

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E INTEGRACIÓN DE UN SISTEMA DE GIRO
OSCILANTE PARA ENSAYOS DE MICRO ABRASIÓN**

DIEGO FELIPE PRIETO MORALES

**JOSE LUIS CABALLERO GÓMEZ
DIRECTOR**



**UNIVERSIDAD MILITAR
NUEVA GRANADA**

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
BOGOTÁ D.C. OCTUBRE DE 2019**

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E INTEGRACIÓN DE UN SISTEMA DE GIRO
OSCILANTE PARA ENSAYOS DE MICRO ABRASIÓN**

DIEGO FELIPE PRIETO MORALES

**JOSE LUIS CABALLERO GÓMEZ
DIRECTOR**



**UNIVERSIDAD MILITAR
NUEVA GRANADA**

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
BOGOTÁ D.C. OCTUBRE DE 2019**

Nota aceptación

Firma de tutor

Firma de jurado 1

Firma de jurado 2

BOGOTÁ D. C. OCTUBRE de 2019

DEDICATORIA

A mis padres Ibray y Alicia, por su sacrificio, su amor y su apoyo incondicional en todo el proceso que me ha llevado a ser la persona que soy actualmente y que ha permitido que realice este proyecto. También lo dedico a mi hermana y a mi abuela que me han apoyado y me han enseñado que siempre se puede ser mejor y hacer las cosas mejor. Finalmente dedico este proyecto a mi familia y amigos que diferentes formas me han apoyado en este proceso.

AGRADECIMIENTOS

Son bastantes las personas que han contribuido al desarrollo de este proyecto de diferentes formas, quiero agradecer de manera especial a mi tutor José Luis Caballero Gómez, ya que él ha sabido guiarme en esta investigación poniéndome retos y siempre buscando que yo tome decisiones de forma reflexiva, aplicando los conocimientos que he adquirido a lo largo de mi carrera universitaria. De igual forma agradezco a todo el equipo de investigación de Volta liderados por el profesor Willian Aperador, que me brindaron su acompañamiento en diferentes fases del proyecto y al ingeniero Juan Hilario Martínez Pinilla por su acompañamiento y su instrucción para el desarrollo de diferentes fases del proyecto.

Finalmente agradezco a los docentes del programa de ingeniería mecatrónica y a la Universidad Militar Nueva Granada por prepararme como persona y como profesional para el mundo laboral.

CONTENIDO

1. PROBLEMA	14
1.1 IDENTIFICACIÓN.....	17
1.2 DESCRIPCIÓN.....	20
1.3 PLANTEAMIENTO	21
2. DELIMITACIÓN	22
2.1 CONCEPTUAL	22
2.2 GEOGRÁFICA.....	23
2.3 CRONOLÓGICA.....	23
3. OBJETIVOS	24
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	24
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	24
4. ANTECEDENTES	25
5. JUSTIFICACIÓN	30
6. MARCO REFERENCIAL	31
6.1 MARCO TEÓRICO	31
7. METODOLOGÍA	37
8. CAPÍTULOS	38
8.1 PLAN DE MEJORA.....	38
8.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	40
8.3 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN	42
8.3.1 SUJECIÓN DE LA PROBETA	42
8.3.2 SISTEMA DE SUJECIÓN DEL BRAZO CONECTOR DE LA MUESTRA	43
8.3.3 SUJECIÓN DE LA ESFERA PARA EL ENSAYO	44
8.3.4 MOTOR, EJE IMPULSOR Y BUJE (SISTEMA NUEVO).....	45
8.4 GENERACIÓN DE SOLUCIONES Y TOMA DE DECISIONES	46
8.4.1 SUJECIÓN DE LA PROBETA	46
8.4.2 SISTEMA DE SUJECIÓN DEL BRAZO CONECTOR DE LA MUESTRA	48
8.4.3 SUJECIÓN DE LA ESFERA PARA EL ENSAYO	49
8.4.4 MOTOR, EJE IMPULSOR Y BUJE (SISTEMA NUEVO).....	51
8.4.5 CAJA DE PRUEBAS.....	52
8.5 SISTEMA COMPLETO	56
8.6 PROGRAMACIÓN DEL MOTOR.....	58
8.6 INTERFAZ GRÁFICA.....	66
8.7 ENSAYOS DE DESGASTE.....	75
8.7.1 ENSAYOS SENTIDO UNICO DE GIRO EN SECO Y CON GIRO RECIPROCICANTE EN SECO	76
8.7.2 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	78

9 CONCLUSIONES85
10 TRABAJOS A FUTURO86
REFERENCIAS87

Lista de ilustraciones

FIGURA 1. DIAGRAMA DEL REEMPLAZO DE CADERA.[8]	13
FIGURA 2. ESQUEMA GENERAL ENSAYOS DE MICRO ABRASIÓN. FUENTE PROPIA	15
FIGURA 3. EQUIPO PARA ENSAYOS DE MICRO ABRASIÓN DESARROLLADO POR EL GRUPO DE INVESTIGACIÓN VOLTA, DE LA UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA.[13].....	16
FIGURA 4. ESQUEMA DE GENERACIÓN DEL DIAGRAMA QFD. [14]	16
FIGURA 5. ESQUEMA DEL SISTEMA GENERAL PARA ENSAYOS DE MIRO ABRASIÓN.[18]	21
FIGURA 6. CRONOGRAMA DE REALIZACIÓN DEL PROYECTO. FUENTE PROPIA	24
FIGURA 7. FASES CRONOLÓGICAS DEL PROYECTO. FUENTE PROPIA	24
FIGURA 8. POSICIONES ALTERNATIVAS PARA LA FLEXIÓN DE LA CADERA A LO LARGO DEL PLANO SAGITAL.[29]	25
FIGURA 9. ESQUEMA DE LA MÁQUINA DE ENSAYOS DE ABRASIÓN SEGÚN NORMA ASTM G65. [32]	26
FIGURA 10. APARATO DE PRUEBA DE MICRO ABRASIÓN-CORROSIÓN.[34]	27
FIGURA 11. EXPLORACIONES SEM QUE MUESTRAN CICATRICES DE DESGASTE CON UNA CARGA APLICADA DE 5 N. DIÁMETRO DEL CRÁTER.[34].....	27
FIGURA 12. EXPLORACIONES SEM QUE MUESTRAN CICATRICES DE DESGASTE CON UNA CARGA APLICADA DE 5 N. SURCOS PARALELOS CON PARTÍCULAS INCRUSTADAS EN LA SUPERFICIE DEL CRÁTER. LAS ESCALAS DE IMAGEN SE INDICAN EN MICROGRAFÍAS.[34]	28
FIGURA 13. ESQUEMA DE PIN EN EL SISTEMA DE DISCO: 1 - REGULADOR DE VELOCIDAD, 2 - SOPORTE, 3 - BANDEJA GIRATORIA, 4 - CARGA APLICADA, 5 - MUESTRA, 6 - MARCO DE RETENCIÓN.[35]	29
FIGURA 14. MICROGRAFÍAS SEM DE MARCAS DE DESGASTE ALTERNATIVAS EN LA MUESTRA Ti6Al-4V DESPUÉS DE LA PRUEBA DE FRICCIÓN A 15 MMSEG, (A) 3 N, (B) 6 N (C) 10 N Y 25 MMSEG, (D) 3 N, (E) 6 N, (F) 10 N (DEFORMACIÓN SEVERA Y FLUJO DE PLÁSTICO). LAS FLECHAS INDICAN EL DESLIZAMIENTO-DIRECCIÓN.[35]	29
FIGURA 15. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO ENSAYO CON “BOLA LIBRE”[45]	33
FIGURA 16. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO ENSAYO CON “BOLA FIJA”[45]	33
FIGURA 17. MEDICIÓN DEL DIÁMETRO DE LA HUELLA PARA ENSAYO SIN PERFORACIÓN.[13]	34
FIGURA 18. MEDICIÓN DE LOS DIÁMETROS DE LA HUELLA PARA ENSAYO CON PERFORACIÓN.[13]	35
FIGURA 19. ESTRUCTURA DE DESGLOSE DE TRABAJO, PARTE 1. FUENTE PROPIA	37
FIGURA 20. ESTRUCTURA DE DESGLOSE DE TRABAJO, PARTE 2. FUENTE PROPIA	38
FIGURA 21. HOJA RUTA PARA EL DISEÑO EN INGENIERÍA.[50]	39
FIGURA 22. MODULO BÁSICO DEL PROCESO DE DISEÑO.[50].....	40
FIGURA 23. DIAGRAMA QFD DEL SISTEMA PARA ENSAYOS DE MICRO ABRASIÓN.[13]	41
FIGURA 24. SISTEMA PARA ENSAYOS DE MICRO ABRASIÓN ACTUAL. 1) CAJA DE PRUEBAS, 2) SUJECIÓN DE LA PROBETA, 3) SUJECIÓN DEL BRAZO, 4) SUJECIÓN DE LA ESFERA, 5) SISTEMA MOTOR. [13]	42
FIGURA 25. SISTEMA DE SUJECIÓN ACTUAL.[13]	43
FIGURA 26. BRAZO CONECTOR, SISTEMA DE PALANCA. [13].....	44
FIGURA 27. SISTEMA ROTACIONAL.[13]	44
FIGURA 28. SISTEMA LINEAL PARA EL MOVIMIENTO DEL EJE DE APOYO.[13].....	45
FIGURA 29. MOTOR DC CON ENCONDER MAGNÉTICO SISTEMA ACTUAL. FUENTE PROPIA	46
FIGURA 30. RENDERIZADO SISTEMA DE SUJECIÓN REDISEÑADO. FUENTE PROPIA	47
FIGURA 31. RENDERIZADO SISTEMA DE SUJECIÓN REDISEÑADO (ANOTACIONES). FUENTE PROPIA	47
FIGURA 32. EXPLOSIONADO SISTEMA DE APOYO DEL BRAZO CONECTOR DE LA MUESTRA. FUENTE PROPIA.....	48
FIGURA 33. SISTEMA DE APOYO DEL BRAZO CONECTOR DE LA MUESTRA. FUENTE PROPIA	49
FIGURA 34. RENDERIZADO SISTEMA EMBOLO. FUENTE PROPIA	50
FIGURA 35. EXPLOSIONADO SISTEMA EJE MOTOR. FUENTE PROPIA	52
FIGURA 36. RENDERIZADO DE LA CAJA DE PRUEBAS. FUENTE PROPIA	53
FIGURA 37. EXPLOSIONADA CAJA DE PRUEBAS. FUENTE PROPIA	54
FIGURA 38. CREACIÓN DE CROQUIS PARA ANÁLISIS DE MOVIMIENTO DE LA ESFERA. FUENTE PROPIA	54
FIGURA 39. PARÁMETROS PARA MOTOR CON GIRO OSCILANTE, SOLIDWORKS. FUENTE PROPIA	55
FIGURA 40. VELOCIDAD ANGULAR DEL MOTOR, DURANTE EL ENSAYO RECIPROCANTE. FUENTE PROPIA.	55

FIGURA 41. RENDERIZADO SISTEMA ENSAYOS DE MICRO ABRASIÓN. FUENTE PROPIA.....	56
FIGURA 42. RENDERIZADO DEL MODELO EXPLOSIONADO DEL SISTEMA PARA ENSAYOS DE MICRO ABRASIÓN. FUENTE PROPIA.....	57
FIGURA 43. FASES DE UN MOTOR BIPOLAR. [51]	58
FIGURA 44. RELACIÓN DE PASOS DEL MOTOR NEMA 17. [51]	59
FIGURA 45. MODULO POLOLU A4988 [51]	59
FIGURA 46. CONEXIONES MOTOR PASO A PASO NEMA 17, DRIVER A4988 Y ARDUINO NANO. FUENTE PROPIA.....	61
FIGURA 47. DIAGRAMA DE CONEXIONES ARDUINO, KEYPAD SHIELD, MOTOR PASO A PASO Y MODULO A4988.....	63
FIGURA 48. INTERFAZ GRÁFICA PARA LA APLICACIÓN DE ENSAYOS DE MICRO ABRASIÓN. FUENTE PROPIA.....	67
FIGURA 49. PROGRAMACIÓN POR BLOQUES DE LA INTERFAZ GRÁFICA DESARROLLADA APP INVENTOR 2. FUENTE PROPIA.....	68
FIGURA 50. CARGA ACTUANTE EN EL HUESO ESFÉRICO.[7]	77
FIGURA 51. HUELLAS ENSAYOS DE DESGASTE EN SECO. (A) SENTIDO ÚNICO DE GIRO A 60 RPM. (B) GIRO RECIPROCANTE A 120 RPM Y 90°. (C) GIRO RECIPROCANTE A 120 RPM Y 76°. (D) GIRO RECIPROCANTE A 120RPM Y 113°. FUENTE PROPIA	79
FIGURA 52. GRÁFICA DEL COEFICIENTE DE DESGASTE K (VELOCIDADES Vs ÁNGULOS). FUENTE PROPIA.....	80
FIGURA 53. GRÁFICA DISTANCIA DE DESLIZAMIENTO S (ÁNGULOS Vs VELOCIDADES). FUENTE PROPIA.	81
FIGURA 54. HUELLAS ENSAYOS DE DESGASTE EN SECO. (A) GIRO RECIPROCANTE A 120 RPM Y 141°. (B) GIRO RECIPROCANTE A 60 RPM Y 45°. FUENTE PROPIA.....	84
FIGURA 55. HUELLA ENSAYO DE DESGASTE EN SECO CON GIRO RECIPROCANTE A 120RPM Y A 90°. FUENTE PROPIA.....	84

Lista de tablas

TABLA 1. EJEMPLOS DE APLICACIÓN DE DESEMPEÑO FÍSICO Y MECÁNICO DE LOS BIOMATERIALES.[17].....	18
TABLA 2. MATERIAL FRECUENTEMENTE EMPLEADO PARA CADA APLICACIÓN ESPECIFICA.[19]	19
TABLA 3. FUNCIÓN DE CADA UNO DE LOS BOTONES Y TEXTBOX DE LA INTERFAZ DESARROLLADA. FUENTE PROPIA.....	69
TABLA 4. ESPECIFICACIONES ENSAYO DE MICRO ABRASIÓN ´ PARA SENTIDO ÚNICO DE GIRO. FUENTE PROPIA	77
TABLA 5. ESPECIFICACIONES ENSAYO DE MICRO ABRASIÓN PARA DIFERENTES ÁNGULOS DE GIRO. FUENTE PROPIA	78
TABLA 6. COEFICIENTES DE DESGASTE DE LOS ENSAYOS REALIZADOS A PARTIR DE LA VELOCIDAD, EL SENTIDO DE GIRO Y EL ÁNGULO DE RECORRIDO. FUENTE PROPIA.....	80
TABLA 7. DISTANCIA DE DESLIZAMIENTO EN FUNCIÓN DE LOS ÁNGULOS DE RECORRIDO Y LA VELOCIDAD DEL MOTOR. FUENTE PROPIA	81
TABLA 8. MODOS DESLIZANTES PARA ENSAYOS DE MICRO ABRASIÓN. FUENTE PROPIA.	83

INTRODUCCIÓN

Desde la antigüedad el ser humano se ha caracterizado por buscar un constante mejoramiento de su calidad de vida, campo donde actualmente tiene grandes avances gracias al crecimiento progresivo de investigaciones relacionadas con este tema, donde las ciencias de la salud y los desarrollos tecnológicos han posibilitado prolongar notablemente la vida de una persona, aumentando así su expectativa de vida. Situación donde un paciente, debe convivir con la enfermedad y sobrellevar los dolores que presenta a causa de esta. La calidad de vida juega un papel vital, ya que es un modo de referirse a la percepción que tiene un paciente de los efectos de una enfermedad determinada o de la aplicación de algún tratamiento en diversos ámbitos de su vida, en especial de si estos mejoran o empeoran su bienestar físico, emocional o social. [1]

Cabe resaltar la importancia de la calidad de vida en toda la población mundial, ya que dependiendo de la zona donde nos encontremos podremos denotar que hay lugares donde existe mayor calidad de vida para ciertos habitantes mejores que las de otras partes del mundo. La calidad de vida de una persona incide directamente en su expectativa de vida, lo que permite ver que tan alto es su umbral de vida. En Colombia se puede ver un notable aumento en la expectativa de vida de la población, ya que paso de estar en el año 1960 en 56 años a estar en el año 2016 en 76 años. [2]

Uno de los principales retos cuando la expectativa de vida aumenta en determinadas poblaciones, es mantener su calidad de vida, ya que empiezan a aparecer factores médicos que se deben tratar y que en lo posible no deben generar nuevas molestias. Uno de los campos con mayor evolución en este tema es el uso de los biomateriales y que junto al aumento de la expectativa de vida ha cobrado una mayor relevancia a nivel mundial.

El fondo de población de las naciones unidas (UNFOA) presenta un informe donde se detalla que para el año 2050 una de cada cinco personas será mayor de 60 años, lo que significa que para ese entonces habrá más personas mayores de 60 años, que menores de 15 años. Adicionalmente se prevé que el número de habitantes que tienen alrededor de 80 años se multiplicará por cinco. La longevidad masiva tiene implicaciones individuales relacionadas con mantener la calidad de vida, ya que se tienen nuevos desafíos sociales y económicos, que de no ser resueltos no permitirán que las personas gocen de condiciones óptimas para vivir. [3]

Estos factores sociológicos han impulsado un gran avance en los biomateriales, y han potenciado la investigación en este campo. Asimismo, los avances tecnológicos y médicos están permitiendo la mejora de técnicas quirúrgicas, lo que deriva en hacer un mayor uso de prótesis, implantes, sistemas y aparatos médicos que usualmente deben estar en contacto con tejidos corporales.[3] [4]

Los biomateriales deben tener ciertas características para poder utilizarse en pacientes que así lo requieran, siendo uno de los más críticos, la compatibilidad del biomaterial con el paciente y asegurar una vida media, factor que actualmente se quiere aumentar, ya que se si el biomaterial tiene una mayor vida útil, posiblemente no sean necesarias cirugías para reemplazo del biomaterial, sino que pueda estar ayudando al paciente durante toda la vida de este. [5]

Es importante considerar la relación riesgo/beneficio que existe a la hora de la utilización de biomateriales, ya que la premisa que se debe cumplir es que los biomateriales deben contribuir al mejoramiento de las dolencias de un paciente y en sí mismo a mejorar la calidad de vida de éste, sin generar un riesgo mayor a su estado.[6]

Para que un biomaterial pueda usarse en paciente debe tener ciertas características que le permitan ser compatible con el cuerpo humano en general y que adicionalmente soporten el ambiente al que están expuestos por largos periodos de tiempo. En las prótesis de cadera que actualmente están dando resultados muy positivos en los pacientes que se deben someter a este procedimiento, aunque se resalta que con el transcurrir de tiempos relativamente altos, empieza a existir un aflojamiento de los componentes que hacen parte de la prótesis, debido al desgaste de estos, aun cuando su vida útil aún no ha terminado.[7]

Debido a lo anterior actualmente se realizan diversos ensayos enfocados a encontrar nuevos biomateriales capaces de soportar de manera más eficiente el desgaste producido por los fluidos internos del cuerpo y por el mismo rozamiento de estos. Uno de los materiales usados más frecuentemente es el acero inoxidable 316 L, usado en prótesis de cadera, específicamente en la cabeza femoral y el polietileno de ultra elevado peso molecular (UHMWPE, por sus siglas en inglés) para la copa acetabular (Figura 1).[8]

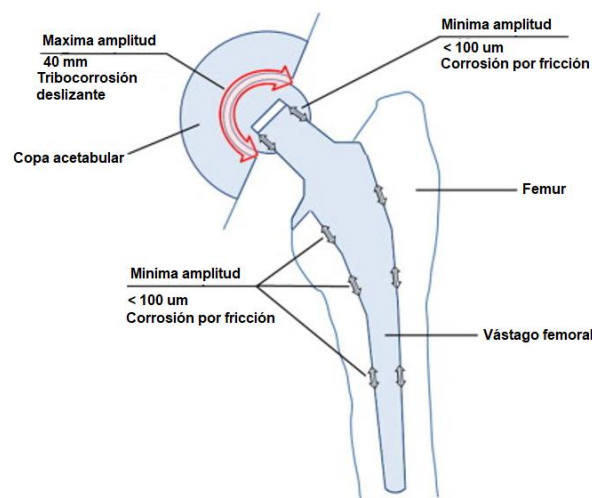


Figura 1. Diagrama del reemplazo de cadera.[8]

Debido a la complejidad de la operación para el reemplazo de cadera, lo ideal es que este solo se realice una sola vez en los pacientes que lo requieran, razón por la cual el estudio de los biomateriales es de vital importancia a la hora de encontrar nuevos biomateriales que permitan aumentar la vida útil de las prótesis en general.

1. PROBLEMA

Actualmente se evidencian múltiples factores que antes solo afectaban mayormente a la población de la tercera edad, pero que con el pasar de los años, han empezado a aquejar a la población más joven. Hoy en día es común hablar de que una persona menor de 50 años sufre de artritis, en todas sus combinaciones, atacando cartílago, generando dolor y rigidez y concentrándose en zonas del cuerpo como las manos, piernas, cadera, rodillas, entre otras. [9]

De igual modo, así como las enfermedades y dolencias evolucionan, el hombre y su capacidad de reinventarse también, es por eso por lo que día a día se encuentran nuevas formas de combatir las enfermedades y de mejorar la calidad de vida de las personas, siendo una de estas el desarrollo de biomateriales, los cuales parecen ganar cada vez más terreno en el área biomédica, pero que aún necesitan ciertas mejoras para mejorar su eficacia, ya que muchos de los biomateriales usados en el cuerpo, tienen una vida útil relativamente baja, en comparación al tiempo que puede llegar a vivir una persona.

Es por lo cual que existen diversos métodos para mejorar las propiedades de los diferentes biomateriales que se pueden utilizar en el cuerpo humano. Un claro ejemplo es la utilización de recubrimientos para disminuir el desgaste de los implantes y evitar la reacción adversa con los tejidos, usados en investigaciones relacionadas a implantes de rodilla o cadera.[10] [11]

Una de las formas de caracterizar nuevos biomateriales, derivados de diferentes procesos para mejorar sus propiedades, es por medio de diferentes tipos de ensayos, siendo uno de los más importantes los ensayos de desgaste, donde se observa el comportamiento de una determinada muestra cuando se pone en contacto con otra, simulando por ejemplo la fricción o rozamiento entre dos partes de una misma prótesis de rodilla, buscando encontrar los puntos donde la muestra presente un menor desgaste, entre otras características.[12]

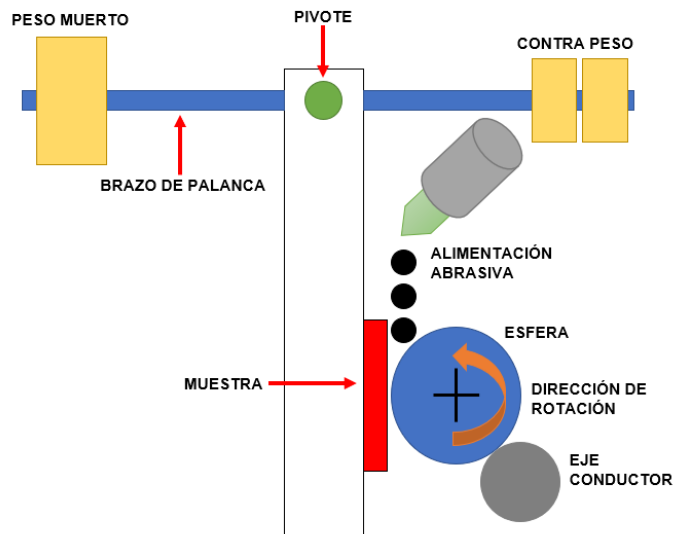


Figura 2. Esquema general ensayos de micro abrasión. Fuente propia

De la figura 2 se tiene que en general para un ensayo de micro abrasión se tiene una base donde hay un brazo de palanca, que tiene contrapesos, que dependiendo de la distancia que tengan con el centro, aplicaran una determinada carga a la muestra que se tenga. Adicionalmente, hay una esfera, que gira en contra de la muestra, un número de ciclos y a unas velocidades determinadas, produciendo abrasión en la misma. La esfera gira gracias a un eje conductor que esta acoplado a un motor.

En la Universidad Militar Nueva Granada, el grupo de investigación Volta desarrollo un equipo para realizar ensayos de micro abrasión (Figura 3). Sin embargo, el sistema actual posee un motor DC y al momento de desarrollar una prueba solo se tiene un sentido de giro durante todo el ensayo.

