

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA DE ENSAYO DE TRACCIÓN PARA MÚSCULOS

MICHAEL MAURICIO BONILLA MORA

JULIANA KATERINE LAGOS MERCHAN



UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
BOGOTÁ, D.C

2018

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA DE ENSAYO DE TRACCIÓN PARA MÚSCULOS

MICHAEL MAURICIO BONILLA MORA
JULIANA KATERINE LAGOS MERCHÁN

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO MECATRÓNICO

DIRECTOR

ING. LUIS FRANCISCO NIÑO SIERRA, MSc



UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

BOGOTA, D.C

2018

ACEPTACIÓN

Nota de aceptación

Firma del presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

DEDICATORIA

A nuestros padres, abuelos y hermana, por el apoyo que nos han brindado y el amor que cada día me llena de entusiasmo para seguir haciendo lo que amamos, y esforzándonos por ser mejores ingenieros y mejores personas.

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo agradecemos a Dios por permitirnos culminar esta etapa de nuestras vidas, a nuestras familias y amigos por el apoyo que nos han brindado, a nuestro director el ingeniero Luis Francisco Niño por orientarnos a lo largo del desarrollo del proyecto y a los demás docentes por sus enseñanzas no solo académicas, al ingeniero Milton por colaborarnos compartiendo sus conocimientos de ingeniería con nosotros, y por ultimo a la universidad militar nueva granada por permitirnos ser parte de esta institución y del equipo de ingenieros mecatrónicos.

Contenido

RESUMEN	10
1. INTRODUCCIÓN	11
1.1 Planteamiento del problema	11
1.2 Antecedentes	11
1.3 Objetivos	14
1.3.1 Objetivo General	14
1.3.2 Objetivos Específicos	14
1.4 Justificación.....	14
1.5 Alcance y Delimitación	15
2. MARCO TEÓRICO	16
2.1 Miología	17
2.1.1 Biostática y Biomecánica	19
2.2 Amplificador de instrumentación	20
2.3 Celdas de Carga	20
2.4 Tarjeta de adquisición de datos DAQ 6009	24
3. ACTUADORES LINEALES	27
3.1 Tipos de Actuadores	27
3.2 Características de los Actuadores	27
3.3 Servo Motor SGMPH-04AAE4C	28
4. DISEÑO DE LA MÁQUINA.....	31
4.1 Diseño Mecánico	31
4.2 Diseño del sistema eléctrico:	38
4.2.1 Diseño de la bandeja eléctrica	40
4.3 Diseño del Sistema Electrónico	41
4.3.1 Diseño de la PCB	46
4.4 Interfaz de control.....	48
5. PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS MUSCULARES	53
6. PRUEBAS Y RESULTADOS	56
6.1 Ruptura.....	56
6.2 Fatiga o cizalladura	60
7. CONCLUSIONES	63
TRABAJOS FUTUROS.....	64

BIBLIOGRAFÍA.....	65
Anexos	67

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Probador mecánico para ensayos de tracción uniaxial de la Universidad Nacional Autónoma de México [3]	12
Figura 2. Prensa de pruebas dinámicas en una prueba con el sistema de fijación [7]	13
Figura 3. Organización de un músculo esquelético con su tendón [13]	17
Figura 4. Disposiciones de fibras musculares esqueléticas [14]	18
Figura 5. A, esquema de fibras del tendón; B y C, dirección de las fibras que tiran durante la flexión [13].....	18
Figura 6. Curva de fuerza-velocidad. la potencia del músculo es la fuerza del músculo por la velocidad de contracción [10]	19
Figura 7. amplificador de instrumentación INA 114	20
Figura 8. Diagrama de un Puente de Wheastone [18].....	21
Figura 9. Celda de carga de un solo punto [20]	21
Figura 10. Celda de carga tipo S [21]	22
Figura 11. Celda de carga tipo botón [20]	22
Figura 12. Celda de carga de Tensión y Compresión [22].....	23
Figura 13. Hoja técnica de especificaciones de desempeño de la celda de carga Honeywell modelo 31 mid range	23
Figura 14. Tarjeta de adquisición de datos DAQ 6009	24
Figura 15. especificaciones técnicas de las entradas análogas	25
Figura 16. especificaciones técnicas de las salidas análogas	25
Figura 17. especificaciones técnicas de entradas y salidas digitales	26
Figura 18. niveles lógicos digitales	26
Figura 19. Tabla de comparación de características de los actuadores lineales	27
Figura 20. Especificaciones del motor SGMPH-04AAE4C	28
Figura 21. Amplificador de torque LEGEND SGDG [16]	29
Figura 22. Lista de terminales del amplificador y especificaciones [16]	30
Figura 23. Diagrama de cuerpo libre viga superior de la máquina	31
Figura 24. Diagrama de Esfuerzos Cortantes de la viga superior	32
Figura 25. Diagrama de Momento Flector de la viga superior	33
Figura 26. Área transversal de la viga superior de la estructura.	33
Figura 27. Simulación de fuerzas en la placa superior para obtención de: A, Factor de seguridad; B, desplazamientos	35
Figura 28. Diseño de la mordaza Inferior con sujeción al motor	35
Figura 29. . Simulación de fuerzas en la mordaza inferior para obtener A, Desplazamientos; B, Factor de seguridad	36
Figura 30. Análisis estructural de las barras	36
Figura 31. A, Diseño en CAD de la máquina de ensayo; B, Construcción de la máquina de ensayo	37
Figura 32. Esquema de conexión amplificador de torque SGDG	38
Figura 33. Distribución del tablero eléctrico	41
Figura 34. Esquema de conexión del regulador LM317	43
Figura 35. esquema de conexión reguladores LM7818 y LM7912.....	46
Figura 36. Diseño final de la PCB	47
Figura 37. Diseño de la interfaz de Usuario	49

Figura 38. Selección de Modos de Operación	49
Figura 39. Interfaz de usuario cuando se ingresa en modo manual.....	50
Figura 40. Interfaz de usuario cuando se ingresa en modo ensayo de ruptura	50
Figura 41. Interfaz de usuario cuando se ingresa en modo ensayo de fatiga.....	51
Figura 42. Ejemplo de recopilación de datos en Excel	52
Figura 43. Preparación del miembro inferior torácico de un bovino para estudio muscular, corte superficial del cuero del animal.....	53
Figura 44. Identificación del músculo extensor común de los dedos de la parte distal del miembro torácico del bovino.....	54
Figura 45. Etiqueta para el envase de las muestras de tejidos musculares [29]	54
Figura 46. Músculos preparados para ensayo	55
Figura 47. Montaje del músculo en las mordazas de la máquina de ensayo	55
Figura 48. Respuestas al ensayo de ruptura 1; A, Gráficas de las señales de respuesta; B, Resultado físico del comportamiento del músculo ante la fuerza.....	58
Figura 49. Respuestas al ensayo de ruptura 2; A, Gráficas de las señales de respuesta; B, Resultado físico del comportamiento del músculo ante la fuerza.....	58
Figura 50. Respuestas al ensayo de ruptura 3 en el tendón muscular extensor digital lateral; A, Gráficas de las señales de respuesta; B, Resultado físico del comportamiento del músculo ante la fuerza	59
Figura 51. Respuestas al ensayo de ruptura 4 en el músculo flexor radial del carpo; A, Gráficas de las señales de respuesta; B, Resultado físico del comportamiento del músculo ante la fuerza	60
Figura 52. Gráfica de la señal de salida interrumpida por el final de carrera.....	61
Figura 53. Gráfica de resultados de fatiga 1 en el músculo extensor común de los dedos	61
Figura 54. Gráfica de resultados de fatiga 2	62

RESUMEN

El estudio de las fibras musculares juega un papel importante en el desarrollo de nuevas tecnologías, el movimiento y resistencia generado por los mismo es fuente de bioinspiración, ya que la información obtenida del entorno natural o la comprensión del funcionamiento o propiedades de este tipo de tejidos permite la creación de productos para el humano. En este proyecto se presenta el desarrollo de una máquina de ensayo que permite realizar estudios de fuerza de tracción en los tejidos musculares, se presenta el desarrollo de análisis estructural para el diseño mecánico, cálculos de voltajes y corrientes para el diseño eléctrico y electrónico y una interfaz de usuario que permite al investigador seleccionar dos tipos de pruebas en las fibras, una de ruptura y una de fatiga, se presenta la preparación de las probetas musculares y como debe ser su ubicación en las mordazas, con base en esto se consiguen realizar pruebas en diferentes tipos de músculos para calcular las fuerzas aplicadas en estos.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

El estudio de los tejidos biológicos ha tomado un papel importante en la sociedad, se procura imitar el funcionamiento de los elementos creados por la naturaleza [1]. De esta forma, el análisis de este tipo de materiales genera impacto social, de modo que al conocer su funcionamiento se pueden implementar diferentes mecanismos que generen un comportamiento similar al muscular. Existen probadores mecánicos que permiten estudiar todo tipo de materiales, pero son muy pocos los que se enfocan en el estudio de tejidos musculares, la fuerza que soportan o su desgaste. Es posible con la tecnología actual recrear o reparar músculos, para llegar a este punto se debe hacer un estudio que permita examinar las características físicas de estos. Por todo lo anterior, se plantea el objetivo del proyecto: desarrollar un sistema que permita el estudio de materiales biológicos sometidos a una carga uniaxial.

1.2 Antecedentes

El estudio de materiales en las máquinas de ensayo está orientado a metales y diferentes polímeros compuestos, sin embargo, se han desarrollado trabajos de aplicación de fuerzas en materiales biológicos, de modo que se iniciaron diseños y construcciones de máquinas que permitan analizar el comportamiento de estos últimos. En el trabajo "Probador mecánico para ensayos de tracción uniaxial en materiales suaves y tejidos biológicos", se enfocan en el diseño de un equipo con las capacidades necesarias para realizar ensayos de tracción en materiales suaves y tejidos biológicos. Actualmente este tipo de biomateriales ha presentado un papel muy importante para el desarrollo de productos aplicados a la bioingeniería, por lo tanto, se debe estudiar el comportamiento de estos y posteriormente ser capaces de crear unos con las mismas características. En el desarrollo de dicho proyecto se presenta un diseño mecánico para realizar el estudio de los materiales, se tienen en cuenta los diferentes sensores para analizar el comportamiento y se hace uso de la herramienta LABVIEW para el control y diseño de interfaz al usuario.

La función de los músculos es proporcionar fuerza y protección al esqueleto, distribuyendo las cargas y absorbiendo los impactos, permiten mayor movilidad de los huesos y mantiene la temperatura corporal; cuando este conjunto de músculos no funciona correctamente se provocan molestias o lesiones. La unidad estructural de un músculo esquelético es la fibra muscular, esta es una célula en forma de cilindro alargada con cientos de núcleos en su interior, tienen un espesor aproximado de 10 a 100 μ m con una longitud que va desde 1 a 30 cm en el cuerpo humano. [2]

Dentro de los sistemas ya trabajados en el área de máquinas de ensayo para materiales biológicos se

encuentra: “Desarrollo tecnológico para evaluar material usado en válvulas cardíacas”, en la universidad nacional autónoma de México se han realizado avances tecnológicos para bioimplantes de válvulas cardíacas, para ello se aplica un sistema opto mecánico que permite la caracterización de materiales suaves y tejidos biológicos, se han desarrollado válvulas cardíacas a partir del tejido del pericardio bovino, además, esta máquina evalúa la respuesta mecánica de la muestra, permitiendo mayor calidad en la selección del material para mejorar el desempeño y la durabilidad de estas válvulas. [3]

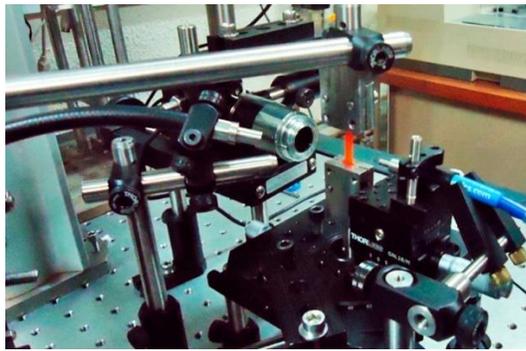


Figura 1. Probador mecánico para ensayos de tracción uniaxial de la Universidad Nacional Autónoma de México [3]

Se definen los biomateriales como “materiales utilizados para evaluar, tratar, corregir o reparar en cualquier tejido, órgano o función en el cuerpo humano”. Se dice que los biomateriales son multifuncionales e inteligentes, es decir, son capaces de reaccionar a estímulos externos, dentro de los ejemplos que se trabajan en el documento están: las antenas de los insectos, perlas y nácar creados por los moluscos, todos estos capaces de regenerarse, estos materiales nanolaminados generan una dureza bastante alta. Dentro del libro se concluye que en la naturaleza se encuentran infinitudes de inspiraciones para crear o manipular los biomateriales, se debe observar el comportamiento de lo que se encuentra allí y será posible manipular la misma cantidad de materiales biológicos. [4]

En el modelado de materiales biológicos, se tratan los aspectos mecánicos de los tumores estudiando así su crecimiento; describiendo sus principales características y relacionándolos con fenómenos como la tensión y la deformación, a partir de ello se crea un modelo matemático con el tipo de ecuación constitutiva en donde se encuentran específicamente la inhibición por contacto del crecimiento, la interacción del medio ambiente y el crecimiento vascular por nutrientes limitados. La principal aplicación que tienen este estudio es desarrollar una estructura multifase describiendo el crecimiento del tumor, mostrando su evolución y aplicándolos a problemas específicos. [5]

El comportamiento mecánico de los músculos se puede relacionar con las aleaciones con memoria, estas condicionan cualquier proceso se tienen cantidades numerosas de factores externos a un ensayo, es decir, los resultados comúnmente no son 100% confiables. En el artículo presentado se establecen condiciones de ensayo para aumentar la credibilidad de los resultados, se parametriza el método y se diseñan los diferentes dispositivos para los procedimientos adecuados en el ensayo de tracción de los alambres con memoria, estos generalmente son de níquel o titanio a diferentes temperaturas. [6]

En el trabajo “Desarrollo de una prensa para pruebas estáticas y dinámicas de elementos ortopédicos y tejidos biológicos” se describe el diseño de una prensa con el fin de realizar pruebas estáticas y dinámicas en materiales biológicos, su diseño está enfocado en la adaptación de la máquina para realizar pruebas en los distintos materiales biológicos y elementos ortopédicos, se permite cambiar la altura de trabajo según el material escogido adaptándose a sus características, hacen uso de un servomotor debido a su precisión y facilidad para controlar la posición, y cuentan con un sistema de tornillo con tuerca de bolas re circulantes que permiten pasar el movimiento rotacional del servomotor a uno lineal para su uso en la prensa. La construcción y diseño de este sistema se hace con el fin de permitir el estudio de tejidos biológicos, conocer su comportamiento para el entendimiento de las enfermedades relacionadas con este tipo de materiales y con una aplicabilidad en el área de prótesis y elementos ortopédicos. También se quiere mostrar que no es necesario depender de empresas y compañías extranjeras para la sistematización y modernización de equipos, logrando tener un sustento y desarrollo tecnológico que apoye la investigación en el área de la biomecánica a partir de los recursos tecnológicos locales. Con esto se da solución a la falta de prensas de prueba que permitan obtener ensayos de calidad precisos y que cuenten con la instrumentación necesaria y su debido control tanto para cargas grandes como cargas pequeñas. [7]

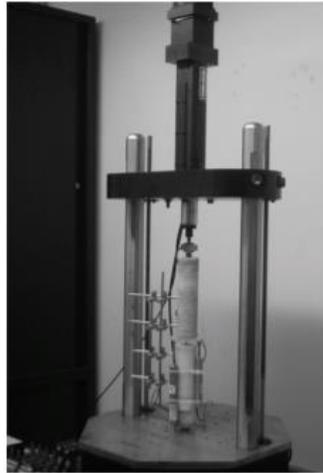


Figura 2. Prensa de pruebas dinámicas en una prueba con el sistema de fijación [7]

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar y construir una máquina de ensayo que permita estudiar el comportamiento de tejidos musculares sometidos a fuerzas de tracción uniaxial.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Estudiar las características de los tipos de músculos de manera que se obtengan los parámetros para determinar las especificaciones de selección de los actuadores lineales y sensores de carga basados en su capacidad de fuerzas y modo de operación.
2. Validar el diseño de la máquina de ensayo a partir de una simulación y respectivo análisis de fuerzas por medio de un sistema CAD.
3. Acondicionar las señales que permitan recopilar la información arrojada por actuadores y sensores para conocer las fuerzas de aplicación en las muestras a estudiar.
4. Representar la información obtenida de los músculos gráficamente, para realizar la extracción de características y posterior identificación de los tipos de músculos.

1.4 Justificación

En la actualidad los tejidos suaves también llamados materiales biológicos, específicamente músculos, tienen un importante papel en el desarrollo de aplicaciones en la bioingeniería, como fuente de apoyo en el desarrollo de prótesis para personas con algún tipo de discapacidad muscular. La mayoría de las máquinas de ensayo son para materiales estándares, como aceros, metales, polímeros entre otros, se hace un análisis de carga uniaxial, contando con equipos específicos para este tipo de materiales; por lo anterior se hace necesario el desarrollo de mecanismos que permitan el análisis de los tejidos musculares, con sus características específicas, haciendo un estudio de fuerzas de carga uniaxial, en el cual se pueda analizar la deformación del músculo. Para obtener las fuerzas de estos tejidos se hacen exámenes en la persona o animal vivo, sin embargo, con la tecnología actual es posible imitar el funcionamiento de estos mecanismos, para ello es necesario saber incluso el punto de ruptura de los músculos, de modo que es necesario extraer el elemento del ser para poder analizarlo a fondo, así en un futuro se podrán desarrollar mecanismos adaptables a prótesis o implantes, e incluso recrear las formas musculares de un animal, facilitando el movimiento y potenciarlo a la forma de trabajo natural de un tejido muscular. Para lograr esto se plantea el desarrollo del presente trabajo, una máquina de ensayo de carga uniaxial para análisis de músculos.

1.5 Alcance y Delimitación

En el objetivo del proyecto se plantea la propuesta de desarrollo de una máquina de ensayo de tracción para músculos, con el fin de obtener resultados del comportamiento de estos, se especifica que la fuerza de tracción será uniaxial. Dentro de los parámetros de diseño y funcionamiento se debe hacer un análisis de cargas al diseño de la máquina para contar con el soporte de que esta sea lo suficientemente resistente, luego de construida se deben entregar los planos de ensamblaje y mantenimiento de este para su posterior uso. Para el análisis de deformación de los músculos se cuenta con un programa que guarda los datos de esfuerzos de la máquina sobre el músculo. El desarrollo se plantea con el objetivo de generar ayuda a la investigación para que posteriormente se puedan construir músculos con base en los resultados obtenidos. Dentro de los resultados se encontrarán los manuales de apoyo y la interfaz de usuario que permite el control de dos tipos de pruebas para los músculos, una de fatiga y otra de ruptura.

2. MARCO TEÓRICO

Un ensayo de tracción permite analizar aspectos importantes de resistencia y alargamiento de materiales, este con el fin de ayudar en el control de calidad y cálculo para someterlos a esfuerzos, este tipo de ensayo generalmente se lleva hasta el punto de rotura del material y se aplica con una carga que aumenta de forma gradual y uniaxial a lo largo del eje de la probeta.

