

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DEL SUR DE GUANAJUATO



“DISEÑO Y DESARROLLO DE MÁQUINA DE DESGASTE TIPO PIN ON RING”

Opción 2: Titulación Integral – Tesis Profesional

Elaborada por:

José David Díaz Medina.

Que presenta para obtener el título de:

INGENIERO EN SISTEMAS AUTOMOTRICES

Asesor:

M.C. Mariano Braulio Sánchez

Uriangato, Gto.

Noviembre de 2021

“DISEÑO Y DESARROLLO DE MÁQUINA DE DESGASTE TIPO PIN ON RING”

Elaborada por:
José David Díaz Medina.

Aprobado por.
M.C. Mariano Braulio Sánchez.
Docente de la carrera de Ingeniería en sistemas automotrices.
Asesor de la tesis profesional.

Revisado por.
Dr. José Eli Eduardo González Durán.
Coordinador de la carrera de Ingeniería en sistemas automotrices.
Revisor de la tesis profesional.

Revisado por.
M.C Pedro Durán Reséndiz.
Docente de la carrera de Ingeniería en sistemas automotrices.
Revisor de la tesis profesional.



LIBERACIÓN DE PROYECTO PARA LA TITULACIÓN INTEGRAL

Uriangato, Gto., 26/10/2021

Asunto: Liberación de proyecto para la titulación integral

Ing. J. Trinidad Tapia Cruz
Director Académico y de Estudios Profesionales
ITSUR
PRESENTE

Por este medio informo que ha sido liberado el siguiente proyecto para la titulación integral:

Nombre de estudiante y/o egresado(a): Díaz Medina José David	
Carrera: Ingeniería en sistemas automotrices	Núm. de control: T16120130
Nombre del proyecto: Diseño y desarrollo de máquina de desgaste tipo ping on ring.	
Producto: Tesis profesional	

Agradezco de antemano su valioso apoyo en esta importante actividad para la formación profesional de nuestras y nuestros egresados.

ATENTAMENTE

Dr. J. Eli Eduardo González Durán
Coordinador de Ingeniería en Sistemas Automotrices
ITSUR



Instituto Tecnológico Superior
del Sur de Guanajuato
COORDINACIÓN INGENIERÍA
EN SISTEMAS AUTOMOTRICES

La comisión revisora ha tenido a bien aprobar la reproducción de este trabajo.

M.C. Mariano Braulio Sánchez Asesor de la Tesis	Dr. J. Eli Eduardo González Durán Revisor 1	M.C. Pedro Durán Reséndiz Revisor 2



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato
Coordinación de Ingeniería en Sistemas Automotrices

DEPARTAMENTO ACADEMICO	CLAVE:11EIT0002E ISA-EGR-2021/11
---------------------------	-------------------------------------

Uriangato, Guanajuato, **26/Octubre/2021**

Asunto: Aprobación de impresión de trabajo profesional

C. Díaz Medina José David
PRESENTE:

Por medio de este conducto, le comunico a usted que después de haber sido revisado su trabajo de titulación bajo la del cual se derivó la Monografía Titulada:

“ Diseño y desarrollo de máquina de desgaste tipo ping on ring ”

La comisión revisora, ha tenido a bien aprobar la impresión de este trabajo.

ATENTAMENTE
“Excelencia en Educación Tecnológica”
“Tecnología y Calidad en la Vida”

Dr. J. Elí Eduardo González Durán
Coordinación de Ingeniería Sistemas Automotrices



C.c.p Unidad de Servicios Escolares
C.c.p Coordinación de Ingeniería en Sistemas Automotrices
C.c.p Archivo Consecutivo



Ave. Educación Superior No. 2000 Col. Benito Juárez,
Uriangato, Guanajuato, C.P. 38980 Tels. (449) 45 7 74 68 al 71
Ext. *137, e-mail: electronica@itsur.edu.mx
tecnm.mx | itsur.edu.mx



“DISEÑO Y DESARROLLO DE MAQUINA DE DESGASTE TIPO PIN ON RING”

Resumen

Resumen. - Se desarrolló una máquina de desgaste del tipo Pin On Ring, bajo la norma ASTM G99-17 (ASTM Int', 2018).

Esta máquina permite realizar ensayos mediante un procedimiento de laboratorio para determinar el desgaste de materiales. Las máquinas de desgaste tipo Pin On Ring requieren realizar pruebas a la pieza bajo ciertas condiciones como lo son: la velocidad de giro y la carga aplicada. En la máquina presentada se pueden manipular y controlar la velocidad de giro y la carga aplicada, gracias a que se incorporan los elementos necesarios para variar la velocidad del giro del motor, esto se logra a través de un variador de frecuencia, además se desarrolló un mecanismo de aplicación de carga que permite aplicar la carga deseada durante el ensayo, esta carga es medida gracias a una celda de carga que mide la cantidad aplicada durante la prueba. Durante el ensayo se genera un incremento de temperatura entre las superficies, el cual se puede medir y observar su comportamiento en el panel de control de la máquina de desgaste mediante un sensor tipo k.

Es posible obtener la tasa de desgaste de los materiales en contacto de manera automática, debido a que la instrumentación incorporada en la maquina permite calcular la distancia recorrida, con lo que se obtiene una idea del comportamiento del material bajo ciertas condiciones de trabajo.

Abstract

Abstract. - A Pin On Ring type wear machine was developed to perform wear tests under the ASTM G99-17 standard.

This machine allows tests to be carried out using a laboratory procedure to determine the wear of materials. Pin On Ring type wear machines require testing the part under certain conditions such as: rotation speed and applied load. In the presented machine, the speed of rotation and the applied load can be manipulated and controlled, thanks to the incorporation of the necessary elements to vary the speed of the motor rotation, this is achieved through a frequency variator, it was also developed a load application mechanism that allows applying the desired load during the test, this load is measured thanks to a load cell that measures the amount applied during the test. During the test, an increase in temperature is generated between the surfaces, which can be measured and its behavior observed on the control panel of the wear machine by means of a type k sensor.

It is possible to obtain the wear rate of the materials in contact automatically, because the instrumentation incorporated in the machine allows calculating the distance traveled, thereby obtaining an idea of the behavior of the material under certain working conditions.

Palabras claves (*keywords*)

- Pin On Ring
- Ensayos de desgaste
- Tasa de desgaste
- Pin on the ring
- Wear tests
- Wear rate

Agradecimientos.

Agradezco a mis padres, mi hermana y madrastra que a pesar de las complicaciones que con su gran apoyo pude lograr todos mis niveles académicos con certeza, así como al Instituto Tecnológico Superior Del Sur de Guanajuato por la oportunidad que se me dio por cursar el nivel de Licenciatura dentro de sus instalaciones y por el uso de material y equipo de laboratorio para el desarrollo del proyecto, también agradezco al Profesor M.C Mariano Braulio Sánchez y al Dr. José Eli Eduardo Gonzales Duran por su guía y sus conocimientos compartidos ante dicho proyecto y el transcurso de la carrera al igual que a todos los profesores de los cuales recibí grandes conocimientos tanto sobre la carrera como de vida.

Dedicatoria.

Dedico esta tesis a mis padres, en especial a mi madre, aunque no esté en este mundo con nosotros sin sus enseñanzas y su guía durante el tiempo que permitió la vida compartirlo a su lado no habría sido posible llegar a este logro.

ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1	10
Introducción.	10
Capítulo 2	12
Marco teórico (Antecedentes).	12
1. Sistemas tribológicos.....	12
2. Fricción	15
3. Desgaste	18
4. Tasa de desgaste	19
Capítulo 3	26
Planteamiento del problema	26
3.1. Identificación.	26
3.2. Justificación.	26
3.3. Alcance.	27
Capítulo 4	29
Objetivos	29
4.1. Objetivos generales.	29
4.2. Objetivos específicos	29
Capítulo 5	30
Metodología	30
2.1 Diseño y desarrollo	31
2.2 Instrumentación	45
2.3 Integración de la Maquina.....	49
Capítulo 6	52
Resultados	52
Capítulo 7	55
Análisis de Resultados	55
Capítulo 8	57
Conclusiones y trabajo a futuro	57
Bibliografía	59

ANEXO 1. Planos Estructurales.....	61
------------------------------------	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Función del sistema tribológico [1].	12
Figura 2. Procesos térmicos, emisión energética y disipación energética.	16
Figura 3. Diagrama de fuerzas que representa la interacción de fuerzas.	17
Figura 4. Categorías de consideración.....	21
Figura 5. Diagrama de flujo de la metodología empleada en el desarrollo de la máquina.....	30
Figura 6. Modelado cad de la base de perfil Bosch para la máquina de desgaste.	33
Figura 7. Protección de perfil Bosch y acrílico.....	34
Figura 8. Disco de acero D2 tratado térmicamente.....	36
Figura 9. Acoplamiento de los elementos de la máquina de desgaste, (motor eléctrico (1), cople (2), disco (3)).....	36
Figura 10. Diagrama de cuerpo libre de la fuerza máxima aplicada sobre el eje del motor.	37
Figura 11. Diseño en CAD del cople motor-disco.....	38
Figura 12. Etapas de maquinado.	40
Figura 13. Mecanismo para la aplicación de carga y medición de la misma.	41
Figura 14. Diagrama de cuerpo libre de la base de celda de carga.	42
Figura 15. Diagrama del momento flector.	43
Figura 16. Modelado cad de la máquina de desgaste.....	45
Figura 17. Celda de carga y amplificador Hx711.....	45
Figura 18. Termopar del tipo K y módulo max6675.....	46
Figura 19. Conexión, celda de carga, amplificador Hx711 y Arduino.	47
Figura 20. Conexión termopar tipo K, módulo max6675 y Arduino.	47
Figura 21. Conexión de encoder rotativo incremental.....	48

Figura 22. Panel de control desarrollado en LabView.	49
Figura 23. Panel de control físico.	50
Figura 24. Diagrama de cuerpo libre de las piezas sometidas a simulación. Fuente: Elaboración propia.	52
Figura 25. Deformación total de la celda de carga utilizada. Fuente: Elaboración propia.	53
Figura 26. Esfuerzo equivalente Von Mises de la celda de carga utilizada. Fuente: Elaboración propia.	53
Figura 27. Deformación total del eje del motor aABB m2va80c-4. Fuente: Elaboración propia.	53
Figura 28. Máquina de desgaste Pin On Ring desarrollada. Fuente: Elaboración propia.	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de diferentes sistemas tribológicos.	13
Tabla 2. Factores que influyen en un sistema tribológico.	14
Tabla 3. Especificaciones técnicas tribómetro Anton Paar.	24
Tabla 4. Especificaciones técnicas tribómetro Microtest.	25
Tabla 5. Especificaciones del motor eléctrico.	32
Tabla 6. Especificación del variador de velocidad utilizado.	32
Tabla 7. Material, características y aplicaciones, del material usado en el disco de desgaste.	35
Tabla 8. Especificaciones del PTR utilizado para la base de la celda de carga. ...	43
Tabla 9. Cotización de la máquina desarrollada.	51

Capítulo 1

Introducción.

Los ensayos tribológicos permiten obtener información sobre el rendimiento tribológico de los materiales con el fin de usar, desarrollar e implementar el material que mejor satisfaga las necesidades de la aplicación en la cual será usado. Para esto se puede y debe analizar el material bajo ciertas condiciones tribológicas, con el fin, de determinar que este material es el adecuado para determinada aplicación y así obtener las mejores propiedades tribológicas específicas deseadas.

Mediante un tribómetro es posible llevar a cabo distintas pruebas, por lo que los fenómenos de fricción, desgaste y lubricación son objeto de estudio de la tribología.

Los resultados de los ensayos tribológicos y los análisis de superficies ayudan a estimar y/o predecir el rendimiento tribológico de los materiales basados en diversos factores que influyen en ellos como lo son, la fricción, el desgaste, mecanismos de falla, la cinética de películas de transferencia, etc.

