

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE ENSAYOS POR IMPACTO
PARA PROBETAS DE MATERIALES PLÁSTICOS.

JESÚS ERNESTO MONSALVE CARABALLO
RAÚL ROQUE DI MARCO D´SILVA



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA MECATRÓNICA
BUCARAMANGA, SANTANDER
2017

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE ENSAYOS POR IMPACTO
PARA PROBETAS DE MATERIALES PLÁSTICOS.

JESÚS ERNESTO MONSALVE CARABALLO
RAÚL ROQUE DI MARCO D´SILVA

Trabajo de grado

Director:

M.Sc. CARLOS ADOLFO FORERO GONZÁLEZ

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA MECATRÓNICA
BUCARAMANGA, SANTANDER

2017

Nota de aceptación:

M.Sc. CARLOS ADOLFO FORERO GONZALEZ
Director de proyecto

M.Sc. JESSICA GISSELLA MARADEY LAZARO
Jurado

MBA. NAYIBE CHIO CHO
Jurado

Bucaramanga, 15 de Mayo del 2017

DEDICATORIA

Dedico este libro a quienes me han apoyado, a mi familia, a mis amigos y a todos aquellos que han aportado al desarrollo de este proyecto.

A mis maestros, quienes se empeñaron en lograr que entraran sus enseñanzas en mi cabezota.

A los celadores de la universidad, que me mandaban a dormir a las 10 de la noche.

A los buenos amigos que encontré en la U, como el delincuente Oswaldo, el menso Papeto, la terrible Paola (y a pancho), a la que los juegos le hacen trampa Luisa, a la tranquila Vero, a la que se le escucha la risa desde la 33 Dalya, al que tengo de hijo en Mario kart León, la que regaña mucho Jegnny, al presidente Julián, al gran Cristian, al pollo, a las preocupaciones Aza, a los de la selección de ajedrez, al profesor Julio (de basket), y a todos los que conocí en general (aunque ahora no recuerdo el nombre de nadie más), inclusive a mi enemigo del alma Jaider villa, a todos gracias.

Y a chucho... no, ese casi se tira el proyecto al él no.

Raúl Roque Di Marco D`Silva.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer en primera instancia a las personas que hicieron este proyecto posible con su aporte económico y moral, a mi familia.

Agradezco también a mi compañero Jesús Monsalve y a su incontable aporte al proyecto.

A mi director de proyecto, M.Sc Carlos Forero, por la ayuda, la asesoría, el apoyo y las correcciones brindadas.

Al ingeniero Juan Carlos Salgado y a su grupo de trabajo, por la fabricación de las piezas.

A mis amigos que aportaron para el desarrollo de este trabajo.

A mis profesores por todas las enseñanzas recibidas.

A todos los que de alguna forma aportaron su granito de arena al proyecto, y que por motivos de memoria olvido en este momento.

Muchas gracias a todos.

Raúl Roque Di Marco D`Silva.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	2
2. JUSTIFICACIÓN	3
3. OBJETIVOS GENERAL Y ESPECÍFICOS	4
3.1 OBJETIVO GENERAL	4
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
4. MARCO REFERENCIAL	5
4.1 ESTADO DEL ARTE	5
4.1.1 Materiales.	5
4.1.2 Ensayos de materiales.	6
4.1.2.1 Ensayos de materiales plásticos.	7
4.2 MARCO TEÓRICO	9
4.2.1 Ensayos de resistencia al impacto.	9
4.2.1.1 Ensayo tipo Charpy.	11
4.2.1.2 Norma para prueba Charpy.	13
4.2.2 Hardware a usar.	14
4.2.2.1 Arduino.	15
4.2.2.2 Pantalla táctil para Arduino.	15

4.2.2.3 Sensores.	15
4.2.2.4 Motor DC.	17
4.2.2.5 Driver L298N.	17
4.2.2.6 Fuentes de voltaje DC o de tensión reguladas.	18
4.2.3 Glosario de términos.	18
5. DISEÑO METODOLÓGICO	21
6. REQUERIMIENTOS DEL DISEÑO, NORMA ASTM D6110-0	24
6.1 GENERALIDADES DE LA NORMA ASTM D6110-04	24
6.2 NORMA PARA EL PÉNDULO	25
6.3 NORMA PARA LA NARIZ DEL GOLPE	25
6.4 NORMA PARA EL SOPORTE PRINCIPAL	26
6.5 NORMA PARA el MECANISMO de ANCLAJE-LIBERACIÓN del PÉNDULO	27
6.6 NORMA PARA EL SOPORTE DE LA MUESTRA	27
6.7 NORMA PARA LA BASE DE LA MÁQUINA DE ENSAYOS	28
6.8 NORMA PARA LA PROBETA	29
6.9 ACEROS DE LA NORMA.	31
7. DISEÑO FINAL	34
7.1 DISEÑO MECÁNICO	34
7.1.1 Componentes mecánicos del banco de ensayo	36
7.1.2 Soporte principal	40
7.1.3 Soporte de la muestra	43
7.1.4 Eje del péndulo	46

7.1.5 Péndulo	48
7.1.6 Acople del péndulo	50
7.1.7 Nariz de golpe	51
7.1.8 Piezas retención	53
7.1.9 Base de la máquina	56
7.1.10 Mecanismo de levantamiento	58
7.1.11 Probeta	60
7.1.12 Rodamientos	62
7.1.13 Tornillos	64
7.2 DISEÑO ELECTRÓNICO	69
7.2.1 Selección componentes electrónicos	69
7.2.2 Tarjeta de adquisición de datos	70
7.2.3 Pantalla touch Arduino	73
7.2.4 Motor	75
7.2.5 Sensor de ángulo	79
7.2.6 Fuente de voltaje	80
7.2.7 Alimentación Arduino	82
7.2.8 L298N	83
7.2.9 Servomotor	84
7.2.10 Cableado	86
8. PRESUPUESTO	87
8.1 PARTE MECÁNICA	87

8.2 PARTE ELECTRÓNICA	88
8.3 PRESUPUESTO GENERAL	88
9. DESARROLLO DEL SOFTWARE Y CÓDIGO DE ARDUINO	89
9.1 CÓDIGO PANTALLA	94
9.2 CÓDIGO SENSOR IMU	96
9.3 CÓDIGO SERVOMOTOR	97
9.4 CÓDIGO L298N Y MOTOR	97
10. ENSAMBLAJE Y PRUEBAS	99
10.1 ENSAMBLAJE GENERAL	99
10.1.1 Ensamblaje parte central	99
10.1.2 Ensamblaje eje-péndulo	101
10.1.3 Ensamblaje de piezas de retención y levantamiento	104
10.1.4 Ubicación componentes electrónicos	107
10.2 PRUEBAS GENERALES	110
10.2.1 Pruebas sensor IMU	111
10.2.2 Prueba de movimiento del péndulo	113
10.2.3 Prueba de funcionamiento del mecanismo de retención y de levantamiento	116
10.2.4 Prueba de funcionamiento general de la máquina de ensayos	119
10.2.5 Pruebas de impacto	121
12. CONCLUSIONES	128
Anexo A	129

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Relación entre el ángulo de carga y la velocidad del impacto	14
Tabla 2. Medidas de las probetas.	30
Tabla 3. Propiedades mecánicas y densidad del acero ASTM-A36.	31
Tabla 4. Propiedades mecánicas y densidad del acero AISI-D2.	32
Tabla 5. Propiedades mecánicas y densidad del acero AISI-SAE 1045.	33
Tabla 6. Componentes mecánicos.	37
Tabla 7. Características del rodamiento SKF 629-2Z.	64
Tabla 8. Componentes electrónicos.	70
Tabla 9. Características Arduino mega.	72
Tabla 10. Características pantalla LCD TFT de 3.97 para Arduino mega.	74
Tabla 11. Características del motoreductor.	78
Tabla 12. Especificaciones de la fuente conmutada 12v-5 A Wansen.	81
Tabla 13. Características técnicas del servomotor Hitec HS-311.	85
Tabla 14. Presupuesto parte mecánico.	87
Tabla 15. Presupuesto parte electrónica.	88
Tabla 16. Presupuesto general.	88
Tabla 17. Prueba de velocidad del péndulo.	115
Tabla 18. Resultados de las pruebas generales de funcionamiento.	121
Tabla 19. Resultados pruebas de impacto en PLA	122
Tabla 20. Resultados pruebas de impacto en ABS.	123

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Ensayo de impacto, colocación de la probeta, a) Izod, b) Charpy.	10
Figura 2. Principio de operación del péndulo.	12
Figura 3. Esquema de diseño Mecatrónico.	21
Figura 4. Soporte de la muestra, nariz de golpe y probeta.	28
Figura 5. Probeta para prueba de impacto para polímeros, establecida por la norma ASTM D6110-04.	30
Figura 6. Diagrama de flujo del funcionamiento electromecánico de la máquina de ensayos.	34
Figura 7. a) Vista explosionada del banco de ensayos y b) acercamiento elementos de retención y levantamiento.	35
Figura 8. Vista explosionada, con la enumeración de las partes.	38
Figura 9. Soporte principal.	41
Figura 10. Simulación de impacto, a) momento inicial y b) momento final.	42
Figura 11. Prueba de impacto y esfuerzos sobre el soporte principal.	43
Figura 12. Componentes del soporte de la muestra.	44
Figura 13. Prueba de impacto y esfuerzos sobre los soportes de la base de la muestra.	45
Figura 14. Prueba de impacto y esfuerzos sobre casquillos.	45
Figura 15. Eje del péndulo.	47
Figura 16. Eje durante la prueba de impacto y esfuerzos generados.	47
Figura 17. Péndulo de la nariz de golpeo.	48

Figura 18. Prueba de impacto y esfuerzos sobre el péndulo.	49
Figura 19. Acople del péndulo.	50
Figura 20. Prueba de esfuerzos sobre el acople del péndulo.	51
Figura 21. Nariz de golpeo y los detalles.	52
Figura 22. Prueba de impacto y esfuerzos en la nariz de golpeo.	53
Figura 23. a) Pieza de retención y b) conector.	54
Figura 24. Rueda dentada.	55
Figura 25. Sistema de retención.	56
Figura 26. Base de la máquina de ensayos.	57
Figura 27. Prueba de impacto y esfuerzos en la base de la máquina.	58
Figura 28. Pieza de levantamiento.	59
Figura 29. Pieza de acople al motor.	60
Figura 30. Probeta realizada en solidworks.	60
Figura 31. Probeta plástica.	61
Figura 32. Rodamiento SKF 629-2Z/C3.	64
Figura 33. Tornillo Bristol milimétrico de 6x35.	65
Figura 34. Simulación de tornillos Bristol de la unión base-soporte principal.	66
Figura 35. Simulación de tornillos de la unión casquillos-soportes muestra.	67
Figura 36. Simulación de tornillos de unión soportes muestra-soporte a la base.	68
Figura 37. Simulación de tornillos de la unión eje-acople.	68
Figura 38. Arduino mega ADK.	72

Figura 39. Pantalla LCD TFT de 3.97 pulgadas para Arduino mega, acoplada a un Arduino mega.	74
Figura 40. Prueba de torque.	76
Figura 41. Motoreductor SKU 385033.	77
Figura 42. Dimensiones del motor.	78
Figura 43. Pololu MinIMU-9 v2.	79
Figura 44. Fuente conmutada 12v – 5 A.	81
Figura 45. Cable de alimentación y adaptador de voltaje.	82
Figura 46. Módulo L298N.	83
Figura 47. Servomotor HS-311.	85
Figura 48. Cable hembra-macho de arduino.	86
Figura 49. Diagrama de bloques del comportamiento de la máquina.	89
Figura 50. Diagrama de flujo del programa en arduino, primera parte.	91
Figura 51. Diagrama de flujo del programa en arduino, segunda parte.	92
Figura 52. Diagrama de flujo del programa en arduino, tercera parte.	93
Figura 53. Calibración de la pantalla táctil.	95
Figura 54. Unión de la base con el soporte principal.	100
Figura 55. Unión de las piezas de soporte de la muestra con la base.	101
Figura 56. Unión eje-acople-péndulo.	102
Figura 57. Unión del soporte principal, rodamiento y el eje.	103
Figura 58. Ensamblaje eje y nariz de golpeo.	104
Figura 59. Ensamble del mecanismo de levantamiento.	105

Figura 60. Ensamblaje de las piezas de retención.	106
Figura 61. Ubicación del motor.	107
Figura 62. Ubicación del servomotor.	108
Figura 63. Ubicación del sensor IMU.	109
Figura 64. Ubicación segundo grupo de componentes electrónicos.	110
Figura 65. Péndulo en posición vertical y lectura del sensor.	112
Figura 66. Péndulo en posición horizontal y lectura del sensor.	112
Figura 67. Secuencia de prueba de caída libre del péndulo.	114
Figura 68. Piezas del mecanismo de levantamiento.	117
Figura 69. Sistema de retención en el instante de sujeción del péndulo.	118
Figura 70. Banco de ensayos antes de las pruebas de funcionamiento general.	120
Figura 71. Pantalla antes de subir el péndulo (menú de prueba).	125
Figura 72. Pantalla durante levantamiento y caída del péndulo.	125
Figura 73. Pantalla táctil tras prueba de impacto	126
Figura 74. Ruptura de la probeta, a) vista frontal y posterior y b) acercamiento de la ruptura.	127

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A	129

RESUMEN

En este trabajo se diseña y construye un banco de ensayos por impacto para probetas de materias plásticas, aplicando la norma ASTM D6110-04 para la pruebas de impacto de tipo Charpy.