Debido a que se estudiaran los músculos se debe tener la definición de estos, la cual dice que es un tejido blando presente en la mayoría de los animales, caracterizado por generar movimiento de contracción o extensión. Se tienen tres tipos de músculos, el estriado, el liso y el cardiaco, cada uno con funciones específicas. Dentro de las características del tejido muscular estriado, se presentan, bajo un microscopio, estrías formadas por las bandas claras y oscuras alternadas, este está controlado bajo la voluntad del animal; el tejido muscular liso no es controlado y no contiene estrías, en lugar de ello cuenta con bolas densas, finalmente se encuentra el musculo cardiaco, de control involuntario y presente únicamente en el corazón, este musculo si posee estrías pero a diferencia del primero tiene movimiento involuntario. [8] [9]

Dentro del análisis de fuerzas se debe tener en cuenta la velocidad de acción de los músculos, durante las acciones concéntricas el desarrollo de la fuerza máxima se da con velocidades bajas, mientras que las acciones excéntricas rápidas permiten una mayor fuerza. [10]

Para realizar el análisis de fuerzas en el músculo también se debe tener en cuenta el corte de este para realizar la probeta, para ello se cuenta con ASTF, siendo esta el área de la sección transversal fisiológica a la línea de acción de las fibras musculares. También se ven los músculos fusiformes y peniformes, los primeros tienen mayor longitud de fibras musculares y una mayor velocidad de acortamiento, pero menor fuerza de tensión, mientras que los peniformes cuentan con las capacidades contrarias, menor velocidad, pero mayor capacidad de fuerza. [11]

Para el diseño de las máquinas, cualquier tipo de ensayo con características especiales es posible siempre y cuando se tenga en cuenta los límites de fuerza y velocidad del equipo. El marco de ensayos debe estar formado por una base que soporte todos los elementos del actuador, allí se ejercen los esfuerzos del sistema, se debe contar con columnas laterales y dos puentes horizontales, uno fijo y uno móvil para generar la traslación, las dimensiones dependen del tamaño de la sección de ensayos, es decir, proporcional a la probeta y su elongación. [12]

Una de las principales características de los tejidos biológicos como los músculos es su capacidad de deformación frente a cargas pequeñas y recuperar su forma original. Para realizar el análisis con base en comportamientos ya establecidos se relaciona con materiales elastómeros, los cuales son bastante parecidos a los tejidos biológicos, este tipo de material es sintético con capacidades de elongación de 30 veces su tamaño normal, y cuenta con la capacidad de regresar a su estado original sin sufrir daños.

2.1 Miología

El estudio de los de las fibras musculares es conocido como miología. los tejidos musculares se clasifican, morfológica y funcionalmente, como los lisos, cardíacos o esqueléticos. Los músculos lisos se presentan como masas de células en forma de huso en las paredes de los órganos huecos y en los vasos sanguíneos al igual que en ciertas glándulas. su acción no está bajo un control voluntario. [13]

Los músculos cardíacos poseen estrías cruzadas dispuestas en masas irregulares, se conectan los extremos de unas fibras con los lados de otras y funcionan con contracciones involuntarias. Los músculos esqueléticos están formados por haces de fibras multinucleares, cada fibra contiene miofibras dispuesta longitudinalmente en una matriz de sarcoplasma. Normalmente las fibras no se extienden por toda la longitud del músculo. Algunas de las fibras parecen oscuras (rojizas) y otras pálidas (blancas). *Las fibras oscuras poseen contracciones tónicas y se sostienen durante periodos prolongados, pero con poca fuerza, mientras que las fibras pálidas se contraen fásicamente, la amplitud de estas contracciones conduce a un máximo de contracción seguido de relajación.* Alrededor de cada fibra externa hay una delgada capa de tejido conectivo llamada endomisio. Cada has de fibras está rodeado de mayor cantidad de tejido conectivo denominado perimisio y la capa externa de todo el músculo es el epimisio. (Figura 3)

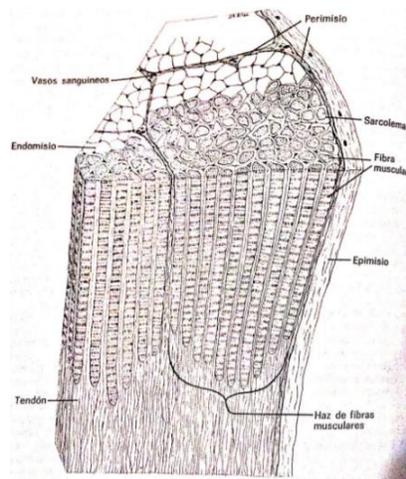


Figura 3. Organización de un músculo esquelético con su tendón [13]

Las membranas del tejido conectivo que separan los músculos de otros o que los mantienen en su posición se llaman fascia, está a menudo varía en más de una capa y grosor según su localización. Las fibras musculares pueden tener una disposición paralela y los haces pueden ser perpendiculares, oblicuos u horizontales respecto al músculo. Las fibras de un músculo fusiforme (en forma de lanzas) convergen sobre un tendón en ambos extremos del músculo, a la parte gruesa se le denomina vientre. [13]. Los músculos penniformes son planos cuyas fibras se distribuyen en torno a uno o más tendones, se cortan en un grado limitado, pero generar acciones de gran magnitud; se denominan unipenniforme cuando las fibras se insertan de un solo lado del tendón, bipenniformes cuando se insertan en lados

opuestos del tendón y multipenniformes cuando las fibras convergen sobre varios tendones (Figura 4). [14]

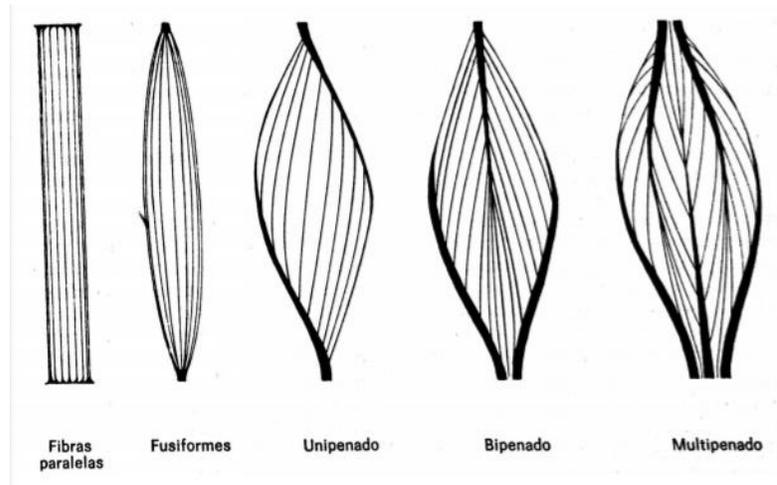


Figura 4. Disposiciones de fibras musculares esqueléticas [14]

La fuerza total ejercida por una contracción muscular es la suma de fuerzas ejercida por sus fibras individuales. Cada fibra se contrae en su total extensión y su longitud se reduce a un tercio a la mitad. la sección que tenga el músculo a través de todas sus fibras determina el potencial de su fuerza. Los músculos con fibras largas producen, en general, mayor variedad de movimientos. Las fibras aladas cortas reducen la masa relativa del músculo y aunque son pocos los movimientos que generan, incrementan la fuerza muscular. Las fibras del tendón entrelazadas permiten la distribución uniforme de fuerzas de cualquier porción del músculo, en los puntos de inserción las fibras tienden a desplegarse, estos permiten que las partes siguientes de esta área proporcionen la fuerza total de tracción ya que el ángulo del tendón y el hueso se hace más agudo (Figura 5). [13]

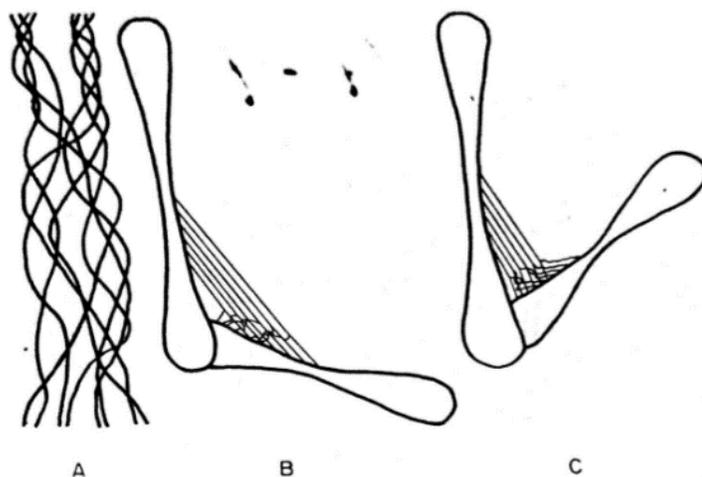


Figura 5. A, esquema de fibras del tendón; B y C, dirección de las fibras que tiran durante la flexión [13]

2.1.1 Biostática y Biomecánica

La biomecánica es el estudio dirigido a varias áreas del movimiento, como[11]:

- Mecánica del movimiento.
- Funcionamiento de los músculos, tendones, ligamentos, cartílagos y huesos.
- Carga y sobrecarga de estructuras específicas de sistemas vivos.
- Factores influyentes en el desarrollo.

Mientras que la Biostática estudia las fuerzas y su equilibrio que actúan sobre los animales y sus órganos en reposo o velocidad uniforme.[13]

“Un músculo está formado de un número de fibras contráctiles, estas pueden estar más o menos paralelamente de una superficie a otra, de forma que la longitud de la posición contráctil de todo el músculo puede estar aproximadamente dependiente de la longitud de una sola fibra” [13] estos son los músculos de fibrado paralelo.

El músculo alcanza su grado máximo de tensión en las contracciones excéntricas y a velocidades relativamente elevadas, esta relación de fuerza velocidad se determina mediante la ecuación de *Hill* (1), la cual predice el comportamiento mecánico de la mayoría de los músculos en valores medios de fuerza y velocidad:

$$(F + a)(V + b) = (F_{m\acute{a}x} + a)b \quad (1)$$

Donde F es la fuerza de tensión del músculo, V la velocidad de contracción, $F_{m\acute{a}x}$ la fuerza isométrica máxima, y a y b son constantes cuyos valores varían según cada músculo (generalmente 0.25). Con base en la ecuación existe una relación inversa entre fuerza de tracción y velocidad de contracción; esta teoría es aplicada a las fibras individuales del músculo. [10]

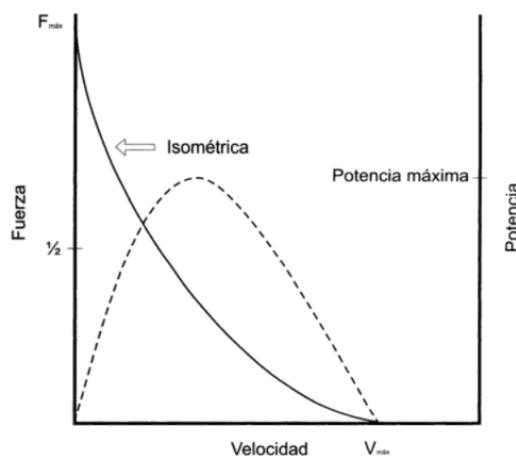


Figura 6. Curva de fuerza-velocidad. la potencia del músculo es la fuerza del músculo por la velocidad de contracción [10]

2.2 Amplificador de instrumentación

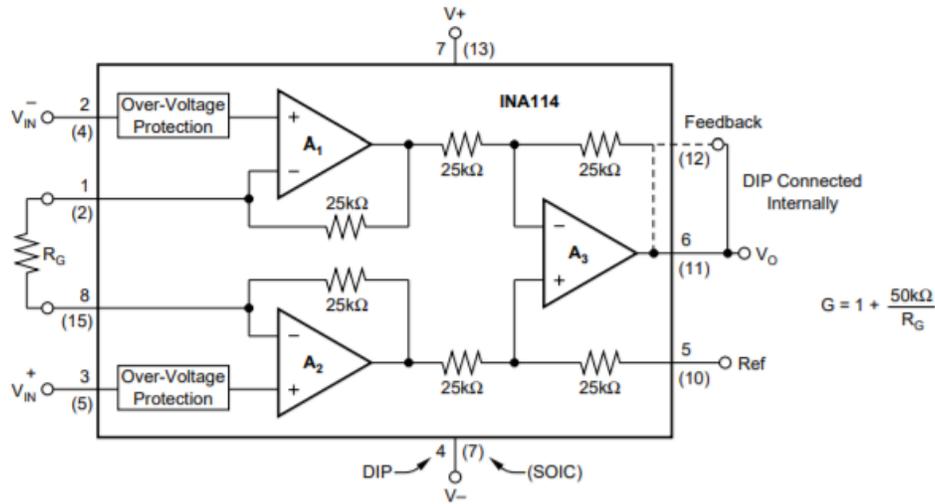


Figura 7. amplificador de instrumentación INA 114

El amplificador de instrumentación INA 114 es un circuito encapsulado compuesto por 3 amplificadores operacionales, los primeros dos configurados como seguidores de voltaje y el ultimo en una configuración de restador con ganancia, como se muestra en la Figura 7. A pesar de ser un amplificador de bajo costo cuenta con una gran precisión, su ganancia está en un rango de 1 a 10000, la cual se ajusta por medio de una resistancia externa, determinada por la ecuación (2).

$$G = 1 + \frac{50k\Omega}{R_G} \quad (2)$$

Cuenta con protección de sobre voltajes en sus entradas, que soportan voltajes de -40V a 40V sin sufrir daños. Tiene una alta impedancia de entrada y baja impedancia de salida, lo cual no permite que la ganancia se vea afectada por las impedancias de la fuente o de la carga. Trabaja con rangos de temperatura entre -40° C a 80° C, puede operar con voltajes de alimentación desde 2.25v hasta 18 v y con una corriente de 3 mA. Una de las características más importantes del amplificador es su alto factor de rechazo en modo común, tiene un factor de 115 dB. Este factor permite tener una amplificación más limpia, ya que elimina los voltajes que son iguales en sus entradas.

2.3 Celdas de Carga

Las celdas de carga son una estructura diseñada para soportar cargas de tensión, compresión y flexiones en cuyo interior se encuentran sensores de deformación llamados Strain Gages, los cuales detectan los valores que la celda está resistiendo [17]. Las galgas son láminas de materiales con un circuito eléctrico resistivo impreso en ellas, esta se adhiere al elemento sometido a las cargas; al

aplicar la fuerza se registra un cambio en la resistencia la cual se asocia a la deformación unitaria del elemento. En el proceso de instrumentación se hace necesario colocar 4 galgas en el centro de la celda, y se realizan las conexiones necesarias para formar un circuito denominado Puente de Wheatstone (Figura 8), el cual permite contrarrestar los esfuerzos no deseados[18].

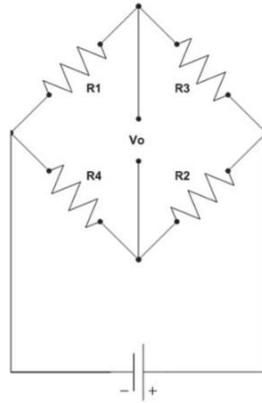


Figura 8. Diagrama de un Puente de Wheatstone [18]

La celda de carga se fija en la parte donde se desea registrar la carga que se aplica a un sistema mecánico, para el caso del presente proyecto se sitúa entre la placa superior y la mordaza superior del músculo para medir la fuerza aplicada al mismo.

Existen diferentes tipos de celdas de carga, para realizar la selección correcta se debe saber el tipo de aplicación o como ejercen su función:

- Celdas de carga con un solo punto:

Estas celdas se utilizan para medir pequeñas escalas, como joyas, balanzas de cocina, entre otros, estas soportan un máximo de 50Kg. El montaje es por medio de pernos hacia abajo en cada extremo de la celda de carga, en donde los cables se unen y la aplicación de la fuerza es en el sentido de la flecha lateral (Figura 9). El principio de funcionamiento de esta celda es medir un efecto de elasticidad sobre la viga mas no la flexión de esta. [19]

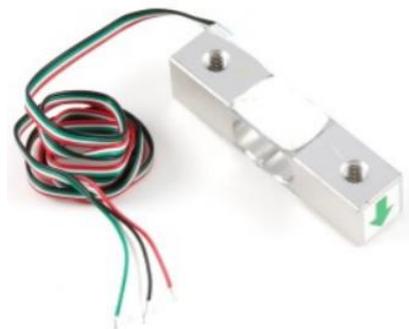


Figura 9. Celda de carga de un solo punto [20]

- Celdas de carga tipo S:

Denominadas así por su forma (Figura 10), se pueden usar en procesos de medición de compresión o tensión, son usadas para altas cargas o pesaje industrial, relacionados con tanques, tolvas, medición de nivel entre otros. Rechazan la carga lateral superior y tiene capacidades máximas desde los 11 hasta los 18200 Kg. [19]



Figura 10. Celda de carga tipo S [21]

- Celda de carga tipo botón:

Miden la compresión de una carga con estabilidad a largo plazo, son construidas en acero inoxidable para trabajos en entornos industriales. El diseño es para operar en una superficie plana, cuenta con un botón de carga mecanizado junto con la celda (Figura 11), soportan rangos de 11 a 23000Kg. [19]



Figura 11. Celda de carga tipo botón [20]

- Celdas de carga de tensión y compresión:

Estas celdas permiten medir tensión y compresión de las cargas, están fabricadas en acero inoxidable, tiene un tamaño reducido y son capaces de ofrecer lecturas de alta precisión. Cuentan con una rosca fina tipo macho en cada uno de sus extremos (Figura 12), lo que le permite adjuntarse a la carga. Tienen rangos variados respecto a la fuerza que soportan van desde las 5lb (0.45Kg) hasta las 10.000lb (45000 Kg). [22]



Figura 12. Celda de carga de Tensión y Compresión [22]

Para la aplicación del presente proyecto las opciones de selección son la celda de carga tipo S y la de tensión y compresión, los dos tipos de celda cuentan con las características necesarias de capacidad del fuerza y tipo de fuerza, sin embargo el tamaño y forma de agarre de la celda de tensión y compresión facilitan el diseño del sistema, además de versatilidad ya que la mayoría de las celdas de carga en un rango de 5-500lb presentan las mismas dimensiones y mecanizados (en la rosca de sujeción).

Los datos técnicos de la celda con la cual se ha elegido trabajar son:

PERFORMANCE SPECIFICATIONS

Characteristic	Measure
Load ranges ⁶	1000 g, 5 lb, 10 lb, 25 lb, 50 lb, 100 lb, 250 lb, 500 lb, 1000 lb
Linearity 1000 g to 250 lb	±0.15 % full scale
Linearity 500 lb to 1000 lb	±0.2 % full scale
Hysteresis 1000 g to 250 lb	±0.15 % full scale
Hysteresis 500 lb to 1000 lb	±0.2 % full scale
Non-repeatability 1000 g	±0.1 % full scale
Non-repeatability 5 lb to 1000 lb	±0.05 % full scale
Tolerance on output 1000 g	1.5 mV/V (nominal)
Tolerance on output 5 lb to 1000 lb	2 mV/V
Operation	Tension/compression ³
Resolution	Infinite

Figura 13. Hoja técnica de especificaciones de desempeño de la celda de carga Honeywell modelo 31 mid range

ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Characteristic	Measure
Strain gage type	Bonded foil
Excitation (calibration) 1 kg to 10 lb	5 Vdc
Excitation (calibration) 25 lb to 1000 lb	10 Vdc
Insulation resistance	5000 Mohm @ 50 Vdc
Bridge resistance	350 ohm
Zero balance	1 % max.
Electrical termination (std)	Teflon cable (1524 mm [60 in])

2.4 Tarjeta de adquisición de datos DAQ 6009

Es un dispositivo USB de múltiples entradas y salidas digitales de bajo costo, ofrece funcionalidades como el registro de datos, medidas portátiles y experimentos académicos de laboratorio. Gracias a su cubierta mecánica ligera y que se alimenta por medio del cable USB, permite una portabilidad sencilla. Cuenta con una conectividad de terminales de tornillo que facilitan la conexión de sensores y señales de la DAQ, con 8 entradas análogas y 4 salidas análogas de 14 bits, 12 entradas y salidas digitales y un contador de 32 bits. Trabaja con el software LABVIEW que tiene incluido el controlador NI-DAQmx, lo cual simplifica la configuración y medidas.