Para la mayoría de las aplicaciones, el desgaste mínimo de los materiales es un objetivo primordial. Por lo general, se trata de alcanzar un punto ideal definido entre un bajo nivel de fricción y una buena resistencia al desgaste.

Dicho esto, para realizar estas pruebas tribológicas existen normas bajo las cuales se debe de basar el investigador, para que su ensayo tenga el alcance deseado, ya que, esto garantiza la posibilidad de la repetibilidad del ensayo en cualquier parte del mundo, en este caso se trabajará bajo la norma ASTM G99-17 [1], esta es la norma en la cual se basó el diseño y construcción de la máquina de desgaste del tipo Pin On Ring de la que hablara este trabajo, esta norma establece que la cantidad de desgaste en cualquier sistema dependerá, en general, de la cantidad de factores del sistema tales como la carga aplicada, las características de la máquina, la velocidad de deslizamiento, la distancia de deslizamiento, el entorno y las propiedades del material.

El método de prueba Pin On Ring no intenta duplicar todas las condiciones que se pueden experimentar en servicio, por lo que no hay garantía de que la prueba predecirá la tasa de desgaste de un material dado en condiciones diferentes a las de la prueba.

Este método de prueba cubre un procedimiento de laboratorio para determinar el desgaste de materiales, además de que se describen las principales áreas de atención experimental en el uso de este tipo de aparatos para medir el desgaste.

Capítulo 2

Marco teórico (Antecedentes).

La tribología es la ciencia que estudia la fricción, el desgaste y la lubricación, comprendiendo la interacción de las superficies en movimiento relativo, en sistemas naturales y artificiales [2].

1. Sistemas tribológicos

La fricción y el desgaste no son propiedades de los materiales, son respuestas a un sistema tribológico específico que generalmente incluye una combinación de cojinete, eje y lubricante y como tal están influenciados por una amplia gama de factores [2].

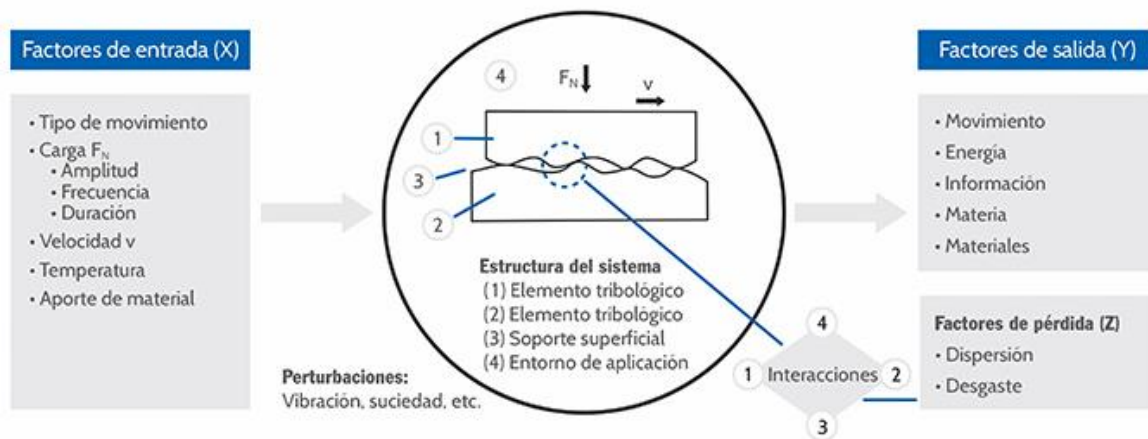


Figura 1. Función del sistema tribológico [1].

En la Figura 1, se puede observar como un sistema tribológico está compuesto por las magnitudes de entrada/conjunto de esfuerzos, la estructura del sistema, las magnitudes útiles y de pérdida. El conjunto de esfuerzos incluye los parámetros técnicos y físicos de la carga incluyendo peso, velocidad de deslizamiento y duración, junto con las condiciones de movimiento y temperatura que tensionan la estructura del sistema. La estructura del sistema está determinada por las

Capítulo 2. Marco teórico (Antecedentes).

propiedades de los elementos materiales incluyendo la base, el contra cuerpo, el lubricante y el medio circundante [2].

En un determinado sistema tribológico la reducción de la fricción es un factor importante en la transmisión del movimiento o fuerza. Por ejemplo, en el caso de un sistema de frenos la fricción debe ser tan alta como sea posible. Así la fricción es un requisito importante para la función del sistema tribológico y está considerablemente influida por la lubricación, en la Tabla 1, se mencionan las características de los sistemas tribológicos [3].

Tabla 1. Características de diferentes sistemas tribológicos.

Sistema tribológico	Función técnica	Elementos de sistema	
Engranaje	Transmisión de Energía	Base: Contracuerpo: Sustancia Intermedia: Medio Circundante:	Rueda conductora Rueda conducida Lubricante Aire
Contactos Eléctricos.	Transmisión de Electricidad	Base: Contracuerpo: Sustancia Intermedia: Medio Circundante:	Contacto móvil Contacto fijo Agente protector Aire
Sistema tribológico	Función técnica	Elementos de sistema	
Mecanismo Aro-Camisa	Transmisión de movimiento	Base: Contracuerpo: Sustancia Intermedia: Medio Circundante:	Aro Camisa Sust. Lubricante Aire

Capítulo 2. Marco teórico (Antecedentes).

Sistema de Freno	Detención de movimiento	Base: Contracuerpo: Sustancia Intermedia: Medio Circundante:	Pastilla de freno Disco Sust No tiene medio Aire
------------------	-------------------------	---	---

Sobre cualquier sistema tribológico influyen diferentes factores como los que se ven en la Tabla 2.

Tabla 2. Factores que influyen en un Sistema Tribológico.

Propiedades del par:	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de contacto (superficial, lineal, puntual). • Tipo de fricción (deslizamiento, rodamiento, combinado). • Estado de fricción (seco, lubricado). • Grado de recubrimiento. • Huelgo.
Condiciones de trabajo:	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de movimiento (traslación, rotación, reciprocante). • Carácter del movimiento (estacionario, móvil). • Velocidad relativa (deslizamiento, rotación). • Magnitud de la carga normal. • Presión. • Carácter de la carga (constante, variable, impacto). • Temperatura de trabajo.

Comportamiento friccional:	<ul style="list-style-type: none">• Fuerza de fricción.• Momento friccional.• Trabajo o Energía de fricción (eficiencia).• Coeficiente de fricción.
Principios de tribología aplicados en la ingeniería mecánica	<ul style="list-style-type: none">• Recorrido de fricción.• Magnitud del desgaste.• Tipo de desgaste.• Diagrama del desgaste.

2. Fricción

La fricción es la fuerza de resistencia al movimiento entre dos cuerpos en contacto. La fricción puede ser descrita en el nivel macroscópico por las leyes fundamentales de la fricción de los físicos Guillaume Amontons y Charles Augustin de Coulomb. Estos físicos encontraron una relación lineal entre la fuerza de fricción resultante y la carga normal aplicada. Basado en esto, se puede establecer un parámetro principal adimensional, llamado coeficiente de fricción. Se define por la relación entre la fuerza de fricción resultante y la fuerza normal aplicada [2].

Sin embargo, el mecanismo real de fricción se presenta a nivel microscópico, lo que significa que las teorías tribológicas sobre la fricción también abarcan la topografía de las superficies, en la Figura 2, se indica la manera en la que influye el coeficiente de fricción en los esfuerzos tribológicos.

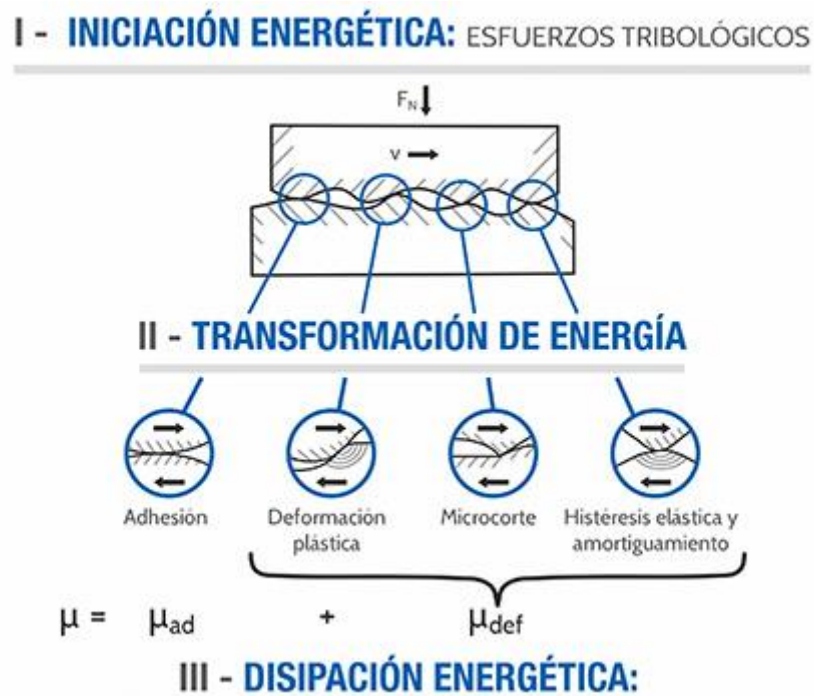


Figura 2. Procesos térmicos, emisión energética y disipación energética.

La fricción desde el punto de vista de la ingeniería se puede analizar como:

- Como un proceso necesario para el movimiento o frenado de sistemas mecánicos.
- Como un fenómeno indeseable durante el movimiento relativo de los cuerpos en contacto.

Matemáticamente se define fuerza de fricción como:

$$F = \mu W \quad (1)$$

Donde F es la fuerza de fricción

W es la carga normal sobre el contacto

μ es una constante conocida como el coeficiente de fricción [4].

Existen dos tipos de coeficiente de fricción: el estático (μ_s) y el cinético (μ_k , independiente de la carga normal), dichos tipos se representan en el diagrama de fuerzas que se encuentra en la Figura 3.

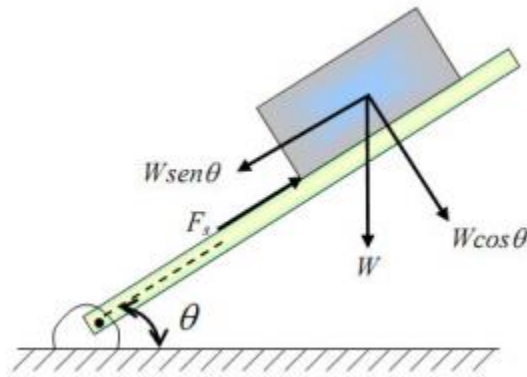


Figura 3. Diagrama de fuerzas que representa la interacción de fuerzas.

La segunda ley plantea que la fuerza de fricción (o el coeficiente de fricción) es independiente del área aparente de contacto entre los cuerpos en contacto, (pero no del área real de contacto) por este motivo un paralelepípedo de determinado peso sufrirá la misma fuerza de fricción apoyado sobre cualquiera de sus caras [4].

La tercera ley, conocida como ley de Coulomb estipula que el coeficiente de fricción cinético es independiente de la velocidad de deslizamiento una vez el cuerpo se encuentra en movimiento. Es importante enfatizar que μ en general es independiente de la velocidad de deslizamiento, pero su valor depende de condiciones de operación (temperatura, humedad, presión ambiental).

Para la caracterización de la fricción se utilizan diferentes técnicas todas ellas basadas en producir el deslizamiento a lo largo de una pista, aplicar una carga normal, y medir la fuerza tangencial de fricción. Para los ensayos de fricción sin lubricación los equipos más utilizados son los basados en punta sobre disco giratorio "Pin On Disk" y bola sobre disco giratorio "Ball on Disk", en este caso se

desarrollará un mecanismo “Pin On Ring”. En estos equipos la muestra es plana y está sujeta a un porta muestras que gira a velocidad constante.