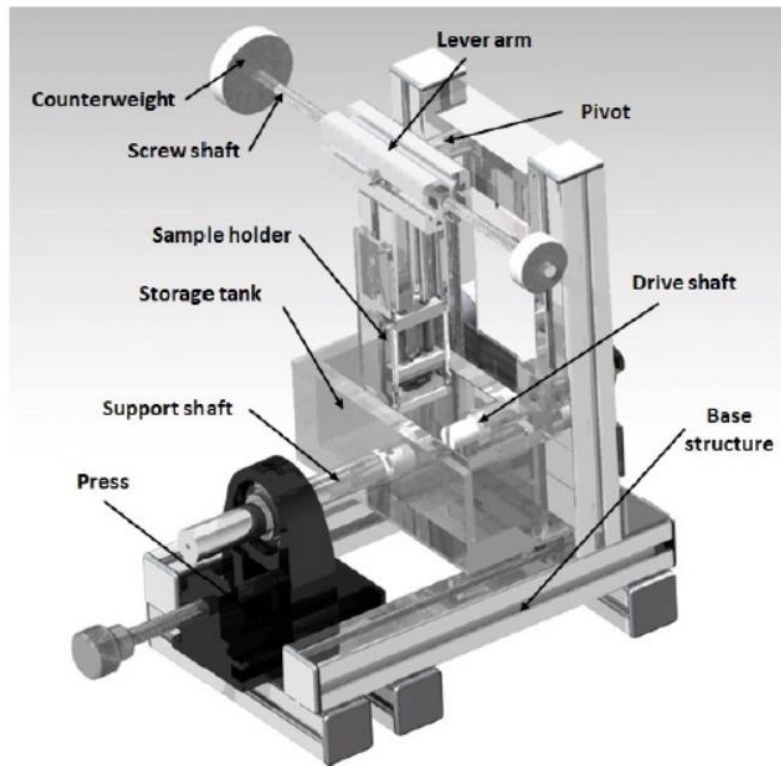


Figura 3. Equipo para ensayos de micro abrasión desarrollado por el grupo de investigación Volta, de la Universidad Militar Nueva Granada.[13]

Cuando se diseñó e implementó el equipo para ensayos de micro abrasión, se utilizó el desarrollo de la casa de la calidad (QFD), que relaciona los requerimientos de las partes interesadas con diferentes características de ingeniería, lo que permite establecer de forma cuantitativa y cualitativa el rumbo de la solución del problema de diseño, presentando especial atención a detalles críticos del proyecto. (Ver figura 4) A continuación, se muestra el esquema para la generación del diagrama QFD.[14]

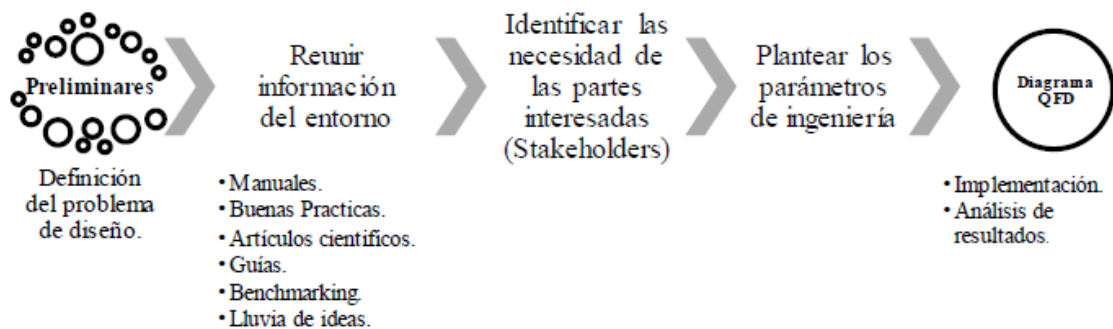


Figura 4. Esquema de generación del diagrama QFD. [14]

A partir del diagrama QFD, se obtuvieron análisis de cada una de las zonas que componen la matriz de la casa de la calidad, lo que permitió obtener una descomposición funcional del sistema, aterrizar conceptos de diseño, realizar un análisis morfológico de la máquina, entre otros análisis de interés, lo que permitió la realización del sistema.

Actualmente los ensayos de micro abrasión se enfocan en simular los movimientos de diferentes articulaciones del cuerpo humano para que sean lo más reales posibles. Estos en su gran mayoría son repetitivos y cíclicos, razón por la cual, al momento de realizar una prueba que permita caracterizar la resistencia de desgaste abrasivo de un biomaterial para su uso en articulaciones, el mejor escenario es uno donde el sistema posea un control sobre su sentido de giro, los grados de libertad permitidos y los ciclos totales del ensayo.

Ante estas circunstancias, en el proyecto se pretende desarrollar un plan de mejoramiento del equipo actual, usando diferentes metodologías de diseño con el propósito de realizar ensayos de micro abrasión donde se tenga un control sobre la velocidad giro y el ángulo de recorrido con movimientos oscilatorios, que permiten aproximar los efectos que tendrá un material que es sometido a un reemplazo articular. El material que se utiliza en los ensayos es acero inoxidable 316L, el cual contiene diferentes metales que aumentan su resistencia a la corrosión, mejora su resistencia a picaduras de soluciones de iones de cloruro y proporciona mayor resistencia a temperaturas elevadas.[15]

1.1 IDENTIFICACIÓN

Los biomateriales pueden ser de diferentes tipos dependiendo de la aplicación donde se usen, ya que esto varía cuando se trata del sistema óseo, el sistema cardiovascular, los órganos o los sentidos.[16] Por lo anterior se puede decir que cada biomaterial tiene un requerimiento de desempeño mecánico de acuerdo con la necesidad que ayuda a solucionar en el ámbito fisiológico, estos requerimientos se pueden dividir principalmente en tres categorías. En la tabla 1, se muestran algunos ejemplos.

- ✓ Desempeño mecánico
- ✓ Durabilidad mecánica
- ✓ Propiedades físicas

Categoría	Aplicación
Desempeño mecánico	Prótesis de cadera: Fuerte y rígida Material de tendón: Fuerte y flexible

	Membrana de diálisis: Fuerte y flexible, por ejemplo, un tipo de material elastomérico
Durabilidad mecánica	<p>Un catéter: Debe proporcionar su desempeño mecánico en un lapso de tres días</p> <p>Una placa ósea: Puede cumplir su función en un periodo de seis meses o más</p> <p>Una valva en una válvula cardiaca: Debe flexionarse durante 60 veces por minuto sin que se rompa durante toda la vida del paciente</p>
Propiedades físicas	<p>Membranas de diálisis: Deben tener una permeabilidad específica</p> <p>La copa acetabular de la articulación de cadera: Debe permitir alta lubricación</p> <p>Lentes intraoculares: Deben cumplir con requerimientos de transparencia y refracción.</p>

Tabla 1. Ejemplos de aplicación de desempeño físico y mecánico de los biomateriales.[17]

Actualmente existe una gran cantidad de biomateriales, cada uno de los cuales se deben usar en determinadas situaciones, típicamente los biomateriales se clasifican en diferentes grupos según su composición y propiedades, los más comunes son los metales, los cerámicos, los polímeros y los materiales compuestos, cada uno de los cuales se utiliza según sea requerido por un determinado paciente. [18]

En la tabla 2, se muestran los materiales más frecuentemente utilizados dependiendo de aplicaciones específicas.

Aplicación	Material frecuentemente utilizado
Sistema óseo	
Reemplazo de articulaciones y placas para fijación de fracturas	Aleaciones de titanio, acero inoxidable, polietileno
Cemento para huesos	Acero inoxidable, aleación cobalto-cromo
Reparación de defectos óseos	Polimetilmetacrilato
Ligamentos y tendones artificiales	Hidroxiapatita
Implantes dentales	Teflón, Dacrón

	Titanio, alúmina, fosfato de calcio
Sistema cardiovascular	
Prótesis vasculares Válvulas de corazón	Dacrón, Teflón, poliuretano Tejido reprocesado, acero inoxidable, Dacrón.
Catéter	Goma de silicona, Teflón, poliuretano
Órganos	
Corazón artificial Placas para reparación de la piel	Poliuretano Materiales compuestos de silicona- colágeno
Riñón artificial (hemodiálisis) Respiradores artificiales	Celulosa, poliacrilonitrilo Goma de silicona
Sentidos	
Lentes intraoculares	Polimetilmetacrilato, goma de siliconas
Lentes de contacto	Silicona-acrilato, hidrogeles

Tabla 2. Material frecuentemente empleado para cada aplicación específica.[19]

El papel de los biomateriales en la ingeniería de tejidos es en muchos casos proveer una matriz extracelular (MEC), sobre la cual las células logren tener un soporte para su adhesión, proliferación, diferenciación y posteriormente el crecimiento de nuevo tejido. Para que un biomaterial pueda llegar a cumplir la función de una MEC, debe cumplir con requerimientos químicos, físicos y biológicos, que le permitan emular el funcionamiento de una matriz original de tejido. [20]

Adicionalmente a los requerimientos anteriores, cuando se desea utilizar biomateriales para la ingeniería de tejidos existen otros requerimientos especiales para emular el comportamiento de una MEC original, los cuales son.

- ✓ Biodegradación
- ✓ Propiedades mecánicas
- ✓ Porosidad
- ✓ Morfología de MEC
- ✓ Bioactividad
- ✓ Funcionalidad superficial

Comúnmente el sistema óseo es el que más demanda tiene, donde los reemplazos de articulaciones tienen gran acogida, estos se realizan con aleaciones de titanio o acero inoxidable. Cabe resaltar que actualmente los ensayos e investigaciones que

se realizan se están enfocando en aumentar la durabilidad de estos implantes, por medio de diferentes procesos como lo son modificaciones topográficas, modificaciones de propiedades bio-químicas o por medio de modificaciones de propiedades micromecánicas.[21] La efectividad de los desarrollos se observa principalmente por medio de la aplicación de ensayos de micro abrasión.[19] [22]

1.2 DESCRIPCIÓN

Uno de los grandes desafíos que tiene el uso de biomateriales e implantes de dispositivos médicos es su propensión a la falla por fatiga o por desgaste, ya que los sistemas vivos son en sí muy complejos y se debe tener en cuenta que el biomaterial está expuesto a la corrosión por desgaste, al agrietamiento, y a la fatiga, razón por la cual, cada vez se desarrollan nuevos biomateriales capaces de soportar un mayor tiempo en el huésped.[23]

Un claro ejemplo de cómo el incremento de la adaptabilidad de los biomateriales está ayudando a las personas, son las cirugías de reemplazo articular en jóvenes, ya que estas no serán tan tediosas y riesgosas como actualmente lo son, en vista de que se disminuye el riesgo de que el paciente este expuesto a ir a múltiples revisiones durante el resto de su vida, incluyendo operaciones para cambiar su bio articulación cuando su vida útil termine. Con la tecnología actual, las prótesis de reemplazo, cuya selección se ajusta a las demandas funcionales, asociadas a la edad del paciente, constituyen una alternativa para pacientes jóvenes y activos.[24]

Cuando se desean realizar nuevos adelantos relacionados con los tipos de biomateriales que se usan en diversos pacientes, se deben hacer múltiples pruebas a los materiales utilizados, para encontrar propiedades intrínsecas de cada uno de ellos, siendo una de las estudiadas el coeficiente de desgaste, que nos permitirá saber la relación desgaste-fricción del biomaterial.

Una de las pruebas realizadas para determinar el coeficiente de desgaste son los ensayos de micro abrasión, los cuales en sus inicios se utilizaban para medir el espesor de recubrimientos de diversos materiales. Actualmente se utiliza en mediciones de resistencia al desgaste abrasivo de recubrimientos finos y capas superficiales. Durante el procedimiento se generan muy pequeñas profundidades de desgaste y volúmenes generados en la muestra de desgaste, producidos por una bola giratoria cubierta con partículas abrasivas. [25] [26] [12]

A continuación, se muestra el esquema general del ensayo de micro abrasión.

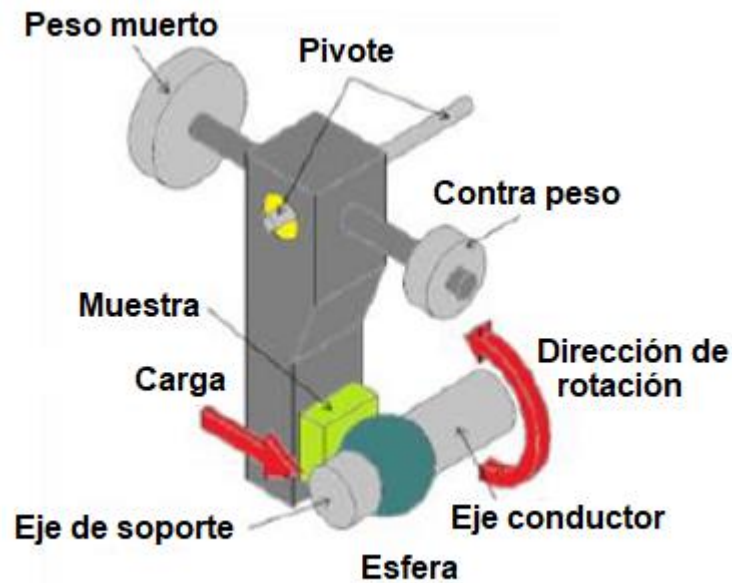


Figura 5. Esquema del sistema general para ensayos de micro abrasión.[18]

De la figura anterior se observa uno de los montajes más comunes usados para realizar ensayos de micro abrasión, que permiten caracterizar la resistencia al desgaste abrasivo de diferentes recubrimientos de manera rápida y simple, donde una esfera gira una cantidad de ciclos, sobre una probeta o superficie a evaluar, con una carga determinada, bajo la influencia de un flujo de partículas en suspensión. El contacto entre la esfera y la probeta, crean fuerzas de fricción, lo que posteriormente genera una huella de desgaste en forma de cascarrón. [26] [27] [28]

1.3 PLANTEAMIENTO

Durante el desarrollo del trabajo de grado, inicialmente se determinan los posibles puntos de mejora del sistema para la realización de ensayos de micro abrasión. Una vez definidos los puntos clave de mejora, se empezará a diseñar y construir las piezas o elementos propios del sistema que se deberán modificar o cambiar, adicionalmente se tiene que se realizara el cambio del motor del sistema, para poder controlar el sentido de giro en los ensayos futuros, además de tener una mayor precisión. Una vez modificado el sistema, se procederá a realizar las validaciones necesarias para verificar el correcto funcionamiento del sistema.

Cuando el sistema se encuentre a punto, se iniciarán los ensayos propuestos en un medio seco, variando la velocidad de la esfera que está en contacto con la muestra, el ángulo del giro y el sentido de giro de la muestra.

Finalmente se medirán las huellas dejadas por la esfera en cada uno de los ensayos por medio de un microscopio electrónico de barrido (SEM). A partir de las mediciones realizadas y por medio de la bibliografía consultada se calculará para cada ensayo su respectivo coeficiente de desgaste K_c el cual permitirá saber si el desgaste presentando en el ensayo es severo o leve.

2. DELIMITACIÓN

El desarrollo del proyecto se divide en diferentes fases de trabajo, que permitirán la consecución de este, las fases se implementarán en determinados tiempos, dependiendo de la tarea que se esté realizando.

A continuación, se muestran las fases del proyecto:

- ✓ Plan de mejora
- ✓ Mecanismos del sistema
- ✓ Sistemas nuevos
- ✓ Validaciones
- ✓ Pruebas y ajustes
- ✓ Informe tipo artículo
- ✓ Libro con desarrollo del trabajo de grado

2.1 CONCEPTUAL

Para el proyecto, la fase inicial se enfoca en el plan de mejora, que permitirá encontrar diferentes métodos que haciendo sinergia, conllevaran a obtener una metodología sólida, que permitirá la detección de posibles amenazas al proyecto y sus posibles soluciones, partiendo de la base del desarrollo de la casa de la calidad (QFD).

La fase de mecanismos del sistema tiene como finalidad realizar el diseño de los diferentes sistemas que son necesarios para la realización del proyecto, teniendo en cuenta, que algunos de estos serán adecuaciones a un sistema existente, mientras otros serán adicionados al mismo, para mejorar diferentes características del ensayo. De lo anterior se obtendrán los diferentes planos y modelos 3D de las piezas nuevas y las modificadas.

La fase de sistemas nuevos posibilitará la realización de ensayos donde las condiciones de este sean controladas con mayor rigurosidad, ya que permitirá que exista la inversión del giro de la esfera que está en contacto con la probeta, simulando el movimiento natural de articulaciones como la de la rodilla o la cadera, adicionalmente se esperan obtener las curvas de movimiento del motor utilizado, por medio de simulaciones (SolidWorks, modulo SolidMotion).

En la fase de validación se contrasta el plan de mejora, con el diseño del sistema, su construcción y su funcionamiento, apoyándose en la casa de la calidad del sistema, lo que permitirá detectar diferentes problemas, que podrían generar dificultades a la hora de realizar el ensayo y generar alternativas de solución a estos.

La fase de pruebas y ajustes permitirá observar las diferencias entre los resultados obtenidos en el ensayo cuando la esfera gira en un único sentido y cuando su sentido cambia cada cierto intervalo de tiempo y asimismo realizar ajustes al sistema.

Finalmente se tienen las fases de realización de un artículo susceptible a publicación y el libro con el desarrollo del trabajo de grado, que se harán a lo largo del proyecto y permitirán validar las diferentes fases del proyecto y los resultados más destacados.

2.2 GEOGRÁFICA

El proyecto se llevará a cabo dentro de la Universidad Militar Nueva Granada, sede Calle 100, en los laboratorios de materiales, térmicas y el taller de mecanizado.

2.3 CRONOLÓGICA

El desarrollo del proyecto se divide en siete fases (Ver figura 6,7), cada una con tiempos de ejecución definidos. A continuación, se muestra el cronograma de realización del proyecto, con respecto a las fases, también definidas a continuación y en una escala de tiempo definida en meses.

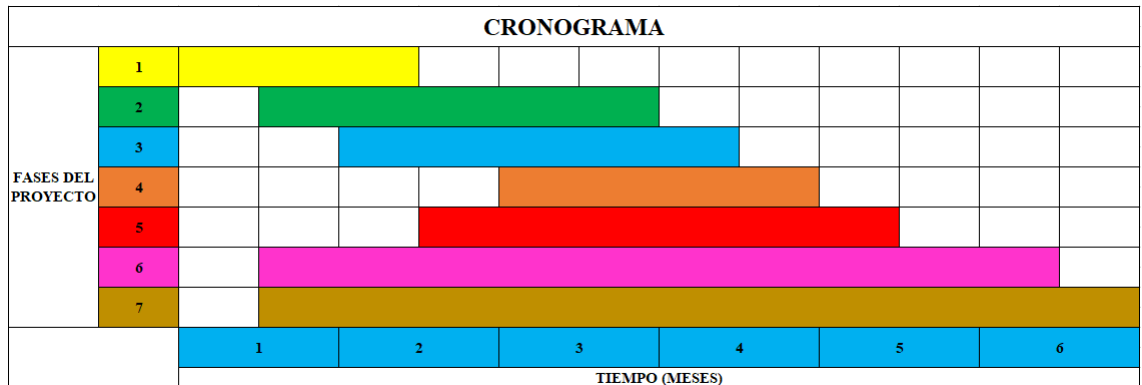


Figura 6. Cronograma de realización del proyecto. Fuente propia

1	PLAN DE MEJORA
	OBTENCIÓN DE LA METODOLOGIA
	PROPOSICIÓN PLAN DE MEJORA
	DIAGRAMA DE ACTIVIDADES
2	MECANISMOS DEL SISTEMA
	DISEÑO
	ADECUACIONES
	CONSTRUCCIÓN
3	SISTEMAS NUEVOS
	SISTEMA DE GIRO INVERTIBLE
4	VALIDACIONES
	DISEÑO DEL SISTEMA
	CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA
	FUNCIONAMIENTO
5	PRUEBAS Y AJUSTES
6	INFORME ARTICULO
7	LIBRO CON DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO

Figura 7. Fases cronológicas del proyecto. Fuente propia

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar, construir e integrar un sistema de sentido de giro oscilante para ensayos de micro abrasión.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Usar metodologías de diseño para realizar un plan de mejora a un sistema de ensayos de micro abrasión.
- ✓ Construir, adecuar y ensamblar los diferentes mecanismos al sistema, teniendo en cuenta la metodología escogida y el plan de mejora diseñado.
- ✓ Incorporar un mecanismo de giro invertible, para el sistema de ensayos de micro abrasión.

- ✓ Realizar una validación del diseño y la construcción del sistema con sus nuevas adecuaciones.

4. ANTECEDENTES

Con el uso de biomateriales se han abierto grandes posibilidades en el campo médico, que están enfocadas a mejorar la calidad de vida los pacientes. Los avances en esta área de la medicina e ingeniería se hacen gracias a diferentes pruebas e investigaciones que se realizan con el fin de mejorar procesos o encontrar nuevas e innovadoras formas de solucionar un determinado problema. Para la realización del ensayo de micro abrasión de deben tener en cuenta diferentes aspectos, teniendo en cuenta que se quiere asemejar el movimiento que realiza la cadera cuando una persona está caminando.

La cadera hace parte de una serie de segmentos que conforman el miembro inferior (cadera, muslo, rodilla, pierna, tobillo y pie), asimismo está compuesta por diferentes estructuras óseas, ligamentosas y musculares que se encargan de dar estabilidad y movilidad. La cadera tiene 3 grados de libertad, lo permite realizar movimientos de flexión-extensión, rotación interna-rotación externa y abducción y aducción. [29]

Para el ensayo se tendrán en cuenta los movimientos de flexión-extensión que se realizan a lo largo del plano sagital (Figura8), para los movimientos deflexión-extensión se tienen diferentes variaciones dependiendo de si esta esta flexionada o extendida.[30]

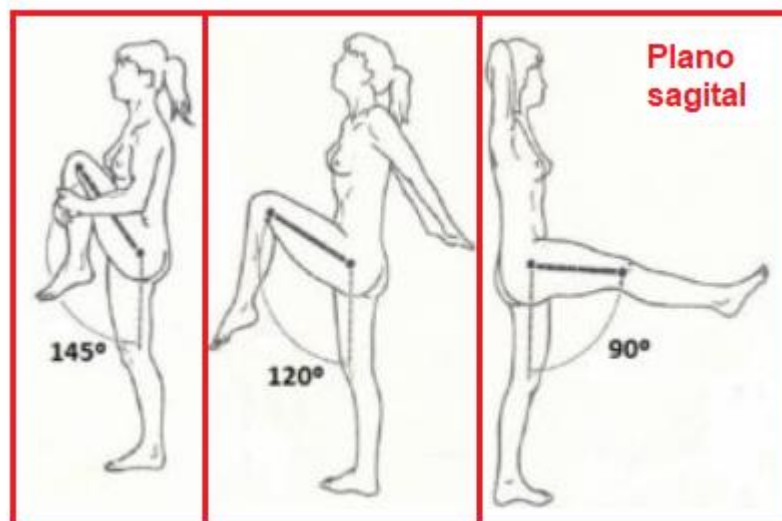


Figura 8. Posiciones alternativas para la flexión de la cadera a lo largo del plano sagital.[29]

Una vez se define el plano sagital como el plano de acción del movimiento, se tiene que la cadera para el análisis de la marcha puede alcanzar un ángulo de 113° para la flexión y un ángulo de 28° para la extensión, con lo que se define que uno de los ángulos donde el motor girara 141° cuando se hagan las pruebas con giro recíprocante. [31]

Dentro de los estudios realizados a diversos materiales y biomateriales, se encuentran algunos autores que se rigen por la norma técnica ASTM G65 para realizar ensayos de desgaste abrasivo, uno de los cuales diseña y construye una máquina para realizar dichos ensayos (Figura 9), ya que una de las principales pérdidas de utilidad en los objetos o mecanismos se debe al deterioro de su superficie. [32]

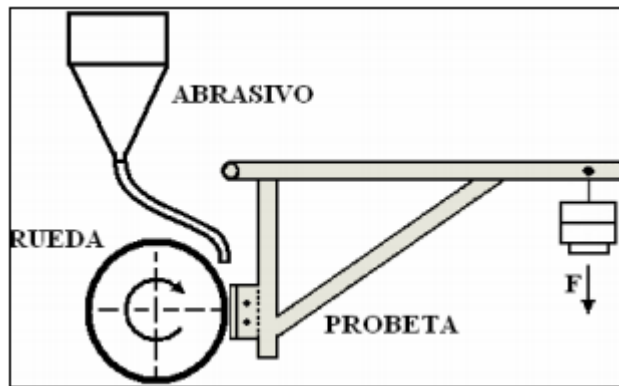


Figura 9. Esquema de la máquina de ensayos de abrasión según norma ASTM G65. [32]

De la figura anterior se observa que el sistema consta de un contrapeso que ejerce una determinada carga a la probeta que a su vez está en contacto con una esfera que gira, mientras cae algún tipo de solución abrasiva en la zona de contacto. Los resultados del análisis realizado por el autor se hacen en función de la pérdida de volumen, para treinta especímenes diferentes, donde se tiene que hay un nivel de repetibilidad. [32]

Otros estudios realizados refieren que las prótesis, como los implantes ortopédicos de cadera y rodilla se pueden considerar sistemas de tribocorrosión ya que el proceso de desgaste que se observa en los implantes es un conjunto de fenómenos mecánicos y químicos. [33] Para realizar los ensayos simulando las condiciones de la cadera se utiliza un aparato de abrasión a microescala conocido como "Ball Cratering" (Figura 10). El aparato proporciona capacidades de prueba de abrasión localizadas a pequeña escala, rápidas y de bajo costo en pequeñas superficies de muestra; Estas pruebas son robustas y repetibles. [34]

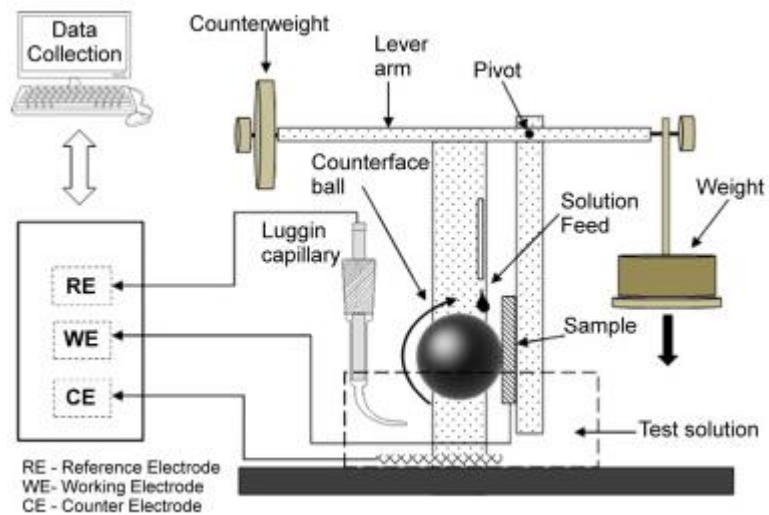


Figura 10. Aparato de prueba de micro abrasión-corrosión.[34]

