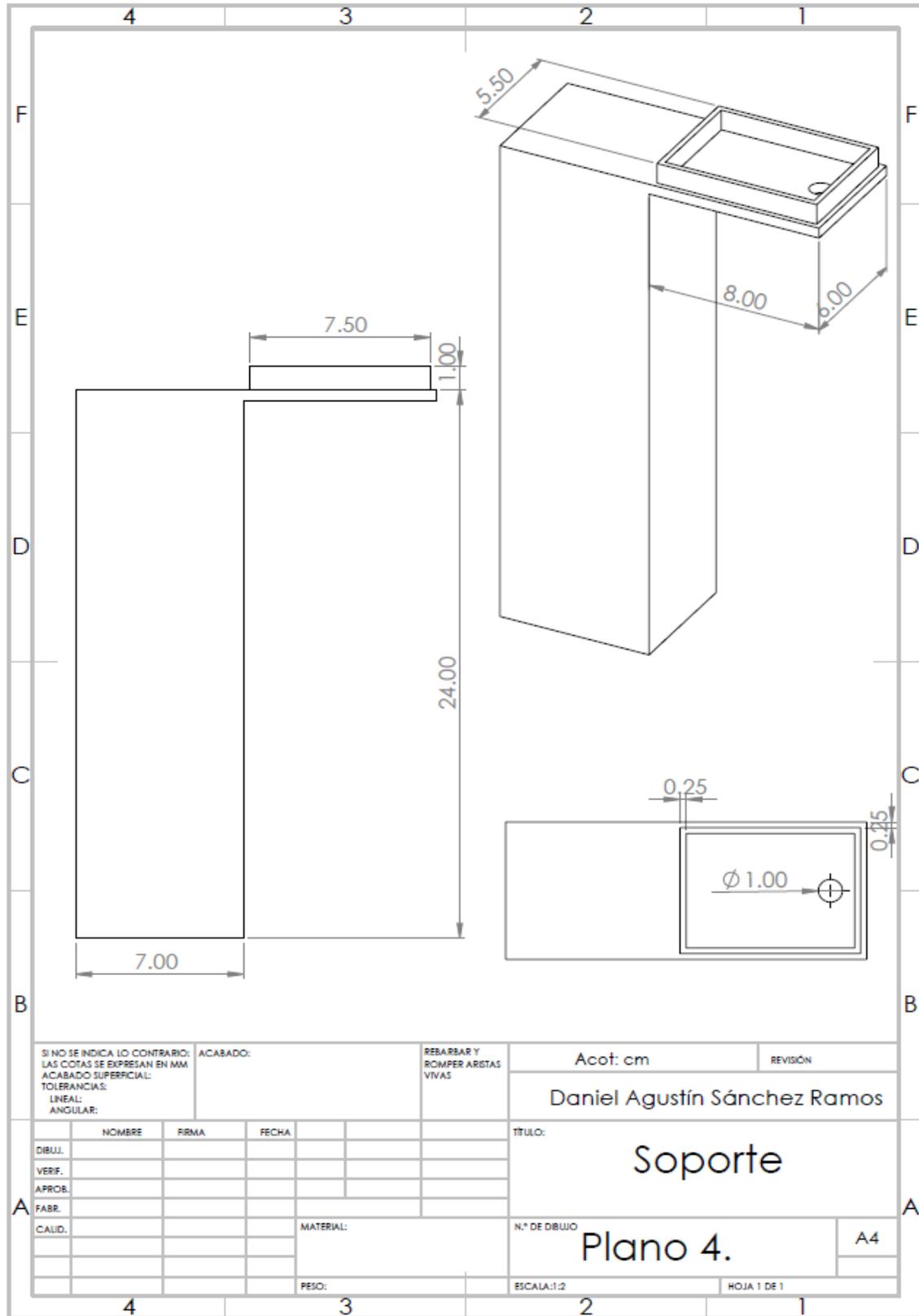


Figura 4. Soporte.

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

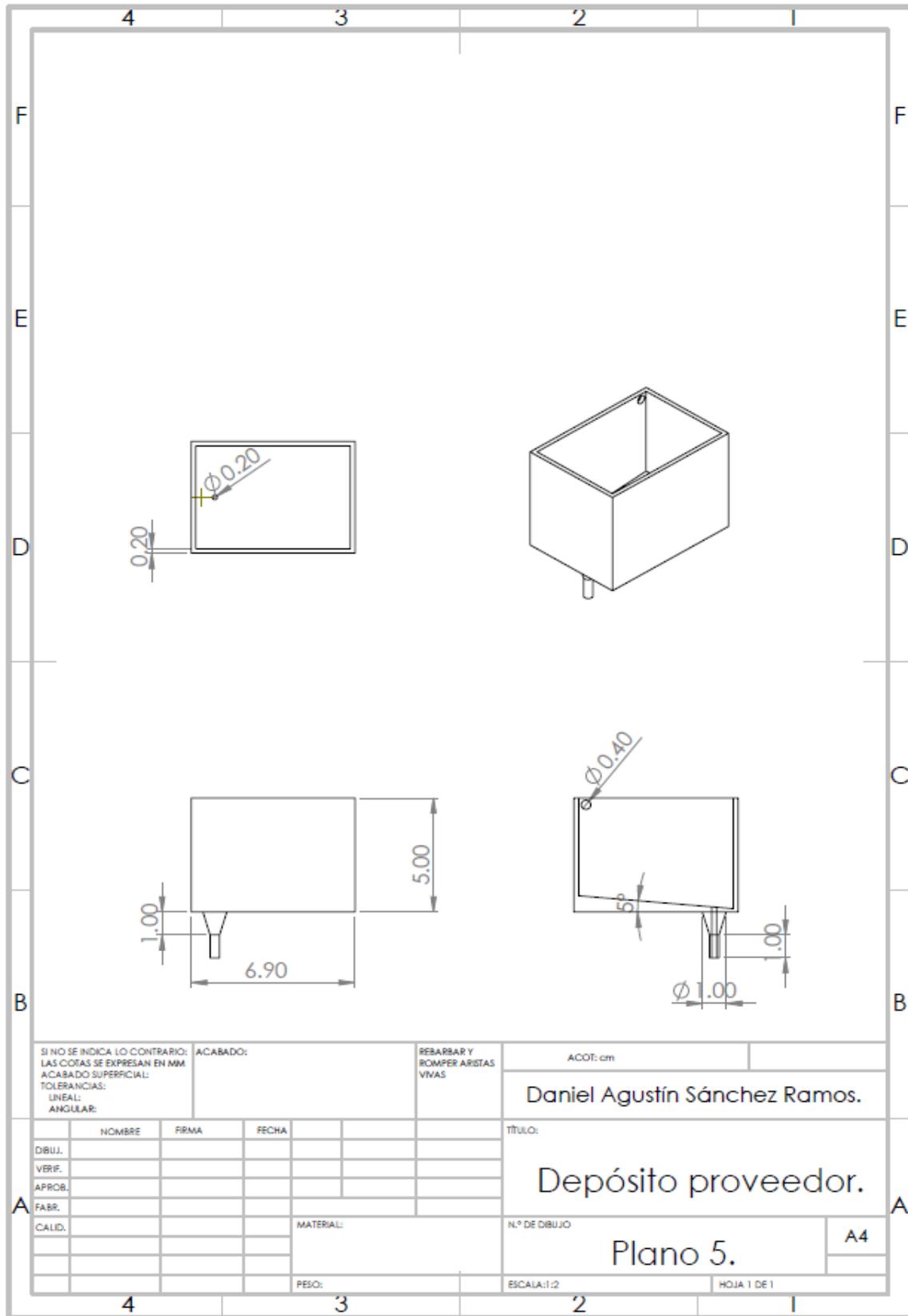


Figura 5. Depósito proveedor.