Se presenta la información recopilada y necesaria para el desarrollo de las etapas de investigación de consideraciones iniciales, diseño preliminar, diseño definitivo de los componentes mecánicos y eléctricos, cotización de elementos, montaje, pruebas y puesta en funcionamiento de la máquina de ensayos.

Se sigue y señala una metodología de diseño mecatrónico para el planteamiento de los sistemas mecánico y electrónico. La metodología se aplica al trabajo para reducir complicaciones en las etapas de montaje y posteriores.

Las generalidades de la norma ASTM D6110-04 muestran los materiales requeridos para la construcción del proyecto, además de medidas tales como altura de la prueba y energía suministrada por el péndulo, también incluye restricciones de longitud, ángulo de prueba, redondeos y acabados de las piezas.

A través del software Solidworks se realiza el diseño de las piezas, y cada una de las piezas se somete a una simulación, por medio del mismo programa, que simula una prueba de impacto, y que en los resultados se observan los esfuerzos que debe soportar cada parte del banco de pruebas durante un ensayo tipo Charpy.

Posteriormente se inicia el proceso de fabricación de cada parte, y la adquisición de los componentes electrónicos, para finalizar con la fase de ensamblaje y pruebas del proyecto. Un manual de usuario es escrito para el correcto uso de la máquina, y esta queda para la realización de pruebas académicas y ensayos de laboratorio en la universidad.

INTRODUCCIÓN

Los materiales son la materia prima que utilizan los seres humanos para la construcción y elaboración de diferentes productos, estructuras, máquinas y objetos en general. Por ello realizar un trabajo de investigación para conocer el material más adecuado para la fabricación de estas (estructuras, máquinas, etc.) es de suma prioridad para las empresas del sector manufacturero.

En este proyecto se realiza el diseño y construcción de un banco de ensayos para probar la tenacidad de probetas de materiales plásticos. Para ello se sigue una metodología en la cual los distintos sistemas de la máquina son diseñados a la par, lo cual ayuda a disminuir la presencia de errores en las etapas finales del proyecto. El objetivo final de la máquina es que los estudiantes puedan realizar laboratorios y prácticas con ella, y que a pesar de estar limitados a materiales plásticos, entiendan la importancia de la selección de los materiales adecuados en los procesos de producción.

1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La UNAB y el programa de Ingeniería Mecatrónica no cuentan en este momento con una máquina de test o banco de ensayo, que permita hacer pruebas a probetas de materiales plásticos (ni ningún otro material), poder observar sus propiedades y adquirir datos para análisis. Para un ingeniero mecatrónico en formación tener un laboratorio para realizar esta prueba es una experiencia positiva y que complementa la información teórica adquirida en las diferentes clases, en especial la asignatura de Materiales. En otras asignaturas se realizan clases de laboratorio donde se refuerzan constantemente los conocimientos teóricos impartidos, pero al no tener la universidad una máquina de pruebas para materiales queda un vacío en el área práctica de la disciplina de Materiales.

2. JUSTIFICACIÓN

Para los estudiantes del programa de ingeniería mecatrónica el poder realizar una práctica o laboratorios en la clase de Materiales les ayudará a comprender mejor las propiedades de algunos materiales plásticos y a complementar los saberes teóricos vistos en el desarrollo de la asignatura.

La universidad no cuenta con banco de ensayos para el desarrollo de pruebas de materiales, con la realización de este proyecto se cubre esta necesidad. La ejecución de estudios prácticos de materiales y el conocimiento adquirido de ellos por parte de los estudiantes se puede utilizar en el diseño y/o construcción de los diferentes proyectos que el estudiante tendrá que desarrollar en su formación académica, puesto que podrán entender mejor las características de los elementos plásticos y podrán seleccionar de una forma técnicamente más adecuada los componentes de sus proyectos.

Además, los estudios de los materiales para la elaboración de productos son una parte esencial que las empresas del sector manufacturero realizan, al entender esto los estudiantes podrán mejorar sus diseños a nivel académico y al trabajar en la industria reconocerán estas pruebas como importantes en el desarrollo de los proyectos laborales que enfrenten. Las propiedades mecánicas de los materiales resultan muy importantes en la selección de los materiales en diseños. El desconocimiento de las propiedades mecánicas de los materiales puede llevar a fallos mecánicos reales o catástrofes, como fue la explosión del trasbordador Challenger (en 1986), la cual fue causada por la baja resiliencia de los anillos (de polímeros elastómeros) que sellaban zonas de los cohetes propulsores, la falla de estos generaron el incendio del tanque de combustible y su posterior explosión. Por otro lado, el proyecto permite la adquisición de este tipo de máquina a un menor costo que el de los precios comerciales, y además para que los estudiantes la puedan utilizar de forma sencilla sin ninguna complejidad mayor.

3. OBJETIVOS GENERAL Y ESPECÍFICOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un banco de ensayos para probetas de materiales plásticos por el método de impacto que permita adquisición, visualización y análisis de datos.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Diseñar un banco de ensayo para probetas de materiales plásticos que cumpla con las normas de seguridad y resistencia presentes en la norma ASTM D6110-04.

Seleccionar los materiales para la estructura, sensores para la adquisición de datos y actuadores necesarios para el funcionamiento del mecanismo de prueba.

Modelar y simular por medio de Solidworks el banco de ensayos para probetas de materiales plásticos.

Desarrollar una interfaz gráfica, en una pantalla táctil o pantalla “*touch*”, para visualizar los resultados de las pruebas por medio de tablas y gráficas.

Construir el banco de ensayos para probetas de materiales plásticos, realizar pruebas de funcionamiento y calibración según la norma ASTM D6110-04.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1 ESTADO DEL ARTE

A continuación se presenta un breve recuento sobre los materiales y los ensayos a los que se someten.

4.1.1 Materiales. En ingeniería se considera un material cualquier sustancia con alguna propiedad útil. Estas propiedades pueden ser mecánicas, térmicas, ópticas o eléctricas. Los materiales son la base fundamental que se necesita para la fabricación de objetos. Los objetos pueden estar compuestos de uno o más materiales.

Los materiales pueden ser naturales o artificiales, entre los naturales están: La madera, piedras, carbón, cobre, arena, petróleo. Entre los artificiales están: El plástico, vidrio, goma, etc.

Cada material es diferente a otro y poseen cualidades distintas. Materiales con propiedades similares se agrupan, algunos de estos grupos son: Materiales metálicos, pétreos, plásticos.

Las propiedades mecánicas de los materiales nos permiten diferenciar un material de otro ya sea por su composición, estructura o comportamiento ante algún efecto físico o químico, estas propiedades son usadas de acuerdo a algunas necesidades creadas a medida que ha pasado la historia, dependiendo de los gustos y propiamente de aquella necesidad a solucionar se selecciona un material u otro para que este solucione a cabalidad la exigencia creada. Algunas de estas propiedades son: Dureza, fragilidad, flexibilidad, resiliencia, tenacidad, etc.

La mecánica de materiales estudia las deformaciones unitarias y desplazamiento de estructuras y sus componentes debido a las cargas que actúan sobre ellas. En

muchos campos de la ingeniería, entender el comportamiento mecánico es esencial para el diseño seguro de todos los tipos de estructuras. El desarrollo histórico de dicho tema, ha sido la mezcla de teoría y experimento, de personajes importantes como Leonardo da Vinci (1452-1519), Galileo Galilei (1564-1642) y Leonard Euler (1707-1783), que llevaron a cabo experimentos para determinar la resistencia de alambres, barras y vigas. [1]

4.1.2 Ensayos de materiales. La elección del material más adecuado, exige el conocimiento previo de sus propiedades técnicas: físicas, químicas y mecánicas. Toda esta información, la ofrecen los ensayos de materiales, realizados generalmente sobre probetas normalizadas y en ocasiones, como se produce en obras de construcción, con elementos utilizados en la elaboración de estructuras.

Por lo tanto, el fundamento de la realización de un ensayo, será la medida de una determinada propiedad que deseamos exigirle a un material para su utilización.

Según el fin de la prueba, se distinguen los siguientes tipos de ensayos: Cualitativos y cuantitativos, y estos pueden ser destructivos y no destructivos.

Los ensayos cualitativos son, normalmente, los destinados a controlar la producción, de forma que satisfagan ciertas normas perfectamente definidas.

Los ensayos cuantitativos son los más utilizados, exigiéndoles una gran precisión y fiabilidad, destinando en su realización mayor cantidad de tiempo que los anteriores.

Entre los objetivos importantes de los ensayos cuantitativos destacan:

- Conocer y estudiar las propiedades de un material y la influencia que sobre el mismo ejerce su composición, proceso de fabricación y transformaciones en su estructura.

- Obtener valores de resistencia que sirvan de base al cálculo para la elección de los materiales más adecuados para su utilización.

Estos objetivos se consiguen mediante el uso de ensayos de tipo destructivo y no destructivo, y pueden ser de carácter químico, físico o mecánico.

Los ensayos mecánicos son por lo general destructivos y tienen como objetivo: Determinar las características elásticas y de resistencia, según el comportamiento de probetas normalizadas sometidas a determinados esfuerzos.

Los ensayos mecánicos pueden ser estáticos (tracción, compresión, flexión...), con tensiones múltiples, de dureza, dinámicos (con cargas bruscas o variables), de duración (fatiga y fluencia) o tecnológicos (plegado, doblado, de forjado...).

Todo ensayo debe cumplir con una serie de condiciones, como lo son: Ser homogéneo, las muestras tomadas deben ser representativas, fiable y repetitivo, de realización técnicamente sencilla y que su procedimiento este perfectamente definido y en lo posible normalizado. [2]

4.1.2.1 Ensayos de materiales plásticos. Al considerar los plásticos como materiales para el diseño de cualquier artículo (máquina), se debe conocer el comportamiento de los mismos ante los diferentes agentes externos (acciones mecánicas, temperatura, tiempo, etc.). Así, el estudio de las propiedades mecánicas es imprescindible cuando estos materiales se utilizan como elementos estructurales. Se trata de conocer si un determinado tipo de polímero es lo suficientemente resistente para un empleo particular o si es lo suficientemente tenaz para aguantar determinados golpes sin romperse. Por otro lado, es conveniente saber las causas que hacen a un polímero ser frágil, a otro tenaz, mientras un tercero se comporta como un elastómero, así como la relación existente entre este comportamiento mecánico y sus estructuras.

En los polímeros, más que en otro tipo de materiales, la temperatura y el tiempo presentan un papel fundamental que influyen de manera notable en sus propiedades mecánicas.

Los polímeros, como grupo de materiales, resultan muy difíciles de clasificar desde el punto de vista de su comportamiento mecánico. Sus propiedades mecánicas difieren mucho de unas familias a otras y además están enormemente influenciadas por las condiciones de ejecución de los ensayos: velocidad de aplicación de la carga (velocidad de deformación), temperatura, magnitud de la deformación impuesta, naturaleza química del medio (presencia de agua, oxígeno, disolventes orgánicos, etc.).

La fluencia, la concentración de tensiones, el resquebrajamiento, la fractura, la tenacidad de fractura, el tamaño del defecto, las cargas, la fatiga y los impactos son algunos de los factores más importantes en el diseño de objetos utilizando materiales plásticos.

La resistencia ante el impacto es una de las propiedades claves de los materiales. La capacidad de un material para soportar golpes accidentales puede decidir su éxito o fracaso en un uso particular. Aunque existen datos de resistencia al impacto citados en la literatura, la mayor parte de ellos son de poco valor, ya que la resistencia al impacto no es una característica inherente del material y de ahí que no sea posible especificar un único valor universal para la resistencia al impacto de cualquier material plástico. La resistencia al impacto depende de una gama de variables incluyendo la temperatura, la velocidad de deformación, el sistema de tensiones, la anisotropía, la geometría de la pieza, las condiciones de fabricación y el ambiente.

Como consecuencia hay, a menudo, una pobre correlación, entre los datos de los ensayos de laboratorio, el funcionamiento del producto y entre los resultados de los ensayos de diferentes laboratorios. El primero de estos problemas es el más

serio porque puede levantar dudas en el diseñador sobre el empleo de los materiales plásticos.

Pero, en general, se logran diseños muy aceptables usando datos resistencia al impacto, obtenidos en condiciones que se relacionan tan estrechamente como sea posible con las condiciones de servicio.

Los valores de resistencia al impacto disponibles en la literatura pueden usarse para la selección inicial de un material sobre la base de un nivel deseado de tenacidad. Entonces, cuando sea posible eso debería apoyarse mediante ensayos sobre la pieza plástica, o sobre una probeta extraída de ella, para asegurar que el material, una vez fabricado, está en un estado satisfactorio para realizar su función. [3]

4.2 MARCO TEÓRICO

A continuación se presentan los principios teóricos, los cuales son la base del proyecto, además de algunos componentes presentes en el banco de ensayos.