A partir del aparato utilizado se hacen diferentes ensayos donde se tienen en cuenta los efectos del potencial aplicado, junto con la variación de la carga, con el fin de estudiar la respuesta de la muestra en esas condiciones. La solución se mantuvo a temperatura ambiente (25°C) y se contuvo dentro de un recipiente de vidrio estéril, desde donde la bomba alimento la solución hacia el punto de contacto de la esfera con la muestra. La carga aplicada vario de (0.5-5 N), con una duración de 30 minutos cada una, la bola giro a una velocidad de 100 RPM, durante 3000 ciclos. El cráter generado a partir de las pruebas se muestra a continuación. [34]

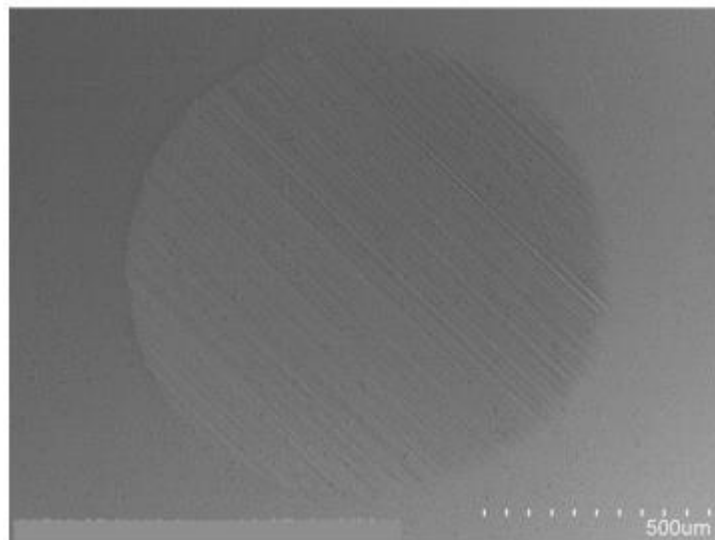


Figura 11. Exploraciones SEM que muestran cicatrices de desgaste con una carga aplicada de 5 N. Diámetro del cráter.[34]

Las imágenes de las cicatrices o cráteres generados durante la prueba son capturadas por el autor, por medio de microscopia óptica y SEM. Se miden los

diámetros de las cicatrices para cada carga aplicada, frente al potencial aplicado, con lo cual se estima la pérdida total de masa del material. Las imágenes (Figura 11) mostraron surcos paralelos claros y distintos en la dirección del deslizamiento visible dentro del cráter, lo que generalmente indica un régimen de abrasión dominante de 2 cuerpos en todo el rango de pruebas realizadas.[34]

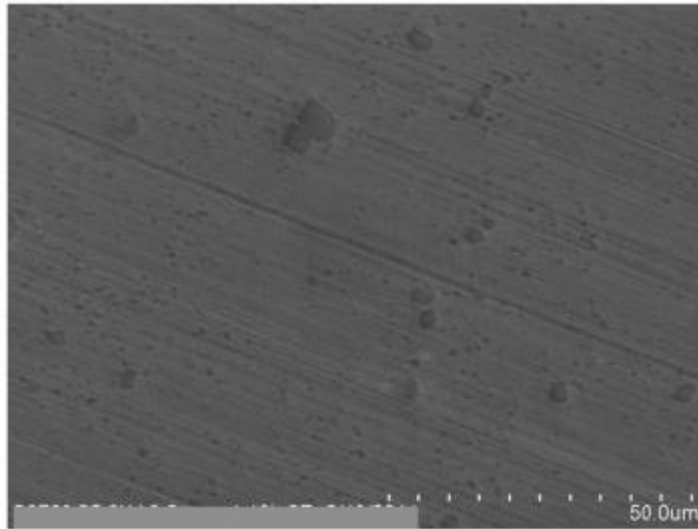


Figura 12. Exploraciones SEM que muestran cicatrices de desgaste con una carga aplicada de 5 N. Surcos paralelos con partículas incrustadas en la superficie del cráter. Las escalas de imagen se indican en micrografías.[34]

Analizando la muestra con mayor detenimiento ($50\mu m$), se ven pequeñas partículas incrustadas en la superficie de las ranuras de desgaste (Figura 12). El autor advierte que no es seguro, pero las partículas que se muestran pueden haber sido responsables de la abrasión (debido al micro corte o arado) y pueden estar compuestas de una mezcla de polietileno, proteína y metal de la aleación.[34]

En los diferentes estudios realizados los autores concuerdan en que el desgaste juega un papel importante en la determinación del rendimiento de los biomateriales, adicionalmente se están utilizando biomateriales metálicos que pueden llegar a ser aleaciones. El titanio es uno de esos materiales que se usa para aplicaciones biomédicas gracias a propiedades como alta resistencia específica, buenas propiedades mecánicas, bajo módulo elástico, corrosión superior resistencia y mayor biocompatibilidad en comparación con los otros biomateriales metálicos utilizados convencionalmente. Una de las investigaciones relacionadas a ver el comportamiento de estos biomateriales se enfoca en el uso de tribómetros. [35]

Fellah, refiere que realizo ensayos utilizando tribómetros de bola sobre disco y pin sobre disco (Figura 13), bajo diferentes condiciones de cargas normales aplicadas (3, 6 y 10 N) y velocidades de deslizamiento (1, 15 y 25 mm/s) para 3000 m.

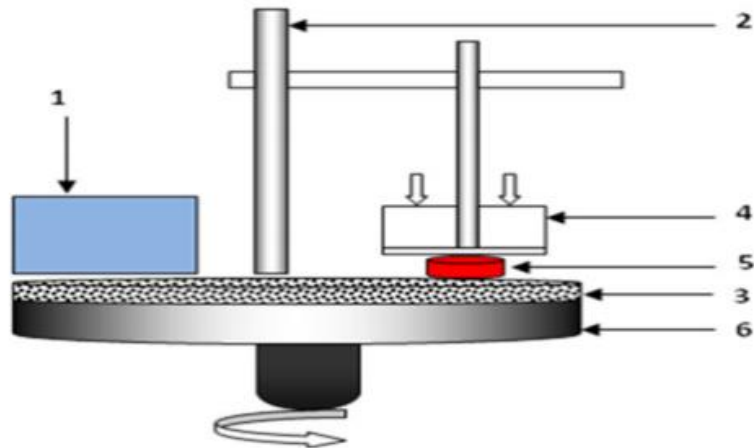


Figura 13. Esquema de pin en el sistema de disco: 1 - Regulador de velocidad, 2 - soporte, 3 - Bandeja giratoria, 4 - carga aplicada, 5 - Muestra, 6 - marco de retención.[35]

Los resultados muestran que las muestras tienen un rendimiento similar de fricción y desgaste, aunque la velocidad de deslizamiento y las cargas aplicadas son diferentes. En la figura 14 se muestra uno de los resultados obtenidos a partir del ensayo.

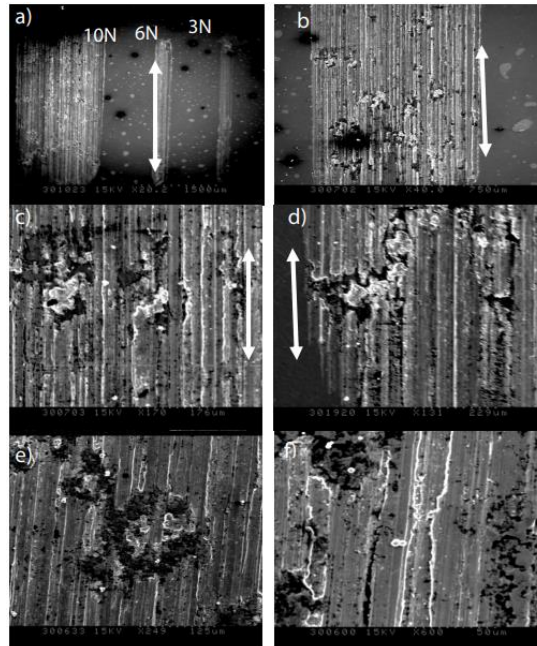


Figura 14. Micrografías SEM de marcas de desgaste alternativas en la muestra Ti6Al-4V después de la prueba de fricción a 15 mm/s , (a) 3 N, (b) 6 N (c) 10 N y 25 mm/s , (d) 3 N, (e) 6 N, (f) 10 N (deformación severa y flujo de plástico). Las flechas indican el deslizamiento-dirección.[35]

De la figura anterior el autor señala que existen marcas deslizantes continuas con deformación plástica, asimismo se ven surcos y crestas en las pistas de desgaste independientemente de la velocidad de deslizamiento.

Se encuentra que la deformación o “arado” es menor, también hay capas con deformaciones plásticas consistentes que son relativamente lisas a todas las velocidades evaluadas (Figura 14). La profundidad de penetración depende de la dureza relativa del abrasivo con respecto a la dureza de la superficie de la muestra.[35]

5. JUSTIFICACIÓN

Con el transcurrir de los años la medicina ha tenido desarrollos importantes gracias a la evolución misma de la tecnología, lo que le ha permitido relacionarse con otras áreas que antes eran ajenas a ellas, para obtener mejores resultados en diferentes áreas de estudio.

Uno de los principales temas de estudio, es la mejora de la calidad de vida relacionada a la medicina, donde actualmente se busca tener en cuenta las opiniones y perspectivas del paciente a cerca de como un procedimiento medico mejorara o afectara su calidad de vida. [36]

Se debe tener en consideración que actualmente la calidad de vida no solo se asocia a una única persona, ya que como seres sociales que somos, también depende en gran medida de intercambios interpersonales favorables, llegando a buscar ser útiles para una población determinada, buscando tener aprobación y reconocimiento. [37]

Por lo anterior la calidad de vida de una persona se mide en base a tres componentes, físicos, emocionales y su función social, donde se debe hacer reiteración sobre la capacidad funcional de las personas, lo que les permite realizar actividades de la vida diaria, donde se ajusten sus roles sociales y laborales. [38]

Con los diferentes avances en la medicina y en otras áreas de la ciencia, actualmente se habla de un aumento en la expectativa de vida de las personas en el mundo, ya que del año 2000 al 2016, aumento 5.5 años, aunque se resalta que otros factores sociales y económicos afectan esta medida, ya que existen países como Suiza y España la expectativa de vida es de 83 años mientras que hay países africanos como Lesotho, donde la expectativa de vida es de 52 años. [39]

Algunos de los adelantos más relevantes en el área de la medicina en los últimos años, que han permitido mejorar la calidad de vida de las personas, así como su expectativa de vida, han sido el desarrollo de biomateriales, los cuales son ampliamente usados, ya que se pueden implantar en la mayoría de las zonas del cuerpo humano. Un campo muy beneficiado por el uso de biomateriales es la ortopedia y traumatología, ya que diversos estudios han demostrado variadas posibilidades para curar enfermedades y traumas óseos en corto tiempo y en costos no tan elevados, uno de los cuales es un producto finlandés que ayuda a la

reconstrucción de huesos fracturados, mientras elimina las bacterias que surgen de posibles infecciones. [40]

Asimismo, cabe resaltar que aún se sigue avanzando en la investigación de nuevos métodos que permitan rehabilitaciones más rápidas, principalmente fomentando el crecimiento de hueso, cartílago, tejido adiposo, ente otros, a través de nuevos métodos, siendo un claro ejemplo de estos, el uso de colágeno de Bovino, extraído de la tráquea del animal y que tiene diferentes propiedades restaurativas, que pueden llegar a usarse en pacientes, con determinados preprocesamientos. [41]

Por otro lado, es apremiante resaltar que, a pesar de los actuales avances de la ciencia y la tecnología en el campo de los biomateriales, estos aun no llegan a tener un desempeño máximo, un claro ejemplo se puede denotar en los reemplazos de rodilla o cadera, donde las prótesis implantadas tienen una duración no mayor a 20 años. [42]

A pesar de que las edades más comunes para tener que someterse a reemplazos de cadera eran de los 60 años en adelante, actualmente, se ven más casos de fracturas y desgastes debidas a esto, a edades más tempranas, como los 40 años, lo que significa que un único reemplazo con un ciclo de vida útil de 15 a 20 años, es en muchos casos insuficiente, ya que probablemente, el paciente se deba someter nuevamente a una cirugía para cambiar su prótesis, situación que tiene repercusiones tanto para el paciente, que tendrá que realizar recuperaciones lentas y terapia nuevamente, como para el sistema de salud, que deberá costear nuevamente la intervención quirúrgica. Cabe resaltar que en Colombia anualmente se realizan alrededor de 10.000 reemplazos de cadera o rodilla, lo que supone costos gigantes, que podrían disminuir si los biomateriales usados, mejoran sus características propias, como su tiempo de vida útil. [43]

6. MARCO REFERENCIAL

6.1 MARCO TEÓRICO

Desgaste por abrasión

Los modos de desgaste más comúnmente encontrados en la práctica son el adhesivo, corrosivo, abrasivo, por fatiga y fretting. Cabe resaltar que cuando se habla de desgaste, el material es removido de la superficie, la cual se puede dar de diferentes formas, a de acuerdo con los mecanismos que rigen el sistema. Con la amplia variedad de mecanismos de desgaste que pueden operar en un dispositivo tribológico, existen varias formas de partículas de desgaste que pueden ser generadas como un resultado de este proceso.[12]

Tanto el desgaste por adherencia como el desgaste por abrasión se pueden considerar en la ingeniería como la forma más común de desgaste. Siempre que

dos superficies entran en contacto existe la probabilidad de adherencia en puntos favorables de la interfase seguida, probablemente, por el desgaste. El desgaste por abrasión es especialmente importante, teniendo que este modo se produce normalmente en dos situaciones. La primera es en procesos de remoción de material industrial tales como ranurado, cortado y maquinado; el segundo modo ocurre donde el material comienza a ser atrapado como partículas individuales entre dos superficies, que actúan como superficies de corte para remover el material. [44]

Como un resultado del proceso de abrasión, una considerable cantidad de deformación se produce en las superficies que son propensas a deformación plástica. Donde los materiales no son muy probables a deformar plásticamente y son relativamente frágiles (tales como materiales cerámicos y hierro fundido), la interacción del abrasivo con la superficie del sólido puede producir agrietamiento en la superficie.

Varios aspectos físicos del material abrasivo influyen en la profundidad del daño en materiales. Uno de estos es el tamaño de las partículas del abrasivo. Existe una correlación entre el tamaño de la partícula abrasiva y la profundidad del daño observado. [13]

Ensayo de micro abrasión

Los ensayos de micro abrasión son métodos de pruebas donde se estudia el rozamiento entre cuerpos sólidos, con el fin de obtener el deslizamiento más óptimo y a su vez impendo el desgaste de estos. Adicionalmente los ensayos de micro abrasión dan la posibilidad de realizar pruebas de abrasión localizadas, rápidas y económicas con muestras pequeñas, aunque en algunos casos la huella dejada debido al desgaste es compleja de medir y analizar.[25] [45] [27]

Anteriormente las muestras que se sometían a ensayos de micro abrasión debían tener un preprocesamiento, donde se sometían a un bombardeo iónico como método de eliminación de la capa superficial de la capa micrométrica, pero debido a que el método era largo y tedioso, se optó por un sistema más sencillo y fácil de usar el cual permite que un cilindro o esfera gire libremente contra la muestra (Probeta), junto con un medio abrasivo.[45] [46]

Variantes del ensayo de micro abrasión

Actualmente existen dos variantes ampliamente aceptadas para realizar ensayos de micro abrasión, los cuales son “Bola libre” y “Bola fija”, que se explican a continuación.

✓ Bola libre

En el ensayo con “Bola libre”, la bola gira contra la muestra (Ver figura 15), a través de un eje giratorio con muesca, con la bola siendo impulsada por fricción entre la muestra y el eje. Debido a que la bola no es conducida directamente existe la posibilidad de deslizamiento producido entre el eje y la bola, dando lugar a incertidumbre en la velocidad y número de revoluciones realizadas por la bola. [45]

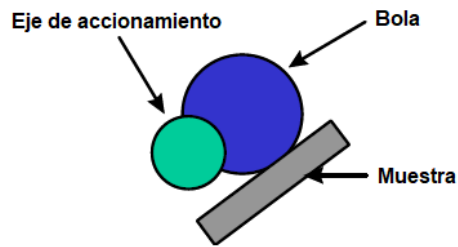


Figura 15. Diagrama esquemático ensayo con “Bola libre” [45]

✓ Bola fija

En esta prueba, la bola se mueve directamente ya que esta se sujeta contra dos ejes de transmisión coaxiales que permiten quitar y reemplazar la bola fácilmente (Ver figura 16). La muestra es presionada por la esfera giratoria desde el lado mediante cargas de prueba colocadas en el soporte de pesas.

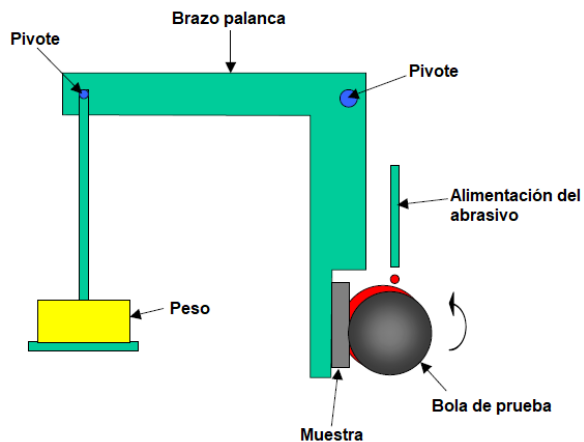


Figura 16. Diagrama esquemático ensayo con “Bola fija” [45]

Ensayo de metrología

Cuando comparamos magnitudes físicas de objetos con sucesos de la vida real, estamos realizando la actividad de medir, lo que nos permite desarrollar estándares y encontrar relaciones entre los objetos de estudio y la unidad de referencia. La

metrología es un campo de estudio donde se incluyen todos los aspectos teóricos y prácticos relacionados con las mediciones. [47]

Cuando hablamos de ensayos de micro abrasión y metrología se debe tener en cuenta que como el tamaño del contacto entre la muestra y la esfera es relativamente pequeño (del orden de un milímetro), el ensayo de abrasión a microescala es ideal para la prueba de pequeñas muestras de material, o para determinar la variación en el rendimiento de desgaste de una posición en una muestra grande. Por lo tanto, los ensayos de micro abrasión son ideales para estudiar el desgaste de los recubrimientos debido a la localización del desgaste.[12]

Normalmente, los ensayos de micro abrasión, como su nombre indica, se llevan a cabo con una lechada abrasiva, pero el sistema también se puede usar para llevar a cabo pruebas de deslizamiento lubricadas o secas donde se puede medir la fricción mediante la adición de un dispositivo de medición de fricción.

Para los revestimientos existen dos variantes del experimento. Cuando el ensayo tiene una duración corta o el recubrimiento es relativamente grueso, la prueba se puede realizar sin perforar el recubrimiento y cuando el ensayo se realiza en recubrimientos finos, puede ocurrir una perforación del recubrimiento en el sustrato y se pueden obtener tasas de desgaste tanto para el recubrimiento como para el sustrato.[45]

Cuando se desean calcular tasas de desgaste por medio de ensayos de micro abrasión se tiene dos variaciones, la primera cuando los materiales analizados son monolíticos o sin perforación del recubrimiento, donde se debe medir el diámetro de la huella generada por la esfera de forma paralela y perpendicular (Ver figura 17) de acuerdo con el sentido de rotación de la esfera y luego determinar su promedio.

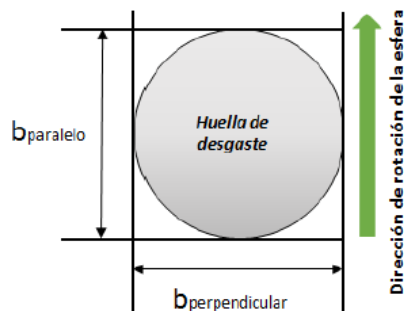


Figura 17. Medición del diámetro de la huella para ensayo sin perforación.[13]

La segunda variación se presenta cuando existe perforación del recubrimiento, lo que genera que el cráter generado tenga un diámetro interior y exterior (Ver figura 18), de manera similar al procedimiento anteriormente descrito, se deben medir ambos diámetros y emplear el método desarrollado por Rutherford y Hutchings, que

explica los fenómenos asociados al desgaste abrasivo del sistema recubrimiento sustrato.[27]

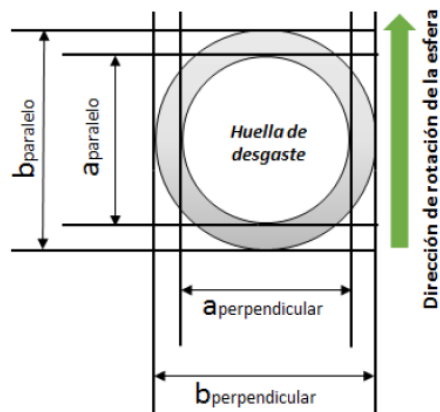


Figura 18. Medición de los diámetros de la huella para ensayo con perforación.[13]

Estándares para ensayos de micro abrasión

La tribología es una ciencia que estudia fenómenos de fricción, desgaste y lubricación de superficies con movimiento relativo, lo que la hace una ciencia que interrelaciona diferentes áreas de estudio como la química, la física, la mecánica, entre otras. [48] Para los ensayos tribológicos existen diferentes estándares según las pruebas a realizar y los mecanismos usados para llevar a cabo dichas pruebas.

Para la estandarización de los ensayos realizados a materiales, productos, sistemas y servicios, existen diferentes organizaciones encargadas de desarrollar las normas y publicarlas, siendo la sociedad americana para pruebas y materiales (ASTM), una de las más relevantes.

A pesar de la existencia de las diferentes organizaciones encargadas de normalizar y estandarizar las diferentes pruebas y ensayos en variados campos de estudio, existen algunas áreas donde aún no hay estándares publicados, siendo los ensayos de micro abrasión uno de estos.

A pesar de que no existe un estándar oficial para realizar ensayos de micro abrasión, hay otros documentos que permiten efectuar estos estudios, buscando siempre que los resultados obtenidos sean claros y precisos. Para el caso de los ensayos de micro abrasión se tiene la guía de buenas prácticas de mediciones No 57, que tiene como título "Ball cratering or Micro-Abrasion Wear Testing of Coatings".

La guía de buenas prácticas provee una introducción a los ensayos de micro abrasión con variaciones específicas en el ensayo, asimismo, contiene diferentes puntos de vista acerca de cuáles son las formas más efectivas de realizar el ensayo

y los aspectos que deben ser tomados en consideración cuando se diseña y programa una prueba de desgaste. [49]

La guía de buenas prácticas presenta los diferentes tipos de desgaste que se encuentran comúnmente, asimismo presenta una visión general acerca de los sistemas usados para realizar los ensayos y sus variaciones, como por ejemplos si el ensayo es con la esfera fija o libre. Adicionalmente se tienen los principios básicos que rigen la prueba, analizando si existe o no perforación en el material usado y finalmente se presentan los factores que podrían afectar los resultados y las mediciones realizadas. [49]

Para el análisis de las mediciones de los ensayos de desgaste realizados se tiene en cuenta que la muestra no tiene perforación, de lo cual se tiene que el volumen de desgaste de la muestra este dado por la siguiente ecuación, teniendo en cuenta que $b \ll R$. [49][53]

$$V = \pi \frac{b^2}{64R} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde (R) es el radio de la esfera y (b) es el diámetro del cráter generado durante el ensayo. Una vez determinado el volumen de desgaste se utiliza la relación de Archard que relaciona el volumen de desgaste con la carga normal (N) y la distancia de deslizamiento (S) como:

$$V = K_c SN \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde K_c es el coeficiente de desgaste para el material. A partir de la ecuación anterior se tiene:

$$K_c = \frac{V}{SN} = \pi \frac{b^4}{64RSN} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Para el cálculo de la distancia de deslizamiento (S) para un giro continuo del sistema se utiliza la siguiente relación.

$$S = \# \text{ ciclos} * 2 * \pi * R \quad \text{Ecuación (4)}$$

Cuando las pruebas se realizan con giro recíprocante, con un ángulo de recorrido (β), expresado en grados, la distancia de deslizamiento (S) se establece de la siguiente forma.

$$S = \frac{\# \text{ ciclos} * \beta * 4 * \pi * R}{360}$$

Ecuación (5)

7. METODOLOGÍA

El desarrollo del proyecto se segmentará en diferentes fases, las cuales permitirán la consecución total del mismo, ya que posibilitan generar tareas simplificadas, para llegar a cumplir objetivos específicos propuestos, lo que posteriormente conllevará a cumplir el objetivo general del proyecto. (Figura 19,20)



Figura 19. Estructura de desglose de trabajo, parte 1. Fuente propia

Inicialmente se estructura un plan de mejora con el cual se detectarán posibles obstáculos en la realización de las mejoras del sistema y se planearán los pasos a seguir para la realización del proyecto.

Para la parte de los ensayos se hace la comparación entre los resultados obtenidos cuando el sistema solo gira un determinado número de ciclos hacia un único sentido de giro, contra el ensayo realizado con movimientos recíprocantes, ambos ensayos se realizan en seco.