Figura 14. Tarjeta de adquisición de datos DAQ 6009

Las especificaciones técnicas de sus entadas y salidas son:

Analog Input

Analog inputs	
Differential	4
Single-ended	8, software-selectable
Input resolution	
Differential	14 bits
Single-ended	13 bits
Maximum sample rate (aggregate)	48 kS/s, system dependent
Converter type	Successive approximation
AI FIFO	512 bytes
Timing resolution	41.67 ns (24 MHz timebase)
Timing accuracy	100 ppm of actual sample rate
Input range	
Differential	$\pm 20\text{ V}^1$, $\pm 10\text{ V}$, $\pm 5\text{ V}$, $\pm 4\text{ V}$, $\pm 2.5\text{ V}$, $\pm 2\text{ V}$, $\pm 1.25\text{ V}$, $\pm 1\text{ V}$
Single-ended	$\pm 10\text{ V}$
Working voltage	$\pm 10\text{ V}$
Input impedance	144 k Ω
Overvoltage protection	$\pm 35\text{ V}$
Trigger source	Software or external digital trigger
System noise ²	
Differential	
$\pm 20\text{ V}$ range	5 mV _{rms}
$\pm 1\text{ V}$ range	0.5 mV _{rms}
Single-ended, $\pm 10\text{ V}$ range	5 mV _{rms}

Figura 15. especificaciones técnicas de las entradas análogas

Analog Output

Analog outputs	2
Output resolution	12 bits
Maximum update rate	150 Hz, software-timed
Output range	0 V to +5 V
Output impedance	50 Ω
Output current drive	5 mA
Power-on state	0 V
Slew rate	1 V/ μ s
Short circuit current	50 mA
Absolute accuracy (no load)	
Typical	7 mV
Maximum at full scale	36.4 mV

Figura 16. especificaciones técnicas de las salidas análogas

Digital I/O

Digital I/O lines	
P0.<0..7>	8 lines
P1.<0..3>	4 lines
Direction control	Each channel individually programmable as input or output
Output driver type ³	Each channel individually programmable as open collector or active drive
Compatibility	TTL, LVTTTL, CMOS
Absolute maximum voltage range	-0.5 V to 5.8 V with respect to GND
Pull-up resistor	4.7 k Ω to 5 V
Power-on state	Input

Figura 17. especificaciones técnicas de entradas y salidas digitales

Level	Minimum	Maximum
Input low voltage	-0.3 V	0.8 V
Input high voltage	2.0 V	5.8 V
Input leakage current	—	50 μ A
Output low voltage (I = 8.5 mA)	—	0.8 V
Output high voltage, active drive (I = -8.5 mA)	2.0 V	3.5 V
Output high voltage, open collector (I = -0.6 mA, nominal)	2.0 V	5.0 V
Output high voltage, open collector (I = -8.5 mA, with external pull-up resistor)	2.0 V	—

Figura 18. niveles lógicos digitales

3. ACTUADORES LINEALES

El primer paso para cumplir el objetivo propuesto es evaluar las tecnologías existentes en el desarrollo de fuerzas que permitan llevar a finalidad el proyecto, por lo que se evalúan los diferentes tipos de actuadores lineales en el mercado. Se debe tener en cuenta que el elemento seleccionado debe tener la capacidad de realizar las fuerzas necesarias para romper músculos de animales grandes como bovinos.

3.1 Tipos de Actuadores

Los principales tipos de actuadores lineales son:

- **Servomotores Industriales:** Son capaces de crear toda clase de movimientos de forma controlada, sus principales características son el par y la velocidad, además dentro de sus principales usos se encuentra las máquinas de trabajo pesado. Están conformados por un motor eléctrico, un sistema de regulación, un sistema de control y sensores que permiten medir la posición del eje central del motor. [15]
- **Cilindros Hidráulicos:** Este mecanismo consta de un cilindro con un vástago interno que transforma la presión del líquido para convertirlo en energía mecánica, normalmente el fluido es alguna clase de aceite industrial, el cálculo de velocidad de este actuador depende de la cantidad de fluido en el cilindro y de la superficie del pistón.
- **Cilindros Neumáticos:** Su funcionamiento es similar a los actuadores hidráulicos, el fluido de trabajo es el aire y este convierte la presión en trabajo mecánico.

3.2 Características de los Actuadores

Para seleccionar el mejor actuador se comparan las características de cada uno con sus respectivas ventajas y desventajas, teniendo en cuenta las fuerzas a realizar, el entorno en el cual va a trabajar y la facilidad de montaje para que el sistema sea óptimo y dado el caso desplazable.

CARACTERÍSTICAS	NEUMÁTICO	HIDRÁULICO	SERVOMOTOR
Fuerza	Baja	Muy Alta	Alta
Fugas	Perdida de Energía	Contaminación	No tiene
Movimiento Lineal	Fuerzas Limitadas, Velocidad dependiente de la carga	Buen control de velocidad, Fuerzas altas	Buen control de velocidad y fuerza
Estabilidad	Baja	Alta	Muy Alta
Coste de Alimentación	Muy Alto	Alto	Bajo
Elementos de Control	Válvulas distribuidoras Direccionables	Válvulas distribuidoras Direccionables	Driver

Figura 19. Tabla de comparación de características de los actuadores lineales

Con base en las comparaciones de la Figura 19 se considera que el mejor actuador para la máquina de ensayo es un servomotor industrial, existen varios tipos de servomotores con su respectivo driver

de control, el modelo SGMPH es uno de los modelos que mejor cumple las peticiones de fuerza mantenimiento y control para lograr el objetivo del proyecto.

3.3 Servo Motor SGMPH-04AAE4C

El servomotor de la serie SGMPH es adecuado para aplicaciones de alta potencia y puede ser usado como un reemplazo a sistemas hidráulicos, diseñados para una alta rigidez torsional y bajo juego, la geometría de su engranaje permite altos pares de salida, cuenta con un diseño de imán permanente que reduce la inercia del rotor, sus devanados de hasta 400v se encuentran para velocidades nominales de 3000rpm y 5000 rmp, en conjunto con el amplificador de torque de la serie SGDG cumple con las características adecuadas para realizar ensayos de tracción.

3.3.1 Características

Voltage		100 V		200 V				
Servomotor Model SGMPH-		01B	02B	01A	02A	04A	08A	15A
Rated Output *1	kW	0.1	0.2	0.1	0.2	0.4	0.75	1.5
Rated Torque *1,*2	N·m	0.318	0.637	0.318	0.637	1.27	2.39	4.77
Instantaneous Peak Torque *1	N·m	0.955	1.91	0.955	1.91	3.82	7.16	14.3
Rated Current *1	A _{rms}	2.2	2.7	0.89	2.0	2.6	4.1	7.5
Instantaneous Max. Current *1	A _{rms}	7.1	8.4	2.8	6.0	8.0	13.9	23.0
Rated Speed *1	min ⁻¹	3000						
Max. Speed *1	min ⁻¹	5000						
Torque Constant	N·m/A _{rms}	0.160	0.258	0.392	0.349	0.535	0.641	0.687
Rotor Moment of Inertia J	x10 ⁻⁴ kg·m ²	0.0491	0.193	0.0491	0.193	0.331	2.10	4.02
Rated Power Rate *1	kW/s	20.6	21.0	20.6	21.0	49.0	27.1	56.7
Rated Angular Acceleration *1	rad/s ²	64800	33000	64800	33000	38500	11400	11900

Figura 20. Especificaciones del motor SGMPH-04AAE4C

Además de las características de la Figura 20, el motor cuenta con un encoder incremental de 13 bits con 2048 pulsos por revolución, tiene una protección IP 67, cuenta con un freno de 24 v que trabaja con 0.35A y tiene la capacidad de alcanzar un par máximo de 700 Nm.

3.3.2 Principio de funcionamiento

Este motor trabaja con una excitación de imán permanente, es un motor sin escobillas, lo cual le permite un mejor cambio de giro, está compuesto por un estator siendo esta la parte fija y un rotor que es la parte móvil, sobre el estator están los bobinados del hilo conductor, la corriente pasa

directamente por estos hilos y por lo tanto no son necesarias las escobillas. La corriente que pasa por el estator induce un campo electromagnético que interacciona con el campo magnético creado por los imanes permanentes del rotor, generando una fuerza que hace girar al rotor y por ello el eje del motor.

3.3.3 LEGEND SGDG-04GT

Debido a la aplicación planteada en el presente proyecto el actuador debe contar con un sistema de control de fuerza, para ello se cuenta con un Amplificador que Torque LEGEND SGDG (Figura 21), este modelo es compatible con el motor seleccionado.



Figura 21. Amplificador de torque LEGEND SGDG [16]

Debido a que los sistemas de accionamiento LEGEND son aplicables a un amplio rango de combinaciones entre motores y controladores, la potencia de salida máxima será determinada por el modelo del driver que se esté manejando, así la potencia del motor será mayor. Para el caso de este modelo se puede trabajar con motores de 100 a 750W, por lo tanto, no se limitará la potencia del motor ya que es de 400W.

Dentro de sus características se encuentra con una corriente de salida de 2.8A, con pérdidas de potencia en el circuito principal de 20W y perdidas de potencia en el circuito de control de 13W. El Amplificador cuenta con un sistema de control interno, para su manejo es necesario interactuar con las terminales análogas y digitales de entrada y salida (Figura 22), los pines de manejo básico para poner en marcha el sistema son el 3 como referencia de torque con un rango de entrada de -10V a +10V, uno de los pines de tierra, el pin 13 siendo el voltaje de fuente externa con +12V o +24V, el pin 14 con la señal de encendido o apagado del servo; como pines de trabajo para el análisis de las señales se cuentan con los pines 28 y 29 los cuales permiten monitorear las señales de velocidad y torque del servo, además se trabaja el 34 que es un señal digital que genera un cambio, el cual se detecta en el programa indicando una alarma.

1	---	---				19	GND	GND			
3	CMD -IN	Torque/ Force Reference Input	2	GND	GND	21	*PAO	Encoder Divided Output A phase-	20	PAO	Encoder Divided Output A phase+
5	---	---	4	GND	GND	23	*PBO	Encoder Divided Output B phase-	22	PBO	Encoder Divided Output B phase+
7	RUN +	RUN Signal Output	6	GND	GND	25	*PCO	Encoder Divided Output C phase-	24	PCO	Encoder Divided Output C phase+
9	---	---	8	---	---	27	DB OFF5	DB OFF Signal Input	26	/S-ON5	Servo ON Input
11	---	---	10	RUN -	RUN Signal Output	29	Torque Mon	Torque Monitor 5V/Max. Torque	28	SPD- MON	Speed Monitor 1V/1000 RPM
13	+24V	External Power Input	12	---	---	31	---	---	30	---	---
15	DB OFF	DB OFF Signal Input	14	/S-ON	Servo ON Signal Input	33	GND	GND	32	---	---
17	---	---	16	---	---	35	ALM -	Servo Alarm Output	34	ALM +	Servo Alarm Output
			18	---	---				36	---	---

Figura 22. Lista de terminales del amplificador y especificaciones [16]

Es indispensable el uso de un controlador o en este caso amplificador de torque, ya que no es posible conectar el motor directamente con la red ya que puede causar daños graves en el motor. Las condiciones ambientales para el panel de control en donde se ubicará el amplificador deben ser con una temperatura ambiente de 0-30 ° C, vibraciones de menos de 4.9m/ s 2. No es necesario realizarle una inspección continua, con una revisión anual es suficiente, dentro de los elementos de inspección periódica como lo son el ventilador, capacitores, relés y fusibles se debe hacer un remplazo periódico dentro de 4-10 años según sea el elemento. El tiempo de operación del amplificador no debe superar las 20 horas por día.

4. DISEÑO DE LA MÁQUINA

4.1 Diseño Mecánico

Se necesita un sistema que permita el desplazamiento vertical del vástago del motor enlazado con un sistema de sujeción a un músculo y a una celda de carga que medirá las fuerzas aplicadas en el material. Con base en las medidas del motor y el desplazamiento del vástago se realiza el diseño preliminar de la máquina dividiendo el sistema en dos partes para el cumplimiento de funciones de los elementos estructurales.

1. Área de soporte y control: allí se encuentra la placa base en la cual está soportada el motor y la estructura en general, cuenta con dos placas laterales de apoyo y una tapa que sirve como guía y soporte para los ejes de desplazamiento, también se tiene una tapa posterior en la cual se ensambla el tablero de potencia y una tapa frontal la cual es utilizada como panel de control.
2. Área de trabajo: es la sección superior de la estructura, donde se enlazan el motor con la mordaza inferior, está sujeta un extremo del músculo y en el otro extremo se encuentra la otra mordaza fija a una celda de carga que a su vez está sujeta a una placa superior que soporta la fuerza ejercida por el motor.

Se trabaja con acero estructural A36 debido a su variabilidad de formas de trabajo como lo son soldadura, atornillado, remachado entre otros, además cuenta con propiedades de ductilidad y resistencia a la tracción considerables para el trabajo al cual será sometido.

El siguiente paso a dar es obtener el valor de los espesores de las placas con las cuales se va a trabajar teniendo en cuenta las fuerzas y las dimensiones ya establecidas, para ello se acude al estudio de mecánica de sólidos analizando las placas como vigas y haciendo el análisis de fuerzas en las mismas (Figura 23), luego se procede a enlazar los perfiles y de esta forma encontrar la medida requerida, la primera pieza en analizar es la placa superior ya que esta soporta el mayor esfuerzo ejercido por el actuador.

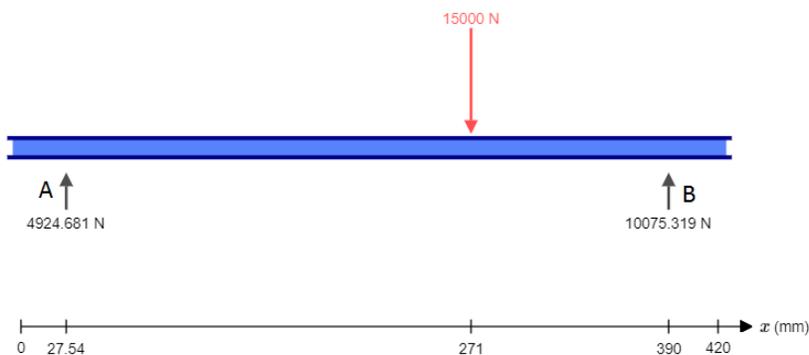


Figura 23. Diagrama de cuerpo libre viga superior de la máquina

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

$$F_A - F_{motor} + F_B = 0$$

$$F_A = 15000N - F_B$$

$$\sum M_A = 0 \quad (4)$$

$$d_{F_{motor}}(F_{motor}) + d_B(F_B) = 0$$

$$0.24346m(15000N) + 3.36246m(F_B) = 0$$

$$F_B = -10075N$$

$$F_A = 4924.681N$$

Con base en las ecuaciones de sumatoria de fuerzas (3) y sumatoria de momentos (4) se obtienen los valores de las fuerzas de reacción, en los apoyos y se realizan los diagramas de esfuerzos cortantes (Figura 24) y momento flector (Figura 25)

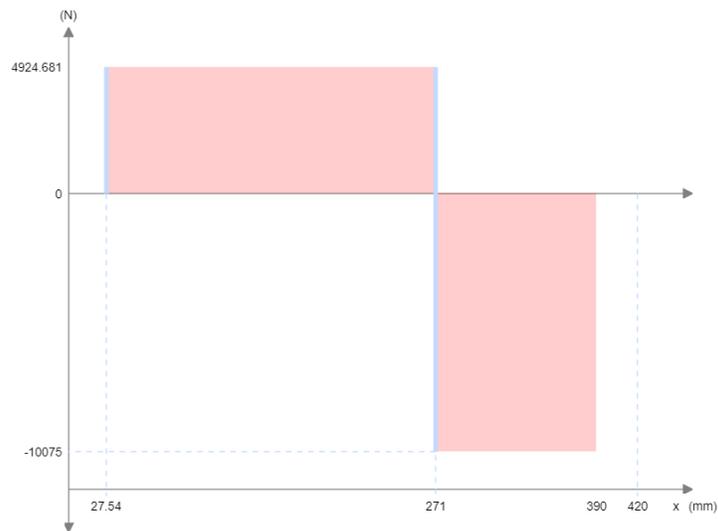


Figura 24. Diagrama de Esfuerzos Cortantes de la viga superior

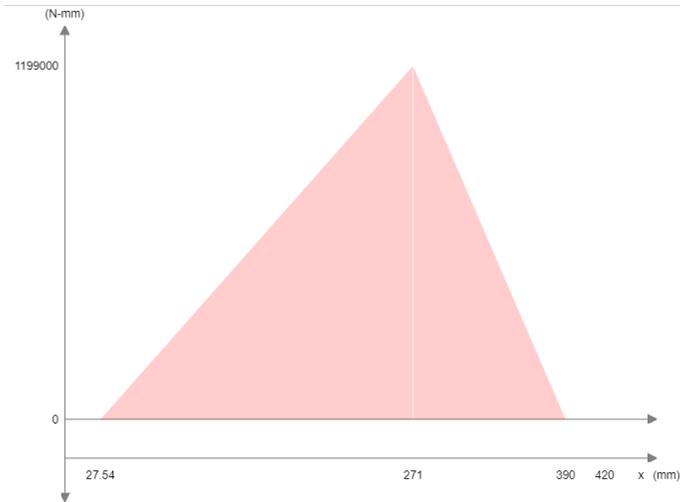


Figura 25. Diagrama de Momento Flector de la viga superior

Es necesario encontrar los esfuerzos cortantes y el diagrama de momento flector para hallar el momento máximo y esta manera aplicando la ecuación (5) se puede encontrar el valor de espesor h .

$$\sigma = \frac{MC}{I} \quad (5)$$

En donde:

σ es el esfuerzo de fluencia del material.

M es el momento flector en su máximo punto.

C es el centroide del área transversal del elemento.

I es el momento de inercia del área transversal.

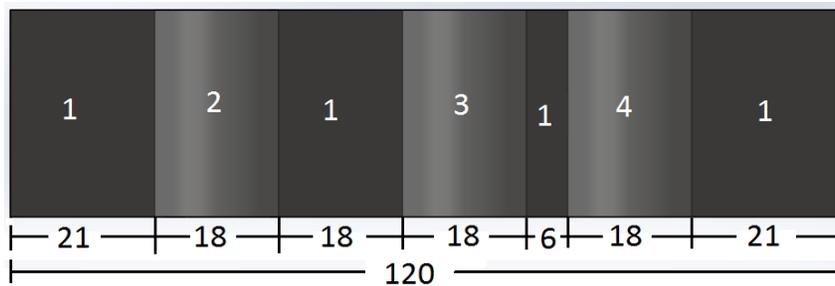


Figura 26. Área transversal de la viga superior de la estructura.