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

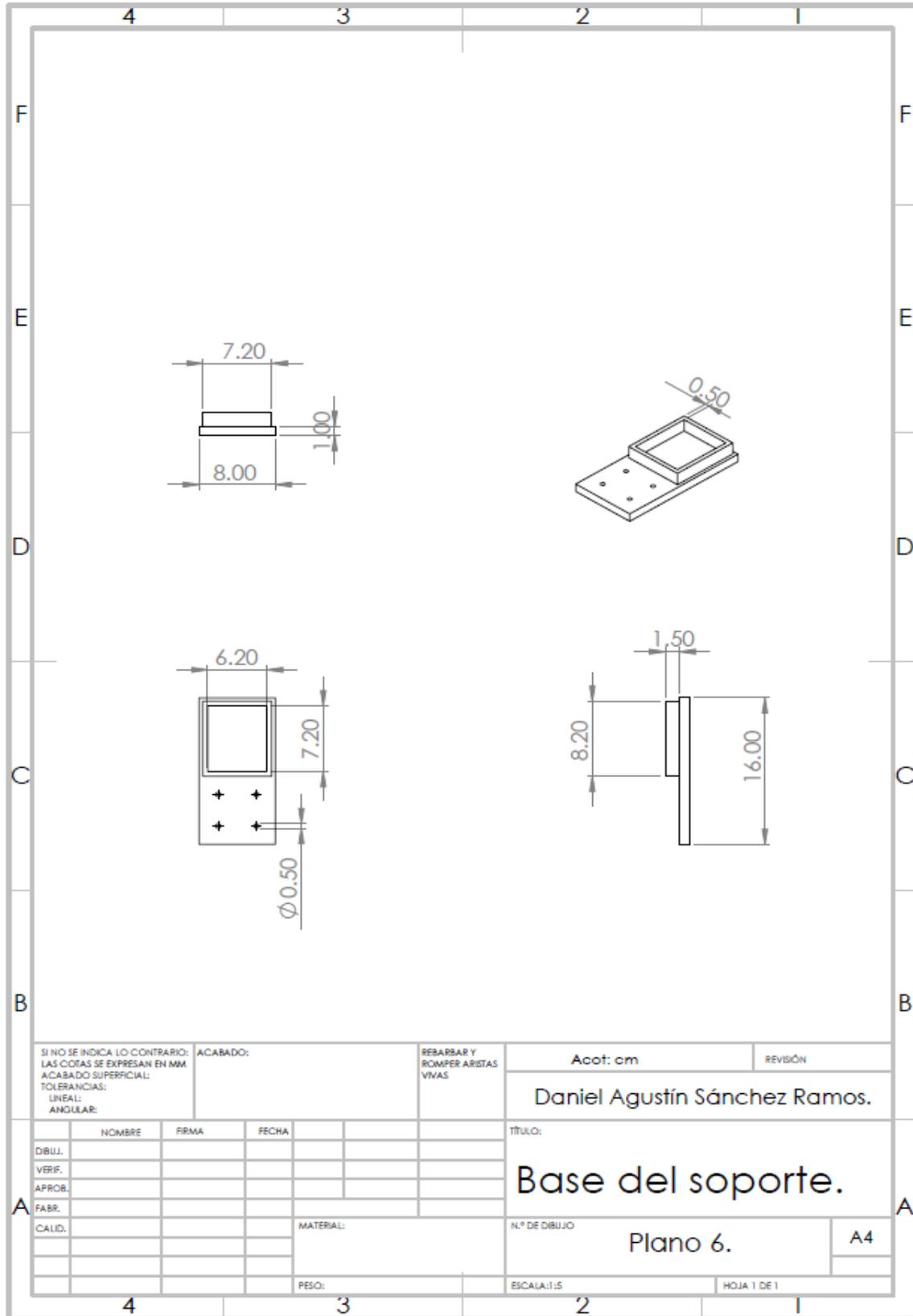


Figura 6. Base del soporte.

Anexo 2. Análisis modal del brazo de la máquina perno sobre disco

Para evitar que el equipo pueda ser afectado por la resonancia, que se puede producir entre las revoluciones del motor y la frecuencia natural del brazo de la máquina tribológica perno sobre disco, se realizó un estudio en ANSYS para determinar las frecuencias naturales del brazo con sus diferentes pesos para que el usuario pueda evitar fallos en los resultados de las pruebas.

Primero se establecen los parámetros en el programa para el análisis, se usa malla de 1 mm como se muestra en la figura 7 y se establecen las fuerzas y reacciones en el brazo como se muestra en la figura 8.

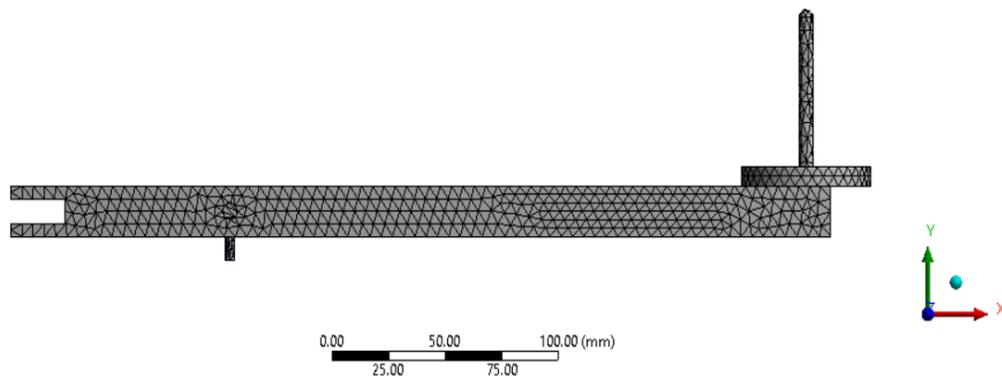


Figura 7. Malla del brazo en ANSYS.

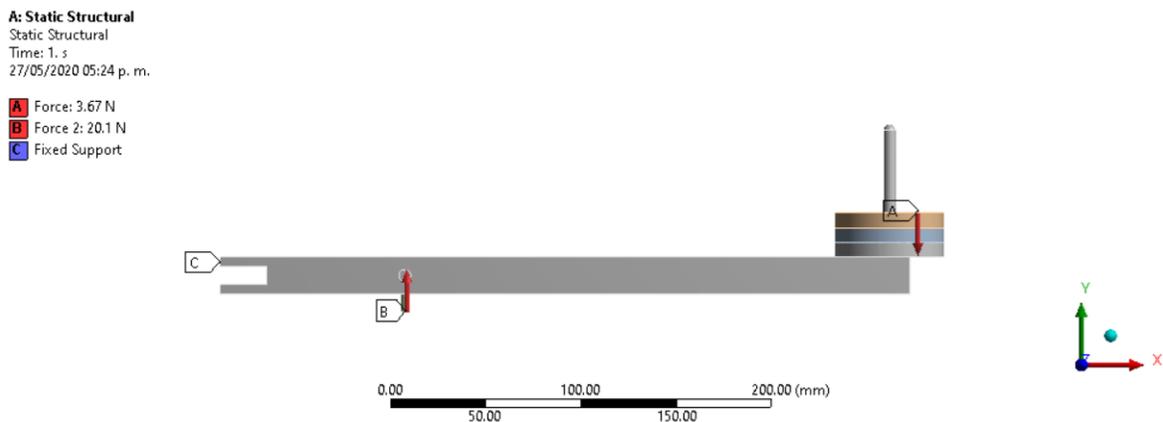


Figura 8. Fuerzas en el brazo.

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

El peso que se puede agregar al brazo varía desde 125 grs hasta 1000 grs, se realiza mediante discos de acero de 125 grs, esto quiere decir que dependiendo del peso que se requiera aplicar para la prueba, se sumara masa a la barra, modificando las frecuencias naturales, por eso se realizó un estudio para la barra con todos los pesos para conocer las frecuencias según la variación de la masa como se muestra en las siguientes figuras.

125 grs.

Modo.	Frecuencia.
1	85.678
2	89.067
3	581.12

Tabla 1. Frecuencias naturales con un disco.

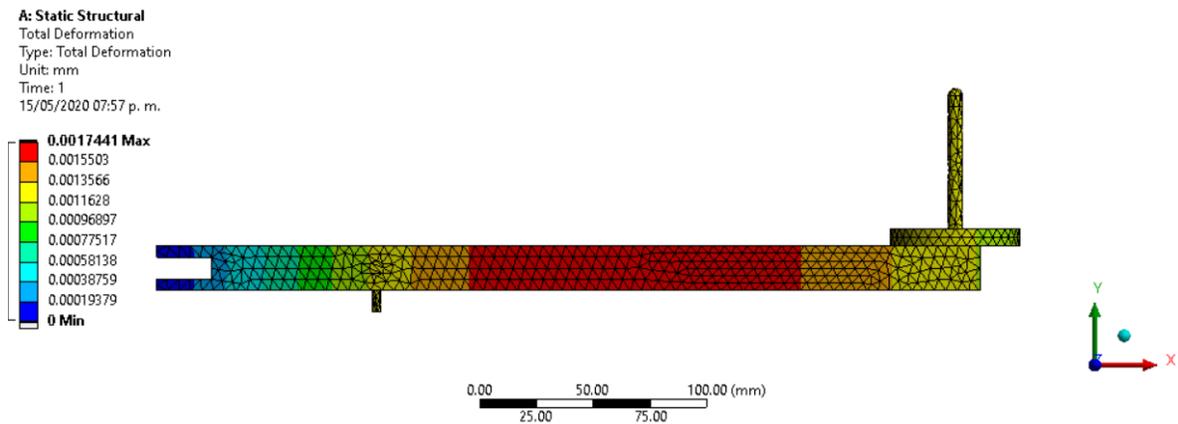


Figura 9. Deformación con un disco.

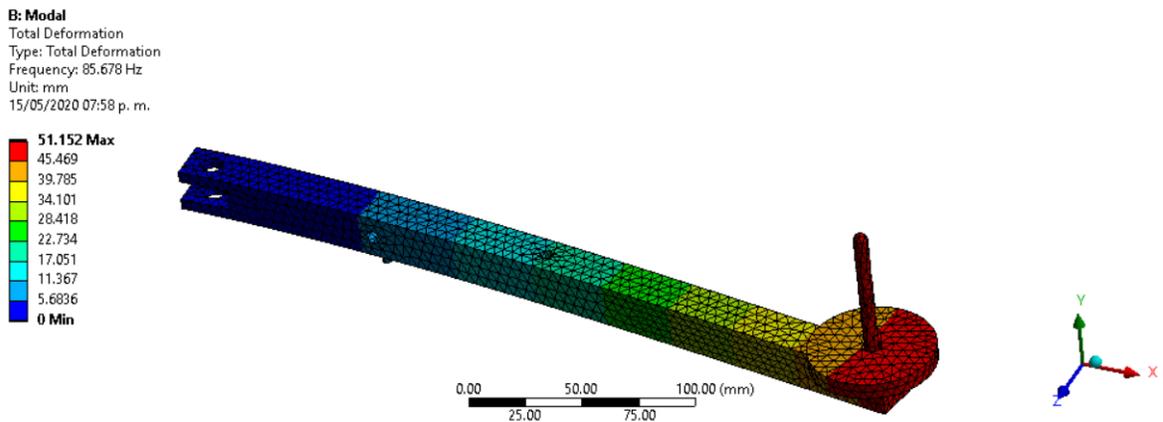


Figura 10. Movimiento en el eje "Z" en la primera frecuencia 85.678[Hz].