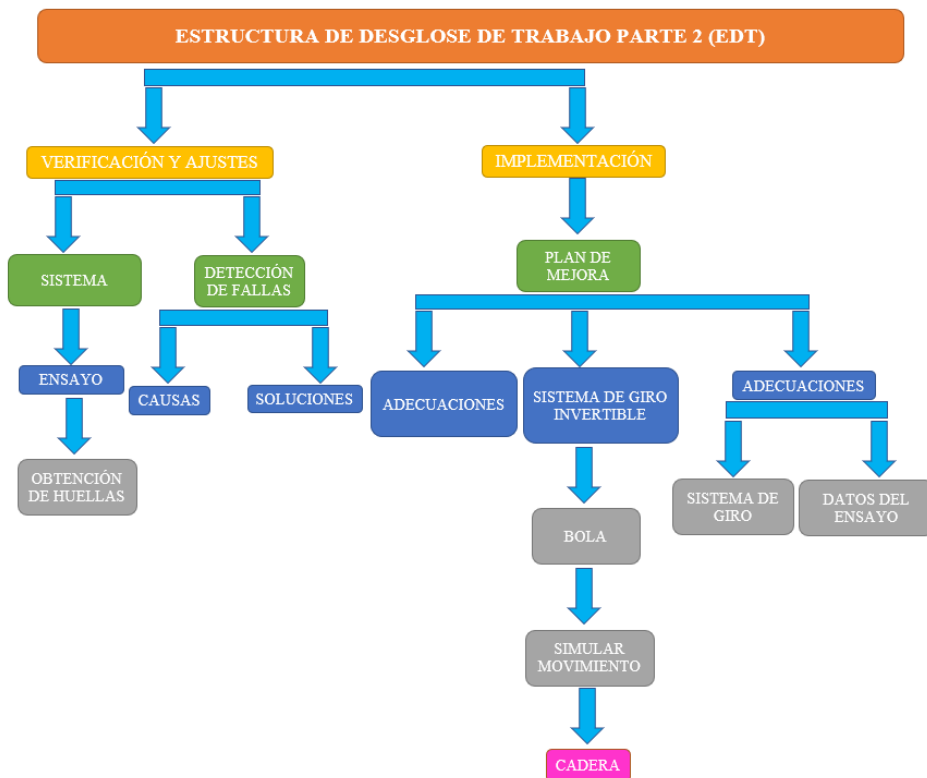


Figura 20. Estructura de desglose de trabajo, parte 2. Fuente propia

En la fase de verificación y ajustes se buscarán posibles fallas en el sistema, cuando ya se encuentre en funcionamiento, con el fin de que las condiciones para la realización de la prueba sean idóneas.

En la implementación del plan de mejora se busca llegar a que el sistema tenga un giro invertible con el control de los grados de giro, con el fin de simular el movimiento de la cadera, al momento de realizar el ensayo.

8. CAPÍTULOS

8.1 PLAN DE MEJORA

Para el cumplimiento de cada uno de los objetivos propuestos, se plantea un plan de mejora que toma elementos de la hoja ruta para el diseño de ingeniería (Figura 21), donde se tienen en cuenta diferentes elementos que permitirán realizar el cada una de las tareas que se propongan.

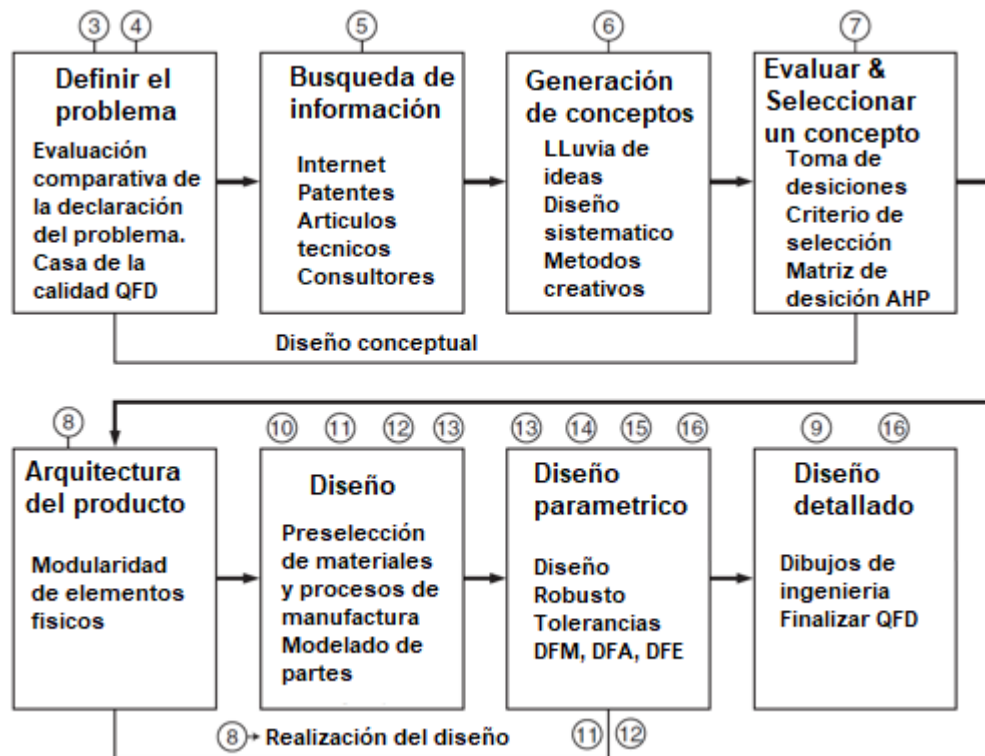


Figura 21. Hoja ruta para el diseño en ingeniería.[50]

Se debe tener en cuenta que dentro de los tipos de diseño que existen, el que se trabajara es el rediseño de ingeniería, donde lo que se desea es mejorar un diseño o sistema existente, dentro del rediseño pueden existir diferentes tareas enfocadas en mejorar el funcionamiento de determinados componentes, que permitirán que el conjunto en general funcione más adecuadamente. Es de resaltar que el rediseño se logra sin ningún cambio en el principio de funcionamiento o concepto original del sistema evaluado. [50]

Para el proyecto se realizará un rediseño de algunos conjuntos de piezas y se reemplazará un sistema, que permitirá mejorar la funcionalidad del equipo.

Para tener un diseño o rediseño viable no existe una formula única, diferentes autores tienen diversos métodos, aunque uno de los más simples y aceptados y tomado como base para otros modelos es el dado por Morris Asimow quien considero que el proceso se puede enmarcar en la siguiente figura.

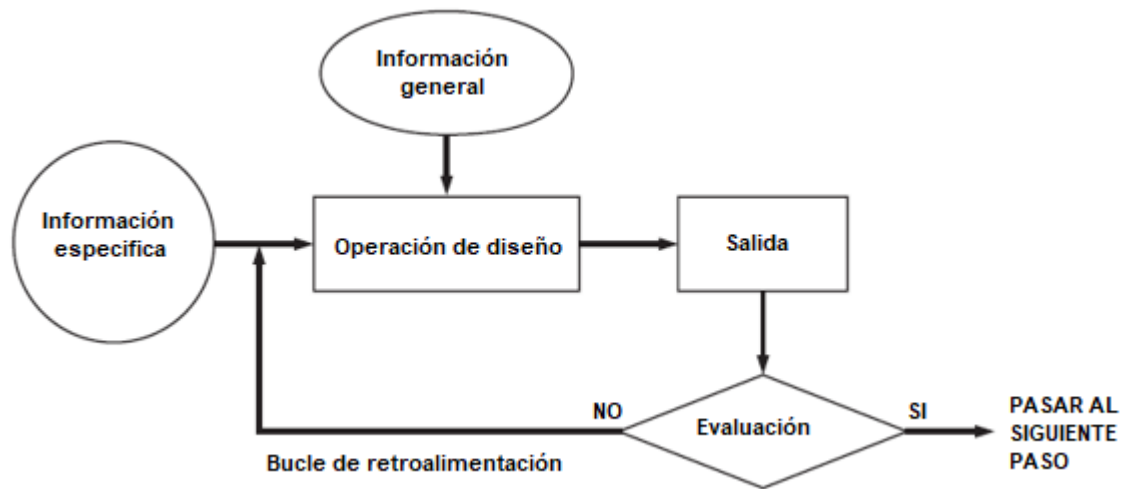


Figura 22. Módulo básico del proceso de diseño.[50]

De la figura anterior se puede inferir que el diseño es un proceso secuencial que consta de múltiples operaciones de diseño, donde se pasa al siguiente paso, después de evaluar si lo hecho cumple con las especificaciones requeridas.

El diseño puede abordarse como un problema a resolver. Una de las tantas metodologías para la resolución de problemas que se abordara consta de los siguientes pasos. [50]

- ✓ Definición del problema
- ✓ Recopilación de información
- ✓ Generación de soluciones y toma de decisiones
- ✓ Resultados

8.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Para la definición de los posibles puntos de mejora del sistema para ensayos de micro abrasión se parte del diagrama QFD (Figura 23) realizado cuando se desarrolló la máquina.

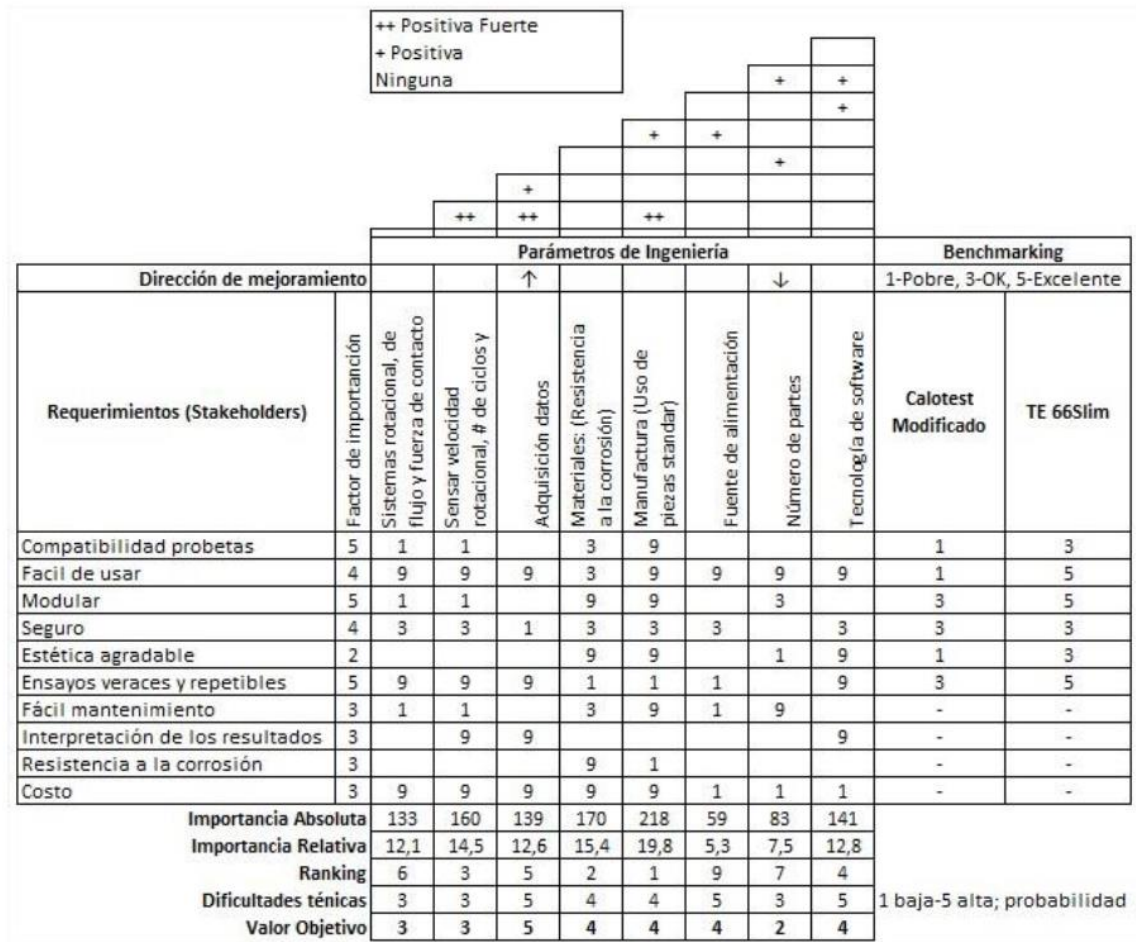


Figura 23. Diagrama QFD del sistema para ensayos de micro abrasión.[13]

Según el diagrama QFD, los requerimientos de mayor importancia para el usuario final del producto son la compatibilidad de probetas, el modularidad y la veracidad de los ensayos, factores que resultan ser fundamentales en un equipo para ensayos de materiales, razón por la cual los posibles puntos de mejora se enmarcan en los requerimientos mencionados anteriormente. [13]

Realizando una inspección del equipo se encontraron 4 posibles puntos de mejora y la posibilidad de cambiar un sistema, todo con el fin de mejorar el funcionamiento del equipo. (Figura 24)

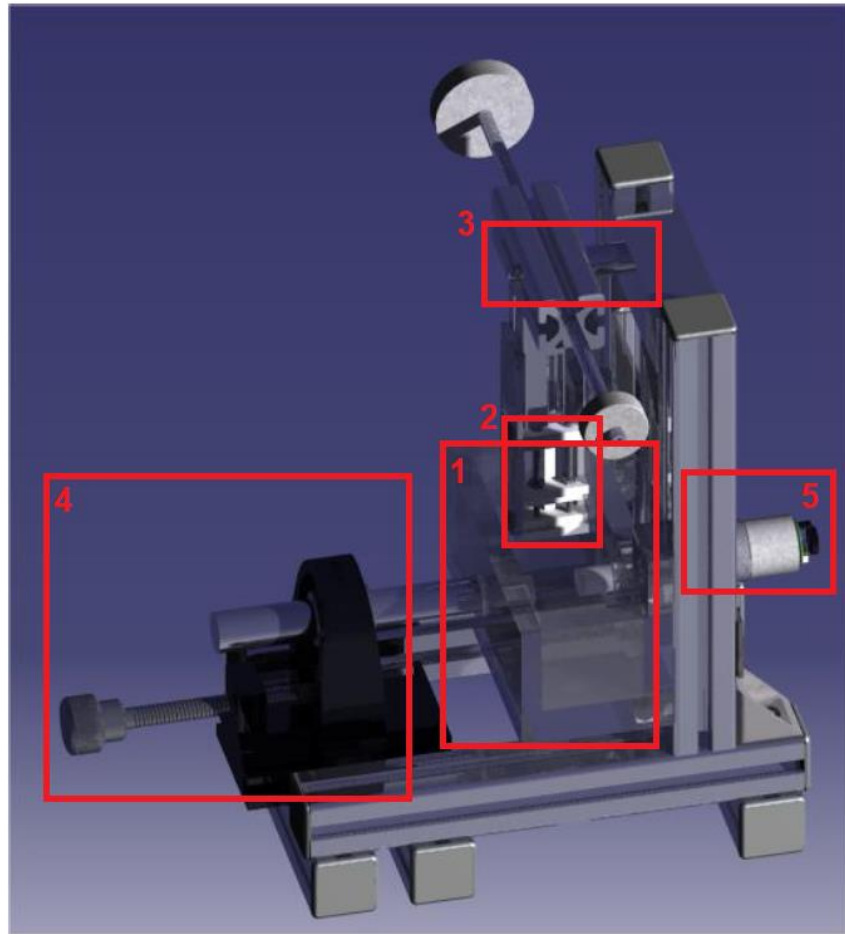


Figura 24. Sistema para ensayos de micro abrasión actual. 1) Caja de pruebas, 2) Sujeción de la probeta, 3) Sujeción del brazo, 4) Sujeción de la esfera, 5) Sistema motor. [13]

Los elementos y conjuntos mencionados en la figura anterior son los que someterán a diferentes modificaciones, que permitirán tener algunos cambios en los ensayos que se harán, para obtener resultados en diferentes condiciones, para su posterior análisis.

8.3 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

Una vez hecha la inspección del equipo y obtenidos los puntos de mejora se procede a analizar cada uno a mayor detalle, con el fin delimitar muy bien, los cambios deseados y su influencia en el conjunto general.

8.3.1 SUJECIÓN DE LA PROBETA

Analizando el sistema de sujeción actual (Figura 25) de la máquina para ensayos de micro abrasión, se determinó que el sistema a pesar de tener un agarre sólido limita la forma de las muestras que se podrían llegar a analizar. Adicionalmente en algunos ensayos se evidencio que la muestra presentaba un leve movimiento, lo que podría generar variaciones en los resultados del ensayo.

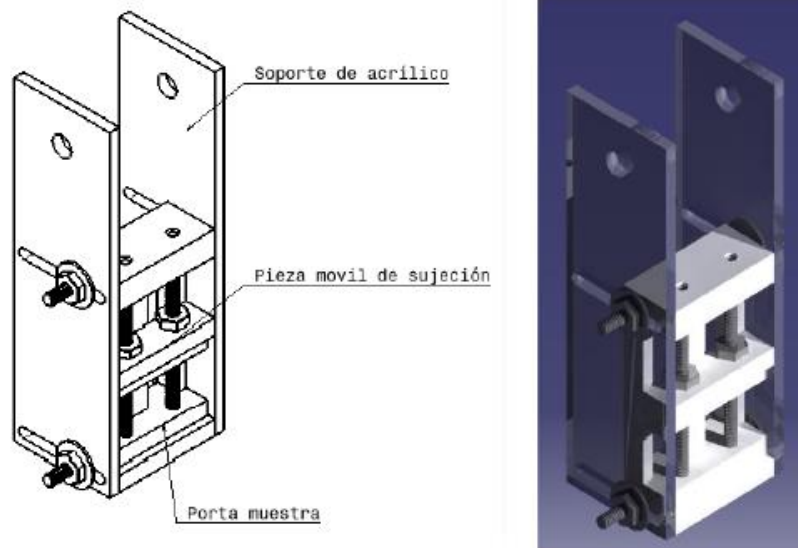


Figura 25. Sistema de sujeción actual.[13]

Como se observa en la figura anterior los soportes del sistema de sujeción están realizados en acrílico, mientras que el porta muestras y la pieza móvil de sujeción se encuentran realizadas en EMPAC.

8.3.2 SISTEMA DE SUJECIÓN DEL BRAZO CONECTOR DE LA MUESTRA

Una vez precisado el conjunto del brazo conector actual (Figura 26) del sistema para ensayos de micro abrasión, se resuelve que el conjunto es estable y que permite que el soporte de sujeción de la probeta se adecue a la parte final del perfil cuadrado que lo compone, aunque tiene la limitante de que el soporte solo permite un grado de libertad (Verticalmente), ya que el rodamiento se encuentra alojado dentro del soporte y no permite mover el pivote horizontalmente.

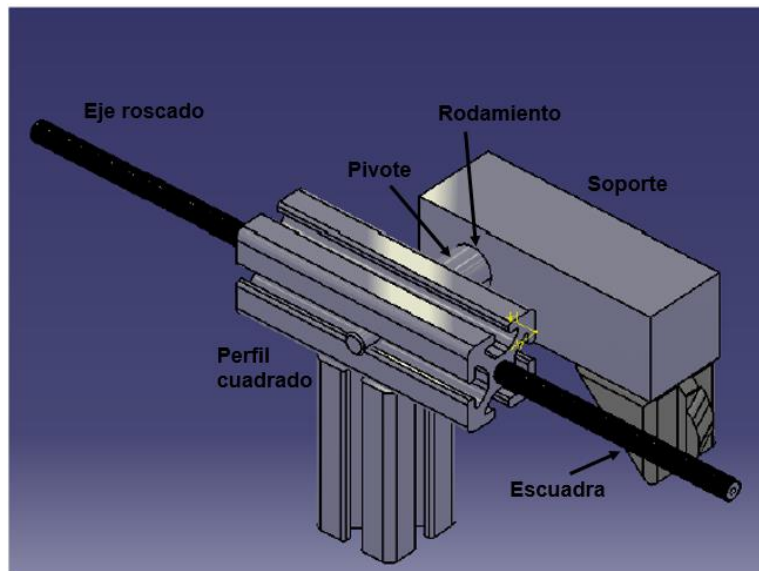


Figura 26. Brazo conector, sistema de palanca. [13]

Como el pivote no se puede mover, si se llegase a tener una muestra de un tamaño considerable o si hubiera que realizar un montaje adicional para un ensayo en específico, este sistema podría llegar a impedir que se realice el ensayo.

8.3.3 SUJECIÓN DE LA ESFERA PARA EL ENSAYO

La esfera realiza contacto con la muestra cuando se realiza el ensayo, esta tiene dos puntos de apoyo (Ver figura 27), uno de los cuales la enclava a un eje impulsor y el otro apoyo impide que la esfera se descentre con respecto a la muestra.

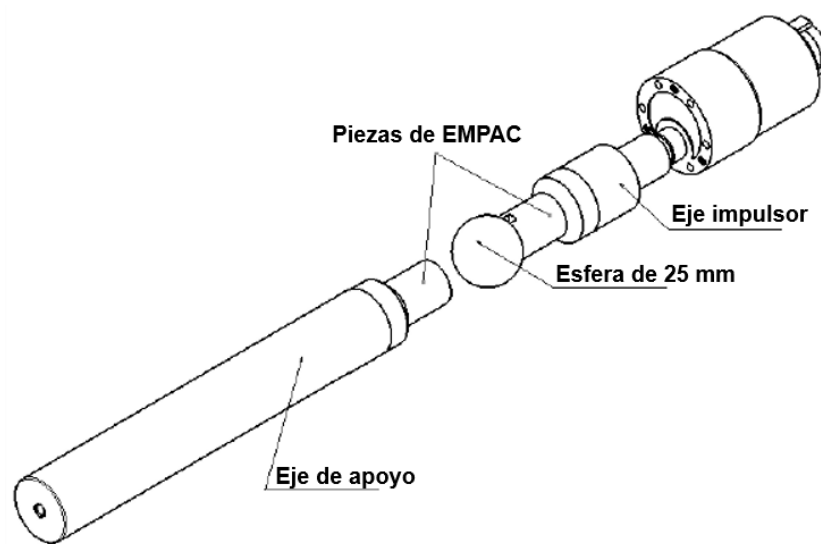


Figura 27. Sistema rotacional.[13]

El eje de apoyo tiene un desplazamiento lineal, generado por una prensa (Figura 28), lo que permite que se pueda cambiar la esfera de ser necesario, de forma versátil, lo que permite poner diferentes tamaños de esta.

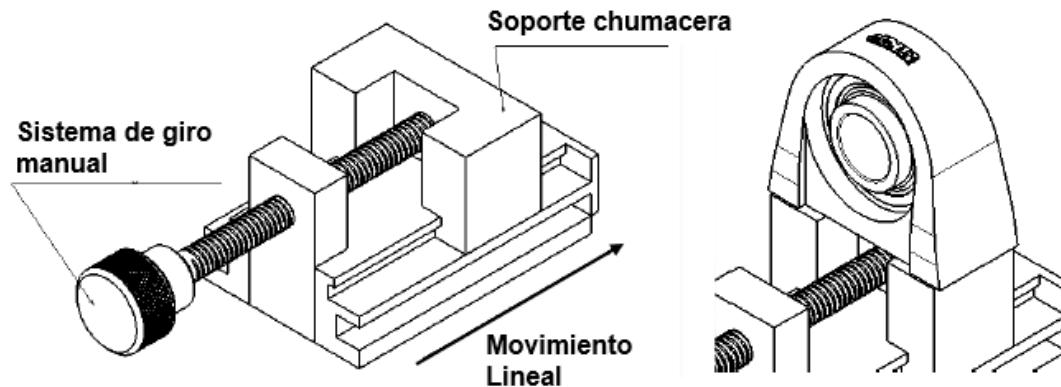


Figura 28. Sistema lineal para el movimiento del eje de apoyo.[13]

El eje de apoyo descansa sobre una chumacera que se posiciona en la parte superior de la prensa. La limitante del sistema de sujeción es que la prensa está sobredimensionada para la función que debe realizar y ocupa una gran cantidad de espacio en el montaje del sistema. Adicionalmente no se tiene certeza de cuanta fuerza ejerce la prensa sobre la esfera y por ende sobre el eje del motor, ya que esta se ajusta manualmente.

8.3.4 MOTOR, EJE IMPULSOR Y BUJE (SISTEMA NUEVO)

El sistema actual cuenta con un motor DC (Figura 29), que tiene acoplado a su eje un enconder magnético, con el cual se realiza el control de este con ayuda de la tarjeta de adquisición DAQ. Asimismo, el motor está sujeto a una lámina por su flanche frontal y su eje está conectado al eje conductor por medio de un tornillo prisionero.



Figura 29. Motor DC con encoder magnético sistema actual. Fuente propia

El motor utilizado en el sistema actual, junto con su respectivo encoder, son difíciles de manipular, ya que requieren un sistema de adquisición que pueda procesar los pulsos del encoder, que al ser magnéticos tienen altas frecuencias.

8.4 GENERACIÓN DE SOLUCIONES Y TOMA DE DECISIONES

Una vez analizados cada uno de los conjuntos e identificados posibles puntos de mejora se procede a plantear soluciones a cada uno de los ítems.

8.4.1 SUJECIÓN DE LA PROBETA

A partir de los posibles puntos de mejora encontrados, se plantea un sistema de sujeción similar al del sistema inicial, a continuación, se presenta el diseño de este. (Figura 30).



Figura 30. Renderizado sistema de sujeción rediseñado. Fuente propia

De igual forma se detallan los cambios realizados al sistema (Figura 31) para que tenga una sujeción apropiada a la hora de realizar los ensayos.