Con base en estas medidas se tiene obtiene el centroide en función de h , para ello se divide la figura en cuatro secciones, la primera es completa y las otras tres son secciones huecas representadas con el color gris, a cada una de ellas se les calcula el área y las coordenadas, para obtener el valor del centroide, el cual entrega un resultado de:

$$\bar{x} = 58.3636$$

$$\bar{y} = 0.5h$$

Con el teorema de ejes paralelos, presentado en la ecuación (6) se halla el valor total de la inercia, calculando este valor para cada una de las secciones del elemento.

$$I_y = \frac{bh^3}{12} + A(\bar{y} - y)^2 \quad (6)$$

Sección 1:

$$I_y = \frac{120h^3}{12} + 120(0.5h - 0.5h)^2 = 0.01h^3$$

Sección 2, 3 y 4:

$$I_y = \frac{18h^3}{12} + 120h(0.5h - 0.5h)^2 = 0.0015h^3$$

$$I_{yTotal} = 0.01h^3 - 3(0.0015h^3) = 0.0055m * h^3$$

El esfuerzo de fluencia del acero A36 es $\sigma = 250\text{MPa}$, con base en los resultados obtenidos se reemplazan los valores en la ecuación (5) para obtener un resultado de:

$$h = 20.88\text{mm}$$

Este mismo procedimiento se repite para el cálculo de las demás placas, en la inferior se obtiene un resultado de $h=6\text{mm}$ y por cuestiones de estética se decide mantener este espesor para las placas laterales y la tapa del motor.[23]

$$\eta = \frac{\sigma_{fluencia}}{\sigma_{maximo}} \quad (7)$$

$$\eta = \frac{\sigma_{fluencia}}{\frac{MC}{I}} = \frac{250 \times 10^6 \text{ N/m}^2}{\frac{1199 \text{ Nm} \times 0.5 h}{0.0055 m \times h^3}}$$

$$\eta = \frac{(250 \times 10^6) \times 0.0055 h^2}{1199 \times 0.5}$$

$$h = \sqrt{\frac{\eta \times 1199 \times 0.5}{(250 \times 10^6) \times 0.0055}}$$

teniendo en cuenta un factor de seguridad $n=2$ se obtiene el ancho de la placa

$$h = \sqrt{\frac{2 \times 1199 \times 0.5}{(250 \times 10^6) \times 0.0055}} = 0.02952 \text{ m}$$

Con base en estos datos se hace el análisis en el CAD SolidWorks para corroborar que la placa resiste las fuerzas aplicadas como se muestra en la Figura 27; se calculan los desplazamientos que indican valores de no más de 0.09mm en su punto de mayor pandeo y el valor de factor de seguridad de 0.41

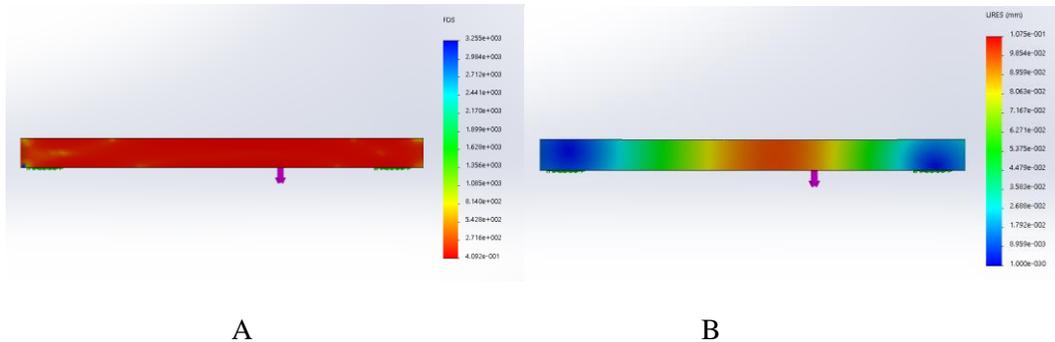


Figura 27. Simulación de fuerzas en la placa superior para obtención de: A, Factor de seguridad; B, desplazamientos

El diseño de las mordazas es plano debido a la estructura de los músculos, ya que estos presentan características planas o redondas, el sistema de sujeción se hace por medio de tornillos que ajustan una placa móvil a la mordaza fija en la máquina; tanto la superior como la inferior cuentan con un roscado en los extremos para sujetar con la celda de carga y con el vástago del motor. La forma de la mordaza inferior (Figura 28) se presenta con una reducción en la sección de agarre del músculo para disminuir el peso de la pieza, cuenta con un espesor 50mm, ya que la rosca del motor es de aproximadamente 20mm de largo, además, se tiene en cuenta el ancho para la sujeción del músculo, por lo tanto se da el espesor mencionado, además, se ubican dos rodamientos en el extremo que se desliza por los ejes del sistema, los cuales permiten la facilidad de desplazamiento disminuyendo la fricción entre las dos piezas(ejes-mordaza) , ya que este elemento se encuentra en constante movimiento vertical.

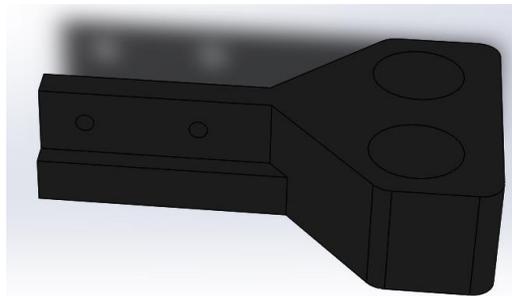


Figura 28. Diseño de la mordaza inferior con sujeción al motor

En caso de que la pieza quede estancada en un punto en las barras y el motor siga haciendo fuerza, se hace un análisis sobre el elemento (Figura 29) para verificar que este no se fracture, en donde se muestra un resultado de deformación de 0.313mm, y nuevamente registrar el factor de seguridad de la pieza el cual arroja un valor de FDS=2.8.

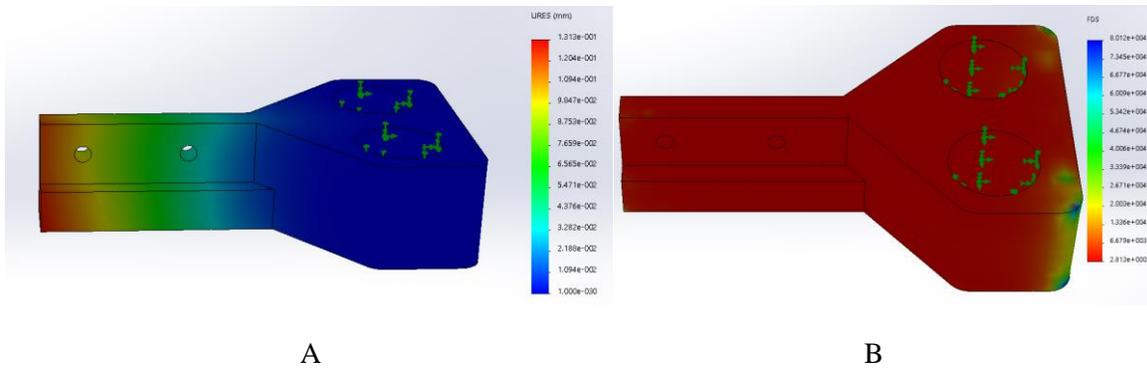


Figura 29. . Simulación de fuerzas en la mordaza inferior para obtener A, Desplazamientos; B, Factor de seguridad

Para las barras se aplica una fuerza de 5000N, teniendo en cuenta esto se hace un análisis en Solid Works, con base en los resultados se cuenta con un factor de seguridad de 11.5 este resultado se deja de tal manera debido a que el diseño fue planteado para hacer una reducción el material y soportan la fuerza de la placa superior, en caso de que la barra elegida hubiese sido hueca este proceso no se habría podido realizar de modo que el mecanizado de la placa superior cambiaria nuevamente.

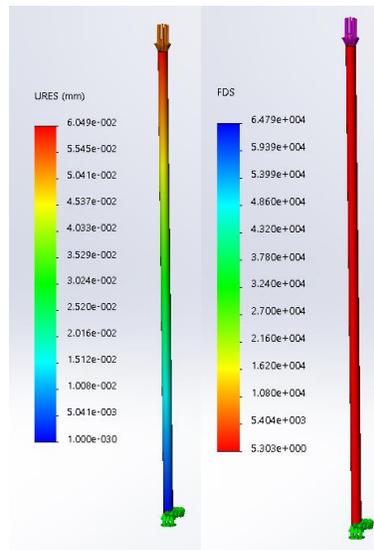
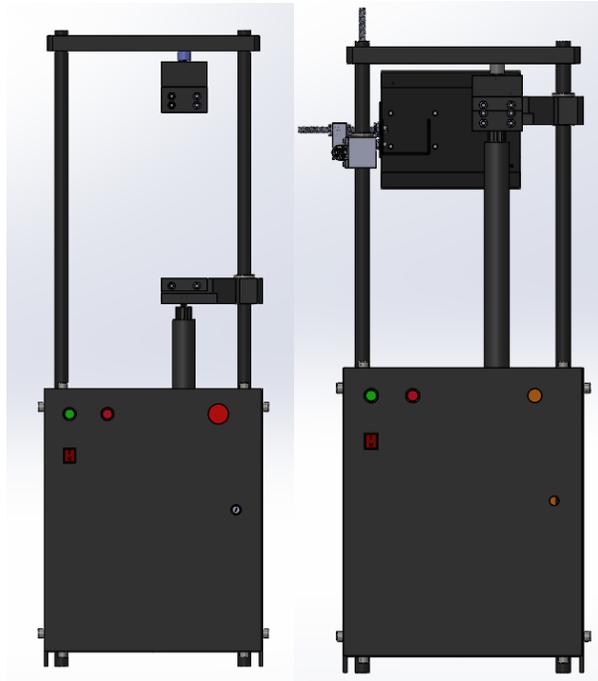


Figura 30. Análisis estructural de las barras

Debido a que en uno de los objetivos se propone usar un microscopio con el fin de visualizar la ruptura de los músculos se decide ubicar los ejes de traslación en un costado de la máquina, y los otros dos en el lado opuesto con la distancia de las dimensiones del microscopio para su correcto ajuste a la estructura. Finalmente, en el espesor de las láminas que hacen la función de tapa trasera y panel de control se incorporan láminas de espesor mínimo ya que estas no deben soportar ninguna carga.



A



B

Figura 31. A, Diseño en CAD de la máquina de ensayo; B, Construcción de la máquina de ensayo

4.2 Diseño del sistema eléctrico:

Para el diseño eléctrico se tienen en cuenta los elementos que representan una carga eléctrica, a partir de estos se seleccionan los componentes de protección y control, los cuales deben satisfacer las necesidades de corriente y voltaje consumidos por el sistema. Otro punto importante dentro del diseño eléctrico a tener en cuenta son las normas RETIE y NTC2050, garantizando al usuario un ambiente de trabajo seguro y confiable, libre de cualquier riesgo eléctrico.

La carga principal del sistema está dada por el motor eléctrico Yaskawa de la serie SGMPH y su amplificador de torque de la serie SGDGT, de los cuales solo se toma como referencia la potencia del amplificador, la cual es de 400w, no se tiene en cuenta la del motor ya que esta es limitada por la potencia del amplificador, es por ello que al diseñar el tablero eléctrico se tiene en cuenta el manual del amplificador de torque LEGEND SGDGT-04GT, el cual nos proporciona el esquema de conexiones como se puede ver en la Figura 32.

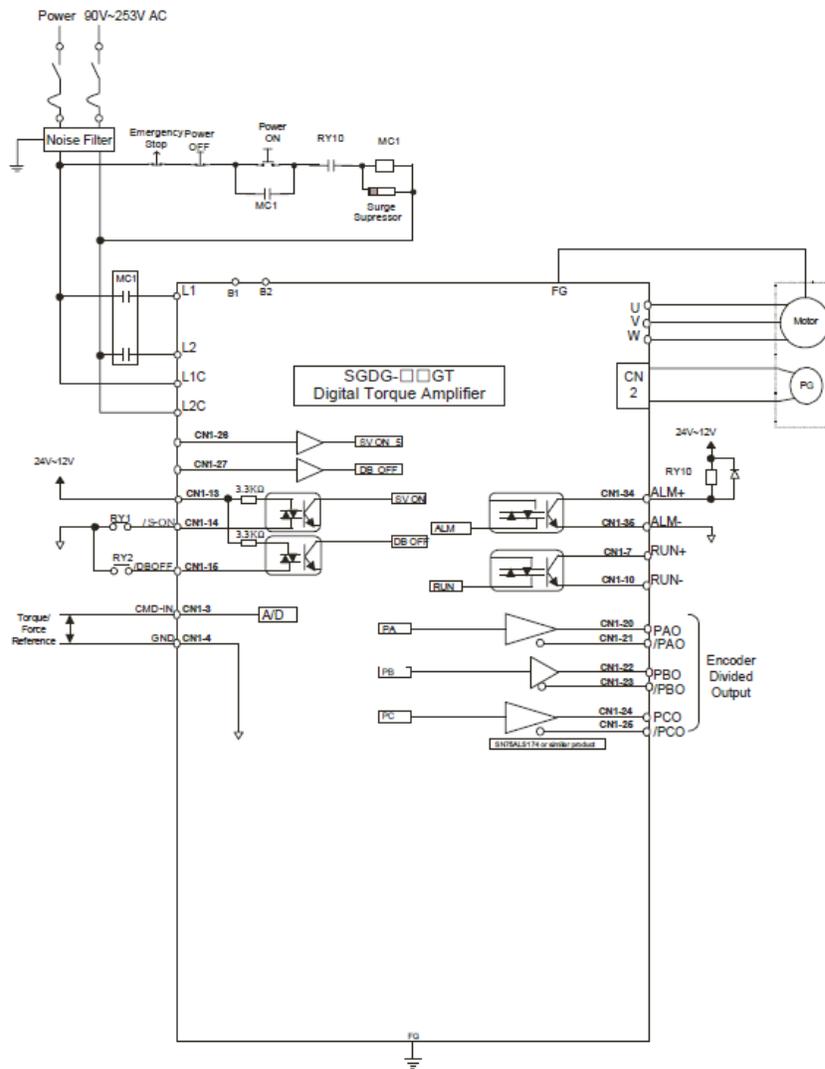


Figura 32. Esquema de conexión amplificador de torque SGDGT

De acuerdo con el esquema de conexiones se tomaron algunos elementos como el breaker, interruptor con enclavamiento mecánico o paro de emergencia y el contactor, los cuales se eligieron teniendo en cuenta las características recomendadas en el manual del amplificador de torque, en el cual establecen que tanto para el breaker como para el contactor sean bipolares con una capacidad de 20A, conectados por medio de alambre calibre 14. Debido a que el motor trabaja con una línea bifásica, se seleccionó un contactor con una bobina de accionamiento de 220v, el cual como elemento de maniobra cuenta únicamente con el paro de emergencia, puesto que el pulsador de start y stop no se manejó según el esquema si no que se trabajó en la parte de software y control como una entrada digital con el fin de sincronizar la señal de referencia de torque con el encendido del motor, a pesar de esto el amplificador de torque cuenta con una entrada a 24 v manejada por medio de un interruptor con el fin de controlar la puesta en marcha del motor.

Para lograr el voltaje necesario de 24 v a la señal de control de puesta en marcha del motor se realiza por medio de un transformador, primero se calcula la relación de transformación de acuerdo con la ecuación (8).

$$Rt = \frac{Np}{Ns} = \frac{Vp}{Vs} \quad (8)$$

En donde

Rt es la relación de transformación
 Np el número de vueltas del primario
 Ns el número de vueltas del secundario
 Vp el voltaje del primario
 Vs el voltaje del secundario.

$$Rt = \frac{220V}{24V} = 9.16$$

Luego de obtener la relación de transformación, se procede a calcular la potencia del transformador, de acuerdo a la ecuación (9), teniendo en cuenta el bobinado secundario el cual tiene un voltaje de 24 v y una corriente de 2.5A, esta corriente se determinó a partir del circuito electrónico el cual trabaja con una corriente máxima de 2A y la entrada de la puesta en marcha del motor el cual trabaja con una corriente máxima de 500 mA.

$$P = V \times I = 24V \times 2A = 48W \quad (9)$$

A partir de la potencia del transformador se calcula el área del núcleo según la ecuación (10)

$$An = \sqrt{P} = \sqrt{48} = 6.93 \text{ cm}^2 \quad (10)$$

De acuerdo con las ecuaciones (8),(11) y (12)se calcula la cantidad de vueltas del bobinado primario respecto al área del núcleo y con la relación de transformación se determina el número de vueltas del secundario.

$$\frac{C}{An} = \frac{42}{6.93} = 6.5 \frac{Np}{V} \quad (11)$$

$$Np = 6.5 \frac{Np}{V} \times 220V = 1430 \quad (12)$$

$$Ns = \frac{Np}{Rt} = \frac{1192}{9.16} = 156$$

Por último, se calcula la corriente que circula por el bobinado primario con el fin de elegir el alambre con el calibre apropiado para cada bobinado.

$$I = \frac{48W}{220V} = 0.21A$$

Según las tablas de tolerancia de intensidad que tiene cada calibre de alambre AWG se elige uno de calibre 28 para el bobinado primario, el cual soporta una corriente de 0.3A y para el bobinado secundario se elige un alambre de calibre 19 el cual soporta una corriente de 2.6A. [15]

4.2.1 Diseño de la bandeja eléctrica

Una vez se han seleccionado los elementos del diseño eléctrico se procede a realizar el tablero eléctrico, teniendo en cuenta las normativas que regulan los sistemas eléctricos, como lo son las normas RETIE y NTC2050. De acuerdo con estas normas se tienen en cuenta que entran dentro de la categoría de instalaciones de baja tensión ya que se manejan voltajes menores a 1000v y mayores a 24 v, en donde los componentes eléctricos deben estar ubicados en una bandeja o lamina de acero con un espesor mínimo 0.9 mm para tableros de hasta 12 circuitos. Dicho esto, se procede a realizar el diseño de la bandeja eléctrica en donde se tiene en cuenta las distancias mínimas entre elementos y el tamaño disponible para la bandeja. Para el amplificador de torque se deja una distancia lateral de 72 mm y una distancia de 53mm con respecto al elemento ubicado en la parte inferior, se eligen estas medidas de acuerdo a la recomendación dada por el manual del amplificador en el cual recomiendan un espacio lateral de mínimo 50mm y un espacio tanto inferior como superior de mínimo 30mm, esto con el fin de permitir una mejor disipación de calor. Luego de ubicar el amplificador de torque se ubica el circuito de control en la parte inferior con la distancia ya mencionada, con el fin de optimizar la distancia entre el cable por el cual se envían las señales del amplificador al circuito de control. Pensando en disminuir la interferencia electromagnética se ubicó el breaker y el contactor alejados del circuito de control, estos dos lo más cerca posible para minimizar la distancia ente los cables que los conectan.

Finalmente se presenta la distribución final en la bandeja eléctrica (Figura 33)y en la Tabla 1 se muestran los elementos que lo componen.