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

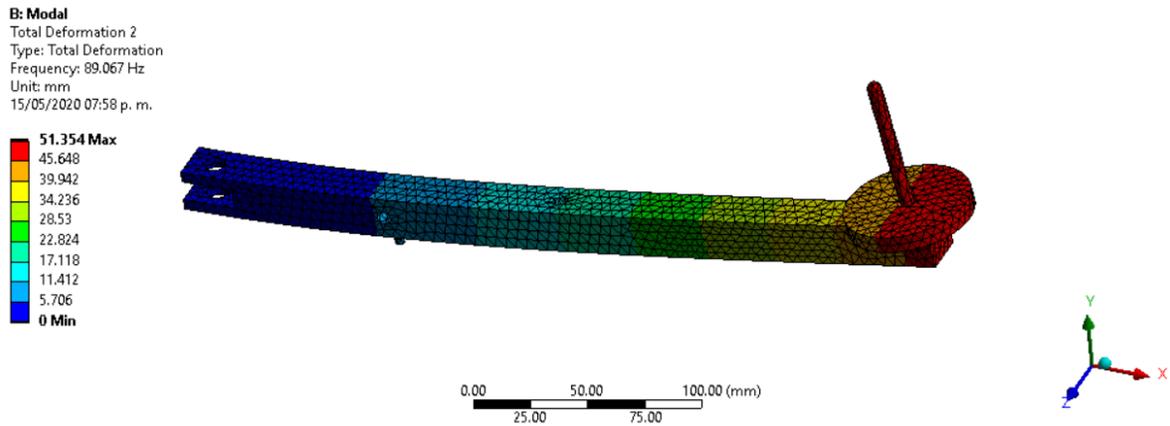


Figura 11. Movimiento en el eje "Y" en la segunda frecuencia 89.067[Hz].

250 grs.

Modo.	Frecuencia.
1	82.479
2	90.167
3	590.49

Tabla 2. Frecuencias naturales con dos discos.

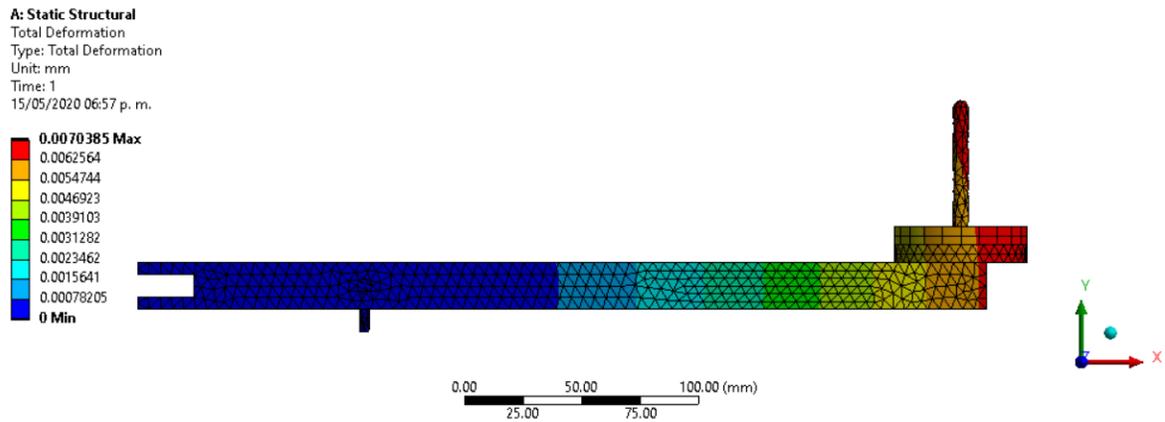


Figura 12. Deformación con dos discos.

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

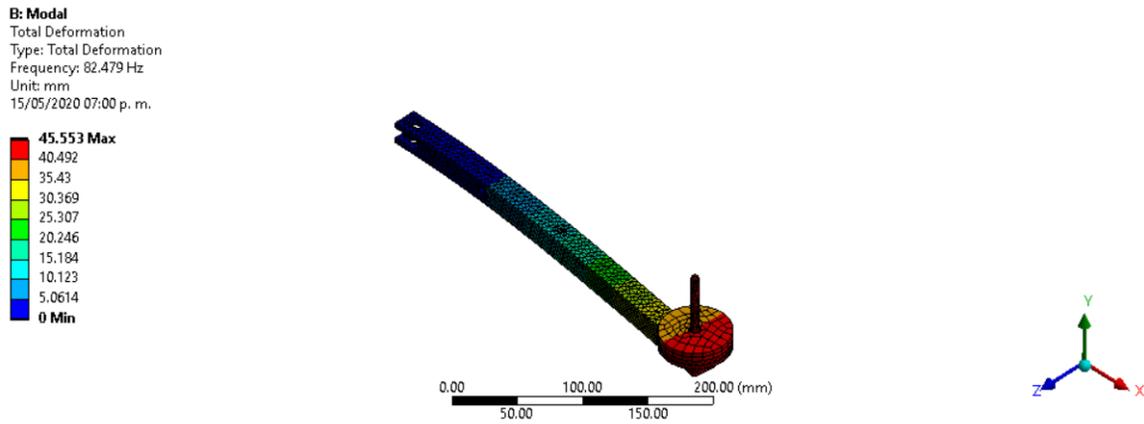


Figura 13. Movimiento en el eje "Z" en la primera frecuencia 82.479[Hz].

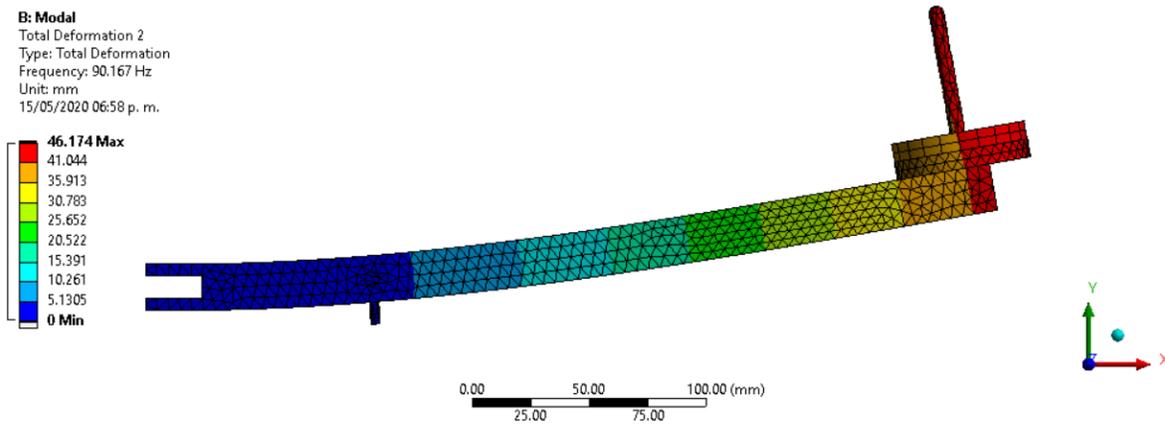


Figura 14. Movimiento en el eje "Y" en la segunda frecuencia 90.167[Hz].

375 grs.

Modo.	Frecuencia.
1	66.852
2	69.498
3	493.47

Tabla 3. Frecuencias naturales con tres discos.

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

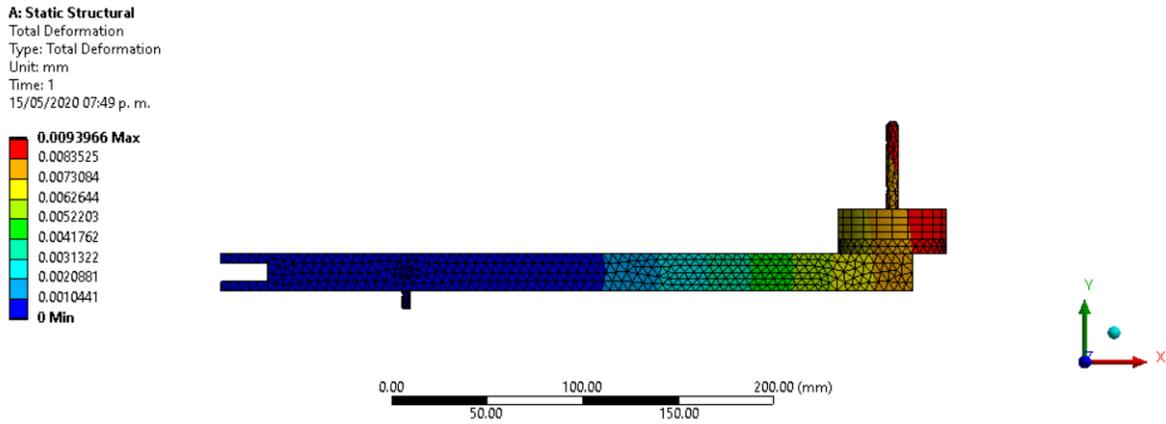


Figura 15. Deformación con tres discos.