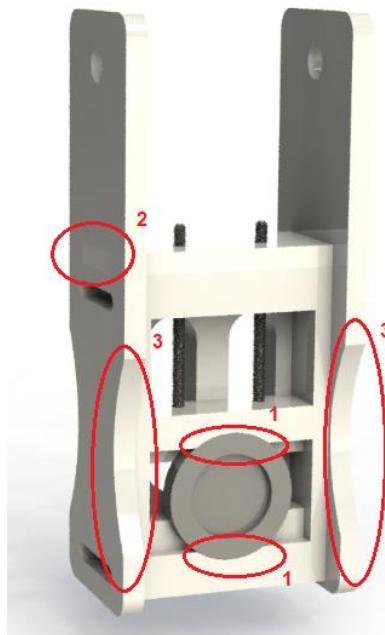


Figura 31. Renderizado sistema de sujeción rediseñado (Anotaciones). Fuente propia

De la figura anterior se tienen 3 cambios en el modelo anterior, el primero de ellos fue realizar un corte circular en las piezas que ejercen presión sobre la muestra, que ahora será un porta muestra circular, lo que permitirá que la sujeción sea más fuerte. El segundo cambio es la adhesión de una pieza en acrílico que se une a las piezas laterales del sistema por medio de una muesca y que restringe el movimiento de estas.

La tercer y última modificación realizada fue realizar un corte a las láminas laterales, ya que en el sistema actual cuando se realizaban los ensayos, existieron momentos donde el sistema de la esfera chocaba en contra de las piezas laterales y se desalineaba la muestra o el punto de contacto de la esfera, lo que no permitía ver resultados claros al final de las pruebas.

8.4.2 SISTEMA DE SUJECIÓN DEL BRAZO CONECTOR DE LA MUESTRA

Con el fin de hacer que la máquina para ensayos de micro abrasión sea más adaptable a diferentes tipos de muestras, se decide cambiar el elemento que mantenía al eje que conectaba el brazo de la muestra con el soporte por una chumacera, como se muestra a continuación.

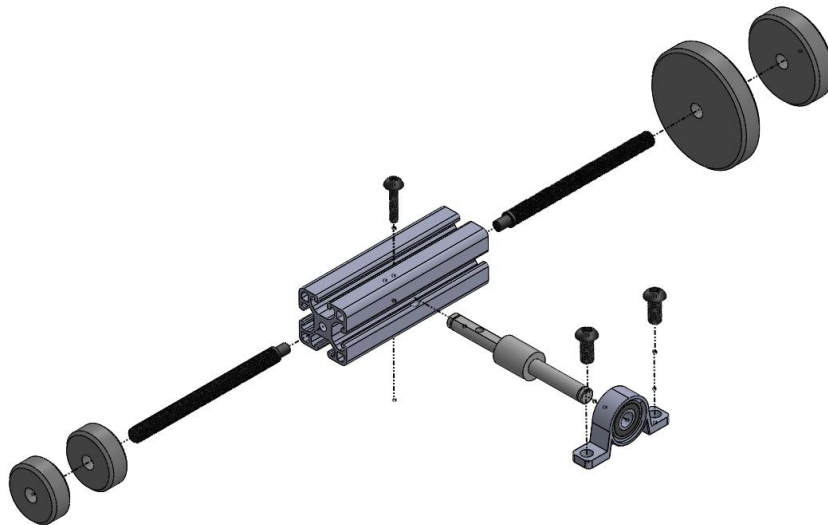


Figura 32. Explosionado sistema de apoyo del brazo conector de la muestra.

Fuente propia

En la figura 32 se observa que ahora la chumacera es la que tiene la función de sostener el conjunto de pesas con el que se modifica la carga sobre la muestra. Asimismo, el uso de la chumacera permite que esta pueda moverse a lo largo del perfil cuadrado sobre el cual está sujeta, como se muestra en la siguiente figura.

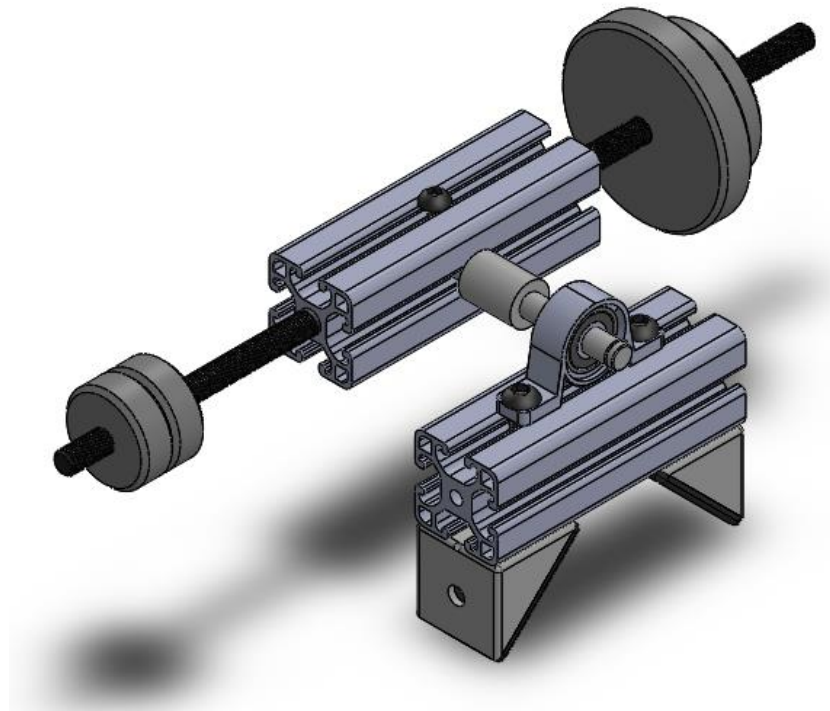


Figura 33. Sistema de apoyo del brazo conector de la muestra. Fuente propia

De lo anterior se observa que la chumacera al poder moverse a lo largo del riel del perfil cuadrado da la posibilidad de tener un mayor espacio en la caja de pruebas, si se tuviera que realizar un montaje diferente al habitual para analizar una muestra determinada.

8.4.3 SUJECIÓN DE LA ESFERA PARA EL ENSAYO

Para la sujeción de la esfera se plantea un sistema con un embolo, que será el encargado de ejercer una determinada presión sobre la esfera para que esta no se descentre durante el desarrollo de los ensayos. (Figura 34).



Figura 34. Renderizado Sistema embolo. Fuente propia

Para el cálculo del resorte se tiene que inicialmente este debe mantener la esfera aprisionada en contra del eje que conecta al motor. Para hallar la constante del resorte que se utilizara, se parte del hecho de que se debe calcular la fuerza que la esfera ejerce verticalmente.

masa de la esfera = 0.11074 kilogramos

$$F = m * g \quad \text{Ecuación (6)}$$

$$F = 0.11074Kg * 9.8 \frac{m}{s^2} \quad \text{Ecuación (7)}$$

$$F = 1.086 \text{ Newton} \quad \text{Ecuación (8)}$$

Teniendo en cuenta un factor de seguridad del 10%, se tiene que la fuerza que ejerce la esfera verticalmente es la siguiente.

$$F_{esfera} = 1.10 * F \quad \text{Ecuación (9)}$$

$$F_{esfera} = 1.10 * 1.086N \quad \text{Ecuación (10)}$$

$$F_{esfera} = 1.19 \text{ Newton} \quad \text{Ecuación (11)}$$

Para el retroceso del resorte se tiene aproximadamente 14 mm que es igual al Δx que el resorte debe tener cuando comprima la esfera. A partir de lo anterior se tiene por ley de Hooke.

$$F = K * \Delta x \quad \text{Ecuación (12)}$$

De la ecuación anterior despejamos el valor de la constante K del resorte.

$$K = \frac{F}{\Delta x} \quad \text{Ecuación (13)}$$

Reemplazando los valores de la fuerza de la esfera y el diferencial de distancia expresado en metros se tiene.

$$K = \frac{1.19 \text{ Newton}}{0.014 \text{ m}} \quad \text{Ecuación (14)}$$

$$K = 85.35 \text{ N/m} \quad \text{Ecuación (15)}$$

La constante k del resorte que se utilizara en el sistema del embolo para la sujeción de la esfera debe ser de $K = 85.35 \text{ N/m}$

8.4.4 MOTOR, EJE IMPULSOR Y BUJE (SISTEMA NUEVO)

El motor DC se reemplaza por un motor paso a paso (Nema 17), el cual no requiere de un sensor, ya que cada uno de sus pasos nos dice exactamente cuántos grados se mueve el eje de este.

Una vez se realiza en modelo CAD del sistema del embolo y de motor paso a paso y se ensamblan los conjuntos (Figura 35), se procede a realizar el diseño del nuevo eje conductor y un buje que permitirá que exista un acople solidario entre el eje del motor y el eje conductor. A continuación, se muestra la disposición de las piezas y los planos de las piezas diseñadas (Ver Anexos 1).

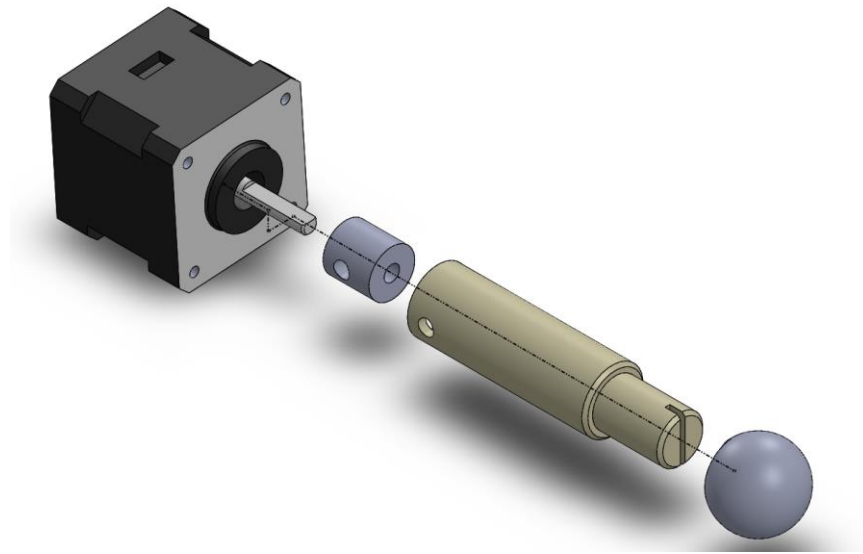


Figura 35. Explosionado sistema eje motor. Fuente propia

El eje conductor se diseña con un diámetro menor en la parte donde entra en contacto con la ranura de la esfera, ya que en el sistema actual el diámetro era mayor y en ciertos momentos, el eje conductor chocaba con la muestra afectando el ensayo.

8.4.5 CAJA DE PRUEBAS

A partir de la caja de pruebas que se tiene del sistema, se decide mantener el mismo diseño, pero se aumentaron las dimensiones de la caja, adicionalmente se decidió tener un sistema de sellado para el eje que es parte del émbolo. Con lo anterior se propone un diseño para la caja, con algunas variaciones, en comparación a la anteriormente usada (Figura 36). A continuación, se muestra el render de la caja diseñada.

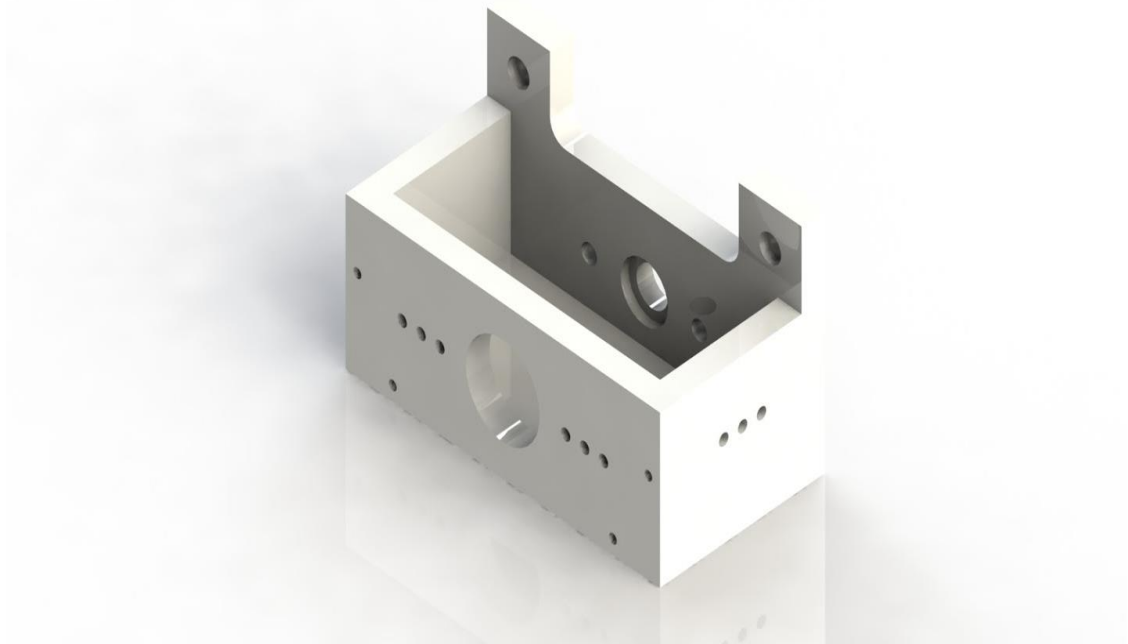


Figura 36. Renderizado de la caja de pruebas. Fuente propia

Asimismo, para la fabricación de la caja se realizaron los respectivos planos de diseño. (Ver anexos 2)

Adicionalmente la caja presenta en una de sus caras frontales un corte circular profundizado, donde se alojará un sello, que impedirá que el líquido salga de la caja, cuando se realicen pruebas con goteo. En esa misma cara habrá una chumacera de pared por donde ingresará el eje conector entre el motor y la esfera. Seguidamente se muestra como estarían dispuestas las piezas.(Figura 37).

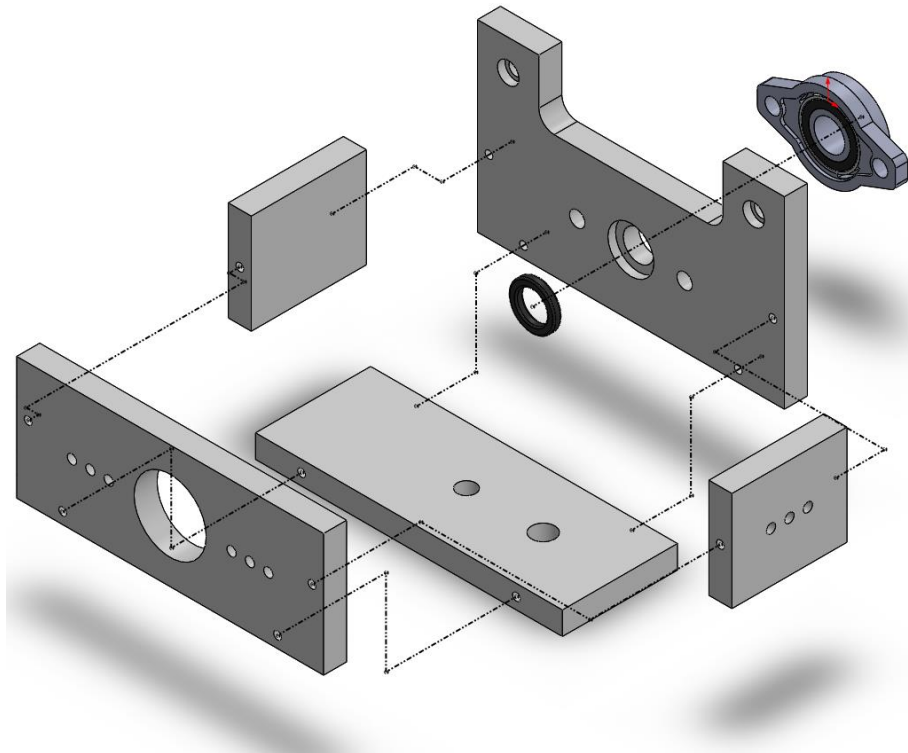


Figura 37. Explosionada caja de pruebas. Fuente propia

Una vez el sistema está diseñado se realiza una simulación para ver la curva de velocidad del motor para el rango de grados designados para el ensayo con giro recíprocante (0° - 141°), para lo cual inicialmente se debe realizar un croquis a lo largo de un plano medio generado en la esfera, como se muestra a continuación.

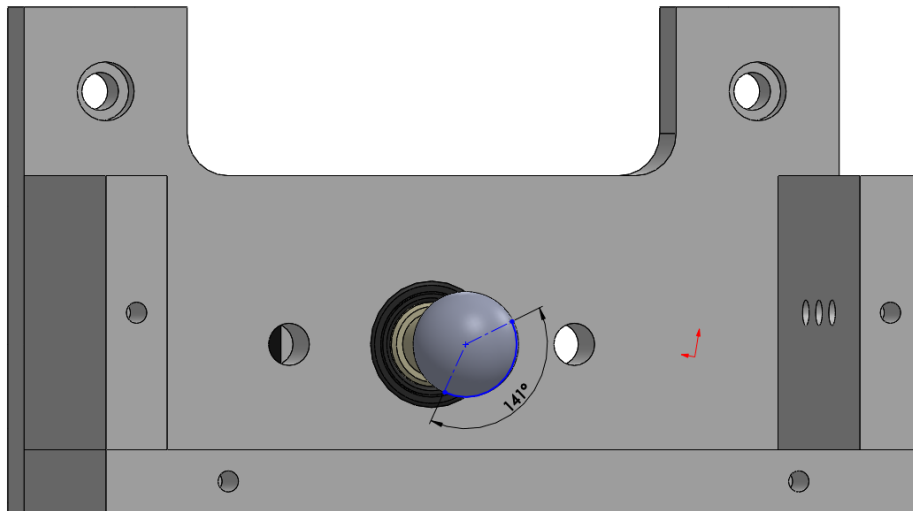


Figura 38. Creación de croquis para análisis de movimiento de la esfera. Fuente propia

De la figura 38 se observa que se crea un arco tangente a la superficie de la esfera con una apertura de 141° , que es el rango designado para el ensayo. Una vez definido el croquis, se procede a realizar el análisis con ayuda del complemento SolidWorks Motion (Figura 39).

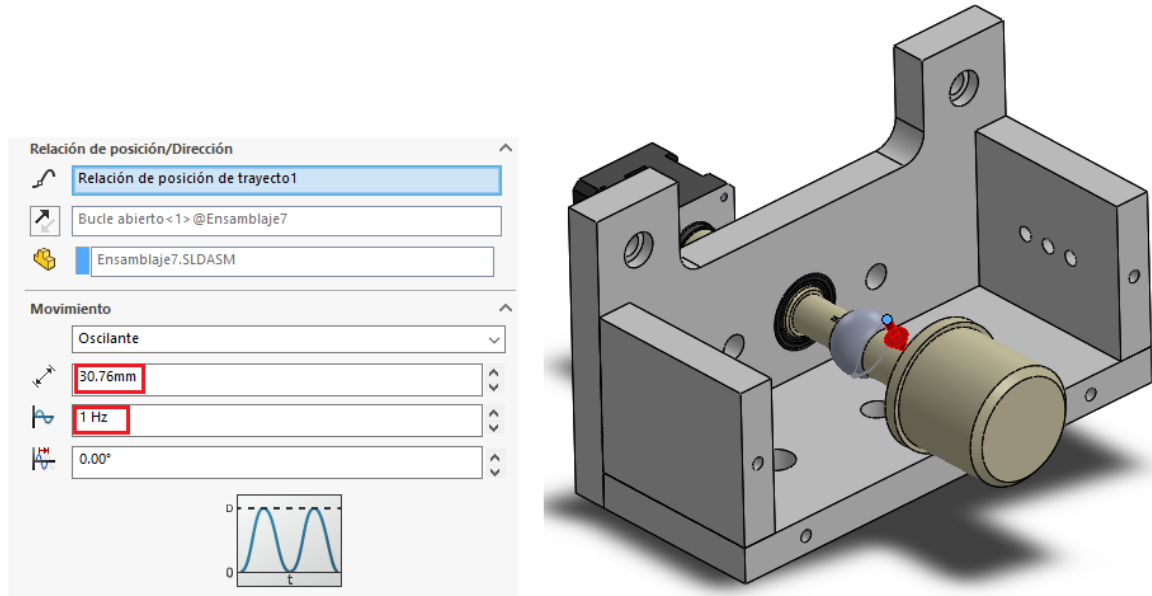


Figura 39. Parámetros para motor con giro oscilante, SolidWorks. Fuente propia

La longitud de arco del croquis de la figura 38 es de 30.76 mm, distancia especificada en los parámetros del motor que se pondrá en la simulación, también se pone la frecuencia de giro del motor que es de 1 Hz y se procede a obtener la curva de la velocidad angular del motor.

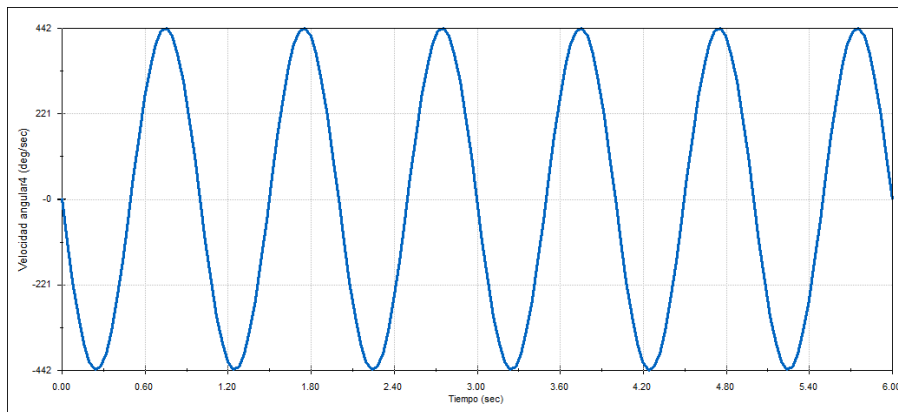


Figura 40. Velocidad angular del motor, durante el ensayo recíprocante. Fuente propia.

Una vez obtenida la gráfica de la velocidad angular del motor Figura (40) se denota que el efectivamente la velocidad de este tiene un comportamiento sinusoidal

debido a que el movimiento de ida y vuelta, representando el movimiento de la cadera de una persona.

8.5 SISTEMA COMPLETO

Con los cambios realizados en los diferentes conjuntos mencionados, se procede a realizar el diseño CAD, del sistema para ensayos de micro abrasión, para poder identificar posibles incongruencias en el modelo, antes de realizar el mecanizado de algunas piezas, a continuación, se muestra el renderizado del modelo. (Figura 41)

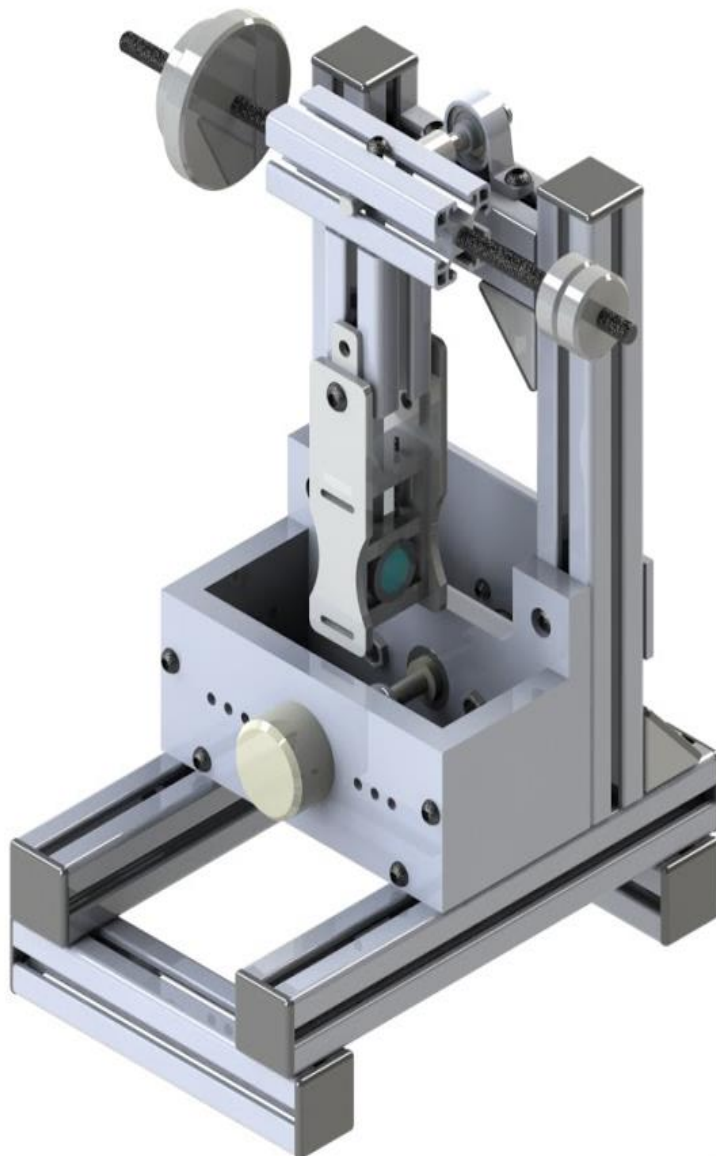


Figura 41. Renderizado sistema ensayos de micro abrasión. Fuente propia

A partir del diseño se realiza el explosionado del mismo, donde se ven cada una de las piezas del sistema. (Figura 42)



Figura 42. Renderizado del modelo explosionado del sistema para ensayos de micro abrasión. Fuente propia

A partir de los modelos mostrados anteriormente se realiza el plano general del sistema. (Ver anexos 3)

8.6 PROGRAMACIÓN DEL MOTOR

Para la puesta en marcha del motor paso a paso Nema 17, se tienen en cuenta diferentes aspectos de su funcionamiento y del driver que permite realizar un control del mismo. A continuación, se muestran algunas características propias del motor.