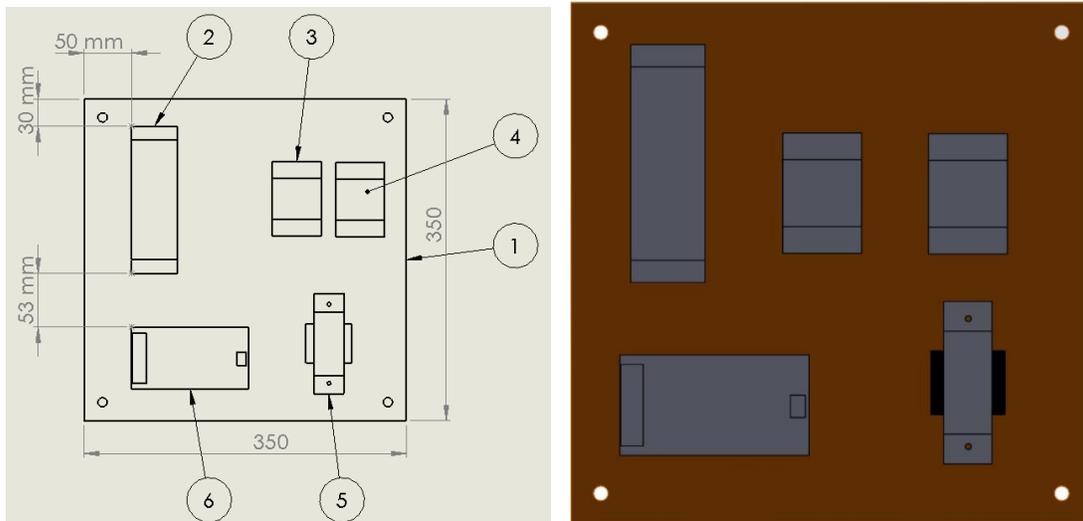


Figura 33. Distribución del tablero eléctrico

N°	Elemento
1	Bandeja tablero eléctrico
2	Amplificador de torque LEGEND SGD-04GT
3	Breaker principal 20A
4	Contactador bipolar
5	Transformador reductor de tensión
6	Circuito de control

Tabla 1. elementos tablero eléctrico

Según la normativa se escoge una lámina de espesor de 1 mm, la cual soporta los esfuerzos mecánicos, eléctricos y térmicos. Para asegurar los conectores se utilizan tornillos de acero, tuercas y clavijas de conexión, para conectar los elementos se hace por medio de cable AWG de calibre 12, el cual soporta la intensidad que circula por los elementos del sistema eléctrico, se cuenta con rotulado que especifica la tensión nominal de operación, corriente nominal de operación, número de fases y el símbolo de riego eléctrico. Para la puesta a tierra se tiene en cuenta que los elementos metálicos que no forman parte de las instalaciones eléctricas, no son incluidos como parte de los conductores del sistema de puesta a tierra y los elementos metálicos que actúan como refuerzo estructural tienen una conexión eléctrica permanente con el sistema de puesta a tierra general, la estructura exterior está cubierta por pintura aislante por lo cual no se generan arcos eléctricos que lleguen o afecten al operario de la máquina, por último el tablero eléctrico está ubicado dentro de la máquina en la parte posterior y solo tiene acceso por la parte delantera.[24][25]

4.3 Diseño del Sistema Electrónico

Para el diseño del sistema electrónico se tiene en cuenta las condiciones de operación de la tarjeta de adquisición de datos y las señales de entrada y salida del amplificador de torque, como lo son el monitor de velocidad, monitor de torque, señal del encoder, señal de finales de carrera y señal de referencia de torque. Debido a que se trabajó con la tarjeta DAQ 6009 de National instruments, es necesario trabajar dentro de los rangos de -10 v a 10 v para entradas análogas, de 0 a 5 v para salidas análogas y 0V o 5V para entradas y salidas digitales, conociendo que la tarjeta reconoce un nivel digital bajo con voltajes entre 0 v a 0.8 v y un nivel digital alto con voltajes de 2 v a 5 v. Para lograr estas condiciones de trabajo es necesario acondicionar las señales y minimizar el ruido del circuito con el fin de obtener lecturas más precisas, ya que al trabajar con motores siempre inducen ruido al sistema. Es importante el diseño del circuito impreso ya que hay que calcular los caminos para que soporten la corriente máxima del circuito, también es importante una correcta organización de los elementos debido a que permite eliminar interferencias y disminuir el ruido eléctrico.

La primera etapa del diseño electrónico es acondicionar la señal de salida de la DAQ que va a la referencia de torque del amplificador, debido a que los rangos de operación de la referencia de torque es de -10 v a 10 v y la salida análoga de la DAQ solo maneja voltajes de 0v a 5v es necesario encontrar una ecuación que permita convertir los rangos de la DAQ a los de operación del amplificador de torque, por medio de una conversión lineal se halla la ecuación de la recta, encontrando la pendiente como se puede ver en la ecuación (13).

x	y
0	-10
2.5	0
5	10

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{10 - (-10)}{5 - 0} = 4 \quad (13)$$

$$Y = 4x - 10$$

Luego de encontrar la ecuación de la recta se elige un amplificador, teniendo en cuenta que cualquier variación o pico de voltaje no deseados en la referencia de torque del driver puede afectar las pruebas de ruptura y fatiga, por ello se escoge un amplificador de instrumentación INA 114, el cual tiene un alto rechazo en modo común. Debido a que la salida del amplificador de instrumentación es descrita por la ecuación(14), es necesario llevar la ecuación de la recta ya obtenida a esta forma.

$$V_{out} = (V_2 - V_1) \times G \quad (14)$$

$$Y = 4x - 10 = (x - 2.5) \times 4$$

Con base en la ecuación (2), que describe la ganancia del amplificador, se procede a calcular la resistencia Rg que permita obtener una ganancia de 4.

$$R_g = \frac{50k\Omega}{(4 - 1)} = 16.7k\Omega$$

Por último, para la primera etapa, hay que tener en cuenta el acople de impedancias, para esto a la salida del amplificador de instrumentación se conecta un amplificador en una configuración de seguidor de voltaje, cuya salida es la que va a la señal de referencia de toque del driver.

Para la segunda entrada del amplificador de instrumentación que es un voltaje fijo de 2.5 v, se realiza un divisor y seguidor de voltaje, este último para acoplar impedancias y asegurar que no exista una caída de tensión en el divisor. Se tiene un voltaje de entrada de 10v proveniente de un regulador lm317 que a su vez alimenta la celda de carga. Para calcular el divisor de voltaje se supone una resistencia R1 de 10KΩ y se calcula la otra a partir de la ecuación (15) característica del divisor de voltaje.

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_2 + R_1} \times V_{in} \quad (15)$$

Despejando se obtiene

$$R_2 = \frac{\frac{V_{out}}{V_{in}} \times R_1}{1 - \frac{V_{out}}{V_{in}}} = \frac{\frac{2.5V}{10V} \times 10k\Omega}{1 - \frac{2.5V}{10V}} = 3.3k\Omega$$

Debido a que el regulador lm317 es ajustable es necesario seguir el esquema de conexión (Figura 34) y calcular la resistencia R2 con el fin de obtener un voltaje fijo de 10v.

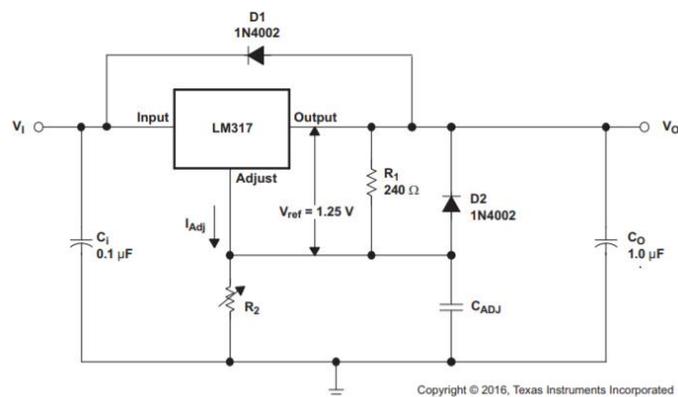


Figura 34. Esquema de conexión del regulador LM317

Para calcular el valor de la resistencia R2 que permita un voltaje fijo de 10V, se despeja R2 de la ecuación (16)

$$V_o = V_{ref} \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + (I_{adj} \times R_2) \quad (16)$$

Donde V_{ref} es un voltaje fijo de 1.25 V, I_{adj} es típicamente $50\mu A$ y R_2 es una resistencia de 240 ohmios.

$$R_2 = \frac{V_o - V_{ref}}{\frac{V_{ref}}{R_1} - I_{adj}} = \frac{10V - 1.25V}{\frac{1.25V}{240\Omega} - 50\mu A} = 1.7k\Omega$$

La siguiente etapa es acondicionar la señal de salida de los finales de carrera, los cuales entregan un voltaje de 12v cuando no detectan la presencia del vástago del motor y -2v cuando la detectan. Para adaptar esta señal a un rango de trabajo de 0v a 5v, lo primero que se hace es eliminar el voltaje negativo por medio de un diodo de silicio, luego usando un diodo Zener polarizado en inversa se atenúa el voltaje a 4.7v, con el fin de leer esta señal por el puerto digital de la tarjeta DAQ 6009. Para el diodo Zener se calcula la resistencia que limita la corriente que pasa por este y por la carga, de acuerdo con la máxima potencia disipada del diodo, para ello primero se calcula la corriente de acuerdo a la ecuación (17).

$$I_{zener} = \frac{0.5W}{4.7V} = 106 \text{ mA} \quad (17)$$

La corriente de entrada de la DAQ que es de 8.5mA, con base en ello se calcula la corriente que tiene que limitar la resistencia según la ecuación (18)

$$I_R = 106 \text{ mA} + 8.5 \text{ mA} = 114.5 \text{ mA} \quad (18)$$

Para hallar la resistencia primero se encuentra el voltaje de esta misma, haciendo uso de la ley de tensiones de Kirchhoff, como se puede ver en la ecuación (19).

$$V_R = 12 \text{ V} - 0.7 \text{ V} - 4.7 \text{ V} = 6.6 \text{ V} \quad (19)$$

Con los valores obtenidos de voltaje y corriente se halla la resistencia necesaria que protege el diodo Zener y las entradas digitales de la tarjeta DAQ 6009.

$$R = \frac{6.6 \text{ V}}{114.5 \text{ mA}} = 57.64 \Omega \quad (20)$$

Debido a que por defecto las entradas digitales de la DAQ están en un estado alto, es necesario acoplar impedancias con el fin de que dicho voltaje no afecte el diodo Zener, para ello se hace uso del encapsulado LM358, el cual contiene dos amplificadores operacionales, uno para cada final de carrera.

Las celdas de carga funcionan con galgas extensiométricas por medio de un puente de Wheastone y su salida se da en el orden de los mili voltios, por lo cual se hace necesario amplificar dicha señal para su lectura en la tarjeta de adquisición de datos. Se trabaja con una celda Honeywell modelo 31, con una capacidad de carga de 100 lb, un voltaje de alimentación de 10 v y cuenta con una resolución de 2 mV/V. De acuerdo con la ecuación (21) y conociendo sus características es posible calcular el voltaje de salida cuando se trabaja con la máxima carga soportada.

$$\text{voltaje salida fondo de escala} = \text{sensibilidad} \times \text{voltaje alimentacion} \quad (21)$$

$$\text{voltaje salida fondo de escala} = 2 \frac{mV}{V} \times 10 V = 20mV$$

Una vez se halla el valor del voltaje de salida a fondo de escala, se calcula la ganancia del amplificador de acuerdo a la ecuación (22), con el fin de obtener valores hasta los 5v, el máximo permitido por la tarjeta de adquisición de datos.

$$G = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{5V}{20mV} = 250 \quad (22)$$

Como la salida de la celda de carga está dada en un rango de voltajes pequeños y viene de un puente de Wheastone, se hace uso de un amplificador de instrumentación INA 114 para acondicionar la señal. Con la ecuación (2) que describe la ganancia del amplificador, se calcula la resistencia que permite dicha amplificación.

$$R_g = \frac{50k\Omega}{(G - 1)}$$

$$R_g = \frac{50k\Omega}{(250 - 1)} = 200\Omega$$

Luego de acondicionar todas las señales, se procede a realizar los cálculos necesarios para una fuente de voltaje interna que alimenta los amplificadores operacionales, el regulador lm317, los finales de carrera, la entrada de puesta en marcha del motor y el freno del motor. la primera etapa en la fuente de alimentación es la etapa de transformación, en la cual se reduce el voltaje de la red bifásica de 220v a un voltaje de 24v, se utiliza un transformador con tap central debido a que para alimentar los amplificadores operacionales se necesita un voltaje de +12 v y -12 v. Los cálculos del transformador se encuentran en la sección 4.2. La siguiente etapa es la de rectificación en la cual por medio de un puente de diodos se realiza la rectificación de onda completa, teniendo en cuenta los elementos del circuito se alimentan con pequeñas corrientes, del orden de los miliamperios, se elige un puente rectificador con una capacidad de 2 amperios. Sigue la etapa de filtrado en la que por medio de capacitores se logra un nivel de tensión más continuo, teniendo en cuenta el voltaje del circuito de 24 v y una corriente de 2A se calculan los capacitores para tener un factor de ripple del 30%, para ello se hace uso de la ecuación(23), no se toma un factor de ripple muy bajo ya que da como resultado capacitores que no son comerciales por su valor tan grande.

$$C = \frac{I}{2 \times f \times (r \times V)} = \frac{2A}{2 \times 120 \text{ HZ} \times (0.3 \times 12)} = 2314 \mu F \quad (23)$$

La última etapa es la de regulación, se realiza por medio de los reguladores lineales LM7812 y LM7912, conectados según el esquema de conexión de la Figura 35. Debido a que el regulador LM7812 alimenta todos los elementos activos del circuito y entrega una corriente de 1.5 A, es necesario tener un disipador de calor.

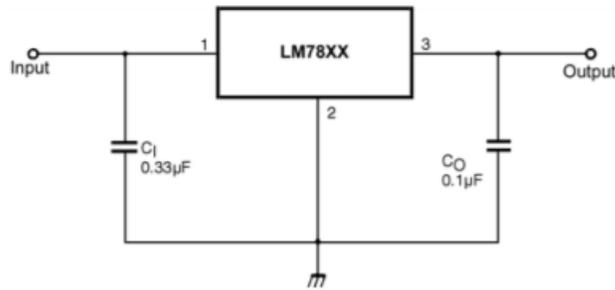


Figura 35. esquema de conexión reguladores LM7818 y LM7912

Como elemento de protección para el circuito se cuenta con un fusible, el cual se encuentra antes del transformador, por lo que se debe calcular el valor de este teniendo en cuenta que la potencia del transformador se mantiene tanto en el bobinado principal como en el secundario y debido a que el primario está sometido a 220v, una pequeña corriente en este punto induce en el secundario una corriente mucho más grande.

$$Pt = 24 \text{ V} \times 2 \text{ A} = 48 \text{ W} \quad (24)$$

$$Ip = \frac{48 \text{ W}}{220 \text{ V}} = 218 \text{ mA} \quad (25)$$

De acuerdo con el dato de la corriente en el bobinado primario que induce una corriente de 2A en el secundario, se elige un fusible comercial de 200mA a 250v.

4.3.1 Diseño de la PCB

Por último, se realiza el diseño del circuito impreso, se calcula el ancho de las pistas según la ecuación (26) teniendo en cuenta varios aspectos como, la máxima corriente que soportan, la diferencia de temperatura entre el aire y la pista, el tipo de pista y el grosor de la pista. debido a que se realiza la PCB con pistas externas las constantes k_1 , k_2 y k_3 tienen valores de 0.0647, 0.4281 y 0.6732. Para las pistas que conectan los elementos de la fuente de alimentación se realizan los cálculos para soportar una corriente de 2A y para el resto de las pistas se calculan para una corriente de 0.5A.

$$ancho = \frac{\left(\frac{I}{K1 \times \Delta T K2}\right)^{\frac{1}{K3}}}{1.378} \quad (26)$$

$$ancho = \frac{\left(\frac{2A}{0.0647 \times 20^{0.4281}}\right)^{\frac{1}{0.6732}}}{1.378} = 17.65 \text{ milésimas}$$

$$ancho = \frac{\left(\frac{0.5A}{0.0647 \times 20^{0.4281}}\right)^{\frac{1}{0.6732}}}{1.378} = 2.25 \text{ milésimas}$$

Por último, se ubican los elementos en la PCB, como se muestra en la Figura 36, dejando espacios para conectar los elementos externos por medio de borneras que facilitan su conexión. En la Tabla 2 se muestra la conexión de cada bornera a los elementos externos como la DAQ o el motor.[26]

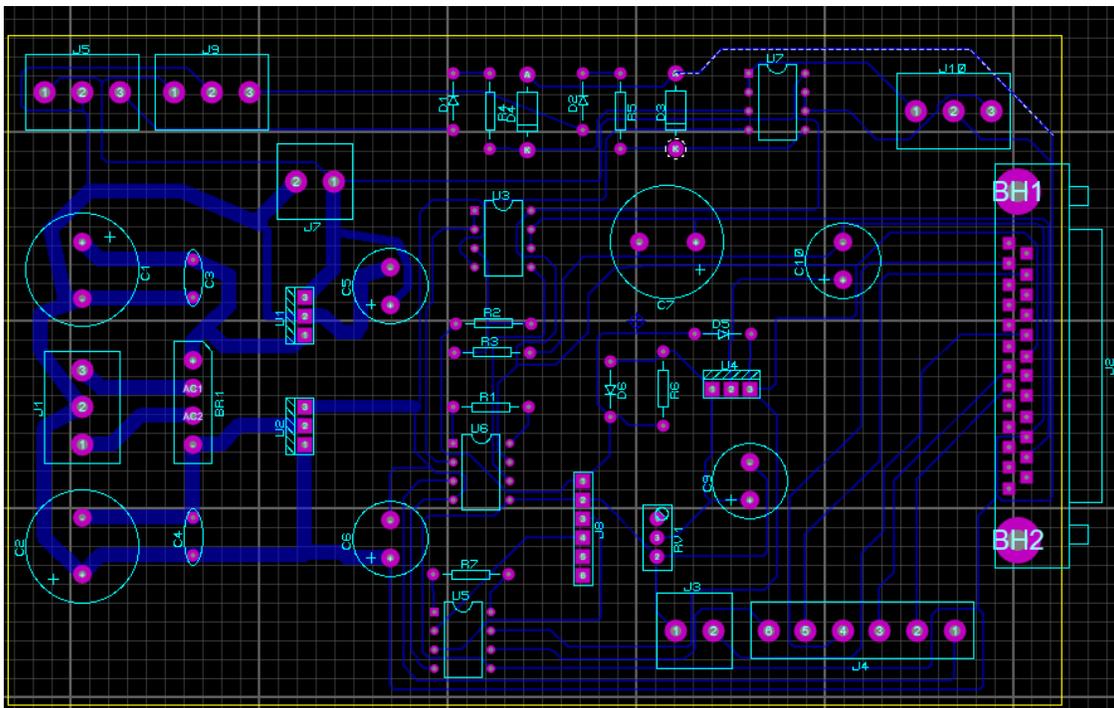


Figura 36. Diseño final de la PCB

Elemento	Función	Conexión	
J1	Entrada del transformador	1	Señal AC
		2	tierra
		3	Señal AC
J3	Entrada Interruptor servo ON	No hay polaridad en el interruptor	
J4	Salida a DAQ	1	A0 0

		2	AI 0
		3	ai1
		4	PFI 0
		5	P0.7
		6	AI 2
J5	Entrada final de carrera 1	1	Cable café
		2	Cable azul
		3	Cable negro
J7	Entrada freno motor	No hay polaridad	
J8	Entrada celda de carga	1	Cable rojo
		2	Cable negro
		3	Cable blanco
		4	Cable verde
		5	Cable azul
		6	Cable café
J9	Entrada final de carrera 2	1	Cable café
		2	Cable azul
		3	Cable negro
J10	Salida señal de finales de carrera a DAQ	1	P0.0
		2	GND
		3	P0.1

Tabla 2. Conexión de borneras a elementos externos

4.4 Interfaz de control

La interfaz de control es desarrollada mediante el software LabVIEW, el cual nos proporciona acceso rápido a información de datos y hardware, que en conjunto con la tarjeta de adquisición de datos DAQ 6009 es posible controlar y supervisar señales del motor y la celda de carga, la interfaz entrega al usuario las señales de torque y velocidad del motor, la lectura de la celda de carga y la salida actual de la DAQ que controla la referencia de torque, todas estas señales medidas en voltaje. En la Figura 37 se muestra la interfaz de usuario y en la Tabla 3 se presentan los elementos que la componen.