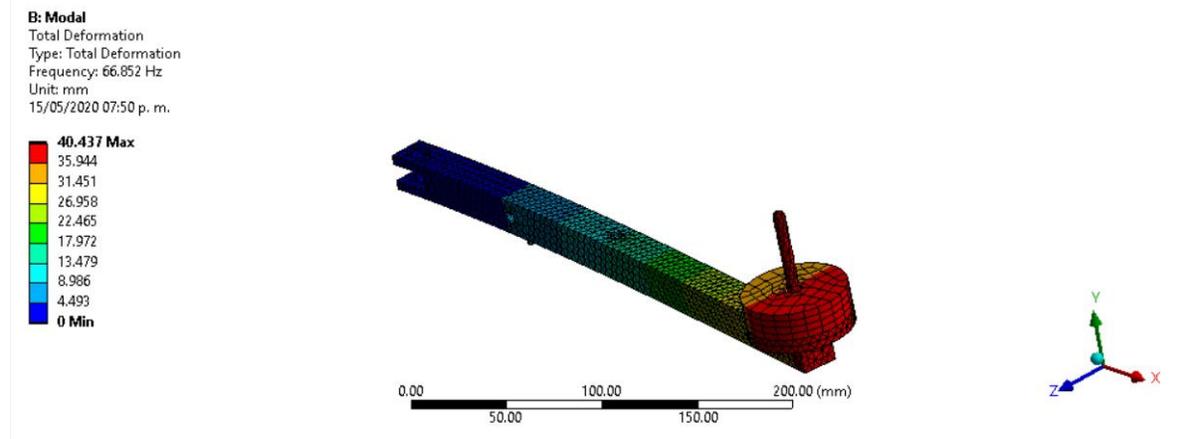


Figura 16. Movimiento en el eje "Z" en la primera frecuencia 66.852 [Hz].

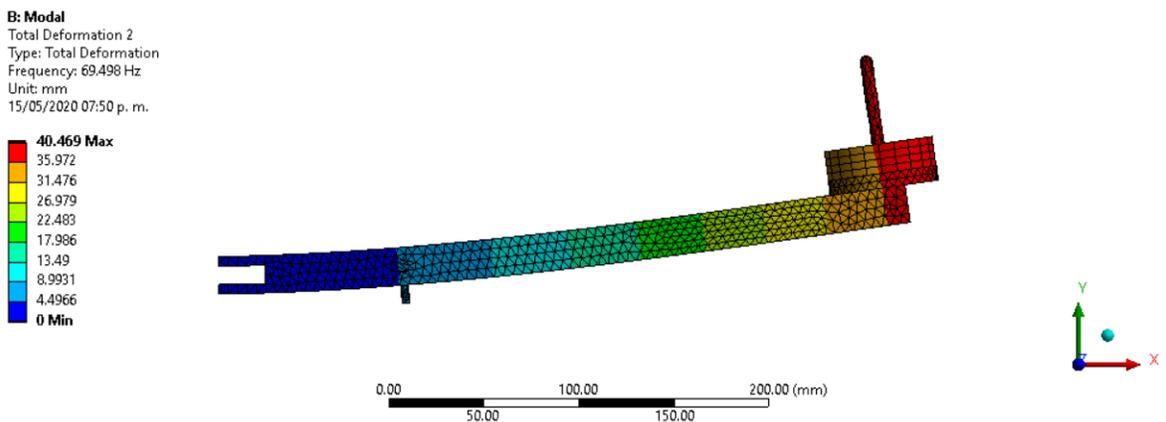


Figura 17. Movimiento en el eje "Y" en la segunda frecuencia 69.498 [Hz].

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

500 grs

Modo.	Frecuencia.
1	61.03
2	63.487
3	450.4

Tabla. 4. Frecuencias naturales con cuatro discos.

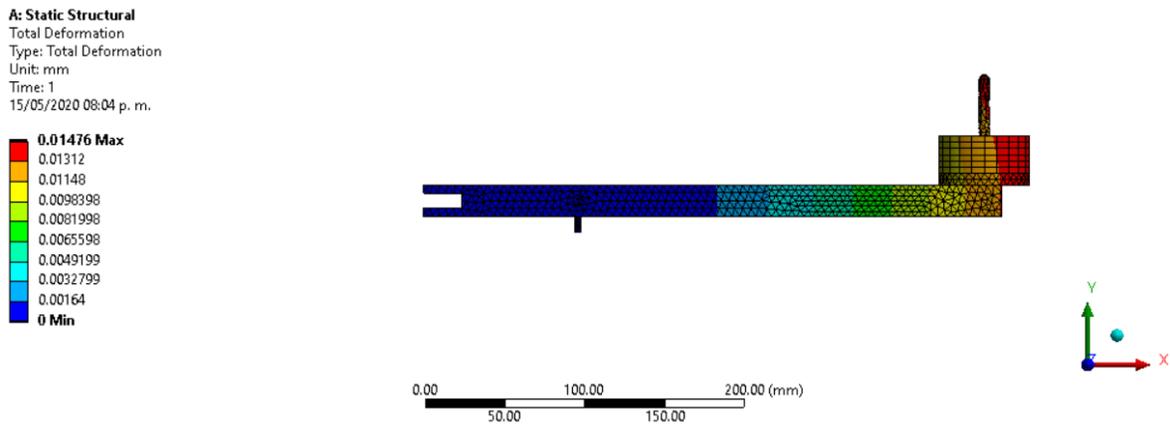


Figura 18. Deformación con cuatro discos.

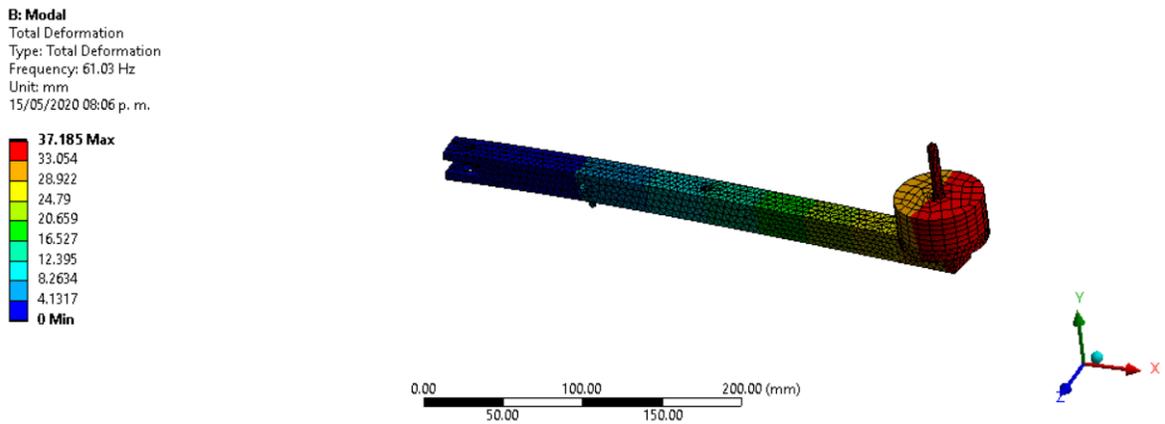


Figura 19. Movimiento en el eje "Z" en la primera frecuencia 61.03 [Hz].

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

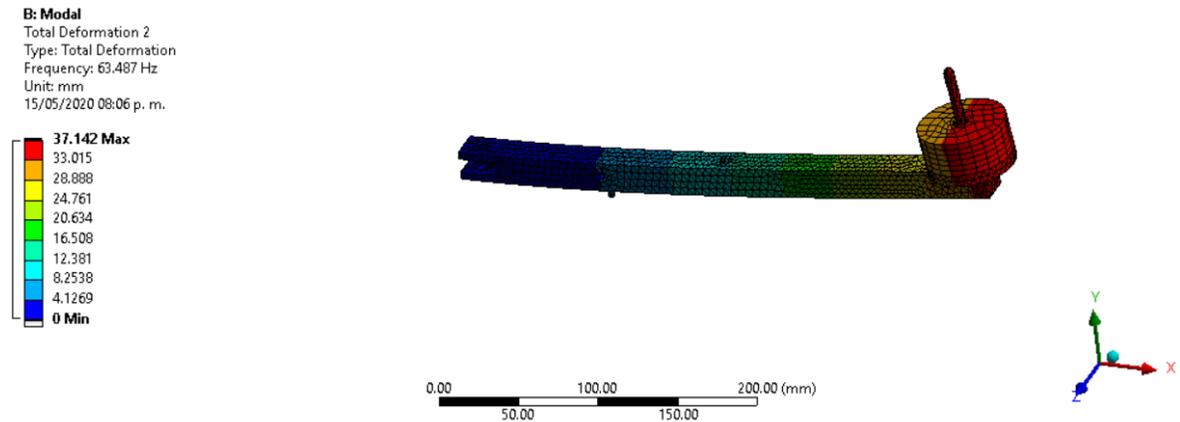


Figura 20. Movimiento en el eje "Y" en la segunda frecuencia 63.487 [Hz].

625 grs.

Modo.	Frecuencia.
1	56.441
2	58.762
3	406.23

Tabla 5. Frecuencias naturales con cinco discos.