- ✓ Corriente por fase: 1.68 *Amperios*
- ✓ Resistencia por fase: 1.65 Ω
- ✓ Ángulo de paso: 1.8°
- ✓ Torque: 5.65 *Kg/Cm*
- ✓ Alimentación: 12 *VDC*

Adicionalmente se tiene que el motor paso a paso es bipolar, por lo que presenta dos bobinas en su conexionado interno (Figura43), generalmente dispuestos de la siguiente forma.

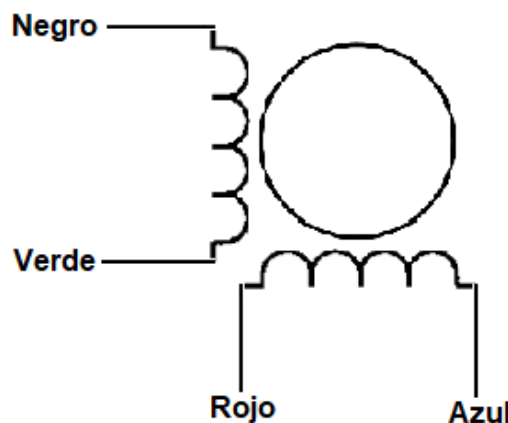


Figura 43. Fases de un motor bipolar. [51]

De la figura 43 se detalla que usualmente los cables de conexión a la salida del motor tienen ese código de colores para su fácil identificación.

El motor paso a paso Nema 17 está configurado para que en cada uno de los pasos que da, recorra 1.8°, lo cual nos permite hacer una relación que nos servirá al

momento de realizar la programación del controlador que permitirá el giro del motor, en la figura 44 se muestra la relación obtenida.

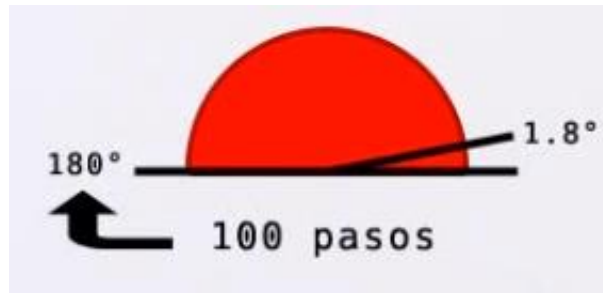


Figura 44. Relación de pasos del motor Nema 17. [51]

De la figura anterior se tiene que para que el motor de media revolución, este debe recorrer 100 pasos, por lo que, si recorre 200 pasos, el motor habrá dado una revolución completa.

Una vez se tienen las especificaciones del motor, se procede a realizar el ajuste del driver que controla el motor (A4988 “Pololu”), el cual se muestra a continuación.

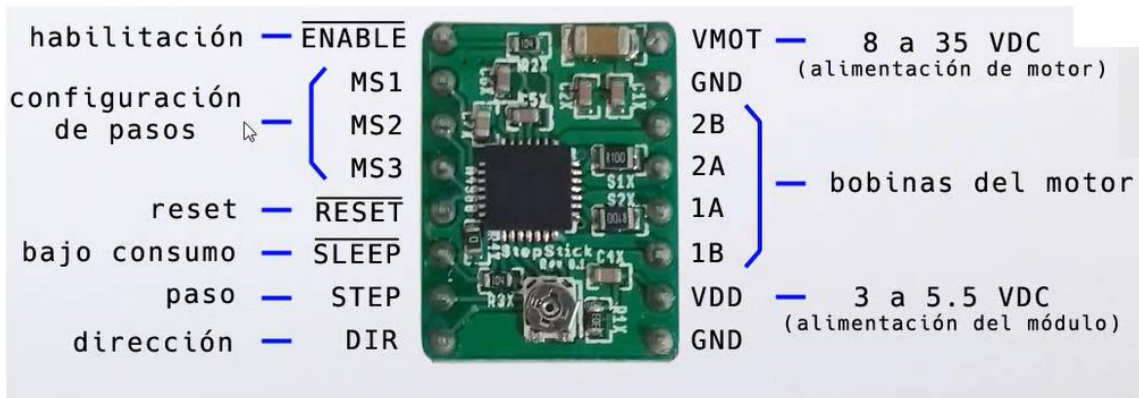


Figura 45. Módulo Pololu A4988 [51]

Con la figura 45, se ven cada uno de los pines de funcionamiento del módulo A4988, de los cuales tenemos las siguientes características.

- ✓ ENABLE, RESET y SLEEP se habilitan con un nivel lógico bajo
- ✓ Pin DIR, se debe dejar como una salida lógica en Arduino, para que su salida sea HIGH o LOW
- ✓ La corriente máxima por fase es de 1.68 Amperios

Una vez se tienen las características del driver A4988, se procede a realizar el cálculo del voltaje de referencia, que limitara la corriente por cada una de las fases del motor Nema 17 cuando esté en funcionamiento, seguidamente se puede ver la relación utilizada.

$$I_{max} = \frac{V_{ref}}{8 * R_s} \quad \text{Ecuación (16)}$$

$$V_{ref} = I_{max} * 8 * R_s \quad \text{Ecuación (17)}$$

La corriente máxima se establece al 90% de la corriente de cada fase del motor Nema 17, especificada anteriormente.

$$I_{max} = I_{fase} * 90\% \quad \text{Ecuación (18)}$$

$$I_{max} = 1.68 \text{Amps} * 90\% \quad \text{Ecuación (19)}$$

$$I_{max} = 1.5 \text{ Amperios} \quad \text{Ecuación (20)}$$

R_s = Resistencia de montaje superficial, tiene símbolo R100 equivalente a 0.1 Ohm.

Con los datos anteriores, reemplazamos en la ecuación 17, para obtener el voltaje de referencia del driver A4988.

$$V_{ref} = 1.5 \text{ Amps} * 8 * 0.1\Omega \quad \text{Ecuación (21)}$$

$$V_{ref} = 1.2 \text{ Voltios} \quad \text{Ecuación (22)}$$

El voltaje de referencia debe ajustarse en el driver, con ayuda de un destornillador y un multímetro y alimentando la parte lógica del driver.

Una vez ajustado el voltaje de referencia del driver, se procede a realizar el conexionado del driver, el motor y el controlador Arduino Nano, que se puede ver a continuación. (Figura 46)

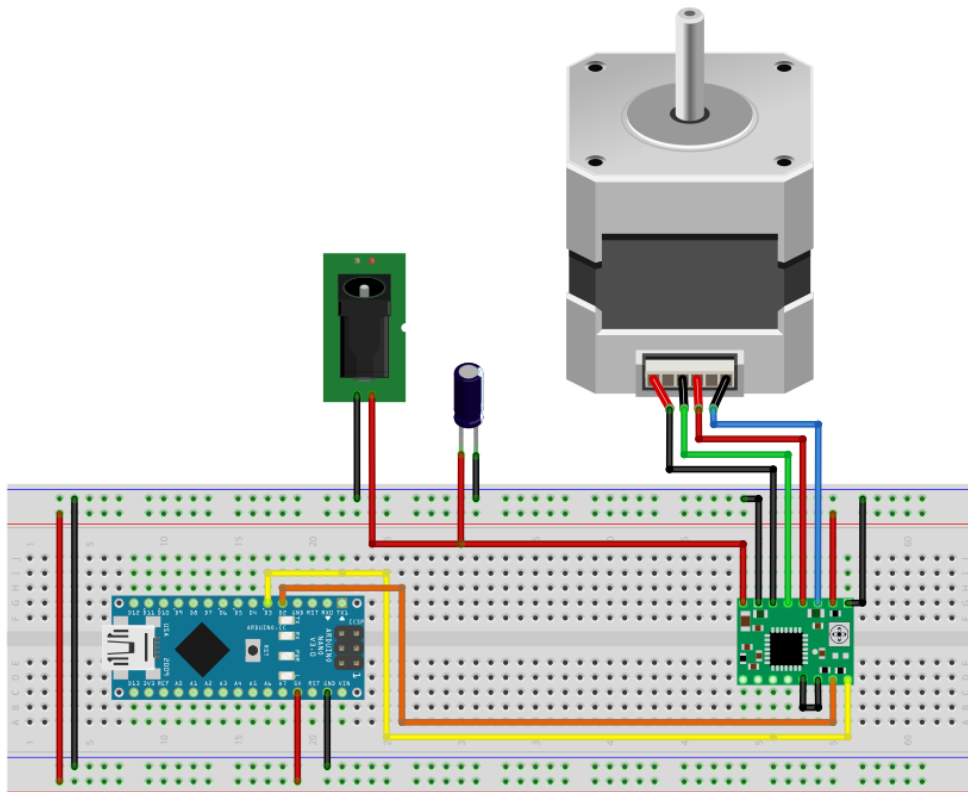


Figura 46. Conexiones motor paso a paso Nema 17, driver A4988 y Arduino Nano.
Fuente propia

Con las conexiones realizadas, se realiza un código con la ayuda del Software Arduino, donde se verifica el correcto funcionamiento del motor.

```

#define STEP 4 //Asigna la palabra STEP al pin #4
#define DIR 5 //Asigna la palabra STEP al pin #5
int a = 1; //Crea variable entera "a" y le asigna el valor de 1

void setup() //Función principal
{
  pinMode(STEP, OUTPUT); //Pin #4 asignado como salida
  pinMode(DIR, OUTPUT); //Pin #5 asignado como salida
}

void loop() //Función ciclica
{
  digitalWrite(DIR, HIGH); //Salida pin #5 puesta en "Alto"
  for (int i = 0; i<1000; i++) //Inicio ciclo FOR
  {
    digitalWrite(STEP, HIGH); //Salida pin #4 puesta en "Alto"
    delay (a); //Detención del programa por 1mSeg
  }
}

```

```

digitalWrite(STEP, LOW);           //Salida pin #4 puesta en "Bajo"
delay(a);                          //Detención del programa por 1mSeg
}

delay (2000);                       //Detención del programa por 2 Seg

digitalWrite(DIR, LOW);            //Salida pin #5 puesta en "Bajo"
for (int i = 0; i<1000; i++)       //Inicio ciclo FOR
{
  digitalWrite(STEP, HIGH);        //Salida pin #4 puesta en "Alto"
  delay (a);                       //Detención del programa por 1mSeg
  digitalWrite(STEP, LOW);         //Salida pin #4 puesta en "Bajo"
  delay(a);                         //Detención del programa por 1mSeg
}
}

```

El código anterior describe el movimiento del motor 180° en un sentido y después de 2 segundos en la dirección contraria.

Una vez verificado el correcto funcionamiento del sistema, se integra una LCD Keypad Shield, para poder visualizar algunos datos de interés durante el ensayo y tener un modo manual, para realizar los ensayos sin la necesidad de utilizar la interfaz diseñada. A continuación, se muestran las características más importantes del LCD Keypad Shield y el diagrama de conexiones realizado.

- ✓ Voltaje de operación: 5V
- ✓ Botones para pulsar (4)
- ✓ Botón de Reset
- ✓ Potenciómetro integrado para ajustar el brillo
- ✓ Pines de entrada/salidas disponibles

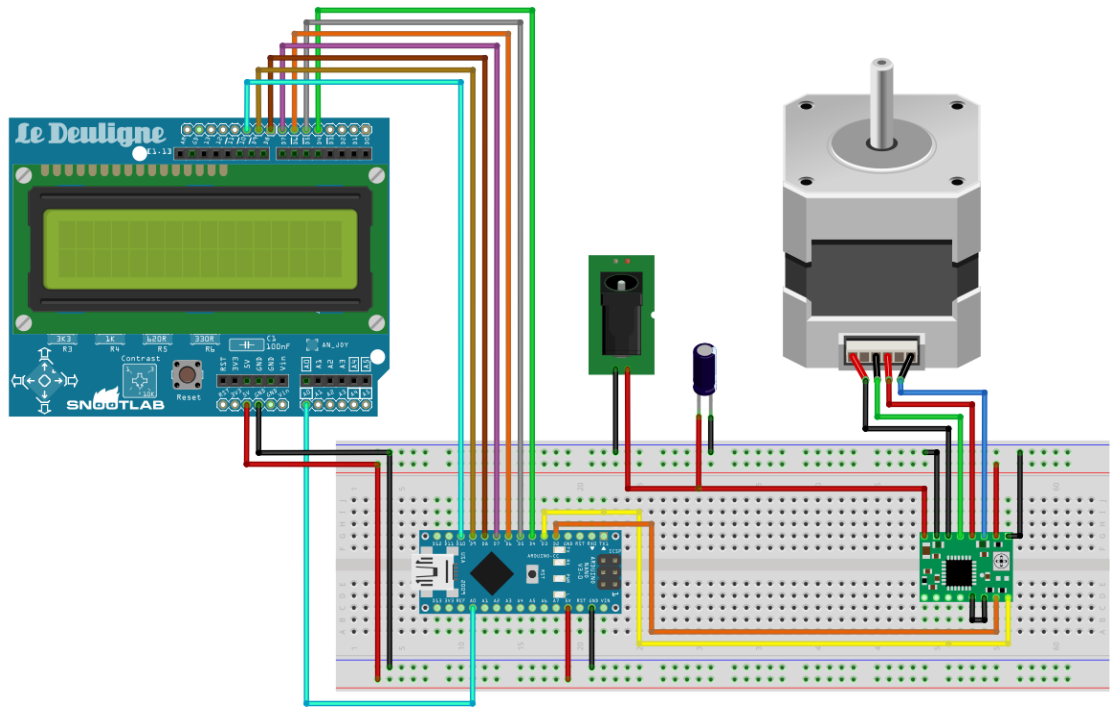


Figura 47. Diagrama de conexiones Arduino, Keypad Shield, motor paso a paso y modulo A4988

A partir del conexionado (Figura 47), se procede a realizar el código de implementación del sistema, el cual permitirá el giro del motor paso a paso, su inversión de giro y su aumento o disminución de velocidad.

//PROGRAMA FUNCIÓN DE MOTOR, DRIVER A4988, KEYPAD SHIELD Y ARDUINO //

`#include <LiquidCrystal.h>`

//Uso de función para usar la LCD KEYPAD

`LiquidCrystal lcd(8,9,4,5,6,7);`
KEYPAD

//Inicialización de pines para la LCD

`#define STEP 2`

//Asigna la palabra STEP al pin #2

`#define DIR 3`

//Asigna la palabra STEP al pin #3

`int a = 5;`

//Crea variable entera "a" y le asigna el valor

de 5

`int x;`

//Crea variable entera "x"

`int habilitador;`

//Crea variable entera "habilitador"

`int derecha;`

//Crea variable entera "derechar"

`int izquierda;`

//Crea variable entera "izquierda"

`int direccion;`

//Crea variable entera "direcciónr"

`int Vel_Up;`

//Crea variable entera "Vel_Up"

`int Vel_Down;`

//Crea variable entera "Vel_Down"

```

void setup()
{
  lcd.begin(16, 2);
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("LCD Key Shield");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("Press Key:");
  Serial.begin(9600);

```

baudios

```

  pinMode(STEP, OUTPUT);
  pinMode(DIR, OUTPUT);
  habilitador = 0;
  derecha = 0;
  izquierda = 0;
  derecha = 0;
  Vel_Up = 0;
  Vel_Down = 0;
}

```

```

void loop()
{
  x = analogRead (0);
ingresa por el pin A0
  lcd.setCursor(10,1);
  if (x < 60) {
    lcd.print ("Right ");
    derecha = 1;
    Vel_Up = 0;
    Vel_Down = 0;
    izquierda = 0;
  }
  else if (x < 200) {
    lcd.print ("Up ");
    Vel_Up = 1;
    Vel_Down = 0;
    izquierda = 0;
    derecha = 0;
  }
  else if (x < 400){
    lcd.print ("Down ");
    Vel_Down = 1;
    Vel_Up = 0;
    izquierda = 0;
    derecha = 0;
  }
  else if (x < 600){
    lcd.print ("Left ");
    izquierda = 1;

```

//Función principal

```

//Inicialización LCD KEYPAD SHIELD 16x2
//Posiciona el cursor en la fila 0, columna 0
//Visualiza la frase "LCD Key Shield"
//Posiciona el cursor en la fila 1, columna 0
//Visualiza la frase "Press Key:");"
//Inicialización del puerto serial a 9600

```

```

//Pin #2 asignado como salida
//Pin #3 asignado como salida
//Asignación de valor "0" a la variable
//Asignación de valor "0" a la variable
//Asignación de valor "0" a la variable
//Asignación de valor "0" a la variable
//Asignación de valor "0" a la variable
//Asignación de valor "0" a la variable

```

//Función ciclica

```

//Lee el valor analogico del voltaje que

```

```

//Posiciona el cursor en la fila 1, columna 10
//Condiciona IF x es menor a 60
//Visualiza la frase "Right"
//Asignación de valor "1" a la variable
//Asignación de valor "0" a la variable
//Asignación de valor "0" a la variable
//Asignación de valor "0" a la variable

```

```

//Condiciona IF x es menor a 200
//Visualiza la frase "Up"
//Asignación de valor "1" a la variable
//Asignación de valor "0" a la variable
//Asignación de valor "0" a la variable
//Asignación de valor "0" a la variable

```

```

//Condiciona IF x es menor a 400
//Visualiza la frase "Down"
//Asignación de valor "1" a la variable
//Asignación de valor "0" a la variable
//Asignación de valor "0" a la variable
//Asignación de valor "0" a la variable

```

```

//Condiciona IF x es menor a 600
//Visualiza la frase "Left"
//Asignación de valor "1" a la variable

```



```

derecha = 0; //Asignación de valor "0" a la variable
Vel_Down = 0; //Asignación de valor "0" a la variable
Vel_Up = 0; //Asignación de valor "0" a la variable
}
else if (x < 800){ //Condicional IF x es menor a 800
  lcd.print ("Select"); //Visualiza la frase "Select"
  habilitador = 1; //Asignación de valor "1" a la variable
}

```

///// SELECCIÓN DE MOVIMIENTOS DEL MOTOR /////

```

if (derecha == 1 && habilitador == 1) { //Condicional IF derecha y habilitador tienen
el valor de 1
  lcd.print ("Right OK "); //Visualiza la frase "Right OK"
  derecha = 0; //Asignación de valor "0" a la variable
  habilitador = 0; //Asignación de valor "0" a la variable

  digitalWrite(DIR, HIGH); //Salida pin #3 puesta en "Alto"
  for (int i = 0; i<1000; i++)
  {
    digitalWrite(STEP, HIGH); //Salida pin #2 puesta en "Alto"
    delay (a); //Detención del programa por un tiempo "a"
    digitalWrite(STEP, LOW); //Salida pin #2 puesta en "Bajo"
    delay(a); //Detención del programa por un tiempo "a"
  }
}
else if (Vel_Up == 1 && habilitador == 1) { //Condicional ELSE IF Vel Up y habilitador
tienen el valor de 1
  lcd.print ("Vel_Up OK "); //Visualiza la frase "Vel Up_OK"
  Vel_Up = 0; //Asignación de valor "0" a la variable
  habilitador = 0; //Asignación de valor "0" a la variable
  if(a >= 1) //Condicional IF a es mayor o igual a 1
  {
    a = a-1; //Toma el valor de a y réstele 1
  }
  else
  {
    a = 10; //La variable "a" toma el valor de 10
  }
}
else if (Vel_Down == 1 && habilitador == 1){ //Condicional ELSE IF Vel Down y
hanbilitador tienen el valor de 1
  lcd.print ("Vel_Down OK "); //Visualiza la frase "Vel Down OK"
  Vel_Down = 0; //Asignación de valor "0" a la variable
  habilitador = 0; //Asignación de valor "0" a la variable
  if(a <= 10) //Condicional IF a es menor o igual a 10
  {
    a = a+1; //Toma el valor de a y sumele 1
  }
}

```

```

else
{
a = 1; //La variable "a" toma el valor de 1
}
}
else if (izquierda == 1 && habilitador == 1){ //Condicional ELSE IF izquierda y
hanbilitador tienen el valor de 1
lcd.print ("Left OK ");
izquierda = 0; //Asignación de valor "0" a la variable
habilitador = 0; //Asignación de valor "0" a la variable

digitalWrite(DIR, LOW); //Salida pin #3 puesta en "Bajo"
for (int i = 0; i<1000; i++) //Inicio ciclo FOR
{
digitalWrite(STEP, HIGH); //Salida pin #2 puesta en "Alto"
delay (a); //Detención del programa por un tiempo "a"
digitalWrite(STEP, LOW); //Salida pin #2 puesta en "Bajo"
delay(a); //Detención del programa por un tiempo "a"
}
}
else if (x < 800){ //Condicional IF x es menor a 800
lcd.print ("Select"); //Visualiza la frase "Select"
habilitador = 0; //Asignación de valor "0" a la variable
}

Serial.println(a); //Visualización en monitor serial de Arduino
}

```

8.6 INTERFAZ GRÁFICA

Para realizar los ensayos de micro abrasión se diseña una interfaz gráfica (Figura 48) con ayuda del entorno de desarrollo de Software MIT app inventor 2, el cual tiene las herramientas suficientes que permiten desarrollar una aplicación sencilla de usar, para el usuario, a continuación, se muestra la interfaz desarrollada.

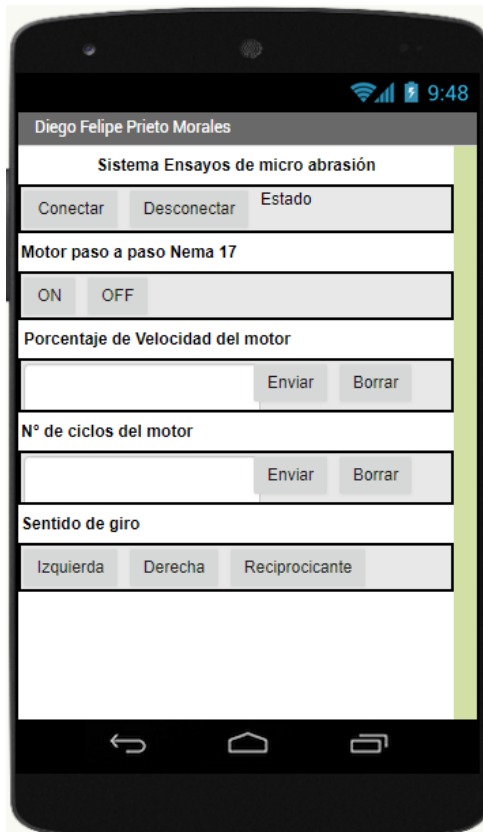


Figura 48. Interfaz gráfica para la aplicación de ensayos de micro abrasión. Fuente propia

Para el desarrollo de la aplicación se usa una programación por medio de bloques (Figura 49), la cual es muy interactiva y permite realizar múltiples tareas, cuando cada uno de los botones de la interfaz es pulsado. A continuación, se muestra la programación por bloques realizada.



Figura 49. Programación por bloques de la interfaz gráfica desarrollada app Inventor 2. Fuente propia

De la figura anterior se tiene que inicialmente en la app se debe hacer una conexión por medio de Bluetooth con otro dispositivo, que en nuestro caso es el Arduino Nano, que se conecta con ayuda del módulo Bluetooth HC-05. Una vez establecida la conexión Bluetooth se procede a manipular cada uno de los botones de la interfaz que permiten controlar el motor NEMA 17, para lo cual, cada botón envía una letra específica, que recibirá el receptor (Arduino Nano) que ejecutará una determinada acción dependiendo de la letra que llegue. A continuación, se muestra en la tabla 3 con el botón y la acción que realiza.

<i>Botón</i>	<i>Acción</i>
Conectar	Busca dispositivos Bluetooth disponibles para conectarse
Desconectar	Finaliza la conexión Bluetooth
Motor Nema 17 ON	Envía carácter "A"
Motor Nema 17 OFF	Envía carácter "B"
Velocidad ENVIAR	Envía carácter "C" y a continuación la cadena de caracteres que se encuentra en el TextBox Velocidad
Velocidad BORRAR	Limpia caracteres escritos en TextBox de velocidad
# Ciclos ENVIAR	Envía carácter "G" y a continuación la cadena de caracteres que se encuentra en el TextBox # ciclos
# Ciclos BORRAR	Limpia caracteres escritos en TextBox de # de ciclos
TextBox Velocidad	Escribir dato de porcentaje de velocidad del motor
TextBox Ciclos	Escribir dato de # de ciclos del motor
Sentido de giro IZQUIERDA	Envía carácter "D"
Sentido de giro DERECHA	Envía carácter "E"
Sentido de giro RECIPROCANTE	Envía carácter "F"

*Tabla 3. Función de cada uno de los botones y TextBox de la interfaz desarrollada.
Fuente propia*

A partir de los datos generados se realiza un código en el software ARDUINO, que permite controlar el motor en función de los caracteres que recibe por medio del módulo Bluetooth, a continuación, se muestra el código generado.