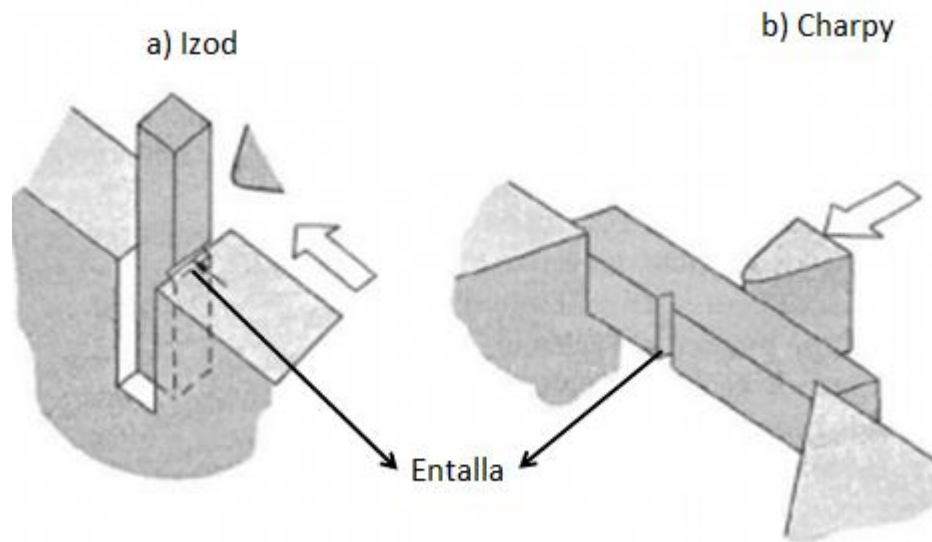
4.2.1 Ensayos de resistencia al impacto. Para proporcionar información sobre el comportamiento de resistencia al impacto de los materiales, se han desarrollado ensayos que implican el golpeo de una barra con muesca mediante un péndulo. El material se someta a un sistema de tensión tri-axial y a altas velocidades de deformación, con lo cual se incita al fallo por rotura frágil.

Los ensayos estándar para medir la energía de impacto, a veces también denominada tenacidad a la entalla, son el Izod y el Charpy.

Las probetas tienen una muesca estándar mecanizada en ellas y se mide la energía de impacto absorbida en la rotura de la probeta. Con el empleo cada vez mayor de plásticos en usos de ingeniería se deben adoptar para ellos estos ensayos.

La principal diferencia entre el estándar Izod y el Charpy es la ubicación de la muestra, mientras que en el Izod la probeta se coloca de forma vertical, en la Charpy es horizontal. Esto se puede observar en la figura 1.

Figura 1. Ensayo de impacto, colocación de la probeta, a) Izod, b) Charpy. [4]



Fuente: Resistencia de polímeros, materiales no metálicos, Universidad de Oviedo.

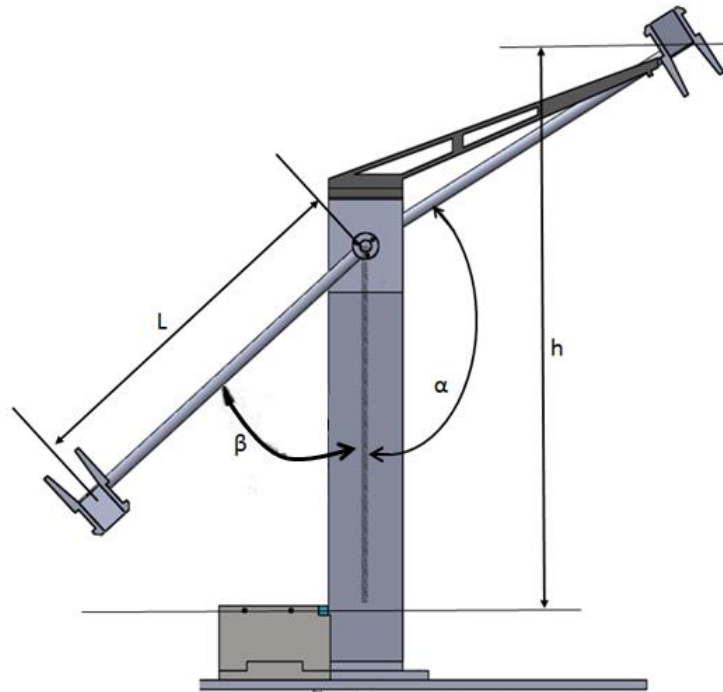
En general, los ensayos estándar son útiles para el control de calidad y con el propósito de especificación, pero no para la predicción del funcionamiento del producto final. La compleja interacción de las variables no permite que el diseño del componente se base únicamente en los datos. Un material que puede parecer malo en los ensayos estándar no necesariamente será malo en el servicio.

Aunque los ensayos Izod y Charpy se usan extensamente para plásticos, también son populares otros tipos de ensayo. Estos incluyen ensayos de impacto en tracción y de placa en flexión (peso decreciente). [3]

4.2.1.1 Ensayo tipo Charpy. El nombre de este ensayo se debe a su creador, el francés Agustín Georges Albert Charpy (1865-1945). A través del mismo se puede conocer el comportamiento que tienen los materiales al impacto.

El principio de operación del péndulo de impacto como el que se muestra en la Figura 2, consiste en dejar caer el péndulo desde una altura conocida (h) así como el ángulo de partida (α), este dispone de una masa (m) montada en el extremo del brazo de longitud (L), distancia desde el eje de apoyo al centro de percusión. Se golpea la muestra apoyada (s) con la masa del péndulo que ha sido liberada en caída libre. La energía absorbida por la muestra para producir su rotura es la medida de la tenacidad del material en las condiciones del ensayo. [5]

Figura 2. Principio de operación del péndulo.



Fuente: El autor

La energía absorbida (E_a) por la probeta, para producir su fractura, se determina a través de la diferencia de energía potencial del péndulo antes y después del impacto. Una vez conocido el ángulo inicial de aplicación de la carga (α) y el ángulo final (β) al que se eleva el péndulo después de la rotura completa de la probeta, junto a la masa (m) de la nariz del péndulo que impacta en la probeta y a la longitud del péndulo (L), se puede calcular la energía E_a (se calcula si la probeta se fractura totalmente, de lo contrario es una prueba fallida) mediante la expresión (1):

$$E_a = mgL[\cos(\beta) - \cos(\alpha)], \quad (1)$$

Donde g representa la aceleración de la gravedad. [6]

4.2.1.2 Norma para prueba Charpy. Las pruebas de impacto Charpy se realizan según normas internacionales en las cuales se detallan las dimensiones de las probetas empleadas en este tipo de ensayo, así como la forma de reportar los resultados de los mismos. De acuerdo con las normas ISO (International Organization for Standardization), los resultados de los ensayos de impacto, en probetas entalladas, se suelen expresar en (kJ/m^2), para lo cual se divide la energía absorbida para provocar la fractura de la probeta entre la sección transversal de la misma en la zona de la entalla, mientras que según las normas ASTM (American Society for Testing Materials) se reportan los resultados en (J/m), donde se divide esa energía absorbida entre la anchura remanente en la base de la entalla.

Desde el punto de vista de la ingeniería es muy importante, y en ocasiones imprescindible, conocer cual sería el comportamiento mecánico de los materiales, cuando se encuentran expuestos a condiciones extremas de servicio. Es por ello que muchos de los ensayos de impacto se realizan en condiciones en las cuales se favorece la fractura frágil. [7]

Entre los factores que contribuyen a modificar el modo de fractura y que se pueden estudiar mediante el ensayo de impacto Charpy se encuentran:

- La velocidad de aplicación de la carga, la cual se controla variando el ángulo α .
- La presencia de concentradores de tensiones, lo cual se logra mecanizando una entalla en la probeta del material a estudiar.
- Así como el impacto en materiales expuestos a diferentes temperaturas.

Tabla 1. Relación entre el ángulo de carga y la velocidad del impacto [7]

Angulo de carga (α)	Velocidad del impacto (m/s)
80	2.55
100	3.03
110	3.24
120	3.42
139	3.71

Fuente: Prueba de impacto: ensayo Charpy, Rev. Mex. Fís. E52 (1) (2006) 51–57.

4.2.2 Hardware a usar. Los bancos de ensayos de impacto tipo Charpy por lo general son de uso manual, esto quiere decir que el péndulo lo sube el usuario hasta la posición inicial, un elemento de seguridad lo retiene (colocado por el mismo usuario) y el mismo operario debe quitarlo para iniciar la prueba. Un indicador de aguja muestra el ángulo final y la toma de datos también y cálculos deben ser manuales. Este proyecto coloca a disposición del usuario métodos automáticos para cada parte mencionada. Para ello se debe diseñar un sistema embebido. Un sistema embebido es un sistema electrónico diseñado para cumplir ciertas funciones específicas en tiempo real. El “cerebro” de este sistema es un microcontrolador, este generalmente se ubica en la placa base, y las acciones que realice el sistema están definidas en un software. Este software necesita un lugar donde pueda guardarse para luego ser ejecutado por el procesador, esto podría ser en una memoria RAM o ROM. Normalmente estos sistemas poseen una interfaz externa para monitorear el estado y hacer un diagnóstico del sistema. Además de una serie de salidas y entradas necesarias para comunicarse con el exterior. Sus líneas de entrada y/o salida soportan la conexión a sensores o actuadores del dispositivo a controlar. Entre los dispositivos electrónicos a usar están: Tarjetas de adquisición de datos (como las de marca arduino), pantalla táctil, motor, sensor.

4.2.2.1 Arduino. Arduino es una marca de tarjetas de adquisición de datos, que en un espectro más global es una plataforma de electrónica abierta para la creación de prototipos basados en software y hardware flexibles, y fáciles de usar. Se creó para artistas, diseñadores, aficionados y cualquiera interesado en crear entornos u objetos interactivos. Las tarjetas arduino permiten a través de la computadora y por medio de programación que el usuario logre interactuar con circuitos electrónicos y controlarlos por código. De igual forma el Arduino es capaz de actuar de manera autónoma sin estar conectado a un ordenador. Existen múltiples modelos de Arduino con diferentes características.

Cada modelo posee un nombre, formas, capacidades y funciones distintas.

La alimentación del arduino se puede realizar por medio de un cable usb con entrada arduino, también con un adaptador ac/dc con entrada para arduino o adecuarle un adaptador al mencionado cable usb. Por lo mencionado el arduino puede conectarse a la toma de corriente o a un ordenador para su funcionamiento.

[8]

4.2.2.2 Pantalla táctil para Arduino. Las pantallas táctiles para Arduino, como la pantalla LCD TFT, son pantallas integradas con tecnología TFT (Thin Film Transistor) y una pantalla resistiva táctil, esta se conecta directamente a arduino, dando la posibilidad de implementar aplicaciones gráficas interactivas, además integra un socket para memoria micro SD donde se pueden almacenar imágenes para ser visualizadas en la pantalla. [9]

4.2.2.3 Sensores. Un sensor es un dispositivo eléctrico y/o mecánico que convierte magnitudes físicas (luz, magnetismo, presión, etc.) en valores medibles de dicha magnitud. [10]

Los sensores, básicamente, transforman o reproducen un determinado fenómeno físico (pueden ser también químicos o bien fisicoquímicos) en una “señal” que puede ser una unidad de medida (como en el caso de los termómetros o barómetros), en sonidos (como los sistemas de seguridad por alarma) o en acciones específicas (por ejemplo, cuando abrimos una puerta mediante el ingreso de una tarjeta magnética). Este proceso se conoce como transducción, y este consiste en la transformación de un tipo de señal o energía en otra de distinta naturaleza. [11]

Los sensores de desplazamiento angular, codificadores digitales y sensores de aceleración (IMU), cada uno de ellos puede medir de forma directa o indirecta la posición angular en un determinado tiempo.

Los sensores o transductores de desplazamiento angular miden el desplazamiento rotacional de un cuerpo que gira en torno a un eje. [12]

Un codificador digital es un dispositivo que convierte desplazamientos lineales o rotacionales en una señal digital. Un codificador eléctrico tiene un funcionamiento similar al potenciómetro, un cursor y un disco montado sobre un eje. [13]

Una IMU mide la posición angular de forma indirecta, puesto que mide la aceleración más no el ángulo en un determinado momento. Para convertir la aceleración en posición angular se debe tener en cuenta la medición de la aceleración en cada uno de los ejes (x, y, z) y por fórmulas matemáticas hallar el ángulo donde se ubica el sensor en un punto establecido.

La alimentación de los sensores depende del tipo de sensor, pero en general para este proyecto se debe poder adecuar a la alimentación del arduino, y preferiblemente que pueda ser alimentado desde la misma tarjeta de adquisición de datos.

4.2.2.4 Motor DC. Un motor es un dispositivo que convierte la energía eléctrica en mecánica por medio de los campos magnéticos en las bobinas del mismo. Los motores dc son impulsados por fuentes de corriente directa. Poseen dos terminales para su alimentación, los cuales dependiendo de su ubicación (cual es positivo y cual es tierra) definen el sentido de giro del motor.