A lo largo del ensayo, la carga normal y la velocidad se mantienen constantes, mientras que la fuerza tangencial de fricción se mide constantemente con un sensor y se registra a lo largo del tiempo y de las múltiples vueltas [4].

Durante el deslizamiento sin lubricación ocurren transiciones en los mecanismos de fricción y ocurren cambios en las condiciones de acoplamiento de las superficies.

3. Desgaste

Se define desgaste como el proceso de remoción de material debido al movimiento relativo de esta superficie respecto otra en contacto. En dicho proceso el material puede ser removido de la superficie y expulsado fuera de la región de contacto. También puede ser transferido a la otra superficie y quedarse adherido a ella o romperse y generar debris que puede quedar, en parte, atrapado en el contacto.

En función de los materiales que están en contacto ya sean metálicos o no, existen varios tipos de desgaste, concretamente los siguientes [5]:

- Desgaste por adherencia: Se produce cuando existe deslizamiento entre dos superficies bajo presión.
- Desgaste por abrasión: Se produce al desprenderse partículas duras que desgastan la superficie de contacto.
- Desgaste por ludimiento: Se produce debido al movimiento oscilatorio entre dos superficies.
- Desgaste por fatiga: Se produce debido a la fatiga superficial entre los materiales, sobre todo al ser un movimiento bidireccional. Suele ser el desgaste más común de todos.
- Desgaste por erosión: Se produce cuando se desprende material debido a un líquido que contiene partículas abrasivas.

- Desgaste corrosivo: Se produce al haber reacciones químicas o electrolíticas con el medio ambiente que aceleran la velocidad de desgaste [5]:

4. Tasa de desgaste:

Para propósitos de diseño y desarrollo de materiales es necesario tener algún parámetro cuantitativo universal para el desgaste. Usar el volumen de material desgastado no es útil ni ilustrativo debido a las diferencias en las condiciones de prueba usadas, en general se utiliza la siguiente expresión [4]:

$$K = \frac{Vol}{W x} \quad (2)$$

Siendo

- *Vol* el volumen desgastado
- *W* el peso aplicado.
- *x* la distancia recorrida.
- Sus unidades son: $mm^3 N$

Los tribólogos clasifican las condiciones de fricción, desgaste y lubricación de acuerdo con los siguientes modelos:

- Estado de fricción 0: Fricción sólida: La fricción se genera entre superficies sólidas en contacto directo sin lubricante.
- Estado de fricción I: Fricción límite: Fricción sólida, en la cual las superficies de las piezas en contacto están cubiertas por una película lubricante molecular que no tiene capacidad de carga. El lubricante incide en las características de fricción y desgaste.
- Estado de fricción II: Fricción mixta: Coexisten el régimen de fricción I y III. El valor de fricción es una combinación de fricción sólida e hidrodinámica. Una película fluida creada por el lubricante cuenta con capacidad de carga.

- Régimen de fricción III: Fricción hidrodinámica: El valor de fricción se determina por el cizallamiento en el fluido. La capacidad de carga de la capa de fluido evita el contacto directo entre las dos superficies sólidas [2].
- Régimen de desgaste a: Altas tasas de desgaste debido a la fricción sólida y el contacto directo de las superficies.
- Régimen de desgaste b: Menores tasas de desgaste debido a una capa de fluido molecular.
- Régimen de desgaste c: Desgaste leve debido a una separación parcial de las superficies mediante un mayor grosor de la capa de fluido.
- Régimen de desgaste d: "Desgaste cero", derivado de películas hidrodinámicas o elasto-hidrodinámicas que impiden el contacto directo de las dos superficies [2].

Cuando se diseñan experimentos que describen la fricción y el desgaste, los ensayos tribológicos pueden clasificarse en una de las seis categorías principales, desde las pruebas de campo de la categoría I hasta las pruebas de laboratorio más simples de la categoría VI, estas categorías se ejemplifican en la Figura 4, en donde tiene la categoría, el tipo de prueba y el sistema de prueba.

Categoría I: Se realiza una prueba de campo en condiciones reales de funcionamiento, lo que puede incluir condiciones operativas prolongadas. La repetitividad de los resultados es deficiente pero cercano a los requerimientos del mundo real que el sistema tribológico enfrentará.

Categoría II: Los experimentos se llevan a cabo con un equipo completo en un entorno real de planta. Estos experimentos pueden alcanzar resultados cercanos a las condiciones normales de funcionamiento y pueden realizarse durante un determinado período de tiempo para replicar las condiciones operativas prolongadas, limitando al mismo tiempo el impacto ambiental.

Capítulo 2. Marco teórico (Antecedentes).

Categoría III: Los componentes, subsistemas o conjuntos se someten a prueba en un laboratorio que se aproxima a las condiciones de funcionamiento normales ampliadas, dando una repetitividad media.

Categoría IV: Las pruebas de laboratorio se llevan a cabo sobre componentes estándar en serie utilizando aparatos de ensayos a escala reducida.

Categoría V: Los experimentos se llevan a cabo sobre una muestra con equipos de prueba para ofrecer condiciones operativas cercanas a las normales con excelente repetitividad.

Categoría VI: Se realiza un banco de pruebas en trabajos de laboratorio con equipamiento de ensayos simple [2].

CATEGORÍA	TIPO DE PRUEBA Condiciones de prueba	SISTEMA DE PRUEBA	
I	PRUEBA DE CAMPO - Condiciones de funcionamiento normales - Condiciones de funcionamiento prolongadas		Repetibilidad deficiente pero cercana a los requerimientos reales
II	LABORATORIO DE PRUEBA CON EL VEHÍCULO COMPLETO (EQUIPO) O EN PLANTA - Cerca de las condiciones de funcionamiento normales - Condiciones de funcionamiento prolongadas		Repetibilidad media y menor impacto medioambiental
III	LABORATORIO DE PRUEBA CON ELEMENTOS DE PLANTA O CONSTRUCCIÓN - Cerca de las condiciones de funcionamiento normales - Condiciones de funcionamiento prolongadas		Verificación de los componentes y repetibilidad media
IV	ENSAYO CON UN ELEMENTO DE CONSTRUCCIÓN ESTÁNDAR O DE PLANTA A ESCALA		Verificación de los componentes estándar con buena repetibilidad
V	ENSAYO CON EQUIPO DE PRUEBAS FUNCIONANDO CERCA DE LAS CONDICIONES NORMALES		Verificación de una muestra con excelente repetibilidad
VI	ENSAYO CON EQUIPO DE PRUEBAS SIMPLE DE LABORATORIO (BANCO DE PRUEBAS)		

Figura 4. Categorías de consideración.

Otro elemento de suma importancia son los lubricantes, ya que, forman parte de la tribología, pero en algunos casos la lubricación puede ser incorporada en el material de los componentes del sistema tribológico [2].

Por lo tanto, los diseñadores de materiales crean materiales específicos para condiciones de lubricación en seco, logrando un rendimiento tribológico superior

relativo a la fricción y el desgaste con una reducción o eliminación de lubricantes líquidos [2].

- Optimizando tribológicamente las superficies de contacto
- Identificando los factores críticos que influyen en el sistema tribológico
- Identificando soluciones para mejorar la eficiencia y reducir el desgaste, incluyendo:
 - El uso de materiales de fricción y de desgaste optimizados.
 - La optimización de los materiales de contacto, lo que conduce a bajos niveles de fricción y desgaste.
 - La selección y el uso de los lubricantes adecuados.
 - Introduciendo cambios en el diseño que repercuten de manera positiva en el rendimiento general del sistema tribológico [2].

El tribómetro como la curva de Stribeck, argumentan que la fricción es dependiente de la viscosidad, la velocidad y la carga, es por eso que el propósito del diseño de tribómetros y el estudio de la tribología es en primera instancia minimizar y eliminar las pérdidas, resultado de la fricción y el desgaste, logrando un importante ahorro en costos dando paso a un crecimiento industrial mayor [6].

Un tribómetro es el equipo mediante el cual es posible determinar la resistencia al desgaste de un material cuando se encuentra en contacto con otro y entre ellos existe movimiento relativo, en un determinado tiempo. Mediante un tribómetro es posible llevar a cabo pruebas y simulaciones de fricción, desgaste y lubricación, que son objeto de estudio de la tribología.

Una de las principales causas que limitan el uso de estos equipos, es el elevado costo, así como una restricción de pruebas que se puedan realizar con él y al tipo de muestras para las que fue diseñado. Por esta razón se vuelve bastante complicado conseguir un equipo que se ajuste a las necesidades del investigador, y que, en la mayoría de los casos al contar con un equipo extranjero, no se garantiza

que en caso de que se presenten fallas, se cuenten con refacciones disponibles o personal capacitado capaz de solucionar el problema en un corto tiempo [6].

Los ensayos tribológicos pueden realizarse en una gran variedad de formas las cuales no solo depende del par de materiales que se someten a estudio, sino que también dependen en gran medida del sistema mecánico en las que serán utilizados. Es conveniente clasificar el comportamiento tribológico de los materiales dependiendo el grado de realismo, las propiedades del material, las condiciones reales de operación, tiempo y costo ya que para algunas pruebas o en algunos ensayos tribológicos la simulación no es una prioridad [6].

Otra clasificación más que se le puede dar a los ensayos tribológicos es con respecto al tipo de contacto que presentan, estas pueden ser cerradas: si la superficie tiene una trayectoria cíclica y abiertas: si la trayectoria de deslizamiento se renueva constantemente. Debido a tiempo y costos, esta clasificación de ensayos tribológicos se origina por el deseo de evaluar nuevos materiales y nuevos diseños de uno o dos componentes ya existentes en máquinas [6].

Es importante hacer hincapié en que las pruebas base en laboratorios están diseñadas con el objetivo de obtener rápidas tasas de desgaste mediante pruebas a condiciones extremas como velocidad, presión, temperatura o una combinación de estas [6].

Sin embargo, para este trabajo en el cual se realizarán algunos tipos de ensayos tribológicos se decidió basarse en la norma ASTM G99-17 [7], y en base a esta desarrollar la máquina de desgaste.

Esta norma establece que, la cantidad de desgaste en cualquier sistema dependerá, en general, de la cantidad de factores del sistema tales como la carga aplicada, las características de la máquina, la velocidad de deslizamiento, la distancia de deslizamiento, el entorno y las propiedades del material. El valor de cualquier método de prueba de desgaste radica en predecir la clasificación relativa de

combinaciones de materiales. Dado que el método de prueba de pasador sobre disco no intenta duplicar todas las condiciones que se pueden experimentar en servicio (por ejemplo, lubricación, carga, presión, geometría de contacto, eliminación de escombros de desgaste y presencia de ambiente corrosivo), no hay garantía de que la prueba predecirá la tasa de desgaste de un material dado en condiciones diferentes a las de la prueba [8].

En la práctica a menudo los usuarios pueden seguir todas las instrucciones, pero elegir otros parámetros de prueba, como carga, velocidad, materiales, entorno, etc., y así obtener diferentes resultados de prueba. Se recomienda el uso de esta norma como un medio para mejorar la metodología de prueba de desgaste.

Estas pruebas de laboratorio se pueden realizar en un tribómetro, o en una máquina de desgaste que siga una norma en específico. En el mercado se encuentran diversos tipos de máquinas de desgaste y/o tribómetros, en este caso se mencionan dos tribómetros que son encontrados comercialmente y en las Tablas 3 y 4, se muestran sus principales características.

Anton Paar ofrece la más extensa gama de tribómetros del mercado basada en décadas de experiencia en tribología, véase Tabla 3 [9].

Tabla 3. Especificaciones Técnicas Tribómetro Anton Par.

Velocidad de Rotación	1 a 500 r/min (opcional 1500)
Par máximo	450 N/mm
Fuerza de fricción	Hasta 10 N (opcional 20)
Diámetro máximo del disco	60 mm
Espesor máximo del disco	15 mm
Fuerza normal máxima	10 N (opcional 60)

Capítulo 2. Marco teórico (Antecedentes).