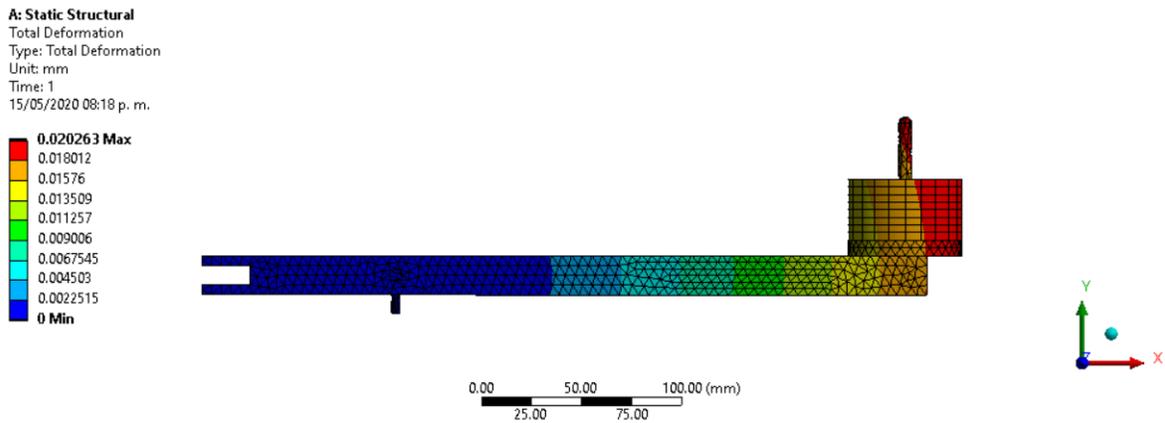


Figura 21. Deformación con cinco discos.

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

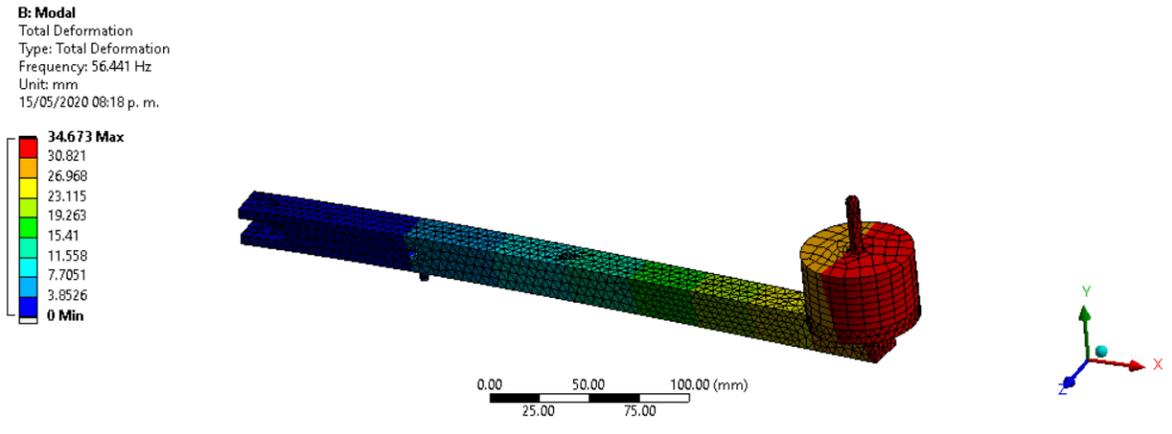


Figura 22. Movimiento en el eje "Z" en la primera frecuencia 56.4441 [Hz].

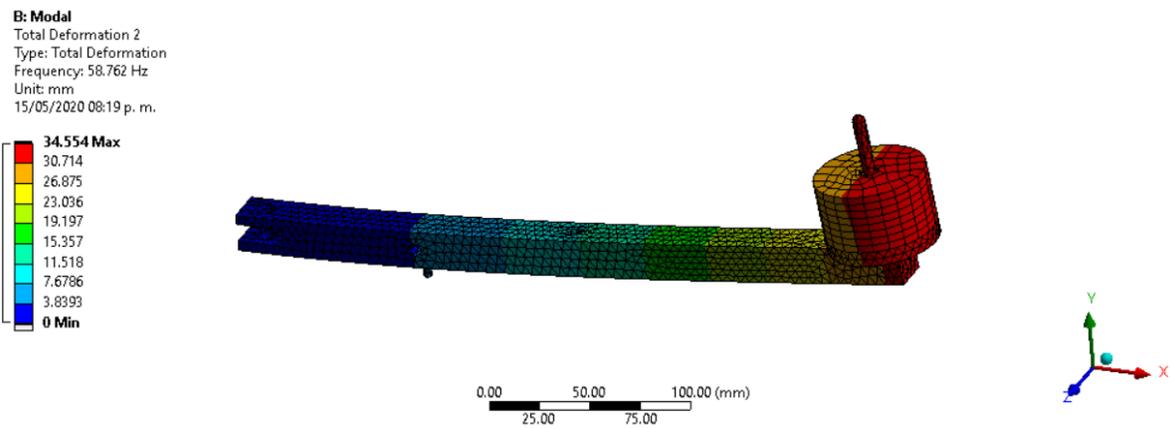


Figura 23. Movimiento en el eje "Y" en la segunda frecuencia 58.762 [Hz].

750 grs.

Modo.	Frecuencia.
1	52.687
2	54.914
3	363.96

Tabla 6. Frecuencias naturales con seis discos.

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

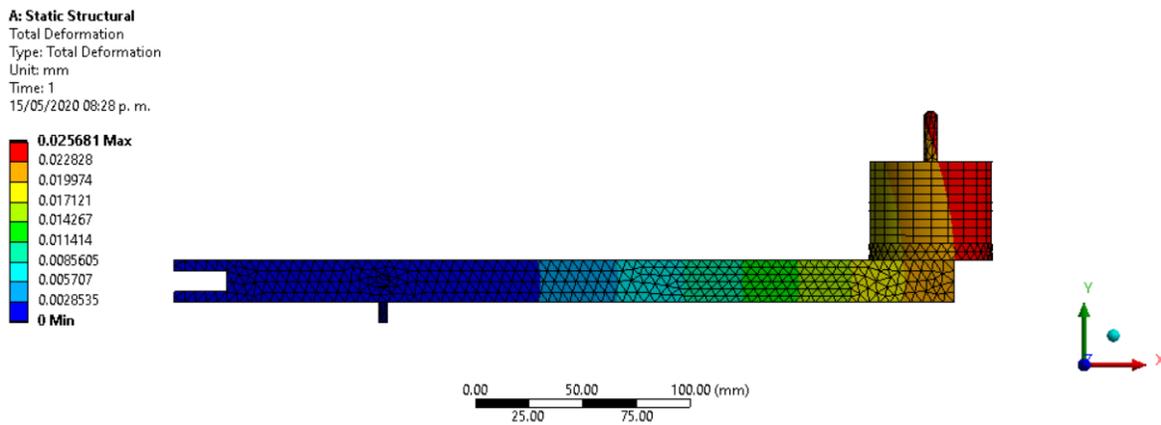


Figura 24. Deformación con seis discos.

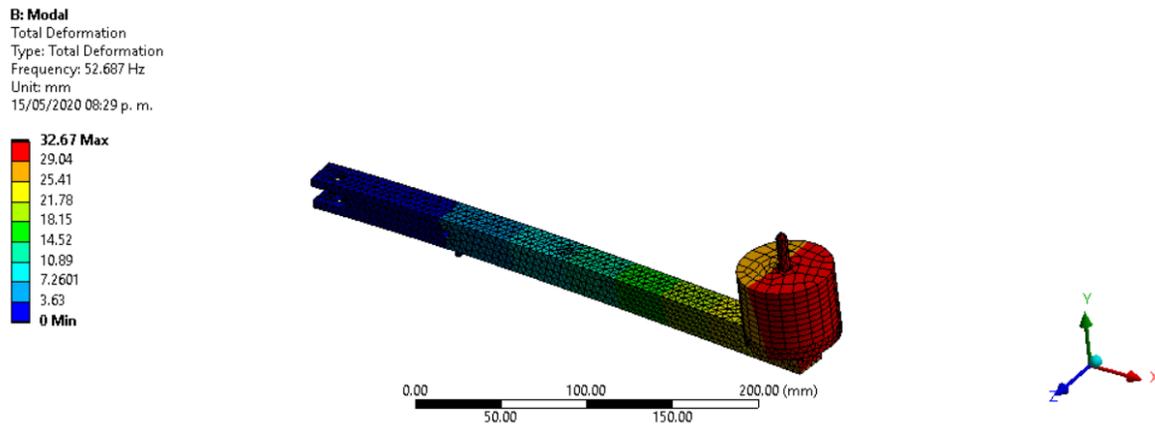


Figura 25. Movimiento en el eje "Z" en la primera frecuencia 52.687 [Hz].

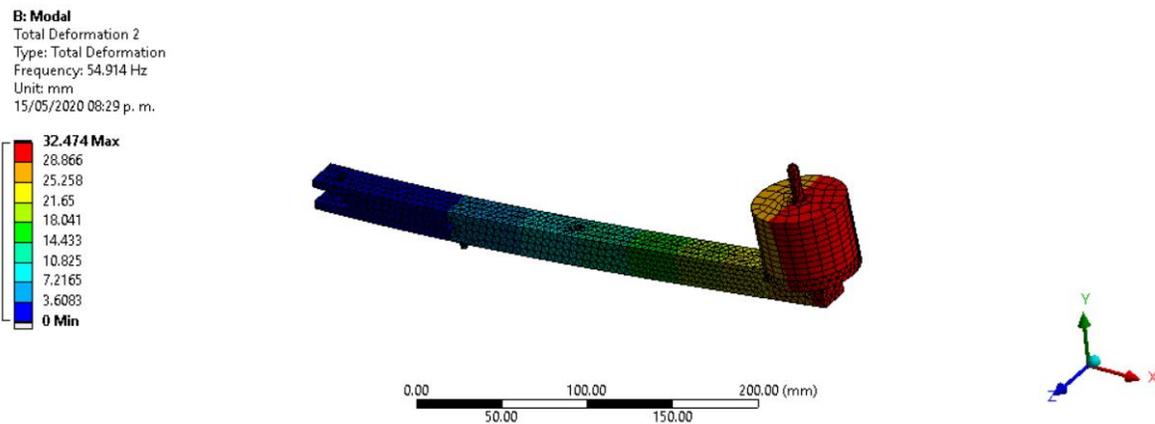


Figura 26. Movimiento en el eje "Y" en la segunda frecuencia 54.914 [Hz].