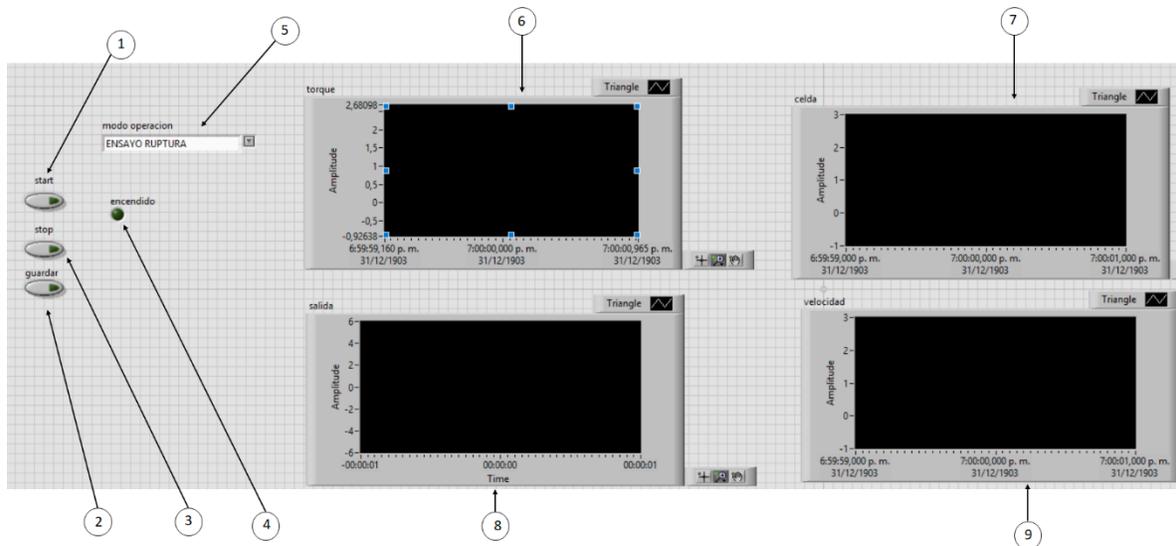


Figura 37. Diseño de la interfaz de Usuario

N°	Elemento
1	Pulsador de start para dar inicio a la prueba
2	Pulsador para guardar los datos de la grafica
3	Pulsador de stop para detener la prueba
4	Indicador de encendido de la prueba
5	Selector modo de operación
6	Grafica señal del monitor de torque
7	Grafica señal de la celda de carga
8	Grafica salida de referencia de torque
9	Grafica señal del monitor de velocidad

Tabla 3. elementos de la interfaz de usuario

El operario se encontrará con un selector para elegir el modo de operación del sistema, los cuales son: manual, ensayo de fatiga o ensayo de ruptura, como se presenta en la Figura 38, se puede iniciar o detener cada modo de operación desde la interfaz con los pulsadores start y stop o por medio de los botones externos ubicados en el panel de control de la máquina. También se puede visualizar el estado de la prueba a través del indicador de encendido, el cual se representa con un LED.

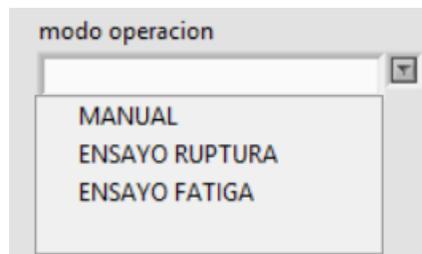


Figura 38. Selección de Modos de Operación

Cada modo de operación cuenta con parámetros distintos que el usuario debe que definir antes de iniciar la prueba. Al seleccionar el modo de operación aparecerán dichos parámetros, como se muestra en la Figura 39, Figura 40 y Figura 41

Modo Manual

En el modo manual aparece un interruptor para seleccionar la dirección del movimiento del motor, tanto para subir el vástago como para bajarlo, una vez se ha seleccionado la dirección se procede a presionar el pulsador start para dar inicio al movimiento, el cual lo hace a una velocidad constante mínima, con el fin de dar un tiempo suficiente de reacción para que el usuario pueda detener el movimiento en la posición deseada.

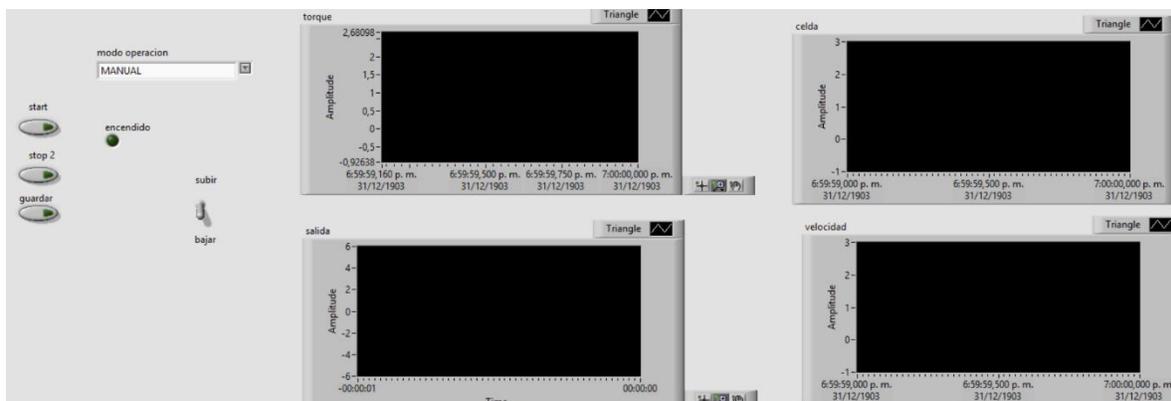


Figura 39. Interfaz de usuario cuando se ingresa en modo manual

Modo Ensayo de ruptura

En el modo ensayo de ruptura se aplica una señal rampa decreciente, por lo tanto, el usuario únicamente ingresa el incremento de la señal de referencia de torque, en donde la pendiente de la rampa está dada por este valor y por el tiempo que se demora en incrementarlo, el cual es realizado cada 2 s. Esta prueba puede finalizar de 3 modos, si el usuario lo hace manualmente por medio del pulsador stop, automáticamente al recibir la señal del final de carrera inferior y por último si se detecta que la celda de carga volvió a su valor nominal sin carga.

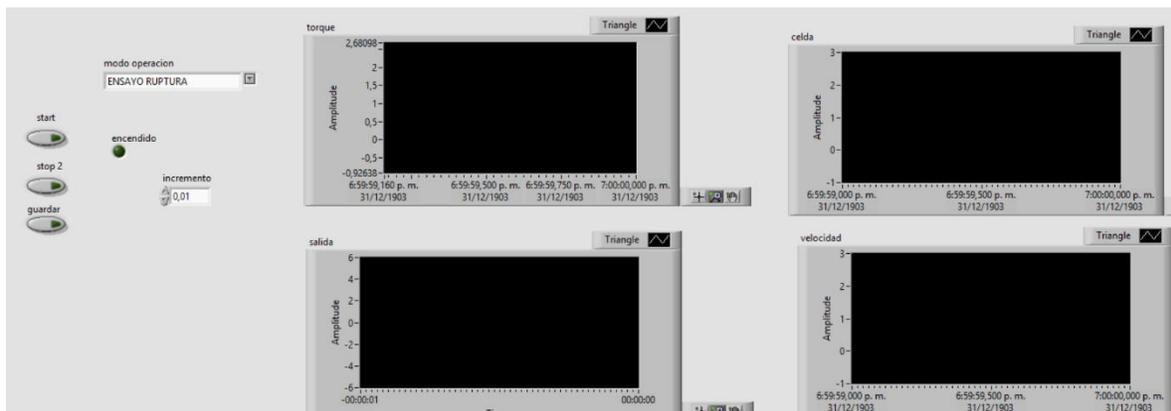


Figura 40. Interfaz de usuario cuando se ingresa en modo ensayo de ruptura

Modo Ensayo de Fatiga

En el modo ensayo de fatiga se aplica una señal diente de sierra que simula el estiramiento del musculo, por lo tanto, antes de iniciar la prueba el usuario debe ingresar los valores de frecuencia y amplitud del ensayo. Según musculo a probar, se debe escoger el valor de la amplitud, ya que con valores grandes puede llegar a romper el musculo, sin conseguir ninguna oscilación. Hay que tener en cuenta que el motor debe vencer la inercia y por lo tanto el voltaje mínimo para mover el motor es de 0.6 V, por lo tanto, se recomienda trabajar con amplitudes mayores a 0.8 V y frecuencia inferiores a 500 mHz, teniendo en cuenta la zona muerta en la transición entre los 0v y 0.6v, lo cual a frecuencias mayores genera un desplazamiento mínimo. La señal de salida de referencia de torque se vuelve cero cuando se activa el final de carrera superior, con el fin de garantizar que siempre empieza el movimiento hacia abajo en el mismo punto en el que se inició la prueba.

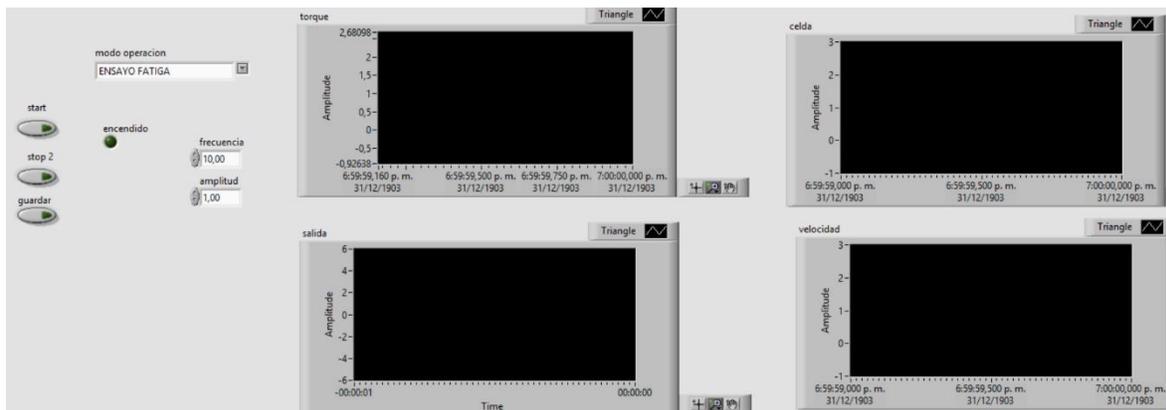


Figura 41. Interfaz de usuario cuando se ingresa en modo ensayo de fatiga

El usuario tiene la opción de guardar los datos en una hoja de Excel que contiene los valores de los 4 gráficos, fecha y hora en que se realizó la prueba, esto permite llevar un registro de los resultados, con el fin de analizarlos y compararlos. Al pulsar el botón guardar se abre una ventana emergente que permite al usuario escoger el nombre y la ubicación del archivo, es importante guardar el archivo bajo la extensión “.csv”, de lo contrario no se visualizaran los datos correctamente. Los datos quedan guardados en una única columna de la hoja de Excel, delimitados por un espacio entre dato y dato, por lo que el usuario debe separar los datos para su posterior uso. Debido a que son pruebas con variaciones lentas, los valores no tienen grandes cambios, por ello se tiene una frecuencia de muestreo de 10Hz, que reduce el número de datos repetidos y optimiza la memoria utilizada evitando saturar el sistema de información.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	waveform	celda	velocidad	torque	salida						
2	t0	31/12/1903 19:00:00,000000		31/12/1903 19:00:00,000000		31/12/1903 19:00:00,000000			31/12/1903 19:00:00,000000		
3	delta t	0,100000	0,100000	0,100000	0,100000						
4											
5	time	celda	velocidad	torque	salida						
6	31/12/1903 19:00:00,000000		2,397529E+0	4,003777E-2	2,881056E-2	-1,990000E-2					
7	31/12/1903 19:00:00,100000		2,377127E+0	-1,598708E-2	3,135995E-2	-2,990000E-2					
8	31/12/1903 19:00:00,200000		2,366926E+0	2,730485E-2	3,390934E-2	-3,990000E-2					
9	31/12/1903 19:00:00,300000		2,366926E+0	4,385593E-3	3,900812E-2	-4,990000E-2					
10	31/12/1903 19:00:00,400000		2,349074E+0	9,478761E-3	3,645873E-2	-5,990000E-2					
11	31/12/1903 19:00:00,500000		2,351625E+0	1,457193E-2	1,861301E-2	-6,990000E-2					
12	31/12/1903 19:00:00,600000		2,341424E+0	1,839009E-3	4,410689E-2	-7,990000E-2					
13	31/12/1903 19:00:00,700000		2,341424E+0	1,202535E-2	5,940322E-2	-8,990000E-2					
14	31/12/1903 19:00:00,800000		2,346524E+0	1,966510E-2	5,685383E-2	-9,990000E-2					
15	31/12/1903 19:00:00,900000		2,354175E+0	1,966510E-2	5,175505E-2	-1,099000E-1					
16	31/12/1903 19:00:01,000000		2,349074E+0	-2,108025E-2	7,215016E-2	-1,199000E-1					
17	31/12/1903 19:00:01,100000		2,341424E+0	2,730485E-2	1,460824E-1	-1,299000E-1					
18	31/12/1903 19:00:01,200000		2,343974E+0	1,457193E-2	5,175505E-2	-1,399000E-1					
19	31/12/1903 19:00:01,300000		2,356725E+0	2,221168E-2	4,920567E-2	-1,499000E-1					
20	31/12/1903 19:00:01,400000		2,356725E+0	1,839009E-3	4,920567E-2	-1,599000E-1					
21	31/12/1903 19:00:01,500000		2,356725E+0	1,839009E-3	4,920567E-2	-1,599000E-1					

Figura 42. Ejemplo de recopilación de datos en Excel

5. PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS MUSCULARES

Uno de los propósitos del presente proyecto es estudiar el comportamiento de los músculos frente a fuerzas externas controladas, para ello es necesario extraer los tejidos del miembro del animal que se desea estudiar, durante las pruebas de este proyecto se toman como muestras los músculos del miembro pelviano de un bovino, se toma la sección inferior desde la pierna de la vaca hasta la pezuña. Como primera medida se debe cortar el cuero de forma superficial con un escalpelo sin tocar el músculo ya que se puede romper y esto afectaría las medidas en el ensayo, al tomar esta sección del bovino es posible encontrar músculos previamente cortados debido a que estos vienen completos hasta la pelvis del animal.



Figura 43. Preparación del miembro inferior torácico de un bovino para estudio muscular, corte superficial del cuero del animal

En la Figura 43 se muestra el inicio de la extracción, las tijeras que se ven insertadas son para separar el músculo de las uniones con las venas, articulaciones, huesos u otros tejidos musculares; en este proceso se encuentra la fascia (membrana que recubre el tejido muscular), la cual debe ser extraída junto con el músculo, esto permitirá que durante el proceso no se sequen las muestras y de este modo conservar sus propiedades mecánicas.

Se deben identificar los músculos, donde comienzan, donde terminan y como se enlazan unos con otros, para ello se separan las venas, grasa y demás tejidos blandos que rodean el músculo (Figura 44). Luego de ello se realizan cortes en los extremos de los tejidos para separarlos del miembro; terminado este proceso se procede a desligar la fascia del músculo, para ello se hace uso de tijeras quirúrgicas con punta redonda para no estropear la muestra, y de esta manera queda el músculo listo para la prueba.



Figura 44. Identificación del músculo extensor común de los dedos de la parte distal del miembro torácico del bovino.

Durante el proceso de extracción de esta sección del animal se pueden obtener más de 5 tipos de tejidos musculares, sin embargo, estos tejidos tienden a secarse cuando no están en su estado natural, cuando esto sucede el músculo pierde sus propiedades mecánicas y por lo tanto el estudio será obsoleto; se plantea una solución de conservación para los tejidos, inicialmente se prepara una solución de formol diluido al 10% [27][28], sin embargo, al plazo de 24 horas se percibe un cambio en las muestras ya que se endurecen y ponen fibrosas, es por esto, que se decide reducir el porcentaje de la solución al 4%; al realizar este cambio se disminuye el riesgo para el operario al manipular las muestras y estas mantienen sus propiedades. En el mercado se encuentra el formol en una concentración de 37% a 40% por lo tanto para diluirlo se mezcla con agua; para obtener un litro de solución se añaden 40ml de formol al 40% y 960ml de agua, cuando la solución necesita conservar propiedades específicas el agua debe ser destilada [28], debido a que para el presente proyecto la necesidad es conservar la humedad en los músculos el diluyente puede ser agua tomada de la llave.

La preparación de la solución se debe hacer en un lugar con ventilación, donde no se ingresen alimentos, con guantes, tapabocas industrial, gafas de seguridad y bata de laboratorio, ya que al manipular el formol en estas concentraciones es peligroso para la salud causando irritaciones en los ojos, quemaduras en la piel, irritación en las vías respiratorias, y es tóxico en caso de ingestión. El recipiente en el cual se va a preparar la solución y se mantendrán las muestras debe ser hermético, y el nivel de llenado no debe superar el 80% de su capacidad para evitar salpicaduras y derrames, debe etiquetarse con el nombre del tipo de residuo químico (Figura 45). Se debe almacenar a una temperatura ambiente (15-25 ° C) y mantener protegido de la luz directa del sol y de la humedad. [29]



Figura 45. Etiqueta para el envase de las muestras de tejidos musculares [29]

Una vez preparadas las muestras y conservadas en la solución se extraen una a una para realizar las pruebas respectivas, para mayor comodidad durante el análisis de resultados y la caracterización de los músculos se pueden identificar como se muestra en la Figura 46



Figura 46. Músculos preparados para ensayo

Una vez preparados los tejidos se deben montar en la máquina para la prueba respectiva, se toma el material con guantes debido a que han estado sumergidos en solución de formol y se ubican en las mordazas, con la llave de 1/2" se aprietan las mordazas a tal punto que no se suelten los músculos, sin embargo, se debe tener precaución de no comprimir los músculos por completo ya que esto generaría que se rompieran en el punto de contacto con la mordaza y las respuestas entregadas durante el proceso serán obsoletas.



Figura 47. Montaje del músculo en las mordazas de la máquina de ensayo

6. PRUEBAS Y RESULTADOS

Finalmente se realizan las pruebas de fatiga y ruptura de los músculos, uno de los resultados esperados es la similitud de respuesta del sistema frente diferentes tipos de músculos. Para iniciar las pruebas se realiza todo el procedimiento de puesta en marcha mencionado en el capítulo 5.

Las señales de análisis a encontrar son:

Referencia de torque: Referencia de voltaje de entrada al motor para realizar la fuerza necesaria para el ensayo, sea de ruptura o de fatiga.

Monitor de torque: Lectura del torque aplicado por el motor al músculo, donde 5v representan el torque máximo.

Monitor de velocidad: Señal que representa la velocidad del motor, donde (1V/1000rpm); también se presenta la escala de velocidad del vástago, dada por (1V/1000mm/sec).

Celda de carga: Señal que representa la fuerza aplicada al músculo, donde 5V representan la máxima fuerza soportada por el sensor.