En la Tabla 4 se muestran las especificación de MICROTEST, la cual desarrolla y fabrica una amplia gama de equipos específicos para analizar las propiedades superficiales de los materiales, incluyendo tribómetros e indentadores [10].

Tabla 4. Especificaciones Técnicas Tribómetro Microtest.

Velocidad de rotación	1 a 500 r/min
Par máximo	450 N/mm
Fuerza de fricción	Hasta 30N
Diámetro máximo del disco	80 mm
Espesor máximo del disco	Hasta 15 mm
Fuerza normal máxima	1N a 60N

Capítulo 3

Planteamiento del problema

3.1. Identificación.

Se decidió llevar a cabo el desarrollo de una máquina de desgaste del tipo Pin On Ring, debido a que el Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato no cuenta con dicha máquina, en la que se pueden realizar diversas pruebas de desgaste que contribuyen al desarrollo de nuevos materiales, o a su vez, ayuda al estudio de materiales existentes con el fin de obtener características del material ensayado con fines de investigación, adicionalmente puede utilizarse como apoyo didáctico.

3.2. Justificación.

Los ensayos tribológicos son de suma importancia, ya que, estos contribuyen de gran manera en el diseño de materiales, máquinas y/o herramientas, además si se toma en cuenta que en el diseño están involucrados, los materiales de las superficies en contacto, el sistema de aplicación del lubricante, el medio circundante y las condiciones de operación. Estos son aspectos que se deben de considerar siempre en el desarrollo de algún elemento, debido a que estos impactan prácticamente en todas las piezas en movimiento.

La realización de estos estudios en diferentes materiales ayuda a resolver problemas en maquinaria, equipos y procesos industriales.

Sin embargo, una de las principales causas que limitan el uso de estos equipos, es el elevado costo, como prueba de ello se realizó la cotización de un Tribómetro tipo Pin-On-Disk (perno en disco) de la marca Anton Paar [11], cuyo costo asciende a \$1 200 000 más IVA, cabe mencionar que se realizó la cotización de este tipo de

tribómetro, porque los ensayos que se realizan en él, también se rigen bajo la norma ASTM G99, norma en la cual se basa el proyecto desarrollado en este trabajo, por lo tanto, si se compara esta cotización con el costo de la máquina desarrollada se obtiene un ahorro del 78% aproximadamente, tal como se muestra el desglose de los costos en la Tabla 9.

Por lo tanto, si el Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato cuenta con esta máquina de desgaste, alumnos y personal docente podrán realizar ensayos a través de los cuales es posible analizar y obtener características particulares del material de interés con fines de investigación.

Otra manera de demostrar la importancia de contar con una máquina de desgaste es la siguiente.

Reducir la pérdida de utilidad de los materiales por deterioro de superficie, debido a que esta corresponde a un 70%, esto gracias a la realización de pruebas de desgaste ya que, se podría predecir su vida útil.

El análisis del desgaste es importante porque junto con la fatiga y la corrosión son los problemas que más fallas causan en las máquinas. De estos tres el menos estudiado ha sido el desgaste [12].

Los beneficios económicos que se obtienen de una correcta aplicación y conocimiento de fenómenos y procesos tribológicos pueden ser, conseguir ahorros sustanciales al aplicar investigaciones tribológicas en el mantenimiento industrial resultado del incremento de la vida útil de máquinas y equipos, incremento de la fiabilidad y reducción del consumo energético [13].

3.3. Alcance.

Se desarrollará una máquina de desgaste Pin On Ring, en la que se puedan realizar ensayos de desgaste en base a la norma ASTM G99-17, la máquina debe de ser funcional y fácil manejo para garantizar su correcto funcionamiento.

Esta contará con un panel de control, en el que se podrá ver y en algunos modificar parámetros como lo son, velocidad de giro del motor, la carga que se está aplicando a la muestra bajo ensayo, así como una aproximación de la temperatura que se tiene en el punto de contacto entre las piezas.

Capítulo 4

Objetivos

4.1. **Objetivos generales.** Diseñar y construir un tribómetro Pin On Ring, para realizar ensayos de desgaste en diferentes materiales, con el fin de obtener y conocer propiedades y características mecánicas, para encontrar puntos de oportunidad para el desarrollo y mejora de los materiales.

4.2. **Objetivos específicos**

- Investigar sobre ensayos tribológicos Pin On Ring.
- Diseñar una máquina de desgaste Pin On Ring.
- Construir la máquina de desgaste Pin On ring.
- Instrumentar la máquina de desgaste desarrollada.
- Crear un panel de control para controlar y monitorear el proceso.
- Realizar pruebas de funcionamiento.

Capítulo 5

Metodología

El trabajo se realizó en el Instituto Tecnológico Superior del sur de Guanajuato en el que se tuvo a disposición todos sus laboratorios, así como el equipo y materiales existentes, lo que facilitó la realización de la máquina de desgaste.

La metodología empleada en el presente trabajo consta de los pasos mostrados en la Figura 5.

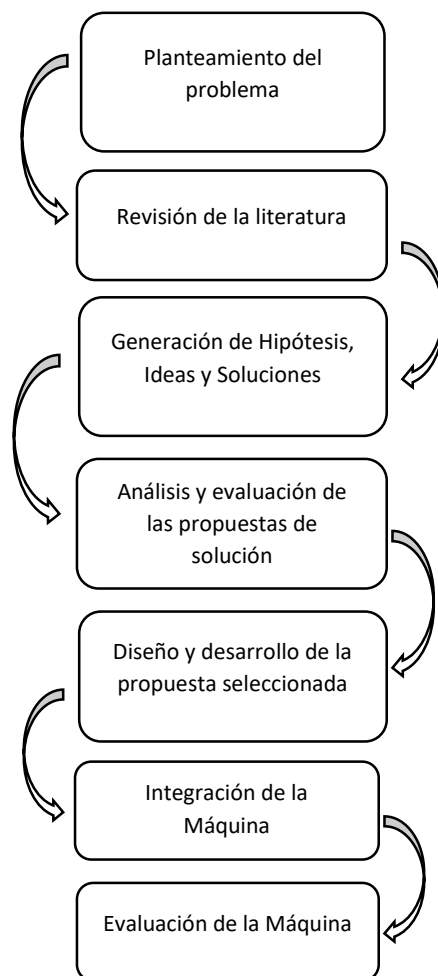


Figura 5. Diagrama de flujo de la metodología empleada en el desarrollo de la máquina.

5.1 Diseño y desarrollo

Como primer paso se determinó el tipo de ensayos de desgaste que se quieren realizar, una vez hecho esto se investigó que norma rige estos tipos de ensayos y también que tipo de máquina de desgaste cumple con dichas especificaciones, por lo que se optó por el diseño y creación de una máquina de desgaste del tipo Pin On Ring, bajo la norma ASTM G99-17 [1].

El segundo paso fue realizar una investigación documental en la que se estudiaron las variables que influyen directamente en la realización del ensayo, por lo que estas se deben de considerar en el diseño y desarrollo de la máquina. Además de estudiar los tipos de máquinas de desgaste Pin On Ring existentes en el mercado y analizar su funcionamiento.

Del análisis realizado se observó que algunas personas, instituciones educativas y/o compañías optan por desarrollar máquinas de desgaste Pin On Disc que se rige bajo la norma ASTM G99, pero cambia la configuración del perno sobre disco. Por ejemplo, David Teodoro Grau diseñó y desarrollo una máquina de desgaste Pin On Disc para la UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA, en la cual utilizo como unidad de control un Arduino Leonardo, para el movimiento tanto del disk, como de la mesa, uso dos tipos de motores, un motor a pasos y un servomotor, este último encargado de hacer girar el pin a altas revoluciones para someter a la probeta a las condiciones tribológicas adecuadas, este servomotor está controlado por un driver Lexium 28, que se encarga de controlar todas las señales del motor, pulsos, velocidad, par y de mostrar a través de un software específico [14].

Otro ejemplo correspondiente a los análisis de desgaste con discos Pin On Disc es el de Experimental Investigation on wear properties with micro-structure behavior of arecanut reinforced polymer composite material [15], donde estudiaron las propiedades de desgaste sobre un material compuesto de polímero reforzado.

Una vez que se entendió su funcionamiento y del mismo modo se conocen las restricciones que maneja norma ASTM G99-17, se procedió a iniciar con la búsqueda de los componentes eléctricos, electrónicos y mecánicos para realizar la máquina.

Se determinó usar un motor eléctrico de CA trifásico, de la marca ABB, modelo m2va80c-4, para poder variar la velocidad de giro sin comprometer el torque, dentro de las características se mencionan los tipos de conexión (Conn) que se pueden realizar, la frecuencia (Freq) y el voltaje (Voltage) que maneja el motor dependiendo de la conexión realizada, a su vez la potencia (Power) y velocidad (Speed) que genera el motor, la corriente máxima (Current) y el torque (Torque) que genera, sus especificaciones se establecen en la Tabla 5.

Tabla 5. Especificaciones del motor eléctrico.

Conn	Freq	Voltage	Power	Speed	Current	Torque
Y	60 Hz	440-480 V	0.90 kW	1690 r/min	1.90 A	5.08 N·m
D	60 Hz	250-280 V	0.90 kW	1690 r/min	3.30 A	5.08 N·m

Para controlar la velocidad del motor eléctrico se determinó utilizar un variador de velocidad, capaz de cubrir la velocidad máxima deseada y poder trabajar con la cantidad de corriente demandada por el motor, el variador de velocidad es el siguiente:

- Variador de Velocidad Mitsubishi Electric FR-E720-050 y en la Tabla 6, se pueden ver sus especificaciones.

Tabla 6. Especificación del variador de velocidad utilizado.

Rated current	Rated active power (KW)	Rated power (HP)	Digital outputs	Analog inputs	Protection functions
5A 150% In for 60s/200% In for 3s overload current rating (inverse-time characteristics)	750W / 0.75kW	1 HP	1 x digital output (SPOT (Single Pole Double Throw contact A/B/C) (programmable). 1x digital output (sink/source open collector)	1x analog input (0-5Vdc /0-10Vdc). 1 x analog	Overcurrent during acceleration. Overcurrent during constant speed. Overcurrent during deceleration.

			transistor) (RUN, programmable). 1x digital output (sink/source open collector transistor) (FU: programmable). 1 x digital output (PTO Pulse Train Output for indicator)	input (0-5Vdc /0-10Vdc / 4-20mA).	Overvoltage during acceleration. Overvoltage during constant speed. Overvoltage during deceleration. Inverter protection thermal operation
--	--	--	--	-----------------------------------	---

Una vez seleccionados los componentes eléctricos que ayudarán a cumplir con las especificaciones deseadas, se realizó el modelado mediante el uso de SolidWorks [16], que consiste en la creación de una base o mesa para la máquina de desgaste, usando perfil Bosch, como se muestra en la Figura 6.



Figura 6. Modelado CAD de la base de perfil Bosch para la máquina de desgaste.

Durante su desarrollo fue necesario cortar el perfil con una cortadora angular para asegurar un corte más uniforme, además se fabricaron escuadras a la medida del perfil y se usaron tornillos cabeza de gota, esto permitió un ahorro económico considerable si se compara con los costos de las escuadras y los tornillos para el perfil, ya que hacen la misma función por un costo menor.

Una vez ensambladas las piezas del perfil Bosch, se cortó una cubierta de melamina de 20 mm de espesor y se fijó a la estructura del perfil.

En busca de garantizar la seguridad del usuario de la máquina de desgaste se diseñó una protección con perfil Bosch y acrílico que permita tener visibilidad hacia la parte interior, con el fin de poder monitorear el ensayo que se esté realizando, además de generar un ambiente seguro alrededor de la máquina, cabe mencionar esta base es removible, por si en dado caso esta se tuviera que retirar, el diseño en CAD, de la protección se puede apreciar en la Figura 7.