////////// ENSAYOS DE MICROABRASIÓN//////////

//Declaración de librerías para el programa

```

#include <LiquidCrystal.h>                                Uso de función para usar la LCD KEYPAD
LiquidCrystal lcd(8,9,4,5,6,7);                          //Inicialización de pines para la LCD
KEYPAD
//Declaración de variables de control y/o lectura

char valor;                                              //Crea variable tipo char "valor"
String estado;                                          //Crea variable tipo string "estado"
String estado1;                                         //Crea variable tipo string "estado1"
float a =5;                                             //Crea variable tipo flotante "a" y le asigna el
valor 5

float MotorVel;                                         //Crea variable tipo flotante "MotorVel"
float MotorCiclos;                                     //Crea variable tipo flotante "MotorCiclos1"
bool MotorOn = 0;                                       //Crea variable tipo bool "MotorOn" y se le
asigna el valor 0
bool MotorOff = 0;                                     //Crea variable tipo bool "MotorOff" y se le
asigna el valor 0
bool Velocidad = 0;                                    //Crea variable tipo bool "Velocidad" y se le
asigna el valor 0
bool Ciclos = 0;                                       //Crea variable tipo bool "Ciclos" y se le
asigna el valor 0
bool MotorIzq = 0;                                     //Crea variable tipo bool "MotorIzq" y se le
asigna el valor 0
bool MotorDer = 0;                                     //Crea variable tipo bool "MotorDer" y se le
asigna el valor 0
bool MotorReciprocicante = 0;                         //Crea variable tipo bool
"MotorReciprocicante" y se le asigna el valor 0
bool Error = 0;                                        //Crea variable tipo bool "Error" y se le
asigna el valor 0
bool CiclosLCD = 0;                                    //Crea variable tipo bool "CiclosLCD" y se le
asigna el valor 0
bool VelLCD = 0;                                       //Crea variable tipo bool "VelLCD" y se le
asigna el valor 0

#define STEP 2                                          //Asigna la palabra STEP al pin #2
#define DIR 3                                          //Asigna la palabra DIR al pin #3

void setup() {                                         //Función principal

    lcd.begin(16, 2);                                  //Inicializamos la pantalla LCD
    lcd.setCursor(3,0);                               //Posiciona el cursor en fila 0, columna 3.

```

```

    lcd.print("ENSAYO DE");
    lcd.setCursor(1,1);
    lcd.print("MICRO-ABRASION");
    Serial.begin(9600);
    pinMode(STEP, OUTPUT);
    pinMode(DIR, OUTPUT);
}

void loop() {

    if (Serial.available())
disponible
    {
        valor = Serial.read();
        switch (valor)
        {
            case 'A':
                MotorOn = 1;
                MotorOff = 0;
                lcd.clear();
mostrando la pantalla LCD
                funcion_motor();
realiza el motor
                break;

            case 'B':
                MotorOff = 1;
                MotorOn = 0;
                funcion_motor();
realiza el motor
                break;

            case 'C':
                Velocidad = 1;
                VelLCD = 1;
                CiclosLCD = 0;
                pantalla_LCD();
en la pantalla LCD
                MotorVel = convertStringtoFloat_C(estado1);//Llama la función que convierte la
cadena de caracteres que viene de la interfaz a tipo flotante
                funcion_motor();
realiza el motor
                break;

            case 'D':
                MotorIzq = 1;
                MotorDer = 0;
                MotorReciprocicante = 0;

```

```

//Visualiza la frase "ENSAYO DE"

//Visualiza la frase "MICRO-ABRASION"
//Inicializamos puerto serial a 9600 baudios
//Definición del Pin #2 como salida
//Definición del Pin #3 como salida

//Función ciclica

//Si el puerto serie (Bluetooth) está

//Lee el dato entrante vía Bluetooth HC-05
//Función Switch-Case

//Asignación de valor "1" a la variable
//Asignación de valor "0" a la variable
//Borra cualquier mensaje que esté

//Llama la función que decide qué acción

//Fin caso A

//Asignación de valor "1" a la variable
//Asignación de valor "0" a la variable
//Llama la función que decide qué acción

//Fin caso B

//Asignación de valor "1" a la variable
//Asignación de valor "1" a la variable
//Asignación de valor "0" a la variable
//Llama la función que muestra el mensaje

//Llama la función que decide qué acción

//Fin caso C

//Asignación de valor "1" a la variable
//Asignación de valor "0" a la variable
//Asignación de valor "0" a la variable

```

```

funcion_motor(); //Llama la función que decide qué acción
realizará el motor
break; //Fin caso D

case 'E':
MotorDer = 1; //Asignación de valor "1" a la variable
MotorIzq = 0; //Asignación de valor "0" a la variable
MotorReciprocicante = 0; //Asignación de valor "0" a la variable
funcion_motor(); //Llama la función que decide qué acción realiza el
motor
break; //Fin caso E

case 'F':
MotorReciprocicante = 1; //Asignación de valor "1" a la variable
MotorIzq = 0; //Asignación de valor "0" a la variable
MotorIzq = 0; //Asignación de valor "0" a la variable
funcion_motor(); //Llama la función que decide qué acción
realizará el motor
break; //Fin caso F

case 'G':
Ciclos = 1; //Asignación de valor "1" a la variable
CiclosLCD = 1; //Asignación de valor "1" a la variable
VelLCD = 0; //Asignación de valor "0" a la variable
pantalla_LCD(); //Llama la función que muestra el mensaje
en la pantalla LCD
MotorCiclos = convertStringtoFloat_G(estado1); //Llama la función que convierte la
cadena de caracteres que viene de la interfaz a tipo flotante
funcion_motor(); //Llama la función que decide qué acción
realizará el motor
break; //Fin caso G

default:
Error = 1; //Asignación de valor "1" a la variable
break; //Fin función instrucción Switch-case
}
}
}

void funcion_motor() //Inicio función motor
{
if (MotorOn == 1 && MotorOff == 0 && MotorIzq == 1 && MotorDer == 0 && Velocidad
==1 && Ciclos == 1 && MotorReciprocicante == 0)//Sentido de giro hacia la izquierda
{
Serial.println("YES"); //Monitor serial visualiza "YES"
digitalWrite(DIR, HIGH); //Salida pin #3 puesta en "Alto"
a = a*MotorVel/100;
for (int i = 0; i < 200*MotorCiclos; i++)//Inicio ciclo FOR

```



```

    {
        digitalWrite(STEP, HIGH); //Salida pin #2 puesta en "Alto"
        delay (a); //Detención del programa por un tiempo "a"
        digitalWrite(STEP, LOW); //Salida pin #2 puesta en "Bajo"
        delay(a); //Detención del programa por un tiempo "a"
    }
    MotorOn = 0; //Asignación de valor "0" a la variable
}
else if (MotorOn == 1 && MotorOff == 0 && MotorIzq == 0 && MotorDer == 1 &&
Velocidad ==1 && Ciclos == 1 && MotorReciprocicante == 0)//Sentido de giro hacia la
derecha
{
    digitalWrite(DIR, LOW); //Salida pin #3 puesta en "Bajo"
    a = a*MotorVel/100;
    for (int i = 0; i < 200*MotorCiclos; i++) //Inicio ciclo FOR
    {
        digitalWrite(STEP, HIGH); //Salida pin #2 puesta en "Alto"
        delay (a); //Detención del programa por un tiempo "a"
        digitalWrite(STEP, LOW); //Salida pin #2 puesta en "Bajo"
        delay(a); //Detención del programa por un tiempo "a"
    }
    MotorOn = 0; //Asignación de valor "0" a la variable
}
else if (MotorOn == 1 && MotorOff == 0 && MotorIzq == 0 && MotorDer == 0 &&
Velocidad ==1 && Ciclos == 1 && MotorReciprocicante == 1)//Giro recíprocante
{
    a = a*MotorVel/100;

    for(int j = 0; j <=MotorCiclos; j++) //Inicio ciclo FOR
    {
        digitalWrite(DIR, HIGH); //Salida pin #3 puesta en "Alto"
        for (int i = 0; i < 200; i++) //Inicio ciclo FOR

        digitalWrite(STEP, HIGH); //Salida pin #2 puesta en "Alto"
        delay (a); //Detención del programa por un tiempo "a"
        digitalWrite(STEP, LOW); //Salida pin #2 puesta en "Bajo"
        delay(a); //Detención del programa por un tiempo "a"
    }

    digitalWrite(DIR, LOW); //Salida pin #3 puesta en "Bajo"
    for (int i = 0; i < 200; i++) //Inicio ciclo FOR
    {
        digitalWrite(STEP, HIGH); //Salida pin #2 puesta en "Alto"
        delay (a); //Detención del programa por un tiempo "a"
        digitalWrite(STEP, LOW); //Salida pin #2 puesta en "Bajo"
        delay(a); //Detención del programa por un tiempo "a"
    }
}
MotorOn = 0; //Asignación de valor "0" a la variable

```

```

    }
    else
    {
        digitalWrite(STEP, LOW);           //Salida pin #2 puesta en "Bajo"
    }
}

float convertStringtoFloat_C(String estado1) // Inicio función convertStringtoFloat_C
{
    char cadena[estado1.length()+1];      //Se verifica que la variable estado1 no esté
vacía
    estado1.toCharArray(cadena, estado1.length()+1); //Se guardan los datos encontrados
en la variable tipo char cadena
    MotorVel = atof(cadena);              //Convierte la variable string cadena a
flotante y la guarda en la variable MotorVel
    return MotorVel;                      //Retorna el valor de la variable MotorVel a la
función cíclica.
}

float convertStringtoFloat_G(String estado) // Inicio función convertStringtoFloat_G
{
    char cadena[estado1.length()+1];      //Se verifica que la variable estado1 no esté
vacía
    estado1.toCharArray(cadena, estado1.length()+1); //Se guardan los datos encontrados
en la variable tipo char cadena
    MotorCiclos = atof(cadena);           //Convierte la variable string cadena a
flotante y la guarda en la variable MotorCiclos
    return MotorCiclos;                  //Retorna el valor de la variable MotorCiclos
a la función cíclica.
}

void pantalla_LCD()                      //Inicio función pantalla LCD
{
    delay(30);                            //Detención del programa por 30m Seg
    while (Serial.available())             //Mientras la comunicación serial este
disponible ejecute las siguientes instrucciones
    {
        char c = Serial.read();           //Lee el dato entrante y lo almacena en una
variable tipo char
        estado += c;                      //Crea una cadena tipo String con los datos
entrantes
    }

    if (estado.length() > 0 && VelLCD == 1) //Se verifica que la cadena tipo String tenga
un largo mayor a cero
    {

```

```

    lcd.setCursor(0,0);
0 en la pantalla LCD
    lcd.print("%Vel:");
    lcd.setCursor(0,1);
0 en la pantalla LCD
    lcd.print("Ciclos:");
    lcd.setCursor(5, 0);
5 en la pantalla LCD
    lcd.print(estado);
    estado1 = estado;
"estado1"
    estado = "";
nuevos datos

}
if (estado.length() > 0 && CiclosLCD == 1) //Se verifica que la cadena tipo String tenga
un largo mayor a cero
{

    lcd.setCursor(7, 1);
7 en la pantalla LCD
    lcd.print(estado);
    estado1 = estado;
    estado = "";
nuevos datos

}
}

```

//Posiciona el cursor en la Fila 0 y Columna

//Visualiza la palabra "Vel:"

//Posiciona el cursor en la Fila 1 y Columna

//Visualiza la palabra "Ciclos:"

//Posiciona el cursor en la Fila 0 y Columna

//Muestra el mensaje en la pantalla LCD

//Asigna los caracteres de "estado" a

//Limpia la variable para posteriormente leer

//Posiciona el cursor en la Fila 1 y Columna

//Muestra el mensaje en la pantalla LCD

//Limpia la variable para posteriormente leer

A partir del código generado anteriormente, se tiene que con los diferentes caracteres que llegan de la interfaz gráfica, se habilitan o no diferentes "Centinelas", los cuales posteriormente se evalúan por medio de instrucciones "IF" "ELSE", donde si se cumplen algunas de las condiciones, el motor ejecutara una acción determinada.

8.7 ENSAYOS DE DESGASTE

Los ensayos se realizan con el equipo actualizado, el cual consta de un sistema de sujeción para la probeta acoplado a un brazo de palanca, el cual rota sobre su pivote controlando la carga ejercida sobre la probeta, al entrar en contacto con la esfera, por medio del ajuste de un peso muerto y un contrapeso. Para determinar la carga ejercida por el peso muerto y el contra peso se utiliza un dinamómetro.

La esfera esta acoplada entre dos ejes coaxiales, uno de los cuales esta soportado sobre un rodamiento y es impulsado por un motor paso a paso Nema 17, con el propósito de garantizar la velocidad y la cantidad exacta de grados que debe

recorrer la esfera según sea el ensayo, mientras que el otro tiene un sistema tipo embolo, para ejercer una fuerza entre la esfera y el otro eje para que esta siempre este en una única posición.

Se realizaron 2 tipos de ensayos sobre la muestra, en primer lugar, solo se llevaron a cabo pruebas donde la esfera tiene un único sentido de giro, variando la velocidad del ensayo; Seguidamente se realizan ensayos con giro recíprocante con variaciones en la velocidad y el ángulo de giro de la esfera.

Para realizar los ensayos, cada probeta se pulió y se limpió en un equipo de ultrasonido marca BRANSON 200, sumergiéndole completamente en alcohol por cinco minutos, luego se seca y se procede a realizar el montaje en el sistema. Los parámetros del ensayo se deben ajustar, como se menciona a continuación.

- ✓ Ajuste de la carga aplicada mediante el desplazamiento del peso muerto y el contrapeso mientras se mide la fuerza con un dinamómetro, para este caso se ajustó una carga constante de 2 N asegurando las masas con tuercas.
- ✓ Posicionamiento de la esfera en el eje conductor seguido de su ajuste mediante el movimiento del eje de apoyo.
- ✓ Sujeción de la probeta al sistema, con la ayuda de una pieza de sujeción realizada en impresión 3D.
- ✓ Se baja el brazo de palanca para que la muestra entre en contacto suavemente con la esfera.
- ✓ Mediante la interfaz con el usuario se establece el tiempo del ensayo, la velocidad de la esfera y si tiene giro normal o recíprocante.
- ✓ Finalmente, se ponen en marcha el equipo y cuando termina la prueba se extrae la probeta cuidadosamente.
- ✓ Al finalizar el ensayo se limpia la esfera y la muestra nuevamente, se examinan las huellas del desgaste mediante un microscopio electrónico de barrido (SEM) para su respectivo análisis.

8.7.1 ENSAYOS SENTIDO UNICO DE GIRO EN SECO Y CON GIRO RECIPROCICANTE EN SECO

Para la realización de los ensayos se deben tener en cuenta parámetros como la velocidad de la esfera que está en contacto con la muestra, si el ensayo es con un único sentido de giro o es con giro recíprocante con variaciones en el ángulo recorrido y por último la carga que se aplica al sistema.

Para los ensayos se determinaron dos velocidades de giro de la esfera, siendo una de estas la velocidad de marcha normal de una persona, que es de alrededor de 60 RPM, mientras que la segunda velocidad se estimo para que fuera del doble de la primera.[52] [53]

Para determinar la carga que se debe aplicar en los ensayos se tiene que en los reemplazos articulares existe una carga normal que recae entre la zona femoral y el componente tibial o acetabular de aproximadamente 2 Newton que es la carga que se utilizara a lo largo de todos los ensayos.[54]

Tanto para los ensayos con giro en un único sentido como para los ensayos con giro recíprocante se tiene que el tiempo de la prueba es de 30 minutos, que el material de la muestra es Acero L 316 y que el material de la esfera que está en contacto con la muestra es Acero AISI 52100. [49]

Para los ensayos con un único sentido de giro se detallan los parámetros del ensayo en la tabla 4.

Especificaciones ensayo de micro abrasión (Desgaste) para sentido único de giro	
Material de la muestra	Acero L 316
Material de la esfera	Acero AISI 52100
Carga normal	2 Newton
Velocidad 1	60 RPM
Velocidad 2	120 RPM
Tiempo del ensayo	30 minutos

Tabla 4. Especificaciones ensayo de micro abrasión para sentido único de giro. Fuente propia

Para los ensayos con diferentes ángulos de giro se tiene que para el análisis de la marcha la cadera puede alcanzar un ángulo de 113° para la flexión y un ángulo de 28° para la extensión, con lo que se define que uno de los ángulos a trabajar será de 113°, que es el ángulo para la flexión; el otro ángulo es la suma de los ángulos para flexión y extensión que es 141°. [31] Seguidamente se tiene que las fuerzas presentes en la cadera actúan sobre un área esférica por dos planos a 76° como se muestra en la figura 50. [7]

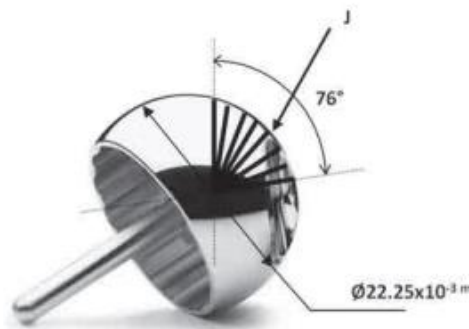


Figura 50. Carga actuante en el hueso esférico.[7]

De lo anterior se tiene que otro ángulo con el cual se realizaran ensayos, será de 76°; finalmente se evaluarán ángulos intermedios entre los mencionados anteriormente, que serán de 45° y 90°.

En la tabla 5 se detallan los parámetros para los ensayos con giro recíprocante.

Especificaciones ensayo de micro abrasión (Desgaste) para diferentes ángulos de giro	
Material de la muestra	Acero L 316
Material de la esfera	Acero AISI 52100
Carga normal	2 Newton
Velocidad 1	60 RPM
Velocidad 2	120 RPM
Ángulo 1	76°
Ángulo 2	141°
Ángulo 3	113°
Ángulo 4	45°
Ángulo 5	90°
Tiempo del ensayo	30 minutos

Tabla 5. Especificaciones ensayo de micro abrasión para diferentes ángulos de giro. Fuente propia

Adicionalmente se tiene que, para cada ensayo, se realizarán 2 pruebas, de donde se obtendrán 2 constantes de desgaste que se promediarán para obtener una constante de desgaste por cada ensayo.

8.7.2 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Inicialmente se tiene como resultado que la actualización del equipo permite generar huellas en la muestra que son bastantes claras y precisas y que permite realizar un análisis de estas.

Una vez realizados todos los ensayos se realiza la medición de las huellas de cada uno de estos por medio de un microscopio electrónico de barrido (SEM), como se muestra en la figura 51.

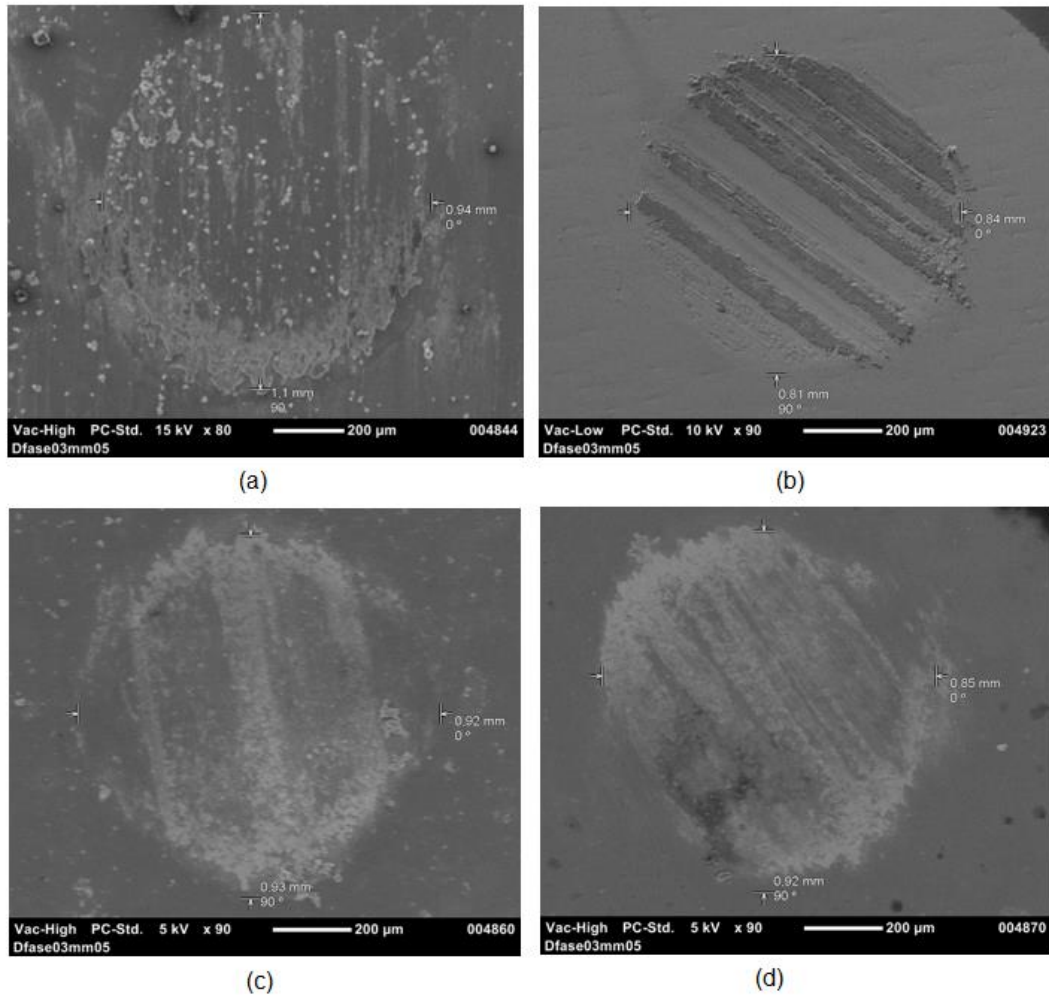


Figura 51. Huellas ensayos de desgaste en seco. (a) Sentido único de giro a 60 RPM. (b) Giro recíprocante a 120 RPM y 90°. (c) Giro recíprocante a 120 RPM y 76°. (d) Giro recíprocante a 120RPM y 113°. Fuente propia

Las mediciones realizadas en cada huella son del diámetro de la huella medidas vertical y horizontalmente, para luego promediar los valores obtenidos.

Una vez promediadas las medidas de las huellas de cada ensayo se procede a calcular el volumen de desgaste de cada ensayo (Ecuación 1), teniendo en cuenta el radio de la esfera que es de $R_{esfera} = 0.0125m$.

Finalmente se debe calcular el coeficiente de desgaste de cada prueba (Ecuación 3), donde se deben usar la distancia de deslizamiento total en cada prueba y el diámetro de la huella medido anteriormente. Como por cada ensayo se realizan 2 pruebas, se obtendrán dos coeficientes de desgaste que serán promediados para obtener un total. En la tabla 6 se tienen las constantes de desgaste obtenidas K_c

en todos los ensayos, en función de la velocidad, el sentido de giro y el ángulo de recorrido. Las unidades del coeficiente de desgaste son $K_c = [m^2/N]$

Ángulos (Grados)	Velocidades	
	60 RPM (1×10^{-8})	120 RPM (1×10^{-8})
45	5.58	2.7
76	4.12	2.91
90	4.94	2.07
113	1.19	2.67
141	4.13	1.81
Giro Continuo	1.23	0.62

Tabla 6. Coeficientes de desgaste de los ensayos realizados a partir de la velocidad, el sentido de giro y el ángulo de recorrido. Fuente propia

A partir de los datos de la tabla anterior, se realiza un gráfico con los datos expuestos.

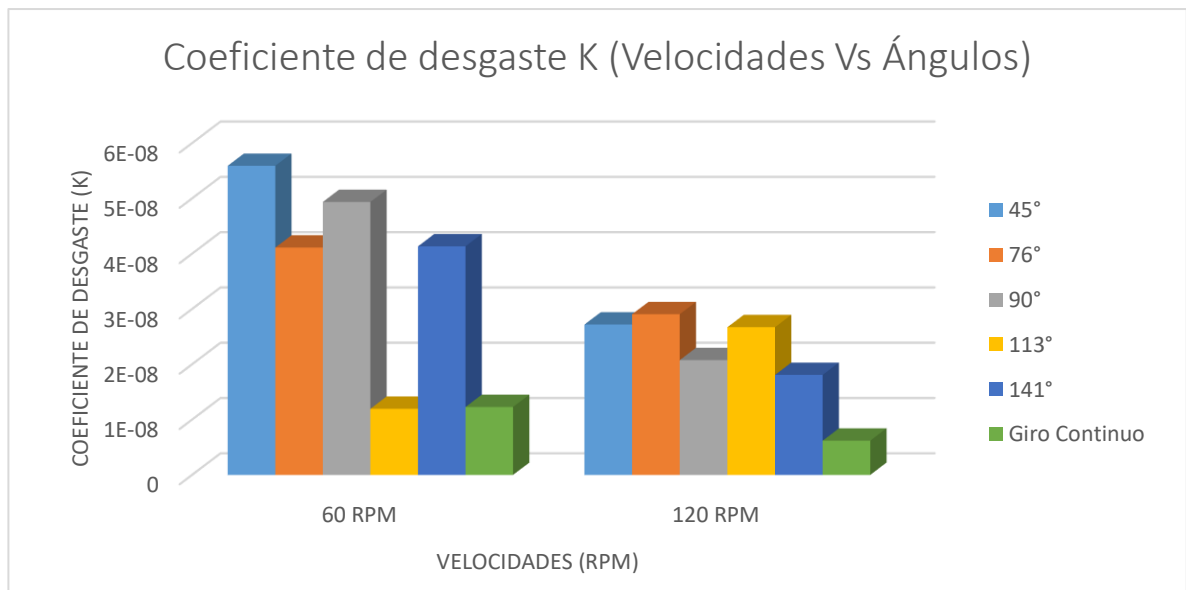


Figura 52. Gráfica del coeficiente de desgaste K (Velocidades Vs Ángulos). Fuente propia.

A partir de la figura 52 se observa que existe una tendencia entre los ensayos realizados, donde en 5 de los 6 casos expuestos se presenta un mayor coeficiente de desgaste a bajas revoluciones (60 RPM).

A continuación, se muestra la distancia de deslizamiento obtenida en cada ensayo, dependiendo de la velocidad de giro del motor, los ángulos recorridos y el giro continuo del motor.