Para obtener los cálculos de fuerza en los músculos se cuentan con las ecuaciones (27) y (28) para calcular la aplicada por el motor, y con la ecuación (29) el cálculo que soporta la celda para hacer las conversiones necesarias al valor.

$$Par\ motor = \frac{Potencia\ motor}{\frac{rev * 2 * \pi}{60}} * Reduccion \quad (27)$$

$$F = \frac{Par\ motor * 1000}{Radio\ Eje} \quad (28)$$

$$F = masa * gravedad \quad (29)$$

6.1 Ruptura

En las pruebas de ruptura se debe tener en cuenta que la máxima fuerza que puede hacer el motor está limitada por la capacidad de carga de la celda, si el músculo soporta mayor fuerza se debe detener la prueba y cambiar la celda por una de mayor capacidad, dentro del programa es posible configurar este límite, es decir, cuando la lectura del sensor llega a un voltaje máximo de 4V se detiene automáticamente la prueba para evitar que el elemento de medida se dañe.

Para todas las gráficas se verá que la señal de referencia se presenta con pendiente negativa, esto es debido a que el motor se encuentra en descenso, por lo tanto, el voltaje que se ingresa al amplificador

de torque es negativo. La señal es una entrada de rampa para que el torque aumente de forma lineal y el músculo pueda llegar a su punto de ruptura.

La señal de torque se mantiene constante en las pruebas, mostrando una pendiente positiva con los valores de la señal de referencia divididos a la mitad.

Las pruebas de ensayo 1 y 2 se hacen con un músculo de la sección del hombro del miembro torácico de un bovino, mientras que las pruebas 3 y 4 se hacen en tendones musculares de la sección de la pezuña del mismo miembro, en estos últimos no se toma en cuenta la señal de la celda.

Ensayo de ruptura 1:

En la parte A de la Figura 48 se destacan cambios en las señales de monitor de velocidad y lectura de la celda; cuando el monitor de velocidad aumenta por primera vez significa que el músculo cede ante la fuerza y se elonga, en el mismo punto la celda registra cambios en la fuerza aplicada, en el momento en que esta llega a su punto máximo la velocidad aumenta drásticamente, ya que con la misma referencia de torque y sin oposición el desplazamiento es mayor. Se hace el cálculo de la fuerza aplicada en la muestra con base en los datos arrojados por la celda, teniendo en cuenta que el sensor soporta un máximo de 100lb (45.3592Kg) y según el tratamiento de la señal, cuando llegue a su punto máximo arrojará un valor de 5V, por lo tanto, se hace una conversión con una regla de tres para obtener el valor, el valor de fuerza máxima de la celda se obtiene con base en la ecuación (29).

$$F = \frac{1.15V * 444.52N}{5V} = 102.2396N$$

Con base en las ecuaciones (27) y (28) se obtiene el valor de fuerza del motor que es de:

$$Par\ motor = \frac{400W}{\frac{390rpm * 2 * \pi}{60}} * \frac{14}{46} = 2.98Nm$$

$$F = \frac{2.98Nm * 1000}{22.5mm} = 132.48N$$

Estos resultados demuestran que la fuerza aplicada al musculo es coherente tanto en la lectura de la celda como la del amplificador del motor.

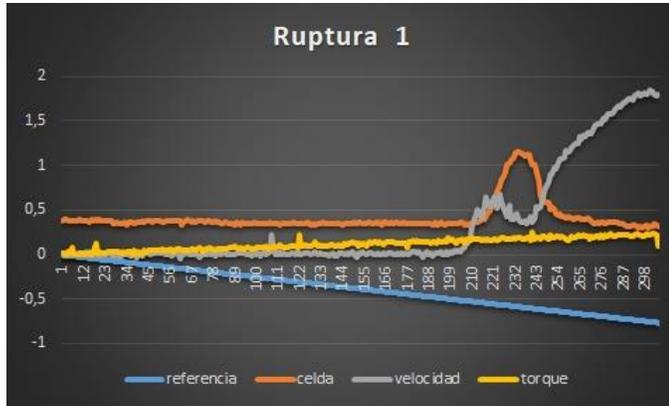


Figura 48. Respuestas al ensayo de ruptura 1; A, Gráficas de las señales de respuesta; B, Resultado físico del comportamiento del músculo ante la fuerza

Ensayo de ruptura 2:

El ensayo de ruptura para este músculo muestra una curva de velocidad mayor antes del incremento en la fuerza aplicada en el músculo, esto quiere decir que la muestra fue cediendo durante la prueba, por lo tanto, la celda registra un valor de fuerza constante, sin embargo, al igual que en el primer ensayo en el momento de máxima fuerza la velocidad disminuye, y cuando la muestra se rompe la celda registra la fuerza mínima y el driver un aumento en el monitor de velocidad. El cálculo de fuerza para este músculo fue de:

$$F = \frac{1.04V * 444.52N}{5V} = 92.46N$$

Con base en las ecuaciones (27) y (28) se obtiene el valor de fuerza del motor que es de:

$$Par\ motor = \frac{400}{\frac{650rpm * 2 * \pi}{60}} * \frac{14}{46} = 1.79Nm$$

$$F = \frac{1.79Nm * 1000}{22.5mm} = 79.48N$$

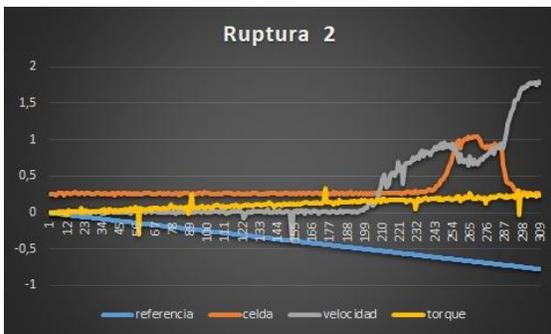


Figura 49. Respuestas al ensayo de ruptura 2; A, Gráficas de las señales de respuesta; B, Resultado físico del comportamiento del músculo ante la fuerza

Ensayo de ruptura 3:

En la gráfica presentada en la Figura 50 se muestran los valores de las señales de referencia velocidad y torque monitoreados por el driver, la curva de velocidad es la que destaca el comportamiento del músculo ya que registra un pico de subida significativo, esto quiere decir que el tejido en ensayo ha llegado a su punto de ruptura. La fuerza aplicada se obtiene con base en las ecuaciones (27) y (28)

$$Par\ motor = \frac{400W}{\frac{270rpm * 2 * \pi}{60}} * \frac{14}{46} = 4.31Nm$$

$$F = \frac{4.31Nm * 1000}{22.5mm} = 191.36N$$



A



B

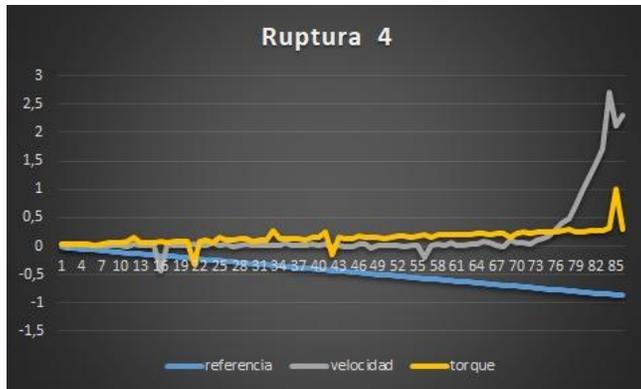
Figura 50. Respuestas al ensayo de ruptura 3 en el tendón muscular extensor digital lateral; A, Gráficas de las señales de respuesta; B, Resultado físico del comportamiento del músculo ante la fuerza

Ensayo de ruptura 4:

En la Figura 51 se muestra el valor de incremento nuevamente de la velocidad cuando el torque aplicado del motor es mayor, con la fuerza del motor calculada con las ecuaciones (27) y (28).

$$Par\ motor = \frac{400W}{\frac{409rpm * 2 * \pi}{60}} * \frac{14}{46} = 2.84Nm$$

$$F = \frac{2.84Nm * 1000}{22.5mm} = 126.32N$$



A



B

Figura 51. Respuestas al ensayo de ruptura 4 en el músculo flexor radial del carpo; A, Gráficas de las señales de respuesta; B, Resultado físico del comportamiento del músculo ante la fuerza

En la lectura de las señales se presentan diferentes picos, estos son la representación del ruido inducido por el motor a la señal de adquisición de datos, sin embargo, la señal se visualiza en los resultados.

Durante las pruebas se evidencio un cambio en las curvas dependiendo del tipo de musculo, es decir, cuando se analizan tendones musculares se cuenta con un pico de velocidad en el momento de ruptura, esto debido a que las fibras que lo componen no presentan la misma elasticidad como la de un músculo de fibras rojas, en estas últimas se evidencia la curva de limite elástico del material, ya que la muestra cede en un punto y con la fuerza continua llega a su punto de ruptura.

6.2 Fatiga o cizalladura

Para estas pruebas se envía una señal dientes de sierra con diferente frecuencia y amplitud según el músculo que se va a estudiar. Durante el desarrollo de estas pruebas se encontraron fallas ya que cuando el músculo es demasiado grueso o fuerte el desplazamiento es menor, por lo tanto, en el movimiento ascendente el motor incrementaba la distancia de trabajo en compresión durante cada ciclo, de modo que en un punto llega al tope de carrera del vástago y no se realiza la prueba correctamente; la solución planteada es hacer uso de los finales de carrera del motor, uno de estos dispositivos es desplazable, de tal modo que se puede ubicar en el lugar que se desea, para lograr esto se busca el punto de compresión del músculo y se ubica el motor allí, esto se hace porque la señal de cizalladura inicia siempre en descenso, luego se ubica el final de carrera, para encontrar el lugar adecuado se debe desplazar a lo largo del camión, este cuenta con una luz que permanece encendida, cuando el LED se apaga es porque está en la misma posición que el vástago, esto permite que durante la prueba se haga un corte en la señal cuando llega al final de carrera y no permite que el motor avance una distancia no deseada, como se muestra en la figura 43.

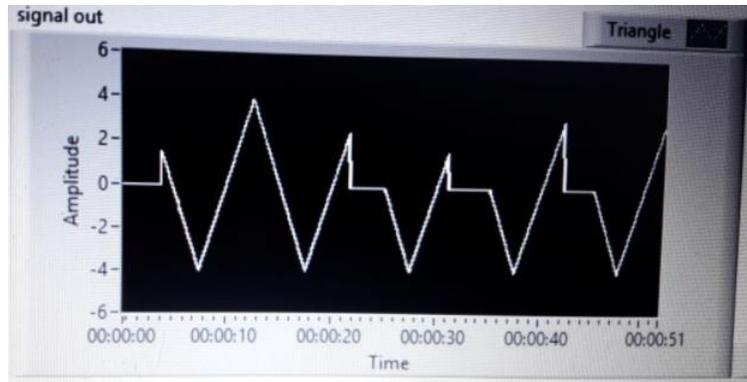


Figura 52. Gráfica de la señal de salida interrumpida por el final de carrera

Para la señal de referencia se ingresa el valor de la amplitud y frecuencia, con esta primera se controla la fuerza aplicada en el músculo, y el valor de frecuencia determina el tiempo que se está ejerciendo dicha fuerza en el tejido.

Ensayo de fatiga 1:



Figura 53. Gráfica de resultados de fatiga 1 en el músculo extensor común de los dedos

En la Figura 53 se muestran las señales de referencia, la cual se muestra cortada debido a la acción del final de carrera, como se ha explicado anteriormente, en la tercera señal de rampa se muestra completa debido a que el tejido en prueba cedió ante la fuerza aplicada, la celda de carga representa un valor de fuerza aplicada constante, cuando se aplica tracción esta llega a su punto máximo y desciende lentamente a medida que el motor inicia el proceso de compresión, en la gráfica de velocidad se observan picos en el punto más alto de la celda y en el de corte de la señal de referencia, la primera debido a que la velocidad aumenta constantemente y cuando hace la fuerza máxima en el tejido este lo detiene y el valor desciende a cero, lo mismo sucede en el proceso de ascenso del vástago, ya que cuando se topa con el final de carrera el valor de la velocidad cae a cero, finalmente con el monitor de torque se observa el seguimiento a la referencia con los valores divididos a la mitad. Se calcula la fuerza ejercida por el motor con las ecuaciones (27) y (28)

$$Par\ motor = \frac{400W}{\frac{190rpm * 2 * \pi}{60}} * \frac{14}{46} = 6.12Nm$$

$$F = \frac{6.12Nm * 1000}{22.5mm} = 271.93N$$

Y la leída por la celda de carga.

$$F = \frac{3.1V * 444.52N}{5V} = 275.6N$$

Ensayo de fatiga 2:

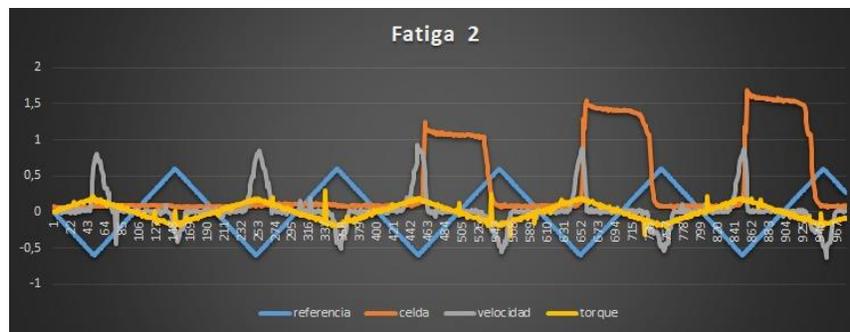


Figura 54. Gráfica de resultados de fatiga 2

La señal de referencia no se muestra cortada debido a que la amplitud seleccionada completa la carrera elasticidad en el músculo, en la gráfica de la celda se muestran los valores de fuerza a mitad de la prueba, esto se debe a que el músculo generó una contracción durante la prueba, por lo tanto, con el paso del tiempo la celda registra las fuerzas aplicadas en el músculo cada vez mayores, al igual que en la prueba anterior la velocidad tiene un comportamiento de picos ya que se elevan hasta un punto en el que o el músculo o en este caso el cambio de dirección, detienen el vástago para iniciar la velocidad en el otro sentido, de igual manera la señal que representa el monitor de torque es similar a la referencia con los valores en escala de $\frac{1}{2}$. De igual forma se calcula la fuerza ejercida por el motor en el punto máximo, con las ecuaciones (27) y (28)

$$Par\ motor = \frac{400W}{\frac{377rpm * 2 * \pi}{60}} * \frac{14}{46} = 3.08Nm$$

$$F = \frac{3.08Nm * 1000}{22.5mm} = 137.04N$$

Y la fuerza leída por la celda de carga en el mismo punto.

$$F = \frac{1.68V * 444.52N}{5V} = 149.36N$$

7. CONCLUSIONES

Gracias al diseño de la máquina de ensayo de tracción para tejidos musculares es posible analizar diferentes tipos de muestras, además de que permite trabajar con los datos recopilados durante cada prueba para estudiar el comportamiento de los materiales ensayados y de esta forma aportar a los proyectos de investigación futuros.

El diseño de la máquina al ser construido con base en elementos de altas cargas permite realizar estudios de todo tipo de tejidos musculares y no musculares, la fuerza proporcionada por el motor es suficiente para romper materiales de tipo no biológico, simplemente es necesario adecuar otro tipo de mordazas al sistema y ubicar una celda de carga que soporte las fuerzas del material a estudiar.

Con el diseño en Solid Works de la máquina es posible comprar datos teóricos de análisis de fuerzas con un dato de simulación, teniendo en cuenta los puntos de falla de la estructura y la precisión en la respuesta de un sistema asistido por computador.

El diseño de la máquina permite crear una base de datos de comportamiento de tejidos musculares que aún no han sido caracterizados, apoyando a los futuros proyectos de investigación de la Universidad Militar Nueva Granada, además se puede analizar el comportamiento de estos biomateriales comparándolos con los resultados presentes en la teoría.

En el presente proyecto se logra evidenciar un proceso de desarrollo de áreas como: mecánica, representada en el análisis estructural y construcción de la máquina; electrónica, en el acondicionamiento de las señales para interacción entre los sensores, actuadores y tarjeta de adquisición; control, al relacionar las señales de referencia con el amplificador, siendo este el controlador del motor; y computación, en el desarrollo de la interfaz y tratamiento de datos. Todos estos como fundamentos de la ingeniería mecatrónica.

TRABAJOS FUTUROS

Una de las principales limitaciones para el estudio de los músculos es la sujeción de los mismos, esto debido a la estructura que poseen ya que unos son planos, otros circulares y otros con varias entradas como puntos de agarre, es por ello que se plantea una propuesta de trabajo en la cual se desarrollen diferentes tipos de mordazas para tejidos musculares específicos, teniendo en cuenta también el tamaño de estos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. L. Rodríguez García, “Fuerza, su clasificación y pruebas de valoración”, *Univ. Murcia*, 1996.
- [2] M. F. V. Nordin, “Biomecánica del músculo esquelético”, *Biomecánica básica del Sist. musculoesquelético*, 2004.
- [3] P. López y Universidad Autónoma de México, “Desarrollo tecnológico para evaluar material usado en válvulas cardíacas | gaceta Digital UNAM”, 2017. [En línea]. Disponible en: <http://www.gaceta.unam.mx/20170209/desarrollo-tecnologico-para-evaluar-material-usado-en-valvulas-cardiacas/>. [Consultado: 24-ago-2017].
- [4] M. E. Calafat, “Materiales Biológicos y Biomateriales”, *Real Acad. Ciencias*, 2000.
- [5] M. Thiriet, L. Graziano, y L. Preziosi, *Modeling of Biological Materials*. 2007.
- [6] C. Urbina, S. de la Flor, y F. Ferrando, “Operativa de ensayo para la determinación de las características mecánicas de alambres con memoria de forma”, *An. Ing. mecánica*, 2002.
- [7] A. L. Virgen, J. D. B. Briceño, R. M. Perafán, F. C. García, C. R. P. Jaramillo, y J. J. G. Alvarez, “Desarrollo de una prensa para pruebas estáticas y dinámicas de elementos ortopédicos y tejidos biológicos”, *Ing. e Investig.*, 2008.
- [8] G. Ponce, “Sistema Muscular”, en *Anatomía y fisiología*, Baja California: Universidad Autónoma de Baja California, 2004.
- [9] D. Moreau, J. L. Stockslager, R. Cheli, y K. Haworth, *Anatomy & physiology*, 2a Edición. SPRINGHOUSE.
- [10] A. Viladot Voegeli, “Biomecánica del músculo”, en *Lecciones básicas de biomecánica del aparato locomotor*, Barcelona: Springer, 2001, pp. 85–101.
- [11] M. Izquierdo, *Biomecánica y bases neuromusculares de la actividad física y el deporte*. Editorial Médica Panamericana, 2008.
- [12] “Sistemas de ensayo, maquinas de ensayo, ensayo de materiales, ensayos mecanicos”. [En línea]. Disponible en: <http://www.sistemasdeensayo.com/productos.asp?Idfam=9&idSubFam=16>. [Consultado: 24-ago-2017].
- [13] R. Getty, S. Sisson, J. D. Grossman, y R. Martín Roldán, *Anatomía de los animales domésticos*, 5 Edición. Salvat, 1982.
- [14] K. L. Moore y A. M. R. Agur, *Fundamentos de anatomía con orientación clínica*, 2a Edición. Edit. Médica Panamericana, 2003.
- [15] I. L. Kosow y V. González Pozo, *Máquinas eléctricas y transformadores*. Prentice Hall Hispanoamericana, 1993.
- [16] Yaskawa, “LEGEND Digital Torque Amplifier SGD7 User ’ s Manual”. .
- [17] M. Espinoza Esquivel, “Diseño y construcción de una celda de carga”, Universidad Autónoma de Nuevo León, 1995.