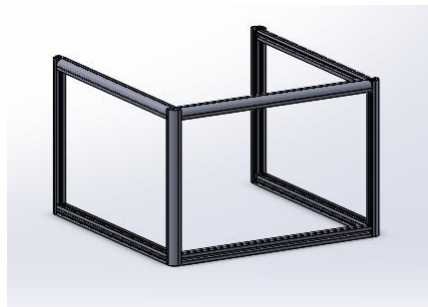


Figura 7. Protección de perfil Bosch y acrílico.

El motor previamente mencionado, se encuentra anclado a toda la mesa, para garantizar una correcta sujeción, además cuenta con un material entre base y motor que ayuda a la absorción de vibraciones generadas por el motor.

Para poder completar la máquina de desgaste es necesario el uso de un disco metálico de cierto grado de dureza, con el fin de que este sea elemento que desgaste al Pin muestra del material que se desea ensayar.

La contraparte consiste en un disco de acero AISI D2 con una dureza del grado HRC 60, que posteriormente fue tratado térmicamente y cuya composición química en peso es: 1.5% C, 0.45% Mn, 0.3% Si, 12% Cr, 0.9% Mo, 0.03% P, 0.03 % S, 1.0% V, 83.79% Fe [6], la dureza del disco para desgaste se determinó mediante el uso de un durómetro Mitutoyo Mod MIC-963-210-100 obteniendo un valor promedio de 95 HRC, dureza suficiente para cumplir con su función dentro de la máquina, entre otras características que se indican en la Tabla 7.

Dicha dureza se consideró como suficiente, debido a que en Centro de Mecánica, Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Lomas de Zamora diseñaron y construyeron una maquina Pin On Disk bajo criterios de la norma ASTM G99, con el fin de la determinación de coeficientes de fricción y ejemplos de aplicación, en la cual utilizaron un disco de acero SAE H13 templado y revenido a 45HRC, material empleado con esa dureza en la fabricación de matrices de forja, y pines mecanizados en tres aceros, máquina que fue aplicada con éxito para determinar coeficientes de fricción, que fueron usados en la simulación de procesos de forjado en caliente [17].

Tabla 7. Material, características y aplicaciones, del material usado en el disco de desgaste.

Material	Características	Aplicaciones
Acero D2	<ul style="list-style-type: none">• Acero al alto carbón y alto cromo.• Dimensionalmente estable de excelente rendimiento al corte y resistencia al desgaste.• Especialmente apto para temple al aire.	<ul style="list-style-type: none">• Estampado y Formado• Matrices y Punzones• Troquelado y Perforado<ul style="list-style-type: none">• Rodillos• Troquelado Fino• Dados para Acuñaado• Herramientas de Roscado<ul style="list-style-type: none">• Partes de Desgaste• Insertos para Moldes• Cuchillas, Slitters y Cizallas

El disco utilizado para el desarrollo de la máquina es el mostrado en la Figura 8.

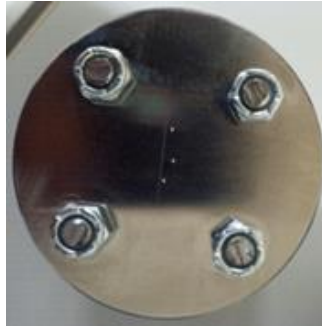
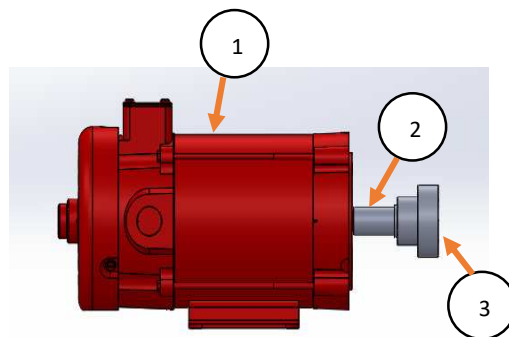


Figura 8. Disco de acero D2 tratado térmicamente.

La manera de acoplar el disco previamente mencionado al eje del motor eléctrico, consta del desarrollo de un cople, cabe mencionar que este cople se debe maquinar y dejarlo a las dimensiones adecuadas, para así garantizar el acoplamiento y la correcta rotación del disco para el ensayo, la manera en la que el disco se acopla al motor se puede visualizar en la Figura 9, en donde se tiene un diseño CAD que incorpora los tres elementos previamente mencionados.



Descripción:

1. Motor eléctrico
2. Cople
3. Disco

Figura 9. Acoplamiento de los elementos de la máquina de desgaste, (motor eléctrico (1), cople (2), disco (3)).

En la Figura 9 se puede ver que el disco se sujeta al motor por medio del cople, esto significa que la carga aplicada durante el ensayo de desgaste será directamente en

el eje del motor, por lo que se realizaron los cálculos correspondientes con el apoyo del diagrama mostrado en la Figura 10.

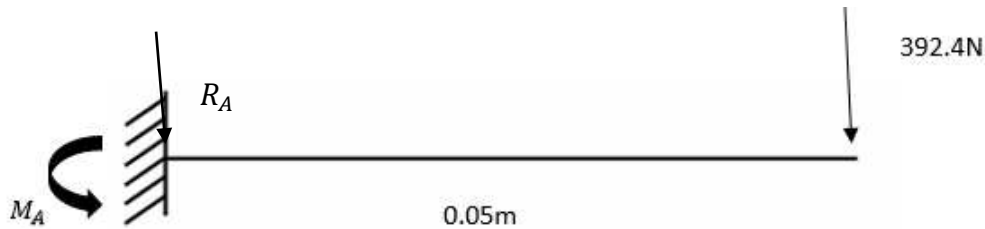


Figura 10. Diagrama de cuerpo libre de la fuerza máxima aplicada sobre el eje del motor.

En el eje “x” no se tienen reacciones, por lo que su valor es de 0 automáticamente.

$$\sum F_x = 0 \quad (3)$$

En el eje “y” se tiene la reacción en el punto A y la carga aplicada en el otro extremo del eje, pero con signo negativo, ya que, se tomaron como positivas hacia arriba en el plano cartesiano.

$$\sum F_y = R_A - P(0.05 \text{ m}) \quad (4)$$

$$\sum F_y = R_A - 392.4N(0.05 \text{ m})$$

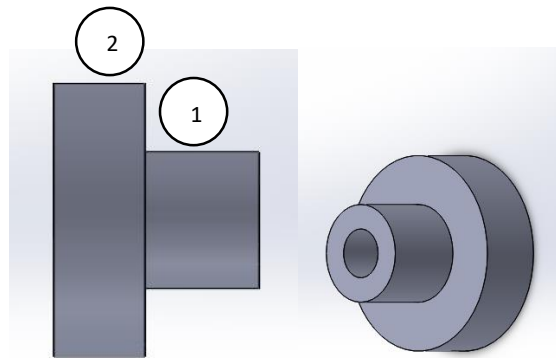
Despejando y sustituyendo en la ec.4 se obtuvo el valor de la reacción en el punto A.

$$R_A = 19.62 \text{ N}$$

Se identifican las fuerzas que pueden generar momento en el eje y se multiplica esta fuerza por su distancia en metros desde el punto de referencia, hasta donde se encuentra la fuerza.

$$\sum M_A = 392.4 \text{ N}(0.05 \text{ m}) = 19.62 \text{ Nm} \quad (5)$$

Conociendo los cálculos en el proceso de fabricación del cople, se utilizó una barra de aluminio de un diámetro de 65 mm, esta barra de aluminio se maquinó en un torno CNC, en el cual, el objetivo fue llegar al diseño mostrado en la Figura 11.



Descripción:

1. Primera etapa de Maquinado.
2. Segunda etapa de Maquinado.

Figura 11. Diseño en CAD del cople motor-disco.

En el proceso de maquinado en el torno CNC, se optó por generar un código que fue introducido en el torno y con este código se realizó el proceso de maquinado automáticamente.

El diseño CAD consta de dos etapas de maquinado en torno, como se vio en la Figura 11, por lo que la generación del código también se dividió en etapas. Por motivos de simplicidad en el proceso de maquinado, se inicia con la parte donde se requiere de una mayor remoción de material, en la Figura 11, esta sección se enumera con el número 1.

El código que se utilizó es el siguiente:

En la primera línea del código, el M03, es el encargado de encender el husillo que, a su vez, genera el movimiento rotacional de la pieza.

El S1000, es el número de revoluciones que puede alcanzar el husillo del torno.

```
0000 M03 S1000 ;
```

El conjunto de coordenadas Absolutas X308.000 Z-100.000 son parte de una posición segura, en la que el portaherramientas con el elemento de corte se posiciona a una distancia cercana a la pieza, en la que no se tiene riesgo de colisión entre el portaherramientas y la pieza a maquinar.

Cabe recordar que en este torno solo se cuentan con dos ejes X y Z, estos ejes se manejan de forma similar a un plano, tienen signo positivo y negativo, pero este depende del punto de referencia que se tome en cuenta.

$$X308.000 Z - 100.000;$$

La instrucción siguiente ($X307.500 Z - 147.000;$), corresponde a un movimiento donde ya se realiza un corte sobre la pieza que se está maquinando, en este caso se estaría removiendo 0.5 mm de material, ya que, con el eje X se mide la profundidad de corte y con el eje Z, se mide la longitud del corte, se debe mencionar que para las instrucciones de corte, las coordenadas cambian con respecto a las coordenadas de seguridad, debido a que se modifica la profundidad y la longitud que debe de seguir el portaherramientas.

$$X307.500 Z - 147.000;$$

Una vez que se realizó el corte, es necesario que el portaherramientas se vaya a la posición de seguridad, para evitar una posible colisión en su movimiento de retroceso, por lo que se le da la siguiente instrucción:

$$X308.000 Z - 100.000;$$

Nuevamente se procede a dar una instrucción de corte, en este caso se dio nuevamente una profundidad de 0.5 mm, y la misma longitud de corte. Para que se realice el corte, es necesario ir restando a las coordenadas absolutas 0.5 mm por pasada en el eje X y la posición en el eje Z permanecerá igual en las instrucciones de corte.

Este proceso se repite tantas veces sea necesario, hasta lograr que se tenga el diámetro deseado, para esta sección de la pieza fue necesario realizarlo hasta las coordenadas $X270.000 Z - 147.000;$ en donde se obtuvo el diámetro deseado.

$$X308.000 Z - 100.000;$$
$$X270.000 Z - 147.000;$$
$$X308.000 Z - 100.000;$$

En la segunda etapa de maquinado se desarrolló un código un poco diferente, en el cual, se tiene la misma posición de seguridad X308.000 Z-100.000; pero con un cambio en las coordenadas absolutas responsables de generar la remoción de material. Esta principal diferencia radica en que se debe de aumentar la longitud de corte, para que el portaherramientas sea capaz de llegar hasta el lugar donde se necesita realizar el corte, X307.500 Z-172.000; de esta manera se logró tener las medidas deseadas.

X308.000 Z – 100.000;

X307.500 Z – 172.000;

Se repitió esta serie de operaciones hasta llegar a las siguientes coordenadas, en las que se obtuvo el diámetro deseado.

X308.000 Z – 100.000;

X299.200 Z – 172.000;

En este punto del maquinado, la pieza debe verse como se muestra en la Figura 12.

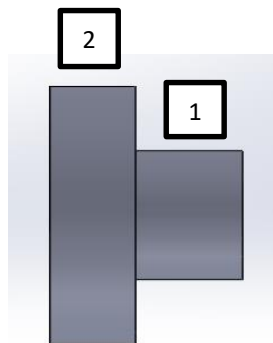
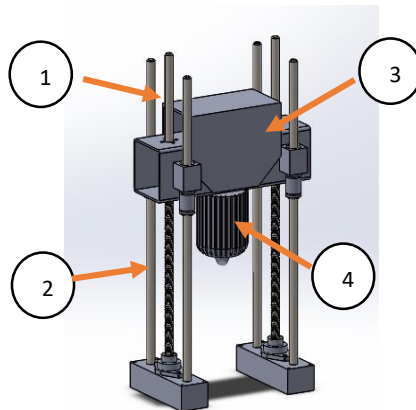


Figura 12. Etapas de maquinado.