	ÁNGULOS (Grados)					
Velocidad	45	76	90	113	141	Giro Continuo
60 RPM	26.69	35.53	38.27	42.28	45.5	135.01
120 RPM	33.91	49.46	55.04	63.36	71.18	292.17

Tabla 7. Distancia de deslizamiento (metros) en función de los ángulos de recorrido y la velocidad del motor. Fuente propia

A partir de los datos obtenidos en la tabla 7, se realiza un gráfico para analizar las distancias obtenidas en cada ensayo Figura (53).

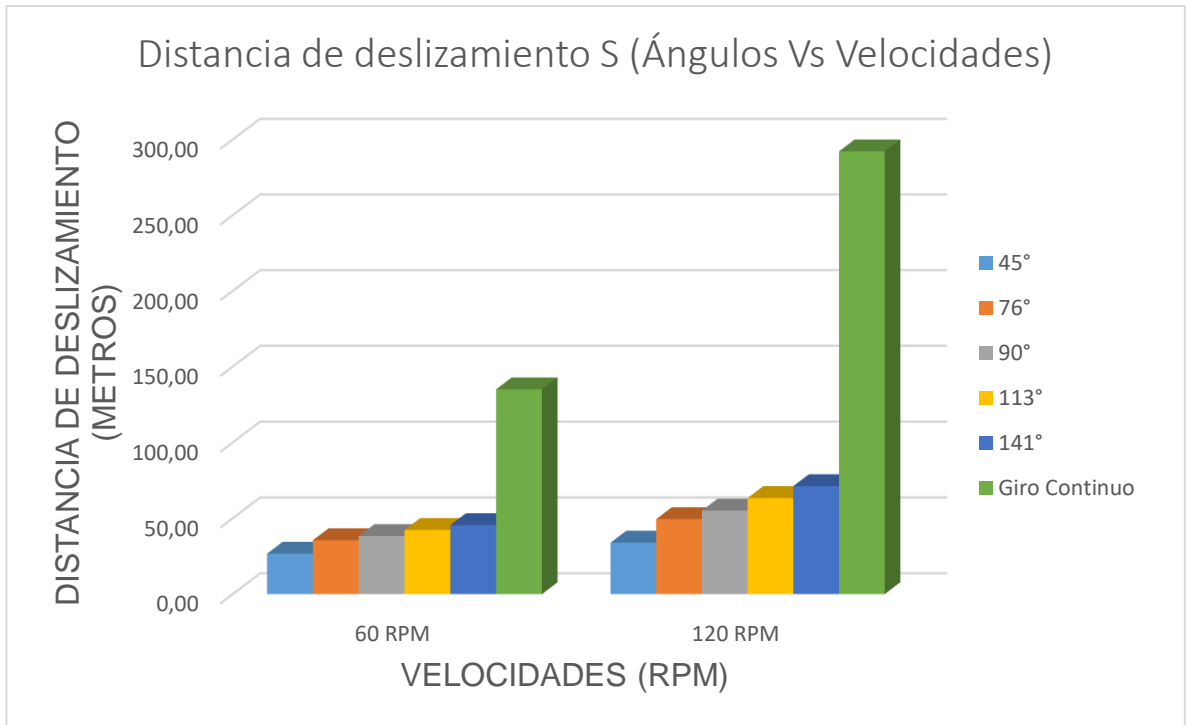


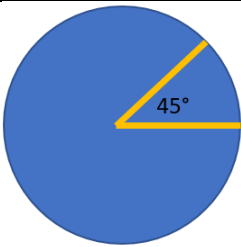
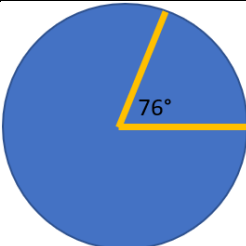
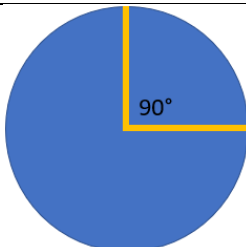
Figura 53. Gráfica distancia de deslizamiento S (Ángulos Vs Velocidades). Fuente propia.

A partir de la figura anterior, se encuentra que a pesar de que todos los ensayos se realizaron con un tiempo de 30 minutos, la distancia de deslizamiento es diferente para cada ensayo, siendo mayor, cuando la esfera gira de forma continua y disminuye progresivamente a medida que el ángulo de recorrido disminuye.

Cuando la esfera gira continuamente el ángulo de recorrido es de 360° y la distancia de deslizamiento se rige por la fórmula del perímetro de una circunferencia (Ecuación 4), multiplicada por la cantidad de ciclos realizados durante el ensayo. Cuando existe un ángulo de recorrido diferente a 360°, se utiliza una relación que determina la longitud de arco recorrida por la esfera en el número de ciclos descritos,

teniendo en cuenta que un ciclo se termina cuando la esfera va en una dirección y se regresa (Ecuación 5).

Al realizar una comparación entre las distancias de deslizamiento (S) y la constante de desgaste (K_c), se tiene que cuando el ensayo se realiza con giro continuo es cuando la distancia de deslizamiento es mayor, pero asimismo es cuando el coeficiente de desgaste (K_c), es menor a los presentados cuando hay giro recíprocante, lo que sugiere que se está generando un mayor desgaste cuando la esfera debe girar en ambas direcciones, ya que el motor debe parar completamente para arrancar a realizar el giro en la dirección contraria (Tabla 8).

Modos deslizantes	Diagrama	Distancia de deslizamiento por ciclo (mm)	Constante de desgaste (K_c) [m^2/N]	
			60 (RPM)	120 (RPM)
Recíprocante 45°		19.63	5.58974E-08	2.71931E-08
Recíprocante 76°		33.16	4.11165E-08	2.90599E-08
Recíprocante 90°		39.26	4.93593E-08	2.07572E-08

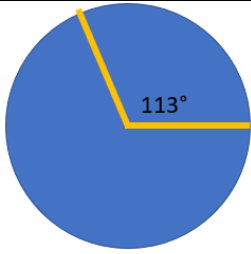
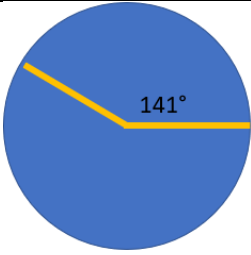

Reciprocante 113°		49.30	1.19597E-08	2.67159E-08
Reciprocante 141°		61.52	4.13362E-08	1.80849E-08
Giro continuo (360°)		78.53	1.22811E-08	6.19363E-09

Tabla 8. Modos deslizantes para ensayos de micro abrasión. Fuente propia.

En los ensayos hechos también se observa que existe una mayor diferencia entre los coeficientes de desgaste a bajas revoluciones, por lo que la incidencia de la velocidad puede llegar a ser un factor determinante en el desgaste de la muestra, así como los grados de recorrido de la esfera ya que el caso donde se presentó el mayor coeficiente de desgaste fue cuando el ángulo de recorrido fue de 45° a bajas revoluciones (60 RPM).

A pesar de haber una diferenciación entre los coeficientes de desgaste del ensayo, todas las muestras tienen evidencia de presentar un desgaste leve, en la figura 54, se muestran 2 de las huellas analizadas.

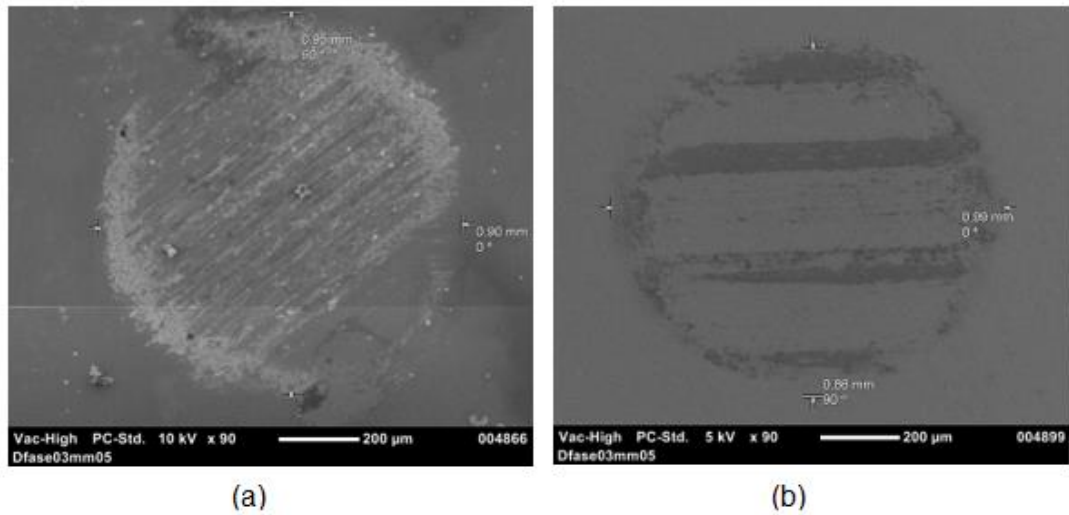


Figura 54. Huellas ensayos de desgaste en seco. (a) Giro recíprocante a 120 RPM y 141°. (b) Giro recíprocante a 60 RPM y 45°. Fuente propia

El desgaste generalmente se clasifica como leve o severo. La diferenciación se basa en términos de las marcas dejadas o producidas por el desgaste. El desgaste leve, sigue un patrón uniforme de líneas definidas y poco profundas, mientras que cuando hay un desgaste severo, existe una mayor profundidad en las marcas de desgaste y pueden incluso aparecer zonas amorfas.[55]

En la figura 54 se muestra en detalle una huella con patrones que cumplen con la descripción de un desgaste leve, asimismo se observó en detalle una de las muestras para visualizar las marcas dejadas por la esfera (Figura 55).

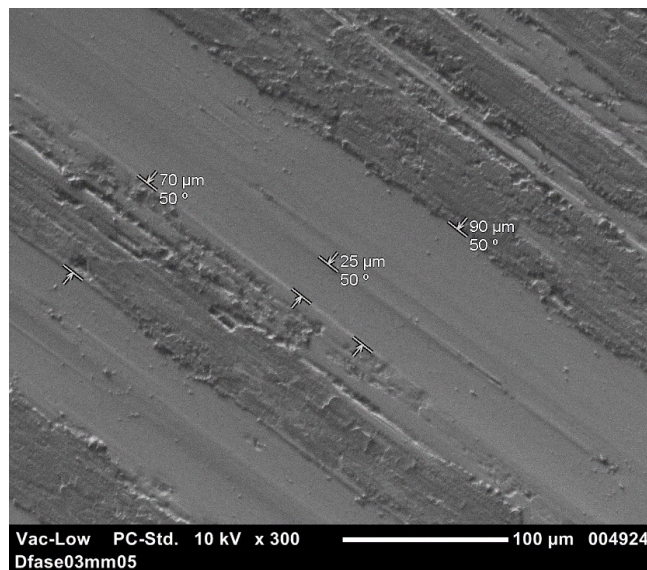


Figura 55. Huella ensayo de desgaste en seco con giro recíprocante a 120RPM y a 90°. Fuente propia.

9 CONCLUSIONES

Para el caso de este proyecto y por medio de las herramientas del diseño moderno, se permitió que el equipo para ensayos de micro abrasión tuviera una actualización que permitirá que el sistema sea aún más versátil y abierto a cambios, ya que con la implementación de los ángulos de recorrido recíprocos, se pueden realizar diferentes ensayos, que permitirán observar el comportamiento de los biomateriales estudiados desde una óptica más allegada a la realidad, pudiendo asemejar los ángulos de giro de una articulación.

Mediante las pruebas se evidenció que el equipo cumple con los requerimientos de desempeño deseado, ya que permitió llevar a cabo ensayos de desgaste, permitiendo obtener huellas más definidas, permitiendo su fácil análisis, en comparación con las huellas que se obtenían antes de la actualización.

Mediante el análisis de las pruebas se evidenció que a pesar de que, en los ensayos con único sentido de giro, existe una mayor distancia de deslizamiento, en comparación a los ensayos con giro recíproco, estos presentan un menor coeficiente de desgaste, lo que se podría llegar a dar debido a que cuando la esfera realiza un cambio en su sentido de giro, se afecta aún más la superficie de la muestra, cosa que no ocurre cuando el ensayo es en un solo sentido de giro. Otro factor importante es la velocidad de giro de los ensayos, ya que cuando los ensayos realizaron a altas revoluciones (120 RPM), el desgaste fue menor en comparación a cuando el ensayo se realizó a bajas revoluciones (60 RPM), con lo que se podría decir que la muestra no presentara un desgaste tan elevado si se mantiene un régimen de velocidades altas.

Adicionalmente en las pruebas realizadas se evidenció que en la mayoría de las pruebas existió una adherencia del material de la esfera (Acero AISI 52100) hacia la muestra, lo que supone que hay un desgaste leve en la muestra.

Finalmente se tiene que, con las pruebas realizadas, se podría llegar a determinar que a medida que el ángulo de contacto de la esfera disminuye, para ensayos recíprocos, el coeficiente de desgaste empieza a aumentar.

10 TRABAJOS A FUTURO

Como trabajos a futuro se plantean investigaciones donde se realicen ensayos en medios abrasivos y con diferentes fluidos de prueba, variando diferentes parámetros (Velocidad, ciclos, sentido de giro, giro recíprocante), para ver su influencia en los mecanismos de desgaste y en los fenómenos corrosivos. Por ejemplo, se plantea trabajar con distintas concentraciones en la mezcla de lactato de Ringer con las partículas de alúmina para observar los diferentes regímenes de desgaste que se presentan. Adicionalmente se plantea realizar los ensayos con mayores tiempos de prueba para poder evidenciar mayores cambios en la muestra analizada y realizar más cantidad de pruebas por cada ensayo para analizar los resultados estadísticamente.

REFERENCIAS

- [1] S. Gómez, Maria Eliana N., «Calidad de Vida. Evolución del Concepto y su influencia en la investigación y la práctica», p. 6.
- [2] «Life expectancy at birth, total (years) | Data», *The World Bank*. [En línea]. Disponible en: <https://data.worldbank.org/indicador/SP.DYN.LE00.IN?end=2016&locations=CO&start=1960&view=chart&year=2016>. [Accedido: 13-mar-2019].
- [3] «¿Cuántos habitantes tendrá el planeta en 2050? ¿Y en 2300?», *BBC News Mundo*. [En línea]. Disponible en: https://www.bbc.com/mundo/noticias/2012/10/121014_poblacion_futuro_habitantes_dp. [Accedido: 13-mar-2019].
- [4] «BBC Mundo - Noticias - Somos 7.000 millones, ¿cuáles son los desafíos?» [En línea]. Disponible en: https://www.bbc.com/mundo/movil/noticias/2011/10/111026_poblacion_informe_am.shtml#sa-link_location=more-story-2&intlink_from_url=https%3A%2F%2Fwww.bbc.com%2Fmundo%2Fnoticias%2F2012%2F10%2F121014_poblacion_futuro_habitantes_dp&intlink_ts=1558643031568&story_slot=1-sa. [Accedido: 23-may-2019].
- [5] M. V. Regí, «Biomateriales para sustitución y reparación de tejidos», p. 12.
- [6] B. D. Ratner, Ed., *Biomaterials science: an introduction to materials in medicine*, 2nd ed. Amsterdam ; Boston: Elsevier Academic Press, 2004.
- [7] R. G. R. Cañizo, L. A. G. García, M. V. Torres, E. A. M. Cruz, y J. M. S. Pineda, «Análisis experimental del desgaste entre UHMWPE y acero inoxidable 316L empleados en la manufactura de prótesis coxofemorales», *Rev. Colomb. Biotecnol.*, vol. 12, n.º 2, pp. 67-85, jul. 2010.
- [8] N. Diomidis, S. Mischler, N. S. More, y M. Roy, «Tribo-electrochemical characterization of metallic biomaterials for total joint replacement», *Acta Biomater.*, vol. 8, n.º 2, pp. 852-859, feb. 2012.
- [9] «Reemplazo total de rodilla (Total Knee Replacement) - OrthoInfo - AAOS». [En línea]. Disponible en: <https://www.orthoinfo.org/es/treatment/reemplazo-total-de-rodilla-total-knee-replacement/>. [Accedido: 08-abr-2019].
- [10] M. Plaza Torres y W. Aperador, «Nuevos materiales para mejorar los niveles de corrosión», *Rev. Cuba. Investig. Bioméd.*, vol. 34, n.º 3, pp. 264-277, sep. 2015.
- [11] D. C. J. Lavernia y D. J. C. Alcerro, «Artroplastia total de rodilla», vol. 13, p. 6, 2008.
- [12] P. J. L. Ávila, «EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE Y A LA CORROSIÓN DE ACEROS BAINÍTICOS ALEADOS CON BORO», p. 161.
- [13] J. L. Caballero, N. Sierra Melo, y W. Aperador Chaparro, «Design and construction of a machine for micro-abrasion-corrosion testing in simulated biological environments», *Tecciencia*, vol. 11, n.º 20, pp. 5-18, ene. 2016.

- [14] E. Yacuzzi y F. Martín, «QFD: CONCEPTOS, APLICACIONES Y NUEVOS DESARROLLOS», p. 38.
- [15] «Aceros inoxidables 316 y 316L», NKS. [En línea]. Disponible en: <https://nks.com/es/distribuidor-de-acero-inoxidable/aceros-inoxidables-316/>. [Accedido: 26-may-2019].
- [16] «Uso de biomateriales en medicina regenerativa, aspectos básicos y aplicaciones en el Sistema Nervioso». .
- [17] S. R. Vasco, C. A. V. Isaza, M. L. M. Suaza, J. Z. Giraldo, y M. E. M. Acevedo, *Ingeniería de tejidos y aplicaciones*. Instituto Tecnológico Metropolitano, 2016.
- [18] J. Y. Wong, J. D. Bronzino, y D. R. Peterson, *Biomaterials: Principles and Practices*. CRC Press, 2012.
- [19] A. Argüelles, «Ciencia de los Materiales. Aplicaciones de interés y antecedentes históricos en el país.», p. 87.
- [20] T. J. Keane y S. F. Badylak, «Biomaterials for tissue engineering applications», *Semin. Pediatr. Surg.*, vol. 23, n.º 3, pp. 112-118, jun. 2014.
- [21] S. E. Rodil, «Modificación superficial de biomateriales metálicos», *Rev. Latinoam. Metal. Mater.*, vol. 29, n.º 2, pp. 67-83, dic. 2009.
- [22] J. Lario-Femenía, A. Amigó Mata, A. Vicente-Escuder, F. Segovia-López, y V. Amigó, «Desarrollo de las aleaciones de titanio y tratamientos superficiales para incrementar la vida útil de los implantes», en *Revista de Metalurgia*, 2016, vol. 52, pp. e084-e096.
- [23] S. Teoh, «Fatigue of biomaterials: a review», *Int. J. Fatigue*, vol. 22, n.º 10, pp. 825-837, nov. 2000.
- [24] I. Pimienta Concepción, Y. González Reyes, M. T. Díaz Armas, Y. Rodríguez Moldón, y R. Rodríguez Duque, «Cirugías de reemplazo articular en pacientes jóvenes», *Rev. Cuba. Reumatol.*, vol. 19, n.º 2, pp. 79-86, ago. 2017.
- [25] G. B. Stachowiak, G. W. Stachowiak, y J. M. Brandt, «Ball-cratering abrasion tests with large abrasive particles», *Tribol. Int.*, vol. 39, n.º 1, pp. 1-11, ene. 2006.
- [26] M. H. Staia, c. E. Enriquez, E. S. Puchi, D. B. Lewis, y M. Jeandin, «Application of Ball Cratering Method to Study Abrasive Wear», *Surf. Eng.*, vol. 14, n.º 1, pp. 49-54, jul. 2013.
- [27] K. L. Rutherford y I. M. Hutchings, «A micro-abrasive wear test, with particular application to coated systems», *Surf. Coat. Technol.*, vol. 79, n.º 1, pp. 231-239, feb. 1996.
- [28] «Article Catalogues». [En línea]. Disponible en: https://serials.unibo.it/cgi-ser/start/en/spogli/dfs.tcl?prog_art=659688&language=ENGLISH&view=articoli. [Accedido: 24-may-2019].
- [29] Á. Bernabé, «La biomecánica de la cadera. | TDC». .
- [30] E. Egozcue, «BIOMECÁNICA DE LA EXTREMIDAD INFERIOR», p. 14, 2009.
- [31] D. C. Boone y S. P. Azen, «Normal range of motion of joints in male subjects.», *J. Bone Jt. Surg.*, vol. 61, n.º 5, pp. 756-759, jul. 1979.
- [32] C. A. Estrada, «CONSTRUCCION DE UNA MAQUINA PARA ENSAYO EN DESGASTE ABRASIVO; SEGUN NORMA TECNICA ASTM G-65», n.º 41, p. 7.

- [33] Y. Yan, *Bio-Tribocorrosion in Biomaterials and Medical Implants*. Elsevier, 2013.
- [34] K. Sadiq, R. A. Black, y M. M. Stack, «Bio-tribocorrosion mechanisms in orthopaedic devices: Mapping the micro-abrasion–corrosion behaviour of a simulated CoCrMo hip replacement in calf serum solution», *Wear*, vol. 316, n.º 1, pp. 58-69, ago. 2014.
- [35] M. Fellah, M. Labaiz, O. Assala, L. Dekhil, N. Zerniz, y A. Iost, «Tribological behavior of biomaterial for total hip prosthesis», *Matér. Tech.*, vol. 102, n.º 6-7, p. 601, 2014.
- [36] L. Schwartzmann, «CALIDAD DE VIDA RELACIONADA CON LA SALUD: ASPECTOS CONCEPTUALES», *Cienc. Enferm.*, vol. 9, n.º 2, pp. 09-21, dic. 2003.
- [37] J. A. Fernández-López, M. Fernández-Fidalgo, y A. Cieza, «Los conceptos de calidad de vida, salud y bienestar analizados desde la perspectiva de la Clasificación Internacional del Funcionamiento (CIF)», *Rev. Esp. Salud Pública*, vol. 84, n.º 2, pp. 169-184, abr. 2010.
- [38] «Calidad de vida en medicina: un problema por resolver». [En línea]. Disponible en: <http://sisbib.unmsm.edu.pe/bvrevistas/spmi/v14n1/editorial.htm>. [Accedido: 05-abr-2019].
- [39] «Esperanza de vida en el mundo subió 5,5 años desde 2000: Organización Mundial de Salud», *ELESPECTADOR.COM*, 05-abr-2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.elespectador.com/noticias/salud/esperanza-de-vida-en-el-mundo-subio-55-anos-desde-2000-organizacion-mundial-de-salud-articulo-848837>. [Accedido: 05-abr-2019].
- [40] «“Tratamientos con biomateriales revolucionan la medicina ortopédica”». [En línea]. Disponible en: <https://www.elheraldo.co/entretenimiento/tratamientos-con-biomateriales-revolucionan-la-medicina-ortopedica-192045>. [Accedido: 05-abr-2019].
- [41] «Colágeno bovino para tratar lesiones de cartílago». [En línea]. Disponible en: <http://www.dicyt.com/noticias/colageno-bovino-para-tratar-lesiones-de-cartilago>. [Accedido: 05-abr-2019].
- [42] «Prótesis de rodilla», *Sanitas*. [En línea]. Disponible en: [//www.sanitas.es/sanitas/seguros/es/particulares/biblioteca-de-salud/prevencion-salud/protesis-rodilla.html](http://www.sanitas.es/sanitas/seguros/es/particulares/biblioteca-de-salud/prevencion-salud/protesis-rodilla.html). [Accedido: 08-abr-2019].
- [43] «En Colombia se realizan 10.000 reemplazos de cadera o rodilla al año», *ELESPECTADOR.COM*, 02-feb-2009. [En línea]. Disponible en: <https://www.elespectador.com/noticias/salud/articulo114216-colombia-se-realizan-10000-reemplazos-de-cadera-o-rodilla-al-ano>. [Accedido: 08-abr-2019].
- [44] L. Sampén A., «Pautas para el diseño de partes metálicas resistentes al desgaste», *Ind. Data*, vol. 6, n.º 2, 2003.
- [45] «(18) (PDF) A review of micro-scale abrasion testing», *ResearchGate*. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/231036682_A_review_of_micro-scale_abrasion_testing. [Accedido: 12-mar-2019].

- [46] «(18) Theory and Application of a MicroScale Abrasive Wear Test», *ResearchGate*. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/249958520_Theory_and_Application_of_a_MicroScale_Abrasive_Wear_Test. [Accedido: 13-mar-2019].
- [47] «Ensayo Metrología», *Scribd*. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/288747028/Ensayo-Metrologia>. [Accedido: 15-abr-2019].
- [48] C. Losada, N. Om Tapanes, y J. Rodríguez, «Tribología y lubricación en ensayo de banco», *Cienc. Sum*, vol. 8, n.º 2, 2001.
- [49] M. G. Gee *et al.*, «Ball Cratering or Micro-Abrasion Wear Testing of Coatings», n.º 57, p. 64.
- [50] G. Dieter y L. Schmidt, *Engineering Design*. McGraw-Hill Education, 2009.
- [51] «Arduino desde cero en Español - Capítulo 33 - Paso a paso bipolar y controlador A4988 - YouTube». [En línea]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=u0SG681s8aA>. [Accedido: 16-ago-2019].
- [52] «(13) (PDF) Frequency and velocity of people walking». [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/291793625_Frequency_and_velocity_of_people_walking. [Accedido: 26-sep-2019].
- [53] «Comparison between PEEK and Ti6Al4V concerning micro-scale abrasion wear on dental applications - ScienceDirect». [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1751616115005123#f0010>. [Accedido: 26-sep-2019].
- [54] «Wear Characteristics of Metallic Biomaterials: A Review». [En línea]. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5455551/>. [Accedido: 26-sep-2019].
- [55] P. Pérez-Oviedo y J. Torre-Nieto, «Guía de Diseño Para Calcular el Desgaste Abrasivo Entre Componentes no Lubricados», p. 7.