Para conseguir la velocidad de giro adecuada, el motor eleva su consumo eléctrico, sin embargo se puede presentar el inconveniente que el motor no entregue el torque necesario para un determinado trabajo.

Para incrementar el torque de un motor se conecta a su eje un conjunto de engranajes, esto provoca la disminución de la velocidad pero el aumento del toque de salida del motor. Por lo general los motores que presentan esta configuración son llamados motoredutores, puesto que la relación de engranes baja la velocidad del aparato.

Para el cambio del sentido de giro de un motor o para su control se recomienda el uso de elementos externos como lo son un circuito puente H o un “*driver*” especial para motores, por lo general estos “*drivers*” contienen el circuito puente H más la adición de elementos de seguridad.

4.2.2.5 Driver L298N. Este módulo basado en el chip L298N permite controlar dos motores de corriente continua, siempre que la corriente no supere los dos amperios.

El modulo cuenta con los componentes necesarios para funcionar sin aditamentos adicionales. Tiene diodos de protección, un regulador LM7805, este último puede suministrar los 5v necesarios para la parte lógica, si no se usa se debe alimentar esta parte con una fuente externa (puede ser el arduino). Posee “*jumper*s” de selección para habilitar la salida o las salidas que se deseen utilizar.

El límite de alimentación para el motor dc que puede recibir este elemento depende de la activación del regulador. Si se encuentra activo el rango de voltaje que puede recibir será de 6 a 12v, de lo contrario puede recibir entre 12 a 35v dc. [14].

4.2.2.6 Fuentes de voltaje DC o de tensión reguladas. Las fuentes de alimentación se encargan de transformar la potencia obtenida de una fuente primaria en potencia de salida dc (corriente continua).

La función principal de una fuente de alimentación regulada es mantener un voltaje constante en sus terminales de salida. Por la general, el voltaje de salida puede variar con el voltaje de línea, la corriente de carga, y el grado de filtración. [15].

4.2.3 Glosario de términos.

Altura: Dimensión de los cuerpos perpendicular a su base, y considerada por encima de esta. En la prueba de impacto hace referencia a la posición inicial de caída de la masa de golpeo.

Ángulo: Figura geométrica formada por dos rectas o dos planos que se cortan respectivamente en una superficie o en el espacio.

Ángulo de partida o de carga: En la prueba de impacto, hace referencia al ángulo que se forma entre el péndulo, en la posición inicial de la prueba, y el eje vertical.

Ángulo final: En la prueba de impacto, hace referencia al ángulo que se forma entre el péndulo y el eje vertical, tras el impacto con la probeta.

Arduino: Marca de tarjetas de adquisición de datos, en la prueba de impacto incorpora una pantalla táctil para la automatización de la prueba de impacto.

ASTM: American Society for Testing Materials, sociedad norteamericana, encargada de la normalización de las pruebas con materiales en Estados Unidos.

Energía: Capacidad de los cuerpos para producir un trabajo.

Energía absorbida: Es la energía necesaria para producir la fractura en la probeta, y se determina hallando la diferencia entre la energía inicial y la energía final durante el ensayo de impacto.

Ensayo: Poner algo a prueba, en el proyecto se hace referencia a la prueba de impacto tipo Charpy.

Entalla: Corte en la probeta para concentrar las líneas de fuerza y por donde sucede la fractura tras el impacto.

Fluencia: Es la deformación irrecuperable de la probeta o de cualquier material, a partir de la cual solo recuperara parte de su deformación elástica y queda una deformación irreversible.

Gravedad: Fuerza que hace que los cuerpos se dirijan hacia el centro terrestre, por mutua atracción de la masa del cuerpo y de la Tierra.

Impacto: Choque de un objeto que se lanza con fuerza o por acción de la gravedad contra algo.

IMU: Inertial Measurement Unit, es un dispositivo electrónico que mide e informa acerca de la aceleración y orientación de un aparato.

Longitud efectiva: En la prueba de impacto hace referencia a la distancia entre el centro del eje y el punto en la masa de golpeo que impacta la probeta. La altura y la energía dependen de esta distancia.

Material: Elemento que puede transformarse y agruparse en un conjunto.

Masa: Cantidad de materia que contiene un cuerpo.

Péndulo: Cuerpo pesado que puede oscilar suspendido de un punto que está encima de su centro de gravedad por un hilo o varilla, en la prueba de impacto hace referencia a la varilla que une el eje con la masa de golpeo.

Plástico: Nombre de ciertos tipos de materiales sintéticos obtenidos mediante fenómenos de polimerización o multiplicación semi-natural de los átomos de carbono en las largas cadenas moleculares de compuestos orgánicos derivados del petróleo y otras sustancias naturales.

Probeta: Muestra de algún material, con medidas estandarizadas, sobre el cual se realizan ensayos.

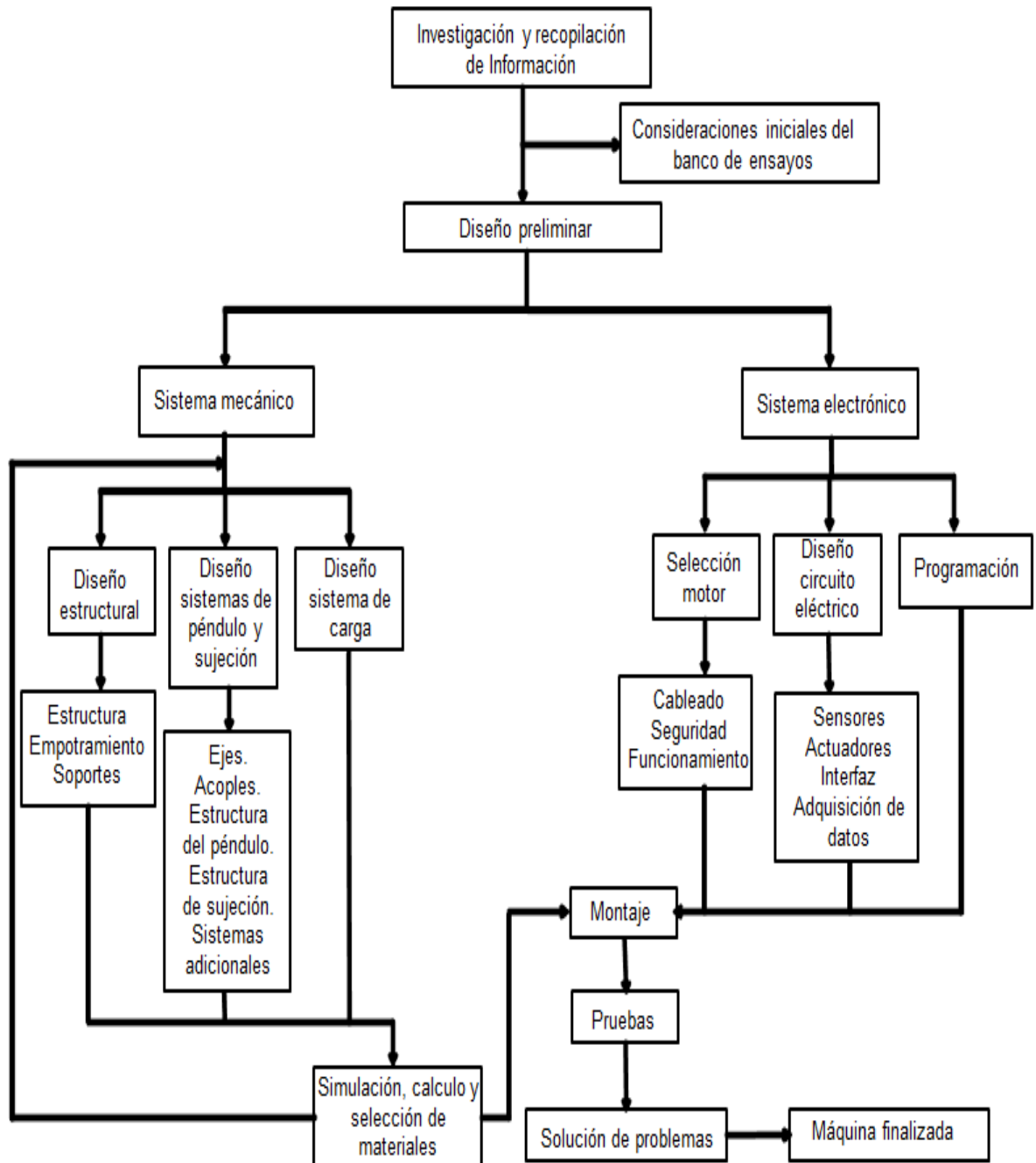
Prueba Charpy: Prueba ideada por Georges Charpy para determinar la tenacidad de un material.

Sensor: Dispositivo que capta magnitudes físicas u otras alteraciones en su entorno.

Tenacidad: Es la energía de deformación total que es capaz de absorber o acumular un material antes de alcanzar la rotura en condiciones de impacto.

5. DISEÑO METODOLÓGICO

Figura 3. Esquema de diseño Mecatrónico. [16]



Fuente: El autor.

El desarrollo del proyecto va a seguir la metodología planteada en la figura 3, en la cual en la primera parte se debe realizar una investigación y recopilación de la información, esto se puede evidenciar con el estado del arte y el marco teórico que se presentó en este proyecto. En esta fase se avanzó en el reconocimiento de los fundamentos conceptuales y tecnológicos que orientan la elaboración del proyecto, y de las experiencias similares en el ámbito nacional o internacional, y que pudieran ser utilizadas como apoyos o guías para la elaboración del proyecto.

Luego se establecen unas condiciones iniciales de diseño (cuando se mencionan “condiciones iniciales de diseño” en esta etapa se hace referencia a lo que se requiere que la máquina realice, por ejemplo, que el péndulo suba por un medio automático a su posición inicial), estas condiciones también ayudan a la definición de los objetivos del proyecto, para este propósito la primera condición es el desarrollo de un banco de ensayo por impacto utilizando un péndulo, esto restringe el problema a este tipo de máquinas, luego esta se debe desarrollar siguiendo alguna de las normas internacionales establecidas (para este caso la norma ASTM D6110-04), lo que garantiza la veracidad de las pruebas. La siguiente condición establecida es que el sistema para la adquisición de datos debe ser automático, al igual que para el levantamiento del péndulo, esto hace que el diseño del banco deba incluir el espacio y los cálculos necesarios para el sistema eléctrico además de una interfaz que permita soltar y/o subir el péndulo, además que permita visualizar los datos.

La siguiente fase del proyecto implica un diseño preliminar, esto es una idea inicial del proyecto, de cómo se podría diseñar el banco de ensayos, sus partes y componentes. De las fases previas (recopilación de la información) se recogieron unos planteamientos iniciales que ayudaron a la elaboración de los primeros bosquejos realizados de la máquina.

Las primeras tres partes mencionadas embarcan un primer tercio del proyecto, donde lo importante es la recolección de información, las siguientes fases a seguir se centrarán en el diseño definitivo, la elección de los materiales para este diseño

al igual que la elección de las piezas, para finalmente la construcción y pruebas para la entrega de la máquina finalizada.

Siguiendo la metodología se realizaron el diseño del sistema mecánico y del sistema electrónico. Estos se realizaron de forma simultánea, con el fin de evitar problemas futuros, dentro de los cuales destacan errores de ensamblaje que surgen al no tener un espacio o lugar para ubicar sensores o el sistema eléctrico en la estructura mecánica que se realizó; este es un problema común que se observó en la construcción de los diferentes proyectos realizados durante la carrera.

De los diseños se realizan simulaciones por medio del programa solidworks las cuales nos permitirán verificar si el diseño propuesto puede soportar las fuerzas o los esfuerzos a los cuales se ve sometido el banco de ensayos durante el funcionamiento. La selección de materiales para el banco de ensayos se realiza según la norma adoptada para este proyecto, la ASTM 6110, pero a su vez las simulaciones mencionadas a través de solidworks permiten comprobar que el diseño, más lo materiales indicados en la norma son los adecuados para las piezas a construir.

En esta etapa si se observa que la máquina no podrá realizar o soportar algún movimiento o fuerza, se puede volver a realizar cálculos o cambiar una parte del diseño, puesto que después de esta etapa sigue la presentación de un presupuesto y compra de los materiales y piezas diseñadas, cualquier arreglo posterior llevaría en un incremento en los costos del proyecto.

En la fase final se debe realizar el montaje del banco, y posterior a esto una serie de pruebas que verifiquen el funcionamiento de la prueba de impacto, si surge algún problema, algo mal alineado o que los datos adquiridos están errados se buscará una solución adecuada a la problemática vista, para entregar la máquina funcionando correctamente para su uso en la universidad.