Por otro lado, se requiere sujetar el Pin muestra, por lo que se decidió usar un broquero de 1/32" a 5/8" con Árbol Cónico para Taladro de Banco Morse # 3 Montaje JT3, ya que, este garantiza la sujeción de la muestra, debido a que permite la

apertura y cierre necesarios de acuerdo a las dimensiones de la muestra, este elemento se puede identificar en la Figura 13.

Para el mecanismo de aplicación de carga entre el Pin muestra y el disco, se cuenta con unos tornillos, que hacen la función de un tornillo sinfín, para subir y bajar la base que sujeta a la porta muestra y a su vez aplicar la carga sobre el disco, además de que en este mecanismo se incorporan sensores que ayudan a la instrumentación de la máquina, como lo son, un sensor para medir la carga aplicada, así como, un termopar que permite censar la temperatura que se tiene entre el disco y la muestra, al momento de realizar el ensayo, estos elementos se visualizan en la Figura 13.



Descripción:

1. Varilla roscada de $\frac{1}{2}$ "
2. Guías de deslizamiento
3. Base para la celda de carga
4. Broquero de $\frac{1}{32}$ " a $\frac{5}{8}$ " con Árbol Cónico para Taladro de Banco Morse # 3 Montaje JT3

Figura 13. Mecanismo para la aplicación de carga y medición de la misma.

En el proceso de diseño del mecanismo de aplicación de carga, resultado de gran interés, el analizar el comportamiento que tendría la base de la celda de carga al aplicarle la fuerza necesaria para el ensayo de desgaste, por lo que se hicieron los siguientes cálculos utilizando los valores del diagrama de la Figura 14.

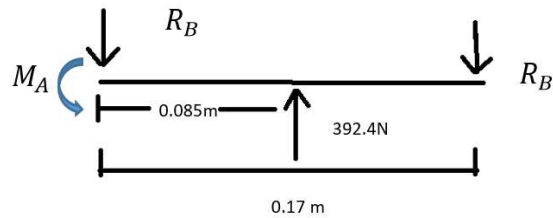


Figura 14. Diagrama de cuerpo libre de la base de celda de carga.

Se identificaron las fuerzas que pueden generar momento en el eje y se multiplicó la fuerza por la distancia en metros desde el punto de referencia, hasta donde se encuentra la fuerza.

$$M_A = [(0.085m)(392.4N) - 0.17(R_B)] \quad (6)$$

Despejando y sustituyendo la ecuación 6, se obtuvo el valor de la reacción en el punto B, como se puede observar en la ecuación 7.

$$M_A = 33.354 - 0.17(R_B)$$

$$33.354 = 0.17(R_B)$$

$$R_B = \frac{33.354}{0.17} = 196.2N \quad (7)$$

Sustituyendo el valor de la reacción en el punto B, en la ecuación 6, el resultado obtenido tiene gran lógica, ya que, el momento resultó con un valor de 0, debido a que la viga se encuentra fija en ambos extremos.

$$M_A = 33.354 - 0.17(196.2) = 0$$

De la ecuación 8 se despejó la reacción en el punto A y se sustituyó el valor obtenido de la reacción en B y se obtuvo el valor de la reacción A, teniendo la misma magnitud que el punto B, debido a que se encuentran a la misma distancia con respecto al centro de la viga, que es el lugar en donde se aplica la fuerza.

$$\sum F_y = 392.4N - R_A - R_B \quad (8)$$

$$\sum F_y = 392.4N - R_A - 196.2 = 0$$

$$\sum F_y = 196.2N - R_A = 0$$

$$\sum F_y = 196.2N = R_A$$

$$R_A = 196.2N$$

Otro calculo que se realizo fue el del momento flector, simulando la flexión que pudiera tener la base de la celda de carga mostrado en el diagrama de la Figura 15.

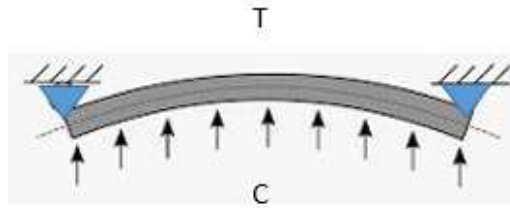


Figura 15. Diagrama del momento flector.

Para poder realizar los cálculos se deben de conocer ciertos datos mencionados en la Tabla 8.

Tabla 8. Especificaciones del PTR utilizado para la base de la celda de carga.

Espesor	Calibre	Área	Momento de Inercia	Módulo de sección
2.794 m	12	3.74 cm ²	7.56	3.97 cm ³

$$\sigma = \frac{M \cdot C}{I} \quad (9)$$

M = Momento flector.

C = Distancia desde el eje neutro (centroide), hasta donde se determina el esfuerzo.

I = Momento de inercia respecto al eje de flexión.

El esfuerzo que se tendría en la pieza se calcula desarrollando la ecuación 9, en la que se sustituyen los valores dados en la Tabla 8 y se realizan las operaciones matemáticas necesarias.

$$\sigma = \frac{M * C}{I} = \frac{392.4 \frac{kgm}{s^2} (0.0381 m)}{7.56 \times 10^{-8} m^4} = 197.757 \times 10^6 \frac{kg}{m^2}$$

El método para conocer el momento flector corresponde a la sustitución de los valores de la resistencia a la tracción del PTR que corresponde a $5000 \frac{kg}{cm^2}$ y el valor del módulo de sección dado en la Tabla 8.

$$M = RZ \quad (10)$$

M = Momento flector.

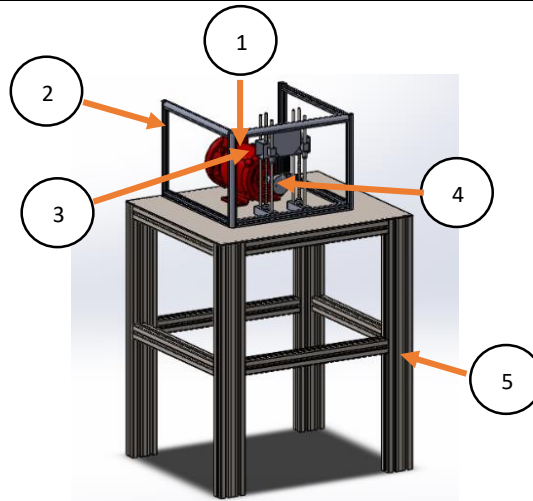
R = Resistencia a la tracción.

Z = Módulo de sección.

Sustituyendo estos valores en la ecuación (10), se obtiene el valor del momento flector.

$$M = 5000 \frac{kg}{cm^2} (3.97) cm^3 = 19850 \frac{kg}{cm}$$

Con los cálculos realizados previamente y los elementos mecánicos y eléctricos seleccionados en la Figura 12, finalmente en la Figura 16 se muestra el modelado en CAD, en el que se incorporan todos los elementos mostrados previamente.



Descripción:

1. Motor eléctrico
2. Protección
3. Mecanismo de la aplicación de carga
4. Disco y cople
5. Base de la máquina

Figura 16. Modelado CAD de la máquina de desgaste.

5.2 Instrumentación

Para la instrumentación de la máquina de desgaste se optó por usar el Arduino Genuino Uno, en base a esta plataforma se eligieron los sensores y en base a estos se desarrolla la programación y la conexión de los mismos.

La máquina requiere de un sensor capaz de medir la carga aplicada y para esta aplicación se eligió una celda de carga de 20kg con Amplificador Hx711, con una resolución de $1\pm 0.15\text{mv/v.}$, que se ilustran en la Figura 17.

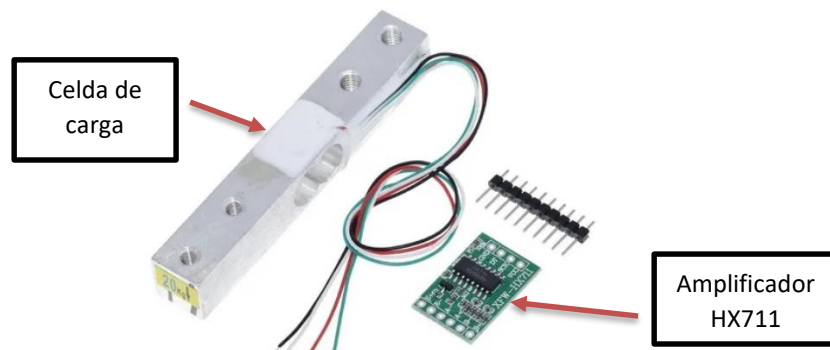


Figura 17. Celda de carga y amplificador Hx711.

Por otra parte, es necesario conocer la temperatura que se tiene entre las superficies en contacto, esto se logra gracias al uso de un termopar del tipo K y un Módulo Max6675, elementos que se pueden ver en la Figura 18.

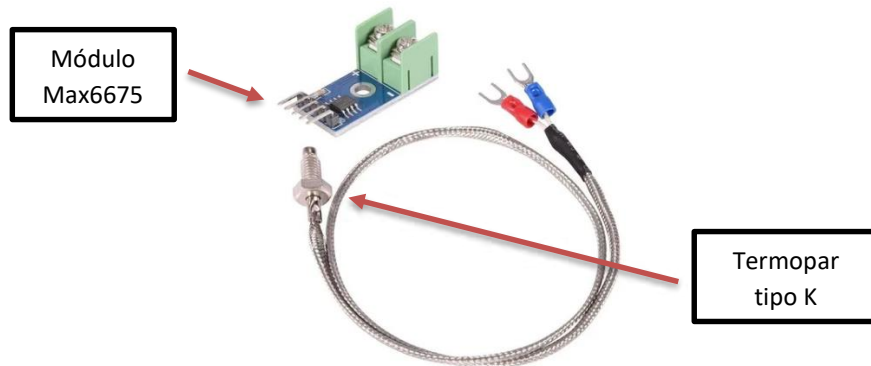


Figura 18. Termopar del tipo K y módulo Max6675.

Para poder tener un panel de control donde se visualicen los valores medidos por los sensores, este se va a desarrollar en LabView, en el que se mostrará la velocidad a la que está girando el motor, la carga aplicada y la temperatura en las superficies en contacto.

Para poder establecer comunicación entre ambas plataformas es necesario descargar las librerías LVIFA_Base.

Ahora se procede a realizar la conexión entre la celda de carga, amplificador y Arduino, la cual se muestra en la Figura 19.

Para que las señales generadas por la celda de carga puedan ser leídas por el Arduino, se requiere del uso del amplificador Hx711, gracias a que este amplifica la señal hasta el rango de valores necesarios para que el Arduino sea capaz de leerlo y sea posible tenerlo visible en el panel de control de la máquina de desgaste, este circuito permite saber cuánta carga se está aplicando durante el ensayo.

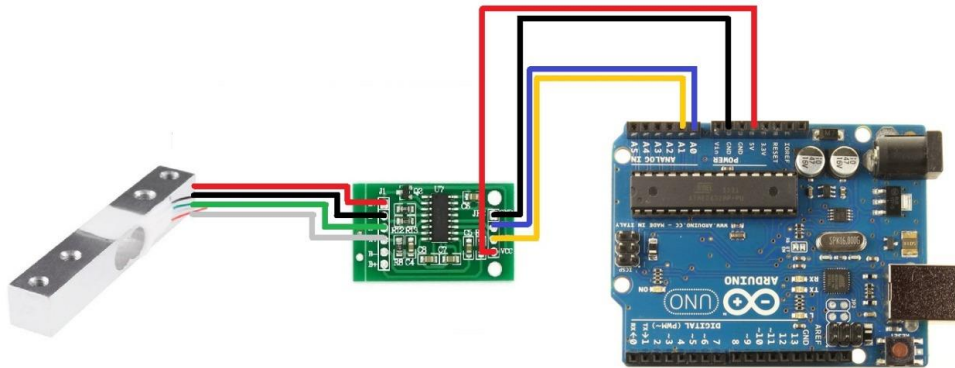


Figura 19. Conexión, celda de carga, amplificador Hx711 y Arduino.