- [18] A. Navas y H. Tioli, “Diseño y construcción de celdas de carga para comprobaciones intermedias de máquinas de fuerza”, *Revista Ingeniería*, vol. 22, núm. 1, Costa Rica, 22-mar-2013.
- [19] B. Bellini, “Sensores de presión utilizados en las plataformas de fuerza aplicadas al estudio de la posturografía.”, 2009.
- [20] Tutoriales 5 Hertz Electrónica, “Celdas de carga.” [En línea]. Disponible en: <http://www.electrrio.com/Anuncios/SensoresyModulos/Peso/sensordepeso.pdf>. [Consultado: 03-sep-2017].
- [21] “Módulos de pesaje a tracción”, *METTLER TOLEDO*. [En línea]. Disponible en: https://www.mt.com/mx/es/home/products/Industrial_Weighing_Solutions/AutomPrecision/load-cell-and-weigh-module/tension.html. [Consultado: 14-ago-2017].
- [22] Honeywell, “Model 31 Mid-Range Precision Miniature Load Cell”, núm. note 3. 2008.
- [23] R. L. Mott y V. González y Pozo, *Diseño de elementos de máquinas*, 4ta edición. Pearson Prentice-Hall, 2006.
- [24] Ministro de minas y energía, “REGLAMENTO TÉCNICO DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS (RETIE)”, 2013.
- [25] Instituto Colombiano De normas Técnicas y certificación, “Norma Tecnica Colombiana 2050”. 1998-11-25, 1998.
- [26] “Cálculo de ancho de pista en una PCB. – Simplificate 2.0”, 2012. [En línea]. Disponible en: <https://cuningan.wordpress.com/2010/10/19/calculo-de-ancho-de-pista-en-una-pcb/amp/>. [Consultado: 30-sep-2018].
- [27] D. Wolff, P. Villa, A. Neirreitter, C. Ruibal, G. A. Ugon, G. Salgado, y M. Cantín, “Comparative Study between Conservative Solutions with and without Formaldehyde in Human Placenta”, *Int. J. Morphol.*, vol. 30, núm. 2, pp. 432–438, jun. 2012.
- [28] F. Gaete, J. Amaro, R. Jara, y P. Toro, “Procedimientos para Preparación de Formalina Neutral al 10%”, 2012.
- [29] J. A. Giménez, A. Fontana Justes, A. Moñita Blanco, Y. Sanz Andrés, P. Sota Ochoa, A. Pérez Ibáñez, E. Mejía Urbáez, S. Zalaya Cortés, D. Rosero Cuesta, A. Buesa Iglesias, S. Vicente Arregui, I. Fondón Iritia, A. Puertas Cantería, A. Artigas Jiménez, E. Olmedo Arbizu, y J. M. Sanz Anquela, “Alternativas al formol como fijador de piezas y tejidos anatómicos”, en *Libro Blanco de la Anatomía Patológica*, España, 2011, pp. 101–140.

Anexos

ruptura 1							
referencia	celda	velocidad	torque	referencia	celda	velocidad	torque
-0,00495	0,3794823	0,01347452	0,01643348	-0,36995	0,346328	0,00073622	0,1311871
-0,00745	0,3947843	0,01092686	0,001133	-0,37245	0,3514286	0,02366516	0,1235368
-0,00995	0,3973346	0,00583154	0,00878324	-0,37495	0,3488783	0,02621282	0,1464876
-0,01245	0,3794823	0,03895112	0,02918388	-0,37745	0,3565293	-0,00181144	0,1209868
-0,01495	0,3871333	0,00328388	0,02153364	-0,37995	0,346328	-0,02983569	0,1311871
-0,01745	0,3820326	0,01602218	0,07253525	-0,38245	0,3590796	0,02366516	0,1031362
-0,01995	0,384583	0,01092686	-0,00141708	-0,38495	0,36163	0,0083792	0,1260869
-0,02245	0,3794823	0,00073622	0,00878324	-0,38745	0,3412273	0,02876048	0,1133365
-0,02495	0,3743816	0,00073622	0,00623316	-0,38995	0,3488783	0,01092686	0,1235368
-0,02745	0,4024353	0,01602218	0,01643348	-0,39245	0,353979	0,0083792	0,1031362
-0,02995	0,3871333	0,01347452	-0,00396716	-0,39495	0,3590796	0,01602218	0,1311871
-0,03245	0,3794823	0,00073622	0,01133332	-0,39745	0,3641803	0,02366516	0,1464876
-0,03495	0,384583	0,02876048	0,001133	-0,39995	0,353979	0,0211175	0,1235368
-0,03745	0,3820326	0,01092686	0,02153364	-0,40245	0,3488783	-0,00690676	0,1362872
-0,03995	0,369281	0,02621282	0,02408372	-0,40495	0,3590796	-0,00181144	0,1439375
-0,04245	0,3896836	-0,00945442	0,001133	-0,40745	0,3488783	0,01602218	0,1235368
-0,04495	0,3794823	0,01092686	0,02918388	-0,40995	0,3641803	0,0083792	0,1388373
-0,04745	0,392234	0,01092686	0,1209868	-0,41245	0,3361266	0,00328388	0,128637
-0,04995	0,3743816	0,01856984	0,02408372	-0,41495	0,36163	0,0211175	0,1133365
-0,05245	0,3896836	-0,00945442	0,0266338	-0,41745	0,3565293	-0,00181144	0,1490376
-0,05495	0,384583	0,0211175	0,02153364	-0,41995	0,3514286	0,01856984	0,1439375
-0,05745	0,384583	0,00583154	0,02153364	-0,42245	0,346328	0,01602218	0,1413874
-0,05995	0,3871333	-0,0043591	0,02153364	-0,42495	0,36163	0,01092686	0,1413874
-0,06245	0,3820326	0,01602218	0,0266338	-0,42745	0,3514286	0,0083792	0,1413874
-0,06495	0,3871333	0,01602218	0,0393842	-0,42995	0,3565293	0,00583154	0,1311871
-0,06745	0,3718313	-0,0043591	0,0266338	-0,43245	0,36163	0,01092686	0,1311871
-0,06995	0,353979	0,0211175	0,0266338	-0,43495	0,353979	0,00583154	0,1209868
-0,07245	0,3488783	-0,00945442	0,03173396	-0,43745	0,3488783	0,01602218	0,128637
-0,07495	0,369281	0,0211175	0,02918388	-0,43995	0,3565293	0,00328388	0,1337372
-0,07745	0,353979	-0,01200208	0,0266338	-0,44245	0,3488783	0,0211175	0,1260869
-0,07995	0,3488783	-0,01200208	0,01898356	-0,44495	0,3514286	0,00073622	0,07763541
-0,08245	0,3514286	0,0083792	0,03428404	-0,44745	0,346328	0,00328388	0,1439375
-0,08495	0,36163	-0,00181144	0,02408372	-0,44995	0,3514286	0,02621282	0,1439375
-0,08745	0,338677	-0,00690676	0,03683412	-0,45245	0,3514286	0,0338558	0,1541378
-0,08995	0,3667306	0,00328388	0,02918388	-0,45495	0,3412273	0,03895112	0,1362872
-0,09245	0,36163	-0,01200208	0,0393842	-0,45745	0,3437776	0,0211175	0,1541378
-0,09495	0,3565293	0,01602218	0,001133	-0,45995	0,353979	0,0338558	0,1362872
-0,09745	0,3514286	-0,00181144	0,04193428	-0,46245	0,346328	0,00583154	0,1388373
-0,09995	0,3590796	-0,03238335	0,01898356	-0,46495	0,346328	-0,02474037	0,1490376
-0,10245	0,36163	0,01092686	0,03173396	-0,46745	0,3437776	0,02366516	0,1413874
-0,10495	0,369281	0,00328388	-0,00651724	-0,46995	0,346328	0,02876048	0,1464876

-0,10745	0,3743816	-0,01200208	0,02408372	-0,47245	0,3514286	0,00328388	0,1439375
-0,10995	0,36163	0,01347452	0,04193428	-0,47495	0,346328	0,0211175	0,1337372
-0,11245	0,376932	0,01092686	0,02918388	-0,47745	0,3361266	-0,01200208	0,1490376
-0,11495	0,3743816	0,01602218	0,04958452	-0,47995	0,3590796	0,01856984	0,1464876
-0,11745	0,3794823	0,00583154	0,04958452	-0,48245	0,338677	0,01602218	0,1311871
-0,11995	0,3641803	0,01856984	0,04193428	-0,48495	0,3284756	0,01856984	0,1566879
-0,12245	0,3794823	0,01347452	0,04448436	-0,48745	0,3565293	0,02621282	0,1388373
-0,12495	0,3794823	0,01092686	0,04193428	-0,48995	0,3514286	0,00583154	0,1464876
-0,12745	0,3743816	0,03130814	0,04448436	-0,49245	0,338677	0,00328388	0,1515877
-0,12995	0,376932	0,01092686	0,04193428	-0,49495	0,3514286	0,0338558	0,1439375
-0,13245	0,369281	0,02876048	0,06233493	-0,49745	0,3514286	0,00328388	0,1974892
-0,13495	0,3667306	0,01856984	0,04958452	-0,49995	0,3437776	0,02621282	0,1541378
-0,13745	0,3871333	0,00073622	0,05468469	-0,50245	0,3437776	0,02366516	0,1821887
-0,13995	0,3743816	0,00073622	0,05213461	-0,50495	0,353979	0,05168942	0,1464876
-0,14245	0,3820326	0,01092686	0,06233493	-0,50745	0,353979	0,03130814	0,1260869
-0,14495	0,376932	-0,02219271	0,04958452	-0,50995	0,353979	0,04404644	0,1643381
-0,14745	0,3794823	0,00328388	0,0393842	-0,51245	0,3590796	0,03640346	0,1643381
-0,14995	0,3718313	0,02621282	0,06233493	-0,51495	0,3565293	0,06188005	0,1745384
-0,15245	0,3794823	0,01602218	0,06233493	-0,51745	0,3361266	0,08480899	0,1235368
-0,15495	0,376932	-0,04002633	0,05978485	-0,51995	0,3437776	0,1383098	0,1668882
-0,15745	0,3361266	-0,00181144	0,04958452	-0,52245	0,3361266	0,1332145	0,1541378
-0,15995	0,3667306	-0,0043591	0,04193428	-0,52495	0,346328	0,212192	0,1643381
-0,16245	0,384583	0,01092686	0,04958452	-0,52745	0,3514286	0,3013601	0,1847388
-0,16495	0,3896836	0,01092686	0,05213461	-0,52995	0,36163	0,4083618	0,1745384
-0,16745	0,3718313	0,0083792	0,05468469	-0,53245	0,3565293	0,4465767	0,1745384
-0,16995	0,3667306	0,0338558	0,05723477	-0,53495	0,3641803	0,5102682	0,1719884
-0,17245	0,376932	0,00073622	0,05978485	-0,53745	0,3820326	0,4796962	0,1796386
-0,17495	0,3641803	0,0211175	0,04448436	-0,53995	0,3896836	0,4185524	0,1515877
-0,17745	0,3743816	0,00073622	0,06233493	-0,54245	0,3973346	0,5357447	0,1821887
-0,17995	0,3794823	-0,03238335	0,07253525	-0,54495	0,422838	0,6529371	0,1643381
-0,18245	0,3718313	-0,00181144	0,06233493	-0,54745	0,4585426	0,6019839	0,1745384
-0,18495	0,3718313	0,01347452	0,0393842	-0,54995	0,4967976	0,5408401	0,1541378
-0,18745	0,3667306	0,00073622	0,06743509	-0,55245	0,545254	0,5663167	0,161788
-0,18995	0,3718313	0,00328388	0,06488501	-0,55495	0,598811	0,6478418	0,1796386
-0,19245	0,3743816	0,0211175	0,07763541	-0,55745	0,6498176	0,5968886	0,1745384
-0,19495	0,369281	0,00328388	0,05978485	-0,55995	0,7161263	0,5230064	0,1515877
-0,19745	0,36163	0,01347452	0,06488501	-0,56245	0,774784	0,6784137	0,1694383
-0,19995	0,3718313	-0,01964505	0,05468469	-0,56495	0,843643	0,6070792	0,1949391
-0,20245	0,3565293	0,0083792	0,06998517	-0,56745	0,889549	0,5077205	0,1872889
-0,20495	0,3641803	0,0338558	0,06743509	-0,56995	0,935455	0,4771486	0,1796386
-0,20745	0,346328	0,00328388	0,06998517	-0,57245	1,006864	0,428743	0,1821887
-0,20995	0,353979	0,01856984	0,06233493	-0,57495	1,027267	0,5459354	0,1821887
-0,21245	0,36163	0,05168942	0,06233493	-0,57745	1,060421	0,3905281	0,1770885
-0,21495	0,3641803	-0,00181144	0,06488501	-0,57995	1,096126	0,3930758	0,1847388
-0,21745	0,3514286	0,0083792	0,07253525	-0,58245	1,12928	0,4491243	0,1821887

-0,21995	0,3488783	-0,00690676	0,07763541	-0,58495	1,154784	0,459315	0,1847388
-0,22245	0,3514286	0,00583154	0,07253525	-0,58745	1,147133	0,3777898	0,1898389
-0,22495	0,338677	0,0083792	0,1031362	-0,58995	1,144582	0,3701469	0,1949391
-0,22745	0,3565293	0,01092686	0,08528565	-0,59245	1,12928	0,3599562	0,1694383
-0,22995	0,346328	0,01347452	0,06743509	-0,59495	1,108878	0,3777898	0,1821887
-0,23245	0,3361266	0,02366516	0,07253525	-0,59745	1,121629	0,3497656	0,192389
-0,23495	0,3590796	0,01602218	0,06998517	-0,59995	1,113978	0,3981711	0,192389
-0,23745	0,3514286	0,0211175	0,06998517	-0,60245	1,065522	0,4312907	0,159238
-0,23995	0,3514286	0,00073622	0,08018549	-0,60495	1,014515	0,3650516	0,256141
-0,24245	0,3488783	0,00073622	0,08273557	-0,60745	1,014515	0,4160047	0,1796386
-0,24495	0,3514286	0,0083792	0,06488501	-0,60995	0,9533073	0,5408401	0,1872889
-0,24745	0,3437776	-0,01200208	0,06998517	-0,61245	0,8257906	0,5204588	0,1898389
-0,24995	0,36163	0,0465941	0,06998517	-0,61495	0,6625693	0,5357447	0,1745384
-0,25245	0,346328	0,00328388	0,08018549	-0,61745	0,6192136	0,5917933	0,2025893
-0,25495	0,353979	0,01092686	0,07253525	-0,61995	0,5937103	0,7344622	0,2000393
-0,25745	0,346328	-0,01454974	0,08018549	-0,62245	0,59116	0,7599388	0,1949391
-0,25995	0,3437776	0,00328388	0,08018549	-0,62495	0,5784083	0,8159873	0,1821887
-0,26245	0,3437776	0,03895112	0,08528565	-0,62745	0,5120996	0,9026077	0,2153397
-0,26495	0,3514286	0,00328388	0,09548597	-0,62995	0,5325023	0,9026077	0,1872889
-0,26745	0,3437776	0,01092686	0,06998517	-0,63245	0,499348	0,9866805	0,1898389
-0,26995	0,3590796	0,05423707	0,08273557	-0,63495	0,461093	0,9662992	0,2000393
-0,27245	0,3412273	0,2249303	0,08018549	-0,63745	0,445791	1,047824	0,2025893
-0,27495	0,346328	0,02621282	0,09038581	-0,63995	0,461093	1,073301	0,192389
-0,27745	0,353979	-0,00181144	0,08273557	-0,64245	0,4279386	1,068206	0,2127897
-0,27995	0,3437776	0,00073622	0,09548597	-0,64495	0,4279386	1,09623	0,1949391
-0,28245	0,338677	0,03130814	0,1107864	-0,64745	0,4100863	1,165017	0,1821887
-0,28495	0,3437776	-0,00690676	0,1005861	-0,64995	0,4279386	1,157374	0,159238
-0,28745	0,3437776	0,0211175	0,08273557	-0,65245	0,407536	1,167564	0,1694383
-0,28995	0,3488783	-0,00181144	0,08273557	-0,65495	0,4049856	1,195589	0,2025893
-0,29245	0,346328	0,00583154	0,08018549	-0,65745	0,4024353	1,228708	0,1974892
-0,29495	0,3412273	0,00073622	0,09803605	-0,65995	0,4126366	1,246542	0,1847388
-0,29745	0,3488783	0,0211175	0,09548597	-0,66245	0,407536	1,243994	0,2178898
-0,29995	0,3565293	0,01092686	0,09548597	-0,66495	0,415187	1,325519	0,2000393
-0,30245	0,3488783	0,00583154	0,09038581	-0,66745	0,4024353	1,300043	0,2051394
-0,30495	0,3514286	0,03640346	0,08528565	-0,66995	0,3947843	1,338258	0,2153397
-0,30745	0,353979	0,00328388	0,2178898	-0,67245	0,3896836	1,333162	0,2127897
-0,30995	0,346328	0,00583154	0,1005861	-0,67495	0,4049856	1,371377	0,2025893
-0,31245	0,3412273	0,01856984	0,1031362	-0,67745	0,3973346	1,363734	0,1745384
-0,31495	0,3437776	0,01856984	0,1056863	-0,67995	0,3820326	1,361186	0,2102396
-0,31745	0,3590796	0,0211175	0,09548597	-0,68245	0,3514286	1,424878	0,192389
-0,31995	0,353979	0,0211175	0,1031362	-0,68495	0,346328	1,445259	0,2025893
-0,32245	0,3361266	-0,0043591	0,09038581	-0,68745	0,3565293	1,463093	0,2025893
-0,32495	0,346328	0,01602218	0,1056863	-0,68995	0,3514286	1,470736	0,1949391
-0,32745	0,3335763	0,02876048	0,1362872	-0,69245	0,3641803	1,465641	0,2280901
-0,32995	0,3437776	-0,0043591	0,1031362	-0,69495	0,3565293	1,536975	0,192389

-0,33245	0,3437776	0,01602218	0,1107864	-0,69745	0,3488783	1,521689	0,2204399
-0,33495	0,346328	0,02366516	0,09293589	-0,69995	0,3667306	1,580285	0,2000393
-0,33745	0,3565293	0,0083792	0,09293589	-0,70245	0,3565293	1,57519	0,22299
-0,33995	0,3437776	0,00328388	0,08783573	-0,70495	0,3641803	1,582833	0,2408405
-0,34245	0,346328	0,00583154	0,1031362	-0,70745	0,3667306	1,600666	0,2127897
-0,34495	0,3437776	-0,00945442	0,1031362	-0,70995	0,3565293	1,631238	0,2025893
-0,34745	0,3437776	0,00583154	0,1056863	-0,71245	0,3641803	1,664358	0,2178898
-0,34995	0,3514286	0,01856984	0,1158866	-0,71495	0,3488783	1,666906	0,2153397
-0,35245	0,346328	-0,01454974	0,1031362	-0,71745	0,346328	1,664358	0,2204399
-0,35495	0,3488783	-0,00945442	0,1005861	-0,71995	0,3514286	1,705121	0,22299
-0,35745	0,346328	0,02366516	0,1107864	-0,72245	0,3259253	1,710216	0,2255401
-0,35995	0,353979	0,02366516	0,1031362	-0,72495	0,315724	1,73824	0,22299
-0,36245	0,338677	0,02366516	0,1031362	-0,72745	0,315724	1,745883	0,2178898
-0,36495	0,3488783	-0,00181144	0,128637	-0,72995	0,3182743	1,750978	0,2127897
-0,36745	0,353979	0,02366516	0,1056863	-0,73245	0,3361266	1,740788	0,2076895