6. REQUERIMIENTOS DEL DISEÑO, NORMA ASTM D6110-04 [17][18]

6.1 GENERALIDADES DE LA NORMA ASTM D6110-04

Con base en la norma ASTM D6110-04 se lograron obtener los cimientos para el diseño de la máquina, así como para el diseño de las piezas más importantes, como lo son la nariz de golpe, el péndulo o la barra del péndulo y el soporte principal. La norma también presenta las siguientes consideraciones generales para los que desean aplicar la norma:

- Las máquinas con martillos de tipo péndulo se han estandarizado, en una altura fija de caída del martillo, que se traduce en una velocidad fija sustancialmente del martillo en el momento del impacto.
- Las muestras están estandarizadas en que tienen una profundidad de longitud fija, sin embargo, la anchura de las muestras se permite variar entre límites. Se permite un diseño de la muesca fresada. La muesca de la muestra sirve para concentrar la tensión, reducir al mínimo la deformación plástica, y dirigir la fractura a la parte de la muestra detrás de la muesca. La respuesta a una muesca dada varía entre los materiales.
- Esta norma no pretende considerar todos los problemas de seguridad. Es responsabilidad del usuario de esta norma establecer las prácticas de seguridad y salud y determinar la aplicabilidad de las limitaciones reglamentarias antes de su uso.

6.2 NORMA PARA EL PÉNDULO

El péndulo simple está compuesto por un brazo de uno o varios miembros, de un cojinete en un extremo y una cabeza, que contiene la nariz de golpeo. Una gran proporción de la masa del péndulo debe concentrarse en la cabeza, el brazo debe ser suficientemente rígido para mantener la distancia adecuada y la relación geométrica entre la pieza de la máquina y la muestra, y para reducir al mínimo las pérdidas de energía de vibración.

Esta máquina estará provista de un péndulo básico capaz de suministrar una energía de $2,7\text{J} \pm 0,14$ [$2,0 \pm 0.10$ ft-lbf]. Este péndulo deberá utilizarse para muestras (únicamente de materiales plásticos) que extraen menos de 85% de esta energía cuando se rompe una muestra.

La longitud efectiva del péndulo deberá ser entre 0.325 y 0.406 m [12.8 a 16,9 pulgadas]. De modo que la elevación requerida de la nariz se obtiene elevando el péndulo a un ángulo de entre 30° y 60° por encima de la horizontal.

La norma recomienda el uso del acero AISI-SAE 1045 para el diseño del eje que proporciona el movimiento al péndulo y para otros componentes, como del mismo péndulo.

6.3 NORMA PARA LA NARIZ DEL GOLPE

Este es el componente del banco de ensayos que impactará directamente con la muestra, por lo cual el material de este componente debe garantizar la fractura de la probeta pero también la durabilidad de esta parte ante las pruebas a realizar y el desgaste ante el impacto que sufrirá este elemento.

La norma ASTM D6110 especifica los principales requerimientos que debe tener esta pieza:

- Deberá ser de acero templado.
- Cónica con un ángulo de $45 \pm 2^\circ$.
- Se redondeará con un radio de 3.17 ± 0.12 mm.

En el caso particular de la masa de golpe y los casquillos colocados en el soporte de muestra, son diseñados en acero herramienta para trabajos de choque, AISI-SAE D2, al que se trata térmicamente para proporcionar el templado como lo recomienda la norma, ya que son los elementos de la máquina que están expuestas directamente al impacto.

6.4 NORMA PARA EL SOPORTE PRINCIPAL

El modelado de los componentes estructurales de la máquina, se basa en acero estructural ASTM-A36 que cuenta con buenas propiedades mecánicas para la conformación de esta, lo anterior desprendido de la norma. El soporte principal será donde estará colocado el sistema del eje del péndulo, el cual permite el giro del péndulo, además de soportar el soporte de anclaje-liberación del péndulo. Teniendo una base inferior que se fija a la base principal de la máquina y una base superior de donde se fijará el mecanismo de anclaje-liberación del péndulo. Para nuestro banco de ensayos adicional deberá dar soporte al motor que subirá al péndulo a su posición inicial.

6.5 NORMA PARA EL MECANISMO DE ANCLAJE-LIBERACIÓN DEL PÉNDULO

Siguiendo la norma ASTM D6110 esta especifica los principales requerimientos para el diseño del mecanismo de retención y liberación (llamado en nuestro proyecto mecanismo de anclaje-liberación.) del péndulo:

- Diseñado, construido y operado de manera que liberará el péndulo sin impartir aceleración o vibración al péndulo.
- La posición del mecanismo deberá ser tal que la vertical de altura de caída de la nariz de impacto deberá ser 600 ± 2 mm (con ángulo inicial 30°).
- Asegurar una velocidad de la nariz en el momento del impacto, aproximadamente 3,43 m/s.

Este componente se diseña en acero ASTM-A36.

6.6 NORMA PARA EL SOPORTE DE LA MUESTRA

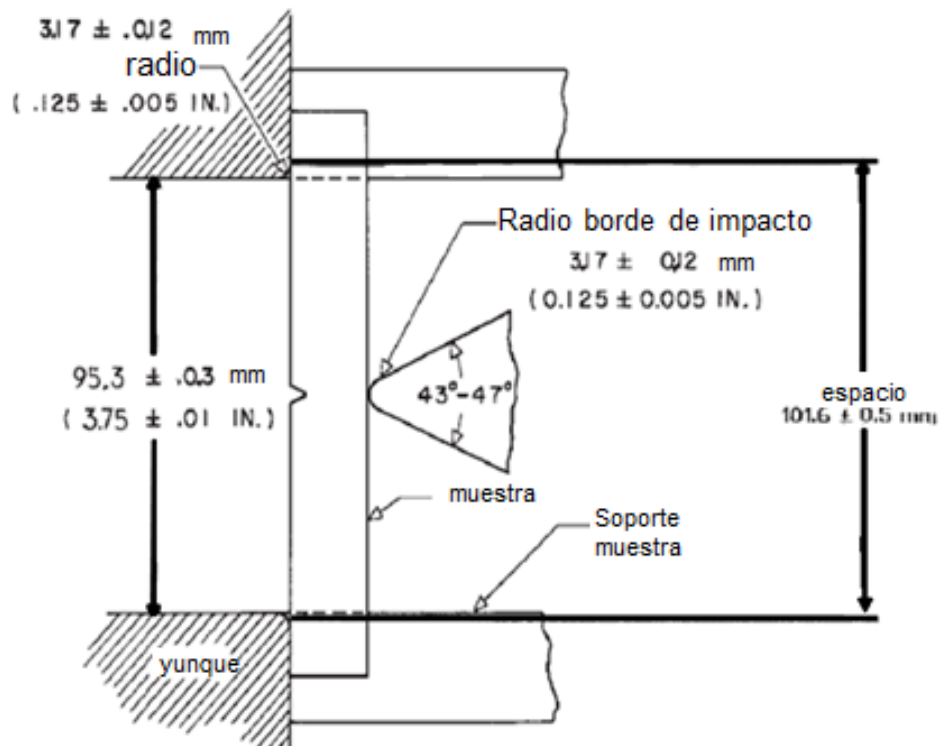
Según la norma ASTM D6110 las especificaciones principales para el diseño del soporte de la muestra:

- Consta de dos yunques rígidos.
- Los bordes de los yunques serán redondeados con un radio de $3,17 \pm 0,12$ mm.
- Las líneas de los yunques de contacto (span) con la muestra deberá ser $101,6 \pm 0,5$ mm.

Los soportes base están diseñados en acero ASTM-A36 y estos se montaran sobre la base principal de la máquina. En acero AISI-D2 se diseña los casquillos sobre los cuales ocurrirá el impacto de la cara opuesta de la muestra en donde

impactará la masa de golpe. En la figura 4 se observa como idealmente debería quedar la probeta soportada en el elemento de soporte, y donde idealmente debería golpear la nariz del péndulo.

Figura 4. Soporte de la muestra, nariz de golpe y probeta. [19]



Fuente: NORMA ASTM D6110-04

6.7 NORMA PARA LA BASE DE LA MÁQUINA DE ENSAYOS

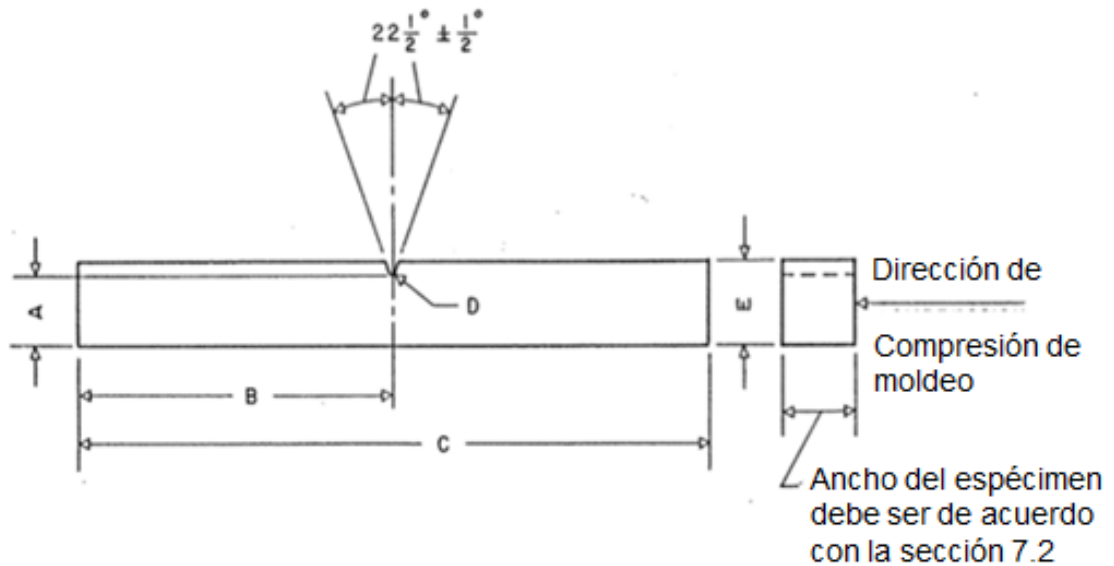
La norma recomienda montar los elementos de la máquina, sobre una base maciza (sólida, no hueca) y rígida que sea capaz de resistir cualquier movimiento, como el del desplazamiento de la máquina al momento de estar realizando el

ensayo, debiendo no afectar la realización de la prueba ni los resultados obtenidos, además de asegurar a todos los componentes de la máquina para que estos no sufran daños durante el desarrollo de las pruebas a realizar. Bajo esta norma y sus recomendaciones el diseño de la placa se realizará en de acero ASTM-A36, buscando así cumplir con lo estipulado por la norma.

6.8 NORMA PARA LAS PROBETAS

La norma ASTM 6110-04 también entrega las medidas para las probetas que se utilizaran en la prueba de impacto tipo Charpy. Esto garantiza lo indicado anteriormente mencionado respecto que la probeta no debe absorber más del 85% de la energía inicial del impacto. Además se debe utilizar este tipo de probetas para garantizar los resultados efectivos de la prueba, un error más allá de las tolerancias indicadas por la norma y presentadas en la imagen y tablas siguientes (Figura 5 y tabla 2) lleva a generar errores en la prueba, en sus resultados y en las conclusiones que obtienen los que la realizan.

Figura 5. Probeta para prueba de impacto para polímeros, establecida por la norma ASTM D6110-04. [20]



Fuente: NORMA ASTM D6110-04

Tabla 2. Medidas de las probetas.

	Medidas en mm	Medidas en pulgadas
A	10.16±0.05	0.400 ± 0.002
B	63.5 máx.	2.50 máx.
B	61.0 min	2.40 min
C	127.0 máx.	5.00 máx.
C	124.5 min	4.90 min
D	0.25R ± 0.05	0.010R ± 0.002
E	12.70 ± 0.15	0.500 ± 0.006

Fuente: NORMA ASTM D6110-04

La sección 7.2 de la norma indica que el grueso (espesor o anchura) de la probeta debe estar en el siguiente rango: entre 3.00 y 12.7 mm (0.118 y 0.500 pulgadas).

La sección 7.2.2 de la misma norma recomienda valores superiores a 6.35 mm porque éstos absorben menos energía debido a la compresión, flexión y torsión que valores de ancho menores a este.

6.9 ACEROS DE LA NORMA

Los tres tipos de aceros recomendados por la norma ASTM D6110-04 son: Acero ASTM-A36, acero AISI-D2 y el acero AISI-SAE 1045. Cada uno de ellos tiene ciertas características generales y propiedades mecánicas que los hacen adecuados para la función para la cual los requiere la máquina.

Las características generales del acero ASTM-A36 dicen que es un acero estructural de buena soldabilidad, adecuado para la fabricación de vigas soldadas para edificios, estructuras remachadas, y atornilladas, bases de columnas, piezas para puentes y depósitos de combustibles. Y entre sus aplicaciones en la industria están: Construcción de puentes, estanques, estructuras para industrias, edificios, torres y aplicaciones estructurales en general.

En la tabla 3 se observan la propiedades mecánicas más importantes y la densidad del acero ASTM-A36.

Tabla 3. Propiedades mecánicas y densidad del acero ASTM-A36. [21]

Material	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Esfuerzo último de tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Densidad (kg/m³)
ASTM-A36	250	400	200	7850

Fuente: Aceros Otero.