En el panel de control se podrá visualizar la temperatura que se tiene entre las superficies en contacto, esto es posible gracias al uso de un termopar compatible con Arduino gracias al uso del módulo Max6675, en el cual se conectan las terminales del termopar a la entrada del módulo y a la salida del módulo se realizan las conexiones a los pines del Arduino, como se ve en la Figura 20.

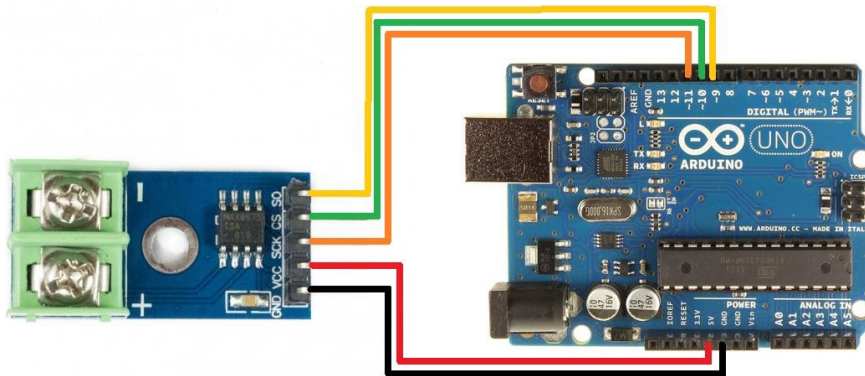


Figura 20. Conexión Termopar tipo K, módulo Max6675 y Arduino.

Con el fin de obtener la lectura de las r/min a las que gira el motor eléctrico se implementó el uso de un encoder rotatorio incremental, cuya conexión eléctrica se muestra en la Figura 21.

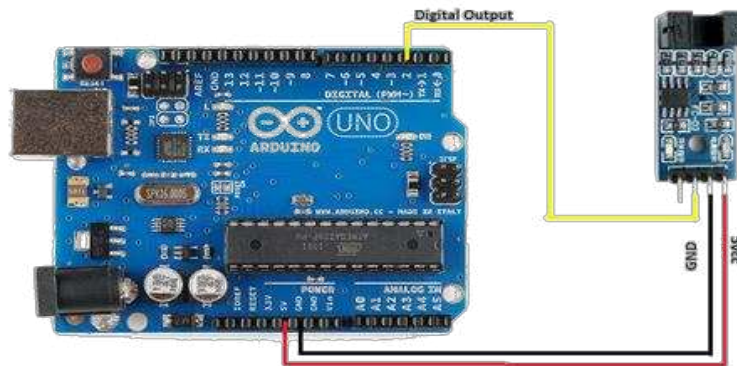


Figura 21. Conexión de encoder rotativo incremental.

Dentro de la etapa de instrumentación se generó un programa en Arduino donde, es necesario descargar y llamar la librería “max6675.h” la cual es encargada de interpretar los datos leídos por el módulo, seguido de esto se definen las variables necesarias para el funcionamiento del programa.

Con el Void setup se inicia el puerto serial 9600 en el cual mostrara los datos obtenidos y ayudara para la comunicación serial con LabView, además se configuran los pines que se usaran en el Arduino.

Posteriormente se generó el programa en LabView, en el cual, se agregaron en el panel frontal 3 gráficos para la representación de las variables de interés, como las r/min , temperatura y la carga aplicada, también se encuentra el botón de “Stop” para detener el programa y el selector del puerto “COM” al que pertenece el microcontrolador a utilizar.

De manera paralela, al desarrollar la programación se generó el panel de control mostrado en la Figura 22, en el cual se cuenta con los indicadores correspondientes para cada sensor, de esta manera se satisface el monitoreo de las variables de interés durante un ensayo de desgaste.

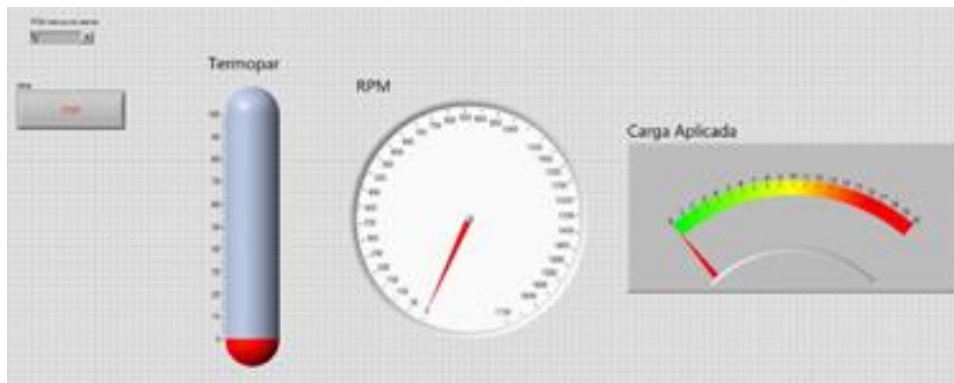


Figura 22. Panel de Control desarrollado en LabView.

5.3 Integración de la Máquina

Ahora en la máquina se integran todos los elementos mencionados previamente, comenzando por los elementos estructurales, como lo son la base de la máquina y la protección para el usuario, adicionalmente se incorporan en un panel de control físico, los elementos eléctricos y/o electrónicos, para poder encender el motor eléctrico, al este ser un motor trifásico, se requiere del uso de 3 pastillas ubicadas dentro de un centro de carga, cada una de estas pastillas controla una fase del motor.

Del centro de carga sale un cable con una conexión trifásica que debe alimentarse a 250-280 V, debido a que el motor está configurado en D (delta), especificaciones mostradas en la Tabla 5.

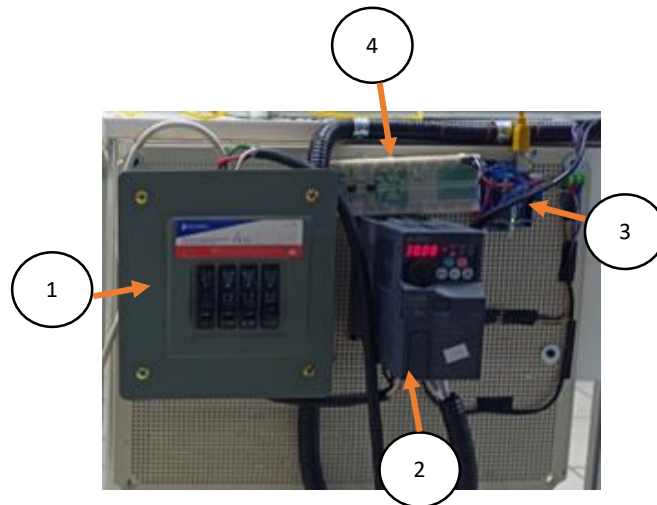
Para poder integrar y encender el variador de velocidad se debe de realizar la conexión pertinente entre el variador de velocidad y el motor eléctrico, de igual manera se debe agregar una clavija que permita tomar la tierra física, ya que, es necesaria para poder encender el variador de velocidad.

En el mecanismo de aplicación de carga se agregan sensores como la celda de carga y el termopar, posteriormente se instala el disco sobre el eje del motor y se coloca el encoder encargado de realizar la medición de la velocidad a la que gira el motor.

Dentro del panel de control físico desarrollado se encuentra un Arduino Genuino Uno, en el cual, se realiza la conexión de los diversos sensores incorporados en la máquina.

Para poder alimentar los positivos (5V) de los sensores, así como, tomar las tierras (GND) necesarias para el funcionamiento de los sensores se incorporó un protoboard para lograr ese fin.

El panel de control físico mencionado se muestra en la Figura 23.



Descripción:

1. Centro de Carga
2. Variador de frecuencia
3. Arduino Genuino Uno
4. Protoboard

Figura 23. Panel de Control Físico.

Ahora con todos los elementos de la máquina integrados, se procede a realizar la calibración de los sensores, así como, corroborar su correcto funcionamiento, realizando pruebas sencillas, como son, girar el motor a una velocidad deseada y comprobar que la medición del encoder sea igual o cercana a esta, además se puede complementar con el uso de una muestra cualquiera y ejercer un poco de fuerza sobre el disco de desgaste y observar si la celda de carga mide de manera correcta la fuerza aplicada.

Una vez hecho esto, la máquina está lista para realizar un ensayo de desgaste en forma, con base en la norma ASTM G99 [7].

Finalmente se realizó el cálculo económico de la integración de los materiales y herramientas utilizadas para la realización de este proyecto, el cual, asciende al costo mostrado en la Tabla 9, donde se desglosa a grosso modo el costo de cada uno de los componentes y finalmente la cantidad total.

Tabla 9. Cotización de la máquina desarrollada.

PRODUCTO O SERVICIO	No.	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
Motor Eléctrico	1	\$19800	\$19800
Variador de frecuencia	1	\$20000	\$20000
Perfil Bosch 45 x 45 mm	2	\$5224	\$10448
Perfil Bosch 45 x 90 mm	1	\$4800	\$9600
Mano de obra	384 hrs	\$500	\$192000
Celda de carga + Amplificador Hx711	1	\$220	\$220
Broquero para taladro de banco	1	\$1250	\$1250
Encoder rotatorio incremental	1	\$420	\$420
Termopar tipo K+ módulo Max6675	1	\$260	\$260
Varillas roscadas	2	\$235	\$470
Tornillos y tuercas	40	\$10	\$400
Escuadras	16	\$20	\$320
Guías de deslizamiento	4	\$110	\$440
Total			\$255628

Capítulo 6

Resultados

A lo largo del desarrollo de la máquina se hicieron cálculos y simulaciones sobre elementos de la máquina, tal es el caso de la celda de carga en la cual, su diseño y correcto funcionamiento se basa en el de una viga en voladizo, por lo tanto, al ejercer una fuerza en uno de sus extremos y al tener la contraparte fija o anclada, esta debería sufrir una deformación, así que, se realizó una simulación en software calculando los valores correspondientes para una deformación total, en la cual, se seleccionó y sometió a análisis una pieza de material Aluminio y agregó una condición de fija o anclada en una de sus caras, del mismo modo, en la otra cara se aplicó una carga de -392.4 N , ya que se consideró el momento en sentido horario, las magnitudes utilizadas y su punto de aplicación se muestran en la Figura 24.



Figura 24. Diagrama de cuerpo libre de las piezas sometidas a simulación. Fuente: Elaboración propia.

Cabe mencionar que la celda de carga tiene una capacidad máxima de 20 Kg , por lo que se decidió aplicar el doble de esta magnitud (40 Kg) que, a su vez, convertida en "N" da la cantidad de 392.4 N , con el fin de analizar el elemento de la máquina en condiciones extremas si se toma en cuenta su capacidad de carga, obteniendo el resultado mostrado en la Figura 25.

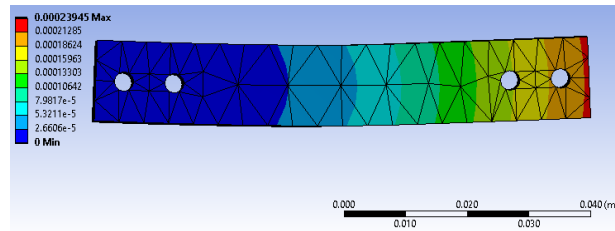


Figura 25. Deformación total de la celda de carga utilizada. Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 25, la fuerza aplicada está dentro de un rango seguro; adicionalmente se realizó una simulación de la misma pieza, con las mismas magnitudes, pero con otra variable de interés, que es el esfuerzo equivalente de Von Mises, ilustrado en la Figura 26.