875 grs.

Modo.	Frecuencia.
1	49.532
2	51.695
3	325.77

Tabla 7. Frecuencias naturales con siete discos.

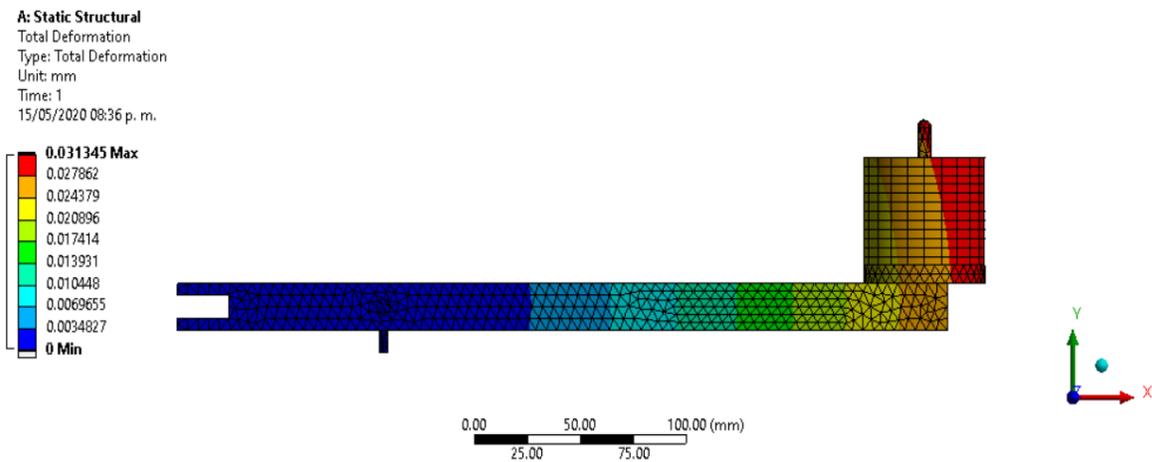


Figura 27. Deformación con siete discos.

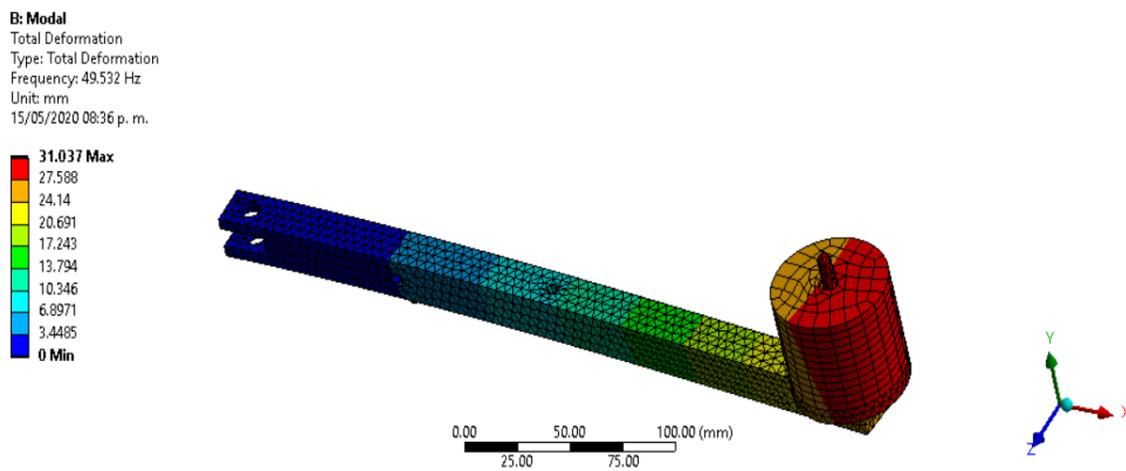


Figura 28. Movimiento en el eje "Y" en la primera frecuencia 49.532 [Hz].

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

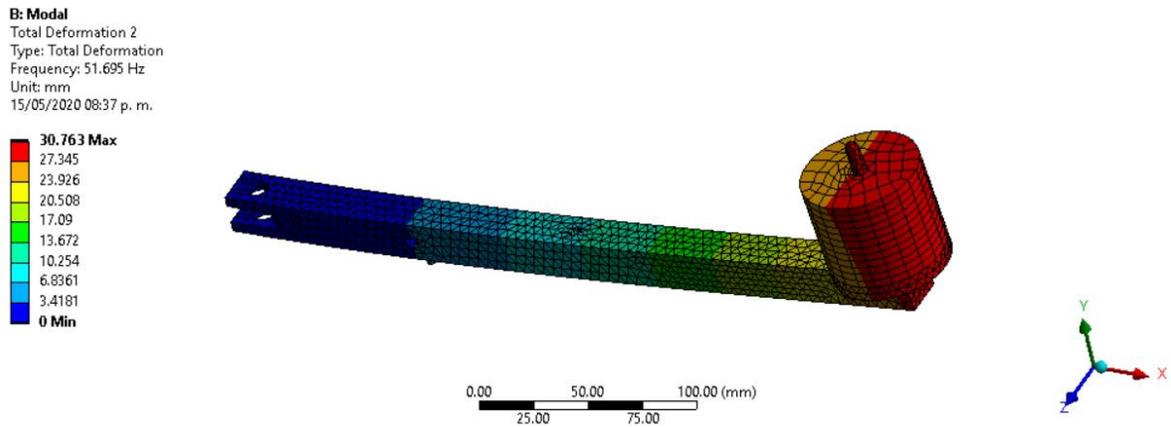


Figura 29. Movimiento en el eje "Y" en la segunda frecuencia 51.695 [Hz].

1000 grs.

Modo.	Frecuencia.
1	46.822
2	48.943
3	292.33

Tabla 8. Frecuencias naturales con ocho discos.

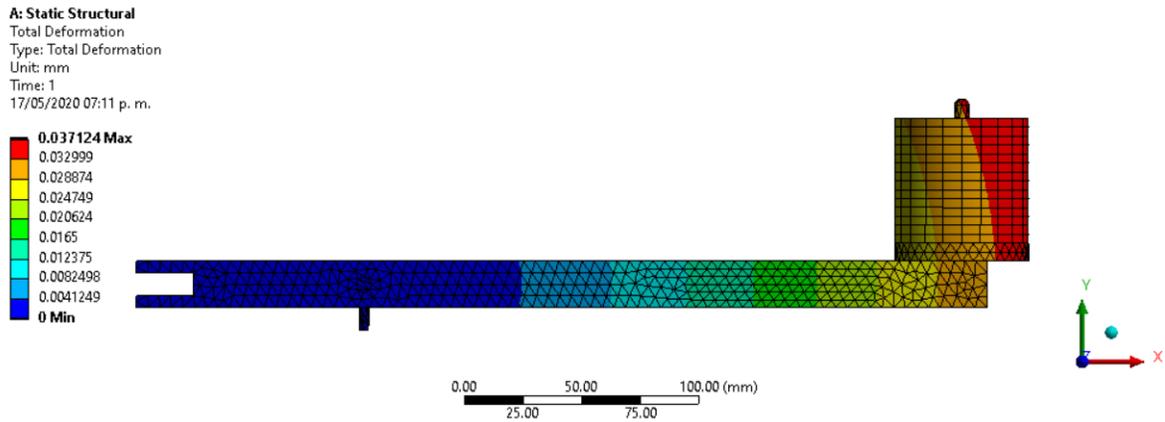


Figura 30. Deformación con ocho discos.

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

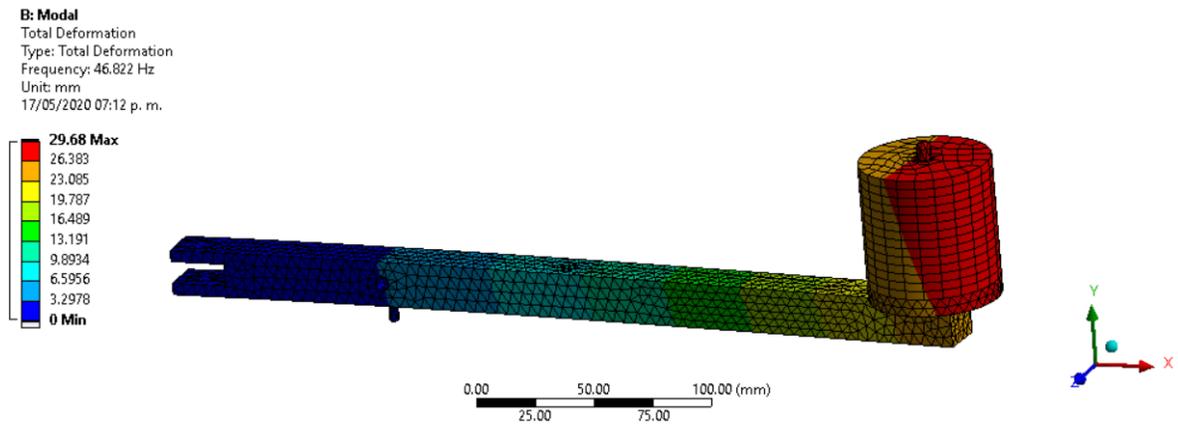


Figura 31. Movimiento en el eje "Z" en la primera frecuencia 46.822 [Hz].