Las características generales del acero AISI-D2 muestran que es un acero de herramientas para trabajo en frío, uno de los más frecuentemente utilizados en la industria del metal y mecánica, en particular en industria de conformación y corte, se trata térmicamente a alta dureza manteniendo una buena resistencia a la fractura. Es un acero con alta dureza de penetración y excelente estabilidad dimensional y forma. Contiene carburos duros, cromo y una alta dureza después del tratamiento térmico, y tiene excelente resistencia al desgaste abrasivo tanto como al adhesivo.

Algunas de sus aplicaciones en la industria son: dados de extrusión, dados para conformado en frío, cuchillas de troqueles, tijeras, dados de conicidad, moldes para plásticos, dados de laminación, cuchillería, troqueles de estampado, punzones, y otras aplicaciones en frío que requiera corte.

En la tabla 4 se observan la propiedades mecánicas más importantes y la densidad del acero AISI-D2.

Tabla 4. Propiedades mecánicas y densidad del acero AISI-D2. [22][23]

Material	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Esfuerzo último de tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Dureza (HV¹)	Densidad (kg/m³)
AISI-D2	1385	1490	207	570	7695

Fuente: Aceros SISA

¹ HV hace referencia a la dureza Vickers o "hardness Vickers" por sus siglas en ingles

El acero AISI-SAE 1045 presenta las siguientes características generales: Es un acero de mediano contenido de carbono utilizado ampliamente en elementos estructurales que requieran mediana resistencia mecánica y tenacidad a bajo costo. Posee baja soldabilidad, buena maquinabilidad y excelente forjabilidad.

Entre las aplicaciones en la industria del acero AISI-SAE 1045 se encuentran su uso para todo tipo de elementos que requieren dureza y tenacidad como ejes, manivelas, chavetas, pernos, tuercas, cadenas, engranajes de baja velocidad, espárragos, acoplamientos, bielas, pasadores, cigüeñales y piezas estampadas. Puede ser sometido a temple y revenido.

En la tabla 5 se observan la propiedades mecánicas más importantes y la densidad del acero AISI-SAE 1045.

Tabla 5. Propiedades mecánicas y densidad del acero AISI-SAE 1045. [24]

Material	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Esfuerzo último de tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Dureza (HB)	Densidad (kg/m³)
AISI-SAE 1045	310	565	200	163	7870

Fuente: SUMITEC SA.

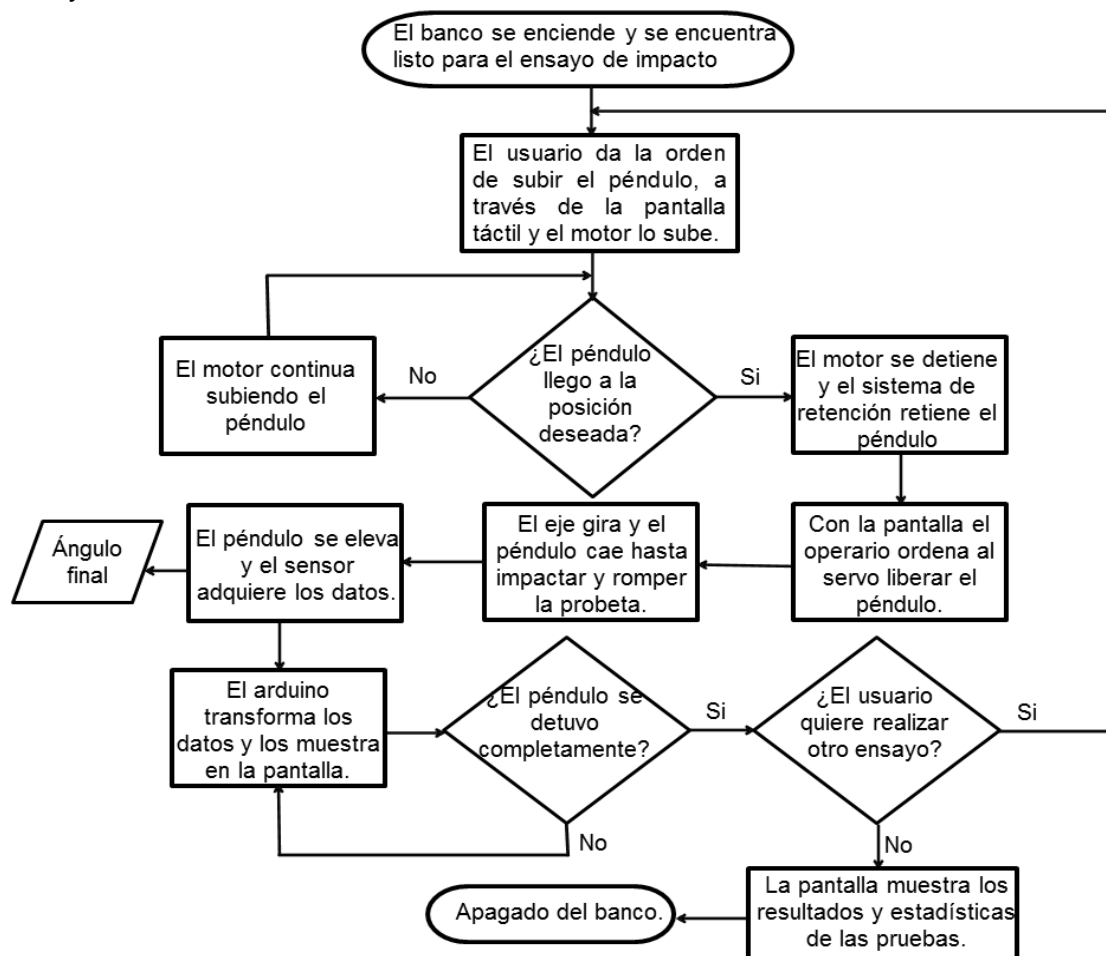
Estos son los tres tipos de acero que la norma recomienda para la construcción de las piezas de la máquina, como se puede apreciar las piezas estructurales o de mayor uso o impacto, como la nariz de golpeo, recomiendan aceros de mayores esfuerzos y dureza.

7. DISEÑO FINAL

7.1 DISEÑO MECÁNICO

Para explicar el desarrollo y diseño de los elementos mecánicos y electrónicos presentes en el banco de ensayo, se realizó el siguiente diagrama de bloque que se observa en la figura 6.

Figura 6. Diagrama de flujo del funcionamiento electromecánico de la máquina de ensayos.

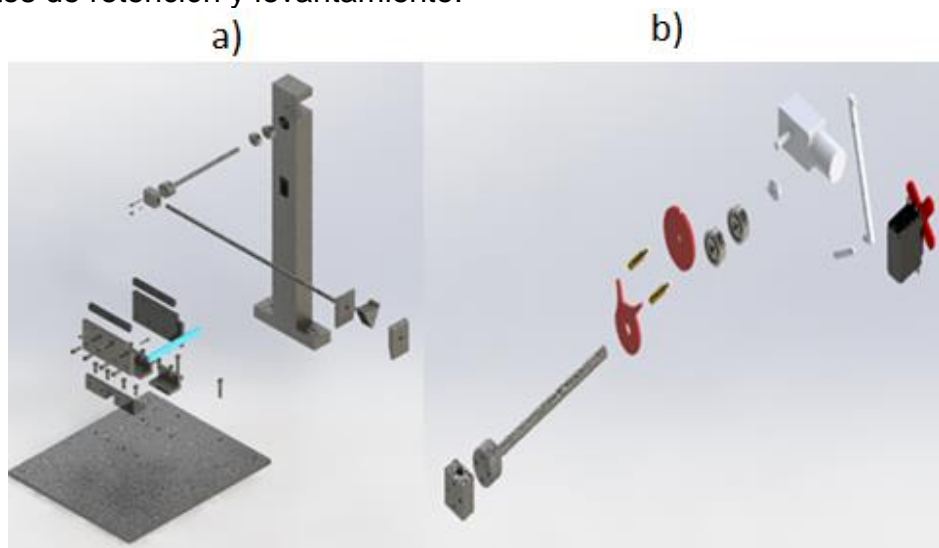


Fuente: El autor.

El diagrama explica rápidamente algunas piezas del banco de ensayos, y el uso que tienen, además de cómo interactúan entre ellas. Básicamente hay un soporte principal anclado a una base, el soporte carga un eje, un péndulo acoplado a este, una nariz de golpeo y unas piezas de retención. Un motor sube el péndulo al lugar inicial de la prueba. Para liberar el péndulo para su caída se debe dar una orden a través de un arduino y una pantalla táctil, un elemento libera las piezas, la nariz de golpeo cae y se realiza el ensayo (unos soportes tienen la probeta en el lugar necesario para la prueba de impacto). Un sensor toma los datos que se necesitan, el arduino los transforma y la pantalla los muestra. Un motor coloca el péndulo en la posición inicial para ensayos de impacto, el sensor detecta que el péndulo está en esa ubicación y el arduino ejecuta la orden para asegurar las piezas. La pantalla muestra todos los resultados y al colocar una nueva probeta se puede realizar una nueva experimentación.

La siguiente imagen, figura 7, muestra una vista explosionada de los componentes mecánicos y electrónicos del banco de ensayos, además de un acercamiento a los elementos de retención y subida del péndulo.

Figura 7. a) Vista explosionada del banco de ensayos y b) acercamiento elementos de retención y levantamiento.



Fuente: El autor.

En la imagen anterior se aprecian todas las piezas de la máquina de impacto, el uso de cada parte mecánica fue explicado en su mayoría en el capítulo 6 (y en sus subcapítulos) de este libro. El uso de cada elemento electrónico es explicado a fondo en el subcapítulo 7.2 y en los títulos de tercer nivel que le siguen a este. En resumen la base, el soporte principal y los soportes de la muestra, son la columna principal de la máquina, no participan de forma directa en la prueba de impacto, pero son las encargadas de dar soporte al banco, a las estructuras de impacto, levantamiento y retención, además de garantizar con su diseño y algunas características claves, como el peso, la correcta realización del ensayo.

Las estructuras de impacto (eje-péndulo-nariz de impacto), levantamiento y retención, además de los componentes electrónicos están directamente involucrados en el ensayo tipo Charpy, además de interactuar entre ellos antes y durante la prueba. Algunos de sus funciones son: Impactar la probeta, ubicar el péndulo en su ubicación inicial, asegurar el péndulo, la adquisición de datos y la ejecución de órdenes (pantalla táctil).

El desarrollo del diseño mecánico comenzó con los parámetros iniciales de diseño mencionados en la norma ASTM 6110, y expuestos en este libro en su numeral 6, a su vez se realizó en paralelo con el diseño electrónico.

Este diseño garantiza la realización de la prueba de impacto tipo Charpy acorde con la norma ASTM 6110, además de la durabilidad de las piezas que componen el banco de ensayos.

7.1.1 Componentes mecánicos del banco de ensayo. A partir de la norma ASTM 6110 y el diseño desarrollado, se establecieron en la siguiente tabla los componentes mecánicos que hacen parte de la máquina de ensayos, esto también soportado en simulaciones realizadas por medio del software solidworks para constatar que el diseño pueda soportar las cargas a las cuales será sometido.

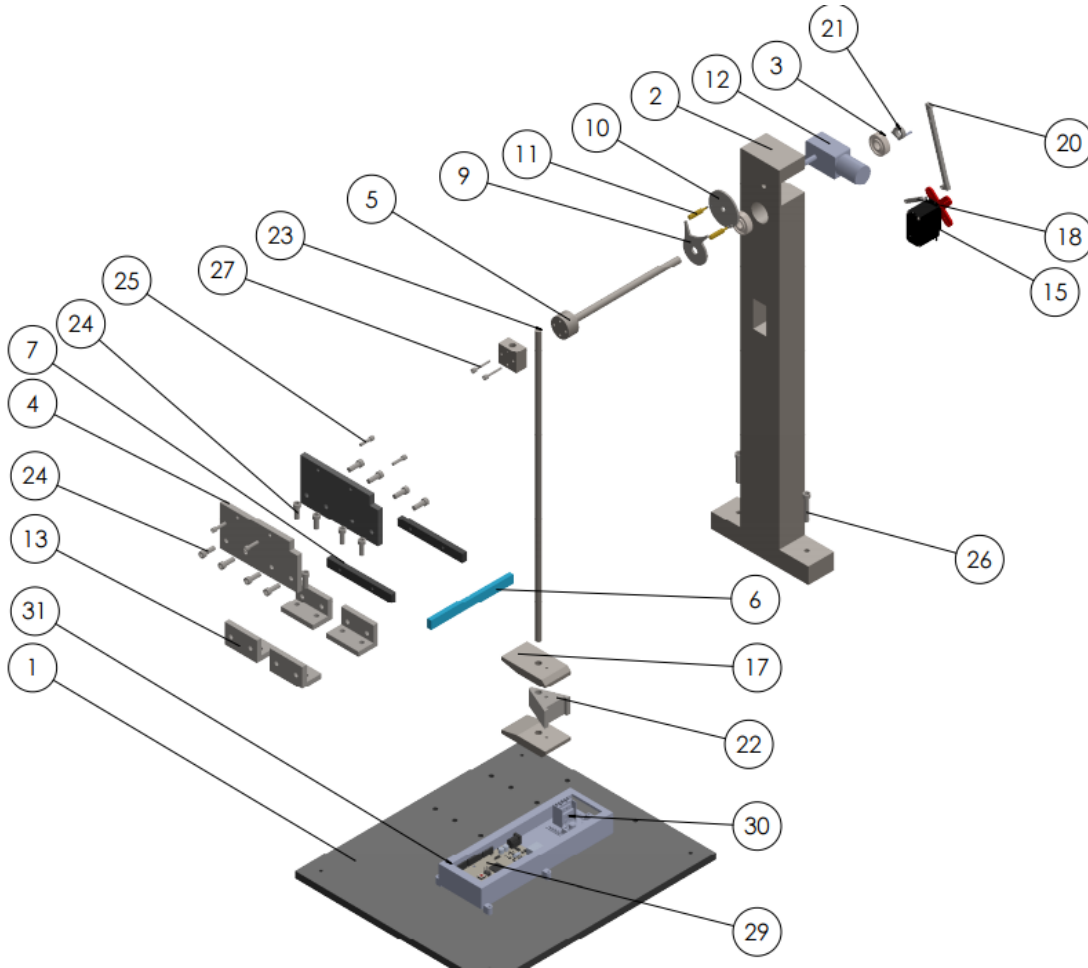
Tabla 6. Componentes mecánicos.