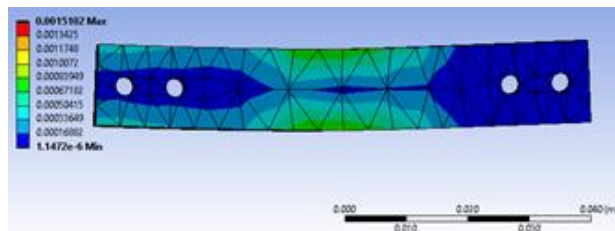


Figura 26. Esfuerzo Equivalente Von Mises de la celda de carga utilizada. Fuente: Elaboración propia.

Otro elemento que se somete a flexión debido a la naturaleza del diseño de la máquina es el eje del motor eléctrico, por lo tanto, se realizó la simulación correspondiente para calcular la deformación total en el eje del motor, en la que se consideró la misma magnitud de carga ilustrada en la Figura 24 (-392.4 N) y de igual manera con un extremo fijo, pero en este caso, lo que cambia con respecto al cálculo realizado para la celda de carga, es el material del cual se constituye el eje del motor, que en este caso es un acero AISI 1045 [14], el resultado se visualiza en la Figura 27.

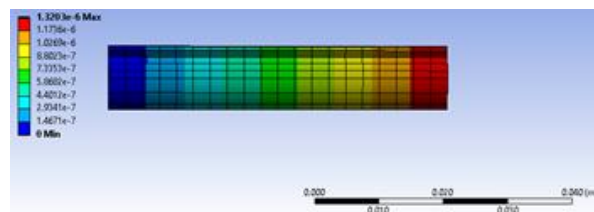


Figura 27. Deformación total del eje del motor ABB m2va80c-4. Fuente: Elaboración propia.

Llevando a cabo las etapas de diseño, desarrollo e instrumentación mencionadas en la metodología, se terminó la etapa de integración de la máquina, obteniendo como resultado un panel de control físico y el desarrollado en LabView, el resultado se visualiza en la Figura 28.



Figura 28. Máquina de Desgaste Pin On Ring desarrollada. Fuente: Elaboración propia.

Se evaluó el funcionamiento de la máquina mediante la alimentación del motor eléctrico con un voltaje de 250-280 V y se configuró en el variador de velocidad una frecuencia de 30 Hz, alcanzando aproximadamente $1650 \text{ } r/min$ visibles en el panel de control en *LabView*, posteriormente se comenzó a aplicar gradualmente carga sobre el disco de desgaste mediante el mecanismo desarrollado, deteniéndose en un valor cercano a 12 kg, el resultado se visualizó en el panel de control en *LabView*, como reacción al giro del motor y la carga aplicada, el termopar tipo K realizó la medición de temperatura cercana a 45° C en el Pin muestra utilizado, la prueba tuvo una duración de 15 minutos y se utilizó como Pin un taquete de madera para ajustes y puesta a punto de la máquina.

Capítulo 7

Análisis de Resultados

Tomando en cuenta la norma ASTM G99-17, se diseñaron los elementos de la máquina de desgaste, con el fin de poder realizar ensayos de desgaste, bajo esta norma.

Los resultados obtenidos hasta el momento son la obtención de una base funcional para la máquina de desgaste, utilizando perfil Bosch, lo que brinda buena estética y reducción de peso, si se compara con una estructura metálica.

Sobre esta estructura se anclo el motor eléctrico seleccionado por medio de tornillos pasados a través de la estructura y de la cubierta de melamina, generando un buen agarre, además se redujo en gran cantidad las vibraciones generadas por el motor eléctrico.

Se realizaron análisis estáticos, con el fin de determinar las fuerzas a las que se someterían ciertos componentes de la máquina, tal es el caso del eje del motor, sobre el cual se acopla el disco de desgaste en el que se aplica la carga durante el ensayo, analizando el eje del motor como una viga en voladizo fija en un extremo.

Además de que la base (PTR) en la que se sujetara la celda de carga, puede llegar a sufrir una cierta flexión durante el ensayo se realizó el cálculo en momento flector de este elemento, comprobando que el material utilizado es viable en esta aplicación.

En el motor eléctrico se incorporó el cople que ayuda a la sujeción del disco de desgaste, este cople fue diseñado y desarrollado con el fin de realizar esta tarea.

Dicho cople se maquinó utilizando un programa desarrollado para el proceso de maquinado en un torno CNC, obteniendo una pieza con las dimensiones establecidas para garantizar el correcto funcionamiento de la máquina de desgaste.

En relación al disco de desgaste, se seleccionó un material capaz de cumplir con los requerimientos principalmente de dureza necesaria para desarrollar su función dentro de la máquina, el material seleccionado fue un Acero D2, con una dureza HRC 60, que posteriormente fue tratado térmicamente obteniendo una dureza aproximada de 95 HRC.

Se fabricó una estructura de protección para el usuario, utilizando perfil Bosch y acrílico, lo que la hace ligera y de buena estética, además al implementar el uso del acrílico, es posible monitorear el ensayo de desgaste, gracias a que es transparente.

Se obtuvo el variador de velocidad, el cual es capaz de variar la velocidad del motor dentro del rango deseado, además de que es capaz de trabajar con la cantidad de corriente demandada por el motor, por lo tanto, se tiene un factor de seguridad en el uso de estos componentes, tanto para garantizar el funcionamiento de la máquina, como en el cuidado de la integridad de los mismos.

En el ámbito de sensores, se optó por el uso de sensores compatibles con la plataforma Arduino para posteriormente trabajar en conjunto con Arduino y LabView, para el desarrollo del panel de control de la máquina.

Los sensores son un Termopar tipo K y un módulo Max6675 que facilita la compatibilidad con Arduino, caso similar al de la celda de carga, la cual incorpora un amplificador Hx711 que permite la lectura de las señales en Arduino.

Como elemento de sujeción del Pin muestra, el uso del Broquero para taladro de banco, permite la apertura de las mordazas en una dimensión suficiente, ya que, el tamaño del Pin, va desde los 10 mm, hasta los 15 mm, en cambio el Broquero tiene una apertura de 16 mm aproximadamente.

Se realizaron pruebas de funcionamiento con fines demostrativos para corroborar que la máquina alcanza la velocidad deseada y que los sensores funcionan de manera adecuada, hasta el momento sin la obtención de resultados relevantes en ámbitos académicos o de investigación.

Capítulo 8

Conclusiones y trabajo a futuro

1.1 Principales resultados.

Se diseñó y fabricó una máquina de desgaste del tipo *Pin On Ring* con un sistema de control e instrumentación a través de un lenguaje de programación visual en *LabView*, con la implementación de *Solidworks* para el modelado CAD.

Se desarrollaron los elementos mecánicos y estructurales necesarios, como lo son la base de la máquina, una protección para el usuario, el anclaje del motor eléctrico. Se maquinó el cople en el torno CNC, el cual servirá para acoplarse al motor y fijar el disco de desgaste con el motor.

Se seleccionó el material del disco con las características requeridas de acuerdo a la literatura para poder realizar análisis tribológicos.

Se creó un panel en *LabView*, en el cual, es posible monitorear la velocidad a la que gira el motor eléctrico, además de que se puede ver la carga aplicada durante el ensayo de desgaste y una aproximación de la temperatura de las superficies en contacto.

1.2 Alcance y limitaciones

Se evaluó el funcionamiento de la máquina mediante un ensayo con fines de puesta a punto la instrumentación y funcionamiento de la máquina, para el correcto funcionamiento de la misma.

1.3 Trabajo a futuro

Como trabajo futuro se tiene el objetivo de realizar ensayos de desgaste, y comparar los resultados con los reportados en la literatura.

Como etapa final del desarrollo de la máquina se planteó la idea de implementar un sistema de visión artificial, con el objetivo de optimizar la realización de ensayos de

desgaste, gracias a la obtención de imágenes en tiempo real y poder calcular la tasa de desgaste sin necesidad de quitar la muestra del ensayo.

Bibliografía

- [1] ASTM Int', «Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus,» February 2018. [En línea]. Available: <https://www.astm.org/Standards/G99>.
- [2] GGB, «Tribología,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.ggbearings.com/es/tribou/tribologia>.
- [3] T. Castillo, «PRINCIPIOS DE TRIBOLOGÍA APLICADOS EN LA INGENIERÍA MECÁNICA,» Diciembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.3ciencias.com/wp-content/uploads/2019/12/PRINCIPIOS-DE-TRIBOLOG%C3%8DA-APLICADOS-EN-LA-INGENIER%C3%8DA-MEC%C3%81NICA.pdf>.
- [4] C. J. Z. Cardona, «Reingeniería en máquina para desgaste tipo pin sobre disco,» 2018. [En línea]. Available: <https://core.ac.uk/reader/71399690>.
- [5] D. Grau, «RiuNet REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE UPV,» 14 Enero 2019. [En línea]. Available: <http://hdl.handle.net/10251/115391>. [Último acceso: Febrero 2021].
- [6] S. Barral, «PROTOTIPO DE TRIBÓMETRO ANILLO SOBRE BLOQUE PARA OBTENCIÓN DE CURVAS DE FRICCIÓN,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/3079/Tesis.pdf?sequence=1>.
- [7] ASTM International, «“ASTM G99-17, Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus,» 2017. [En línea]. Available: doi: 10.1520/G0099-17.
- [8] A. S. G02.40, «Método de prueba estándar para pruebas de desgaste con un aparato de clavija sobre disco,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.astm.org/Standards/G99>.
- [9] Anton Paar GmbH, «Anton Paar,» 2021. [En línea]. Available: https://www.anton-paar.com/mx-es/productos/grupo/tribometro/?ref=adwords&utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=M_X_BC.MSC_ES&utm_content=C-00040346&gclid=Cj0KCQjwp86EBhD7ARIsAFkgakhytyyWfW0635jiNW0qdv7uYfcFwBHRHabVJSIJdG0QTRVeXTi9nQaAhbYEALw_wcB. [Último acceso: Marzo 2021].
- [1] Microtest, «Microtest,» 2021. [En línea]. Available: http://www.microtest-sa.com/es_ES/productos/equipos-0/de-ensayo/tribometros-indentadores/. [Último acceso: Marzo 2021].
- [1] Anton Paar GmbH, «Tribómetro tipo pin-on-disk (perno en disco): TRB,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.anton-paar.com/mx-es/productos/detalles/trb3-tribometro-pin-on-disk/>. [Último acceso: 15 octubre 2021].
- [1] Z. E. Marulanda, «Scientia et Technica,» Mayo 2009. [En línea]. Available: <https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/2875>. [Último acceso: Febrero 2021].
- [1] P. Granizo, «Dialnet,» Marzo 2010. [En línea]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5210282>. [Último acceso: Febrero 2021].
- [1] D. T. GRAU, «DISEÑO Y DESARROLLO DE UN,» Septiembre 2018. [En línea]. Available: <http://hdl.handle.net/10251/115391>. [Último acceso: Junio 2021].
- [1] D. C. Presin, «Experimental data on the properties of natural fiber particle reinforced polymer composite material,» *materialtoday PROCEEDINGS*, 2017.
- [1] S. C. D. Systèmes, «“SolidWorks” Alemania,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.solidworks.com/>. [Último acceso: Junio 2021].
- [1] L. P. A. M. Martynenko, «DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MAQUINA PIN-ON-DISK PARA LA DETERMINACIÓN DE COEFICIENTES DE FRICCIÓN Y EJEMPLO DE APLICACIÓN,» s.f. [En línea].

Bibliografía.

Available: https://www.researchgate.net/profile/Daniel-Krahmer/publication/280085064_Disenoy_construccion_de_una_maquina_pin-on_disk_para_la_determinacion_de_coeficientes_de_friccion_y_un_ejemplo_de_aplicacion/links/55a7777c08ae0b4e87121f77/Diseno-y-construccion-de.

[1 [En línea].
8]

[1 L. M. G. E. A. T. Juan Sebastián Rudas F, «Modelamiento del proceso de desgaste de un tribómetro pin-9] disco: Flash temperature y mecanismos de disipación,» 2013. [En línea]. Available: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-17982013000200007 .

ANEXO 1. Planos Estructurales