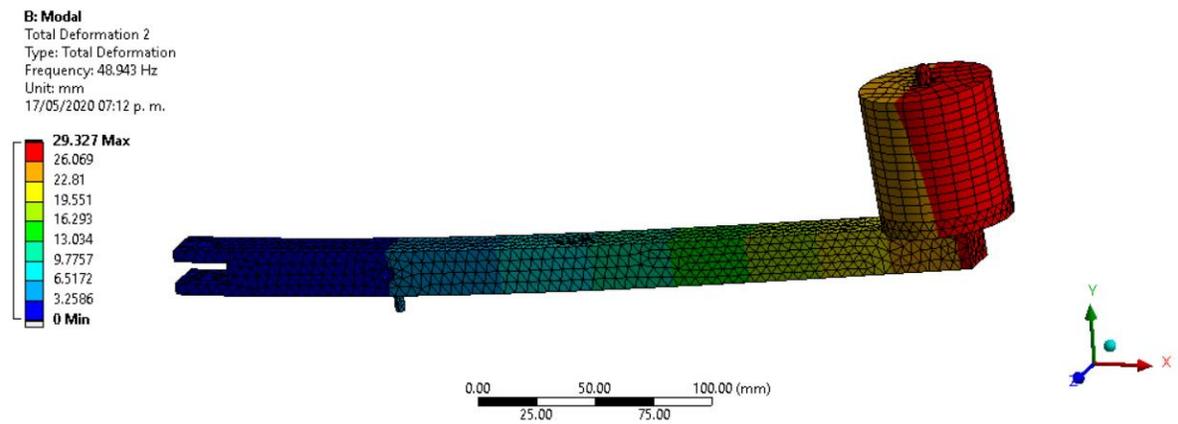


Figura 32. Movimiento en el eje "Y" en la segunda frecuencia 48.943 [Hz].

Para prevenir fallas por resonancia se deben de evitar las velocidades del motor de la máquina perno sobre disco que se muestran en la tabla 9 dependiendo del peso que se utilice.

Peso (grs)	Primera frecuencia	Segunda frecuencia
125	85.678	89.067
250	82.479	90.167
375	66.852	69.498
500	61.03	63.487
625	56.441	58.762
750	52.687	54.914
875	49.532	51.695
1000	46.822	48.943

Tabla 9. Velocidades que pueden causar resonancia.

Anexo 3. Plan de limpieza del módulo

Para que el módulo se conserve en plenas condiciones para su uso en las pruebas tribológicas, es necesario seguir los pasos que se enlistan a continuación cada que se realice una prueba para dejar el módulo en pleno uso para las siguientes pruebas.

1. Con el equipo apagado se verifica que el nivel del depósito base no exceda la pestaña de .5 cm con la que cuenta el piso, de caso contrario se espera a que se drene, se retiran la manguera base y la manguera proveedora, se retira el soporte y se drena el depósito proveedor, se retira la manguera proveedora y se desacopla el depósito proveedor del soporte.
2. Con el lubricante drenado del depósito base, se retira la caja, con cuidado se desprende la junta para liberar las dos partes del piso, para esto se puede hacer uso de una espátula, para desmontar por completo el depósito base.
3. Con las partes del piso divididas se recolectan los restos de la prueba para poder analizarlos.
4. Con todos los depósitos vacíos se pasa un paño desechable como el que se muestra en la figura 33, el cual está diseñado para limpiar aceites y grasas, tiene más resistencia en comparación con otros paños, funciona, aunque este mojado y protege de entrar en contacto directo con los residuos de la prueba.



Figura 33. Paño limpiador.

5. El depósito base seco se debe limpiar con una lija de agua de grano fino de entre 1000 y 1500, para retirar el elastómero de silicona y se pueda aplicar uno nuevo para las siguientes pruebas.
6. Se recomienda aplicar una crema desengrasante la cual se debe de utilizar con agua y frotar de manera que se limpien los residuos de la prueba, enjuagar, si quedan restos a la vista repetir con la crema y agua. Esta crema puede eliminar grasa, aceite y residuos de junta, no es dañino para la piel, es biodegradable y se puede usar con o sin agua.

Diseño y construcción del sistema de lubricación para una máquina tribológica

7. Para finalizar se utiliza aire comprimido como el que se muestra en la figura 34, se secan los depósitos, y si quedaron algunas partículas pequeñas de material los quitará de la superficie, con esto se asegura que los depósitos estén limpios para su uso en las siguientes pruebas.



Figura 34. Aire comprimido.

8. Para limpiar la bomba se debe de pasar el paño limpiador por toda la bomba, después se lava con agua hasta eliminar el aceite restante, después se conecta su manguera proveedora y se sumerge en un contenedor de agua, la manguera debe llegar a otro contenedor vacío, se enciende la bomba de esta manera el aceite que este adentro sea depurado.
9. Para la limpieza de las mangueras se debe de pasar agua por su interior para que el aceite residual no se quede en ellas, después se pasa un limpiapipas como el que se muestra en la figura 35 de forma que cualquier residuo que quedó en su interior sea removido.



Figura 35. Limpiapipas.

Anexo 4. Productos académicos derivados de la tesis

A continuación, se muestran la constancia de la asistencia a congreso, evidencia de la estancia realizada y artículo publicado durante el desarrollo de la presente tesis.



León, Gto. 09 de Abril de 2019

Estimado(a) Daniel Agustín Sánchez Ramos:

Su trabajo enviado al XVI Encuentro Participación de la Mujer en la Ciencia, identificado con el número de registro **IN-0066/19** y titulado:

Diseño de un módulo de lubricación para una máquina tribológica.

Daniel Agustín Sánchez Ramos¹, Guillermo Alonso Yañez Vera¹, Marisa Moreno Ríos¹, Erika Osiris Ávila Dávila¹ y Edgar Ernesto Vera Cárdenas¹

¹ Instituto Tecnológico de Pachuca. agustin9054@gmail.com

ha sido aceptado para su presentación en la modalidad de póster. La clave del trabajo es **S1-ING08** y deberá presentarse el día Miércoles 29 de Mayo del presente, en el horario de 10:45 a las 12:45 horas (Sesión 1) en las instalaciones del Centro de Investigaciones en Óptica.

Le recordamos que los reconocimientos por presentación de trabajos se entregarán después de comprobar su participación en la sesión correspondiente. Favor de verificar si así desea que aparezca el nombre de los autores del trabajo.

Mayor Información puede ser obtenida en www.cio.mx en la sección de congresos y conferencias.

Sin otro motivo, reciba cordiales saludos.

ATENTAMENTE:

Dra. Amalia Martínez García
POR EL COMITÉ ORGANIZADOR
encuentro2019@cio.mx

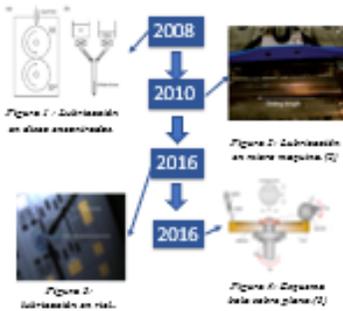


Diseño y construcción de un módulo de lubricación para una máquina tribológica.

Daniel Agustín Sánchez Ramos Maestría en Ingeniería Mecánica
Tecnológico Nacional / I.T Pachuca correo: agustin9054@gmail.com

Introducción

En la actualidad es importante desarrollar pruebas tribológicas controladas para que las condiciones de prueba sean cercanas a las condiciones reales, por esto, es importante diseñar un módulo de lubricación, en el cual se pueda controlar el lubricante suministrado a las pruebas, como se ah visto en estudios previos la lubricación es muy importante como se puede observar en las figuras (1,2,3,4), debido a que se quiere emular las condiciones reales en pruebas de laboratorio la lubricación debe de ser aplicada constante y la cantidad adecuada para que los estudios muestren los verdaderos efectos, ver cuáles son los estudios y avances que se están relacionados con la lubricación para poder estar a la vanguardia



Objetivo.

• Diseñar y construir un módulo de lubricación automático con repetibilidad y control sobre la lubricación.

Metodología

Para llevar a cabo esta actividad es necesario contar con una metodología, a fin de hacer con orden una cosa o proceso, planteando una serie de actividades a realizar para lograr un propósito, se debe de plantear los pasos a seguir para que junto, como se muestra en las figuras (5,6)

- 1 Identificación del problema.
- 2 Determinación de los requerimientos.
- 3 Determinar la importancia relativa de los requerimientos y expectativas del proyecto.
- 4 Elegir un estudio comparativo
- 5 Traducir los requerimientos y expectativas en términos mensurables de ingeniería.
- 6 Establecer metas de diseño.

Figura 5. Fases de la metodología

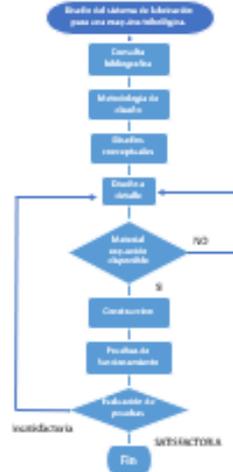


Figura 6. Metodología de la fase conceptual.