Soporte principal (2)
Soporte de la muestra (4, 7 y 13)
Eje del péndulo (5)
Péndulo (23)
Acople del péndulo (27)
Nariz de golpe (22 y 17)
Piezas retención (18, 20 y 21)
Base de la máquina (1)
Mecanismo de levantamiento (9, 10, 11)
Probeta (6)
Rodamientos (3)
Tornillos (24, 25 y 26)

Fuente: El autor.

Los números en la tabla corresponden al número del elemento en la vista explosionada que se puede observar en la figura 8.

Figura 8. Vista explosionada, con la enumeración de las partes.



Fuente: El autor.

Para el diseño de las piezas mecánicas se parte de los requerimientos de la norma ASTM D6110-04 (los requerimientos son: la energía capaz de suministrar la máquina, la longitud efectiva y el ángulo inicial, todo esto comentado en el capítulo 6 de este libro). Partiendo de los rangos que entrega la norma se diseñó en primera instancia la nariz de golpeo (el diseño comenzó a partir de los requerimientos de la norma para esta pieza, los cuales están en el numeral 6.3 del libro), tras el diseño en solidworks de esta pieza se verifico en el mismo software

la masa de la pieza diseñada, la cual es de 480g, a partir de lo cual se busca una longitud efectiva y un ángulo inicial para satisfacer la condición de la energía que es capaz de suministrar la máquina y que está presente en la norma.

Para seleccionar el ángulo inicial se buscó en primera instancia un ángulo con el cual se pudiera escoger cualquier longitud efectiva del rango establecido por la norma (junto con el valor de la masa ya obtenida), y como segunda medida que este ángulo de carga facilitara el diseño del mecanismo de levantamiento, puesto que este mecanismo debe subir el péndulo hasta la altura inicial de la prueba y luego no debe interferir con la misma. Para estas dos consideraciones un ángulo de 30 grados (el menor que permite la norma) nos deja elegir cualquier longitud efectiva dentro del rango, y para el diseño del sistema de levantamiento este ángulo genera un mayor espacio de seguridad (respecto ángulos mayores) para que exista una interferencia entre el péndulo en caída libre y el mecanismo para subirlo.

Teniendo los parámetros de masa y ángulo final, se seleccionó una longitud que cumpliera el criterio de energía de la norma. Con una longitud de 400 mm, que está dentro del rango permitido para este valor, y a través de la ecuación (2):

$$E_p = m * g * l * (1 - \cos(\alpha)) \quad (2)$$

Donde E_p es la energía potencial, m es la masa, g representa la gravedad, l la longitud efectiva y α el ángulo inicial. El resultado de aplicar la ecuación (2) es de 2.82 J, este valor está dentro del rango que la norma permite que la máquina sea capaz de suministrar.

A partir de los valores de la masa, la longitud, ángulo inicial y los criterios específicos de la norma respecto a cada pieza se inició el diseño todas las demás piezas mecánicas.

7.1.2 Soporte principal. El soporte principal de la estructura es la pieza central, ya que cumple varias funciones, como es darle peso a la estructura, soportara al eje con el péndulo acoplado, además van estar incorporados algunos sistemas electrónico como el motor y el servomotor, además de su cableado.

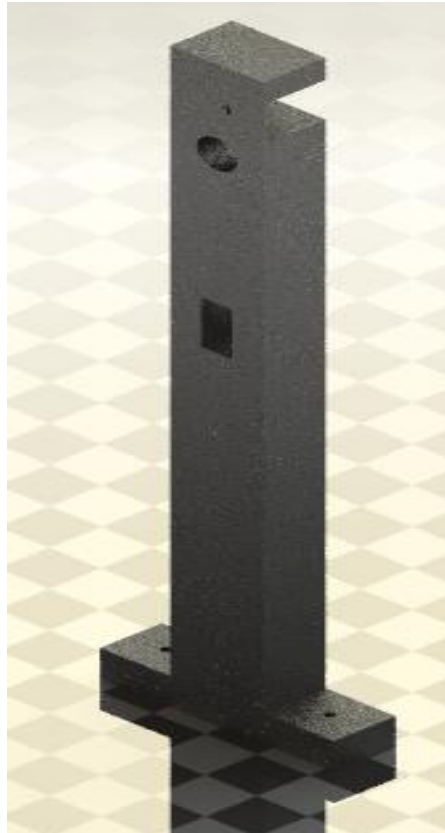
El material empleado para el diseño y posterior construcción es el acero ASTM A36.

En la figura 9 observamos el soporte principal diseñado. Para su diseño la primera consideración es que la altura de la pieza debe ser superior a longitud efectiva del péndulo (de 400 mm), también se debe considerar un espacio para la ubicación de un rodamiento (para el movimiento del eje) y una distancia adicional para la ubicación del sistema de levantamiento. La segunda contemplación es que esta pieza debe tener una parte para juntarla (atornillarla o unirla) a la base.

El diseño final presenta una altura de 532 mm, 150 mm de largo (60 mm en la parte maciza) y 40 mm de ancho. En la parte inferior se ubicaron un par de espacios para los tornillos que unirán esta pieza a la base. La altura del soporte garantiza la realización de la prueba sin que se presente ningún tipo de impacto con la base y además tiene el espacio necesario para la ubicación de otras piezas del banco de ensayos. Los sistemas de levantamiento (el motor) y retención (el servomotor), junto con los rodamientos se diseñaron la par de este elemento, con lo cual los espacios o huecos en la parte central y superior del soporte principal están hechos de forma tal que las piezas mencionadas encajen correctamente en ellos.

El plano, con las medidas exactas de esta pieza, se ubica en el anexo B de este libro.

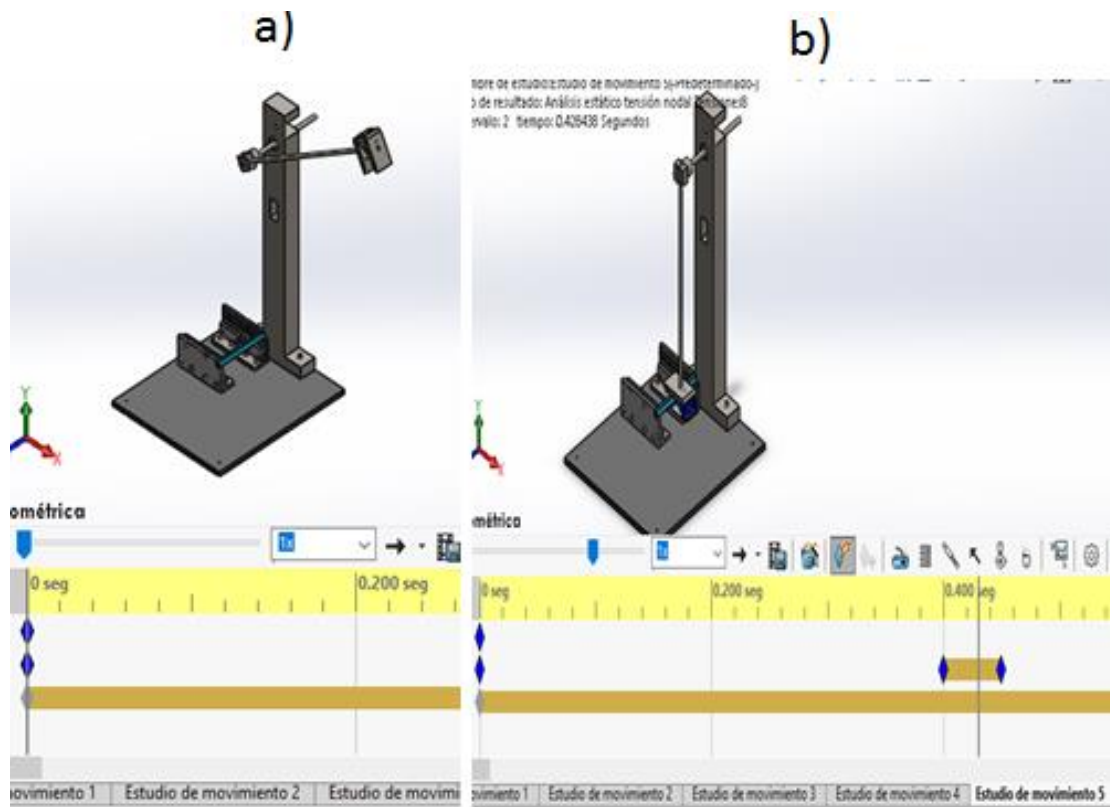
Figura 9. Soporte principal.



Fuente: El autor.

La simulación consistió en dejar caer el péndulo y que la nariz impactara una muestra de acero, y al instante del golpe observar los esfuerzos que se generaron sobre las distintas piezas, con esto asegurar que el diseño soporte las pruebas a realizar sobre probetas plásticas. Todas las pruebas se realizaron bajo estas mismas circunstancias. El momento inicial de la simulación y su parte final se puede observar en la figura 10.

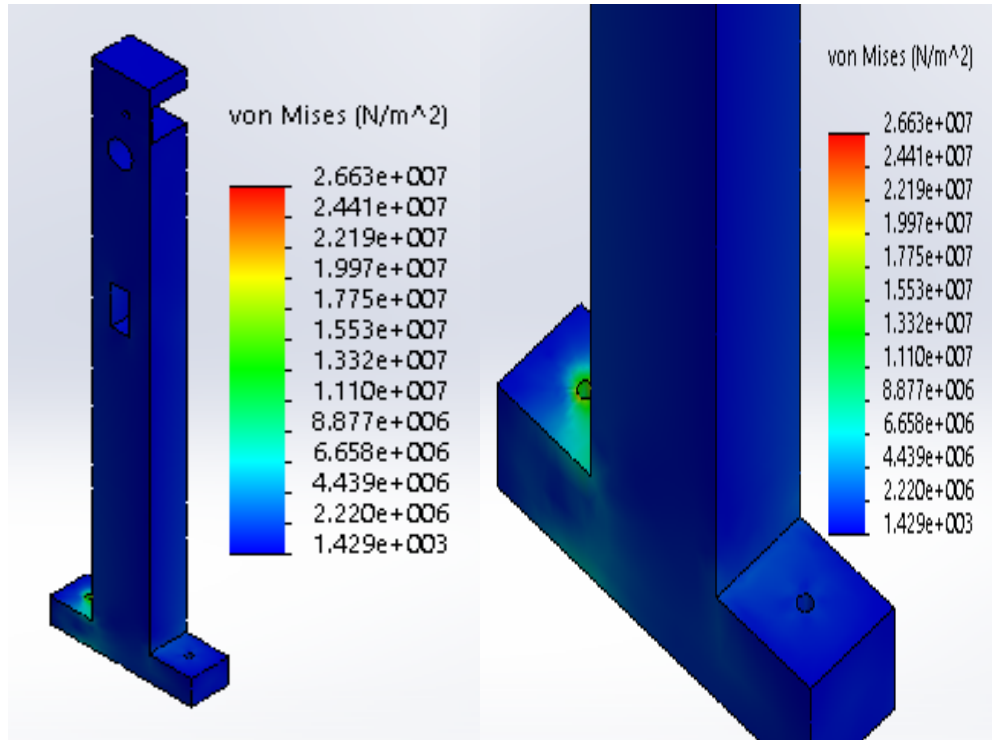
Figura 10. Simulación de impacto, a) momento inicial y b) momento final.



Fuente: El autor.

En la figura 11 se observa la simulación de impacto y los esfuerzos que se generaron a partir de ella sobre el soporte principal, al instante de impactar la nariz de golpe sobre una probeta, que para esta prueba y las pruebas realizadas a todos los componentes mecánicos es de acero, esto para simular una condición de impacto extrema.

Figura 11. Prueba de impacto y esfuerzos sobre el soporte principal.



Fuente: El autor.