La generación de alternativas nos permite generar una gama de posible soluciones para el diseño, dado las características tanto de las opciones como del objetivo de modelo se escogen y se va generando un camino de diseño para el módulo como se puede observar en la figura .

MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	Aluminio	Acero	Polímero (PU)
MÓDULO DE FILTRADO	Malla	Óleo	
BOMBA	2.5 R	4.5 R	5.5 R
REGULADOR DE CAUDA	Elongador de caudal	Válvula reguladora	
PO DE LUBR.	Reservorio	Botellón	Ampl.

Figura 7. Generación de alternativas

La máquina perno sobre disco figura (8) es la primera configuración donde se presentará el modelo, se realizaron las primeras pruebas para evaluar los resultados con las pruebas realizadas con el modelo, el modelo se presenta sobre la máquina como se muestra en la figura (9) , donde se describen las partes que contendrá el módulo para la recirculación del lubricante



Figura 8. Máquina para estudio

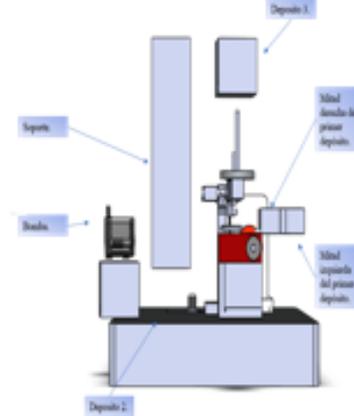


Figura 9. Diseño del módulo.

Resultados

Los planos del módulo están diseñados, las conexiones entre depósitos serán mediante mangueras, se realizó la selección de la bomba, terminando la manufactura del módulo se realizaron pruebas para evaluar su funcionamiento.

Conclusión preliminar.

- Los resultados ya obtenidos de las pruebas realizadas son la base para comprobación del eficacia del módulo.
- Se mantiene la configuración del módulo simple para que se pueda adaptar a otro tipo de máquina.

Referencias

1. Jorge Ramos Watarive, Curso de Diseño Mecánico, Vol.1 y 2 IPN ESIME SEPI México, 2000 G.H.F Nayler.
2. Moreno Rios, M., Gallardo-Hernandez, E., Vite Torres, M., & Peña-Rubio, A.C. (2016). Field and laboratory assessments of the Journal of Rail and Rapid Transit.
3. L.V., J., V., H., N., S., & Succi K., S. (2010). Localized lubrication of macromachines: A feasibility study on Si in reciprocating. Wear

Agradecimientos

Se agradece al TecNM, Proyecto 6787.18.P por el apoyo para el desarrollo del presente trabajo. Se agradece a CONACYT por el apoyo para realizar estudios de posgrado.



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

Departamento de Ingeniería

Grupo de Tribología

Bahía Blanca, 31 de Enero de 2020

Sr. Daniel Agustín Sánchez Ramos
Programa del Posgrado de Ingeniería Mecánica
Instituto Tecnológico de Pachuca

De mi mayor consideración:

Tengo el agrado de dirigirme a Usted con el objeto invitarlo a asistir al curso Escuela de Tribología 2020, que se dictará entre los días 02 al 06 de Marzo de 2020 en dependencias del Departamento de Ingeniería de la Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina.

En virtud de nuestro interés de colaboración con otras universidades, quisiera destacar que vuestra asistencia estará eximida de todo costo, debiendo Ud. solamente cubrir el costo del viaje y manutención, dado que los gastos de hospedaje corren por cuenta de la Universidad Nacional del Sur, Argentina.

Esperando contar con vuestra presencia, lo saludo con mi más distinguida consideración.

Dr. Walter Tuckart
Profesor Adjunto Ded. Exclusiva
Universidad Nacional del Sur



"2020, Año de León Mexicano, Benemérita Madre de la Patria"

Ciudad de México 20-febrero-2020

FRANCISCO RAFAEL SALDAÑA IBARRA
DIRECTOR DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PACHUCA
P R E S E N T E

OFICIO No. M00/0461/2020

Con referencia a su oficio **D-0166-2020**, donde solicita la comisión al extranjero del estudiante **DANIEL AGUSTÍN SÁNCHEZ RAMOS**, me permito comunicarle que dicha solicitud ha sido **AUTORIZADA** de acuerdo con los siguientes datos:

Evento	"Escuela de Tribología 2020" en la Universidad Nacional del Sur.
Tipo de Evento	CURSO.
Periodo de comisión	DEL 25 DE FEBRERO AL 09 DE MARZO DE 2020.
Nº de días	14
Lugar de comisión	BAHÍA BLANCA, ARGENTINA.
Motivo/Justificación	Fortalecer las habilidades correspondientes a la línea de conocimiento del proyecto que el estudiante desarrolla sobre "Caracterización tribológica de un lubricante para sistema de engranajes modificados en un diferencial de transporte de carga".

En caso de que los gastos generados por esta comisión se cubran por ese instituto, la autorización y justificación de los mismos será bajo su responsabilidad, así como la comprobación correspondiente, debiendo cumplir con los tabuladores vigentes y los LINEAMIENTOS por los que se establecen medidas de austeridad en el gasto de operación en las dependencias y entidades de la Administración Pública Federal, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 22 de febrero de 2016.

Es imprescindible que el estudiante realice un informe de las actividades realizadas al término de la comisión para incorporarlo al expediente de su plantel, mismo que deberá ser enviado a la Secretaría de Extensión y Vinculación del Tecnológico Nacional de México.

Aprovecho la oportunidad para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
 Excelencia en Educación Tecnológica®

ENRIQUE FERNÁNDEZ FASSNACHT
DIRECTOR GENERAL
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
 DIRECCIÓN GENERAL



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
 TECNOLÓGICO NACIONAL
 DE MÉXICO

C.c.p Guillermo Hernández Duque Delgadillo - Secretario de Extensión y Vinculación - Presente
 Archivo

GH00/ROM/msoa*

Av. Universidad 1200, Col. Xico, Alcaldía Benito Juárez, C.P. 03330, Ciudad de México.
 Tel. (55) 3600.2001, Ext. 65050. E-mail: directoria@tecnm.mx
 www.technm.mx



Prueba tribológica en acero AISI 1018 y aleación Al-Mg en un equipo perno cobre disco (ASTM G99)

D.A. Sánchez-Ramos¹, H.A. Martínez-Castañeda¹, E.E. Vera-Cárdenas¹, M. Moreno-Ríos¹

¹Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Pachuca. Carretera México-Pachuca Km. 87.5, C. P. 42080, Col. Venta Prieta, Pachuca de Soto, Hidalgo, México.

Recibido: Agosto 27, 2020; Aceptado: Septiembre 10, 2020.

Resumen (CI)

Se presenta el ensayo tribológico en una máquina del tipo perno sobre disco (Pin on disc, en inglés), la cual está basada en la Norma ASTM G99. Dos diferentes materiales son evaluados, una aleación Al-Mg para el perno y un acero AISI 1018 para el disco. El estudio realizado permitió evaluar el coeficiente de fricción en condición seca, la pérdida de volumen de ambos materiales, coeficiente de desgaste y distancia de profundidad, así como los mecanismos de desgaste. Con base en los resultados obtenidos se puede determinar que la aleación tuvo mayor desgaste, presentó abrasión y deformación plástica, mientras que el acero, tuvo desprendimiento de material y abrasión. La razón de realizar pruebas tribológicas con diferentes materiales es para encontrar el coeficiente de fricción y el coeficiente de desgaste que hay entre dichos materiales ya que los coeficientes antes mencionados serán diferentes dependiendo de los dos materiales en contacto.

Palabras clave: Acero, Aleación, Desgaste, Fricción, Norma.

Abstract (CI)

A tribological test is presented in a pin on disc machine, the test is based on the ASTM G99 standard. Two different materials are evaluated, an Al-Mg alloy for the pin and an AISI 1018 steel for the disc. The study carried out evaluated the dry friction coefficient, the volume loss of both materials, the wear coefficient, the depth distance, and the wear mechanisms. Based on the results obtained, it can be determined that the alloy had greater wear and presented abrasion and plastic deformation, while the steel had material loss and abrasion. The reason for performing tribological tests with different materials is to find the coefficient of friction and the coefficient of wear that exist between the materials, the coefficients will be different according to the two materials in contact.

Key words: Alloy, Friction, Standard, Steel, Wear.

INTRODUCCIÓN

Las aleaciones aluminio-magnesio tienen un amplio rango de aplicaciones debido a sus buenas propiedades mecánicas (Starke, 2001). Generalmente contienen de 8-9% de aluminio con 2% de zinc para incrementar tenacidad y un 0.3% de magnesio para incrementar la resistencia a la corrosión (Kro'el, 2017). El magnesio hace que el aluminio sea más anódico lo que lo hace resistente en ambientes salinos y alcalinos. Por ello son materiales ampliamente usados en aplicaciones en estos ambientes además que su rango de aplicación es amplio, especialmente en la industria automotriz y marítima (Martín, 2006).

Además de su capacidad de fundición relativamente buena y distinguirse por su resistencia a la corrosión estas aleaciones también son idóneas como material para componentes estructurales donde se requiere alta resistencia y altas elongaciones adecuadas (Starke, 2001).

El desgaste corrosivo es un ataque a una superficie de un material dentro de su entorno de trabajo. El desgaste corrosivo puede ser húmedo o seco, dependiendo del tipo de ambiente (Ram K. Upadhyay, 2018).

En el desgaste por corrosión, ambos son dos mecanismos independientes; si éstos ocurren por separado, la condición puede ser más crítica