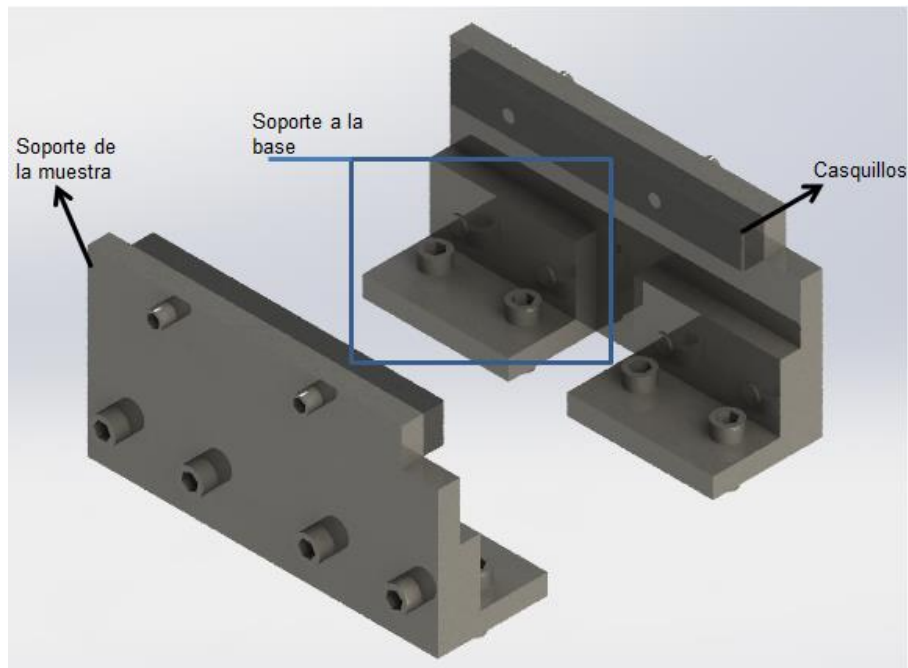
En la simulación realizada el esfuerzo máximo hallado fue de 26.63 MPa, el cual es un valor por debajo del límite de fluencia del material de 250 MPa (aproximadamente 10,6% del límite de fluencia), por lo cual se asegura que la estructura no sufrirá ni deformaciones permanentes ni rupturas al momento de realizar las pruebas de impacto.

7.1.3 Soporte de la muestra. El soporte de la muestra son un conjunto de tres piezas, claves ya que debe cumplir con la norma exacta, esto porque la medida correcta garantiza que la prueba de impacto entregue resultados confiables.

Las piezas que componen en general esta estructura son: El casquillo de la muestra, el soporte a la base y el soporte de la muestra. Estas se pueden observar en la figura 12. Para el diseño de estas piezas se tiene como punto de partida lo escrito en el numeral 6.6 de este libro. La norma solo especifica la distancia entre los casquillos y el material de las piezas. El soporte de la base tiene cuatro huecos para su anclaje, por medio de tornillos, a la base (dos) y al soporte de la muestra (2). A su vez el soporte de la muestra tiene seis huecos, cuatro para los soportes a la base y dos para los casquillos (los cuales solo tienen dos huecos cada uno para la unión con el soporte de la muestra). El soporte a la base y el soporte de la muestra se diseñaron como piezas separadas por la dificultad que resultaría el maquinado una sola pieza. Las piezas ocupan un largo de 120 mm, 62.7 mm de alto (50 mm en el lugar de la muestra) y 36.5 mm de ancho (cada conjunto de un casquillo, un soporte de la muestra y dos de la base).

En el anexo B se encuentran los planos de cada una de estas piezas.

Figura 12. Componentes del soporte de la muestra.

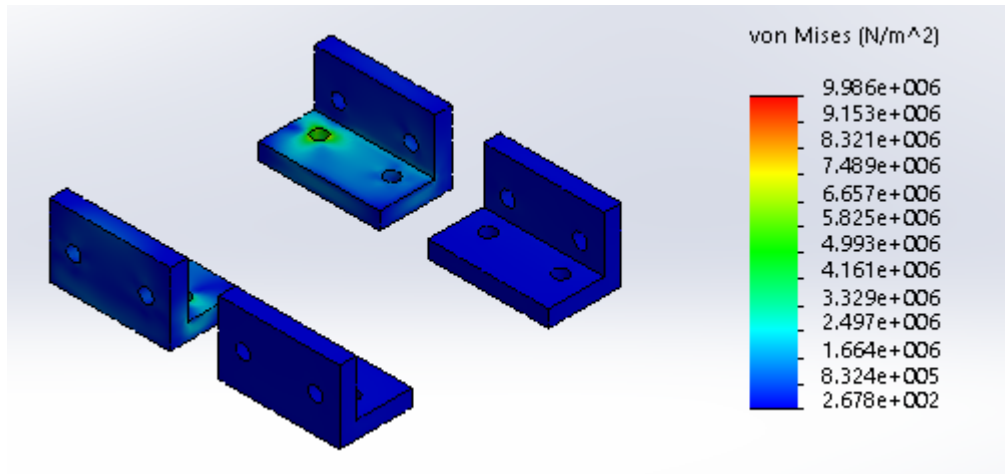


Fuente: El autor.

El material del casquillo es AISI D2, mientras que el de los soportes es ASTM A36.

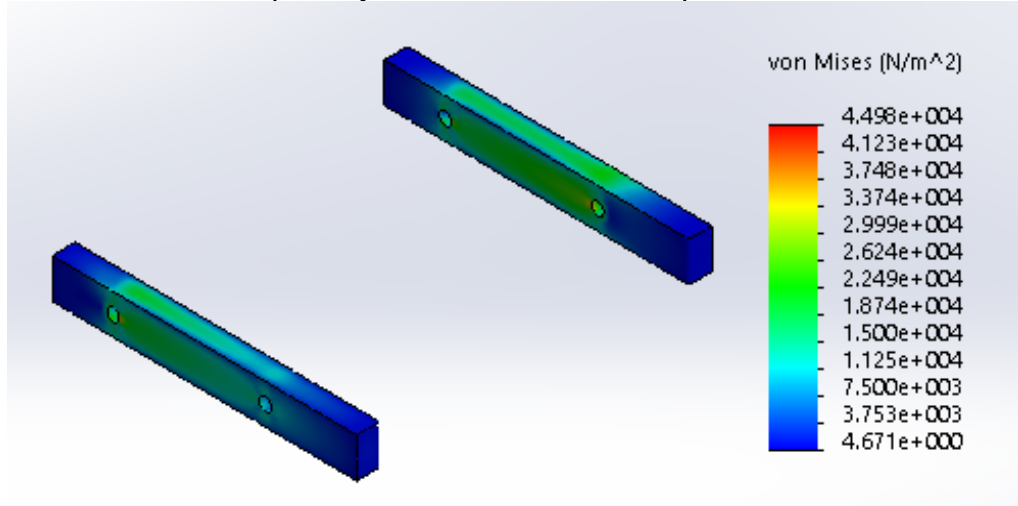
Las figuras 13 y 14 muestran las pruebas de impacto realizadas a la base del soporte de la muestra y a los casquillos en el instante en el cual la nariz de golpeo impacta una probeta.

Figura 13. Prueba de impacto y esfuerzos sobre los soportes de la base de la muestra.



Fuente: El autor.

Figura 14. Prueba de impacto y esfuerzos sobre casquillos.



Fuente: El autor.

El acero AISI D2 tiene un esfuerzo de fluencia de 1385 MPa, por lo cual al ver el valor máximo de la prueba realizada, que es de 0.04498 MPa asegura que los casquillos no sufrirán ni deformaciones permanentes ni rupturas al momento de realizar las pruebas de impacto.

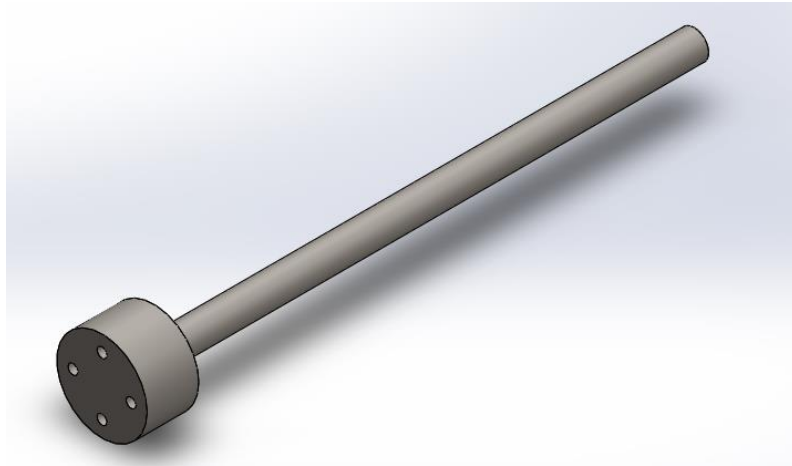
Respecto al soporte de la muestra, el esfuerzo máximo visto en la simulación fue de 9.98 MPa, el esfuerzo de fluencia del acero ASTM A36 es de 250 MPa, este límite es aproximadamente 25 veces mayor que el valor pico hallado, por lo cual la integridad de esta pieza se garantiza.

7.1.4 Eje del péndulo. El eje del péndulo lleva el movimiento de la nariz de golpe en caída libre, en un ángulo estandarizado por la norma, además soporta la masa de nariz de golpe y la barra del péndulo. Para minimizar los efectos de la fricción se usaran dos rodamientos para unir (disminuir la fricción) el eje con el soporte principal.

El material del péndulo es acero AISI SAE 1045. La norma como tal no especifica un largo o diámetro para esta pieza, pero se debe considerar que el eje sea lo suficientemente largo como para el péndulo se ubique de forma que la nariz de golpeo impacte la probeta en el medio, a la mitad de la distancia que hay entre los soportes de la muestra. El diámetro del eje debe ser debe corresponder al diámetro interno del rodamiento, por lo cual se tiene que realizar de un valor comercial de rodamientos. Y por último parámetro se garantiza un espacio para la ubicación del de los mecanismos de levantamiento y retención.

En la figura 15 se puede observar el péndulo diseñado. Tiene un largo de 183.5 mm (en el extremo se ubica una figura cilíndrica de 28mm de diámetro y con los huecos para unir el eje al acople del péndulo), con un diámetro de 9mm. En el anexo B está el plano de la pieza con todas las medidas correspondientes.

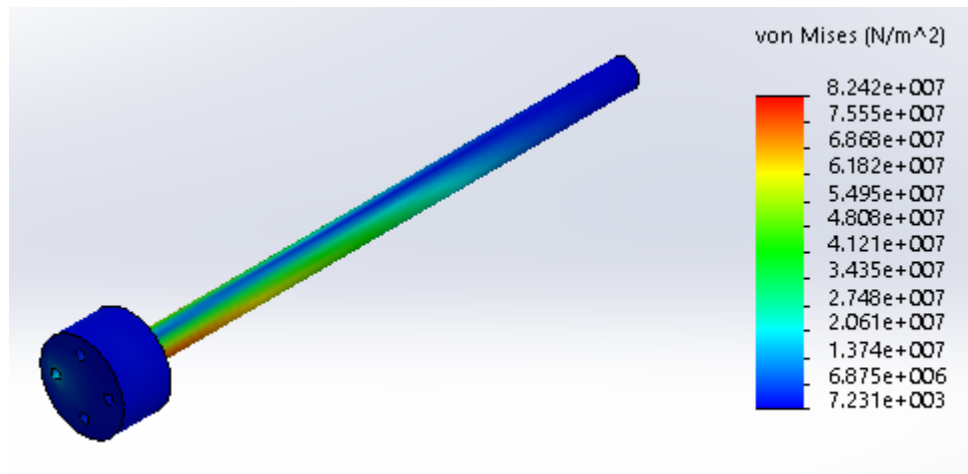
Figura 15. Eje del péndulo.



Fuente: El autor.

En la figura 16 se puede observar los esfuerzos sobre el eje durante la prueba de impacto.

Figura 16. Eje durante la prueba de impacto y esfuerzos generados.



Fuente: El autor.

El valor máximo registrado durante esta prueba fue de 82.4 MPa, el acero SAE 1045 tiene como valor de esfuerzo de fluencia 310 MPa, esto es 3.7 veces mayor que el valor pico de la simulación y se garantiza que si se llega a superar el límite hallado hay un colchón de seguridad, y por lo tanto la pieza no fallara durante los ensayos de impacto.

7.1.5 Péndulo. El péndulo es una unión entre la nariz de golpe y el eje principal, y la característica principal es que cumpla con la altura de caída que recomienda la norma y la longitud efectiva con la cual se diseñó la máquina para que cumpliera el parámetro de la energía suministrada. Siendo la longitud efectiva la distancia entre el centro del eje y el centro de la nariz de golpeo, pero en el diseño de la masa de golpe se dejó un espacio para que el péndulo la atravesara completamente (para mejorar la unión entre el péndulo y la nariz), por lo cual el largo del péndulo se estableció en 445 mm, con lo cual atraviesa toda la nariz, sobresale por el acople que lo une al eje y se garantizan los 400 mm. El diámetro del péndulo de 8 mm corresponde a un valor comercial de varilla del acero 1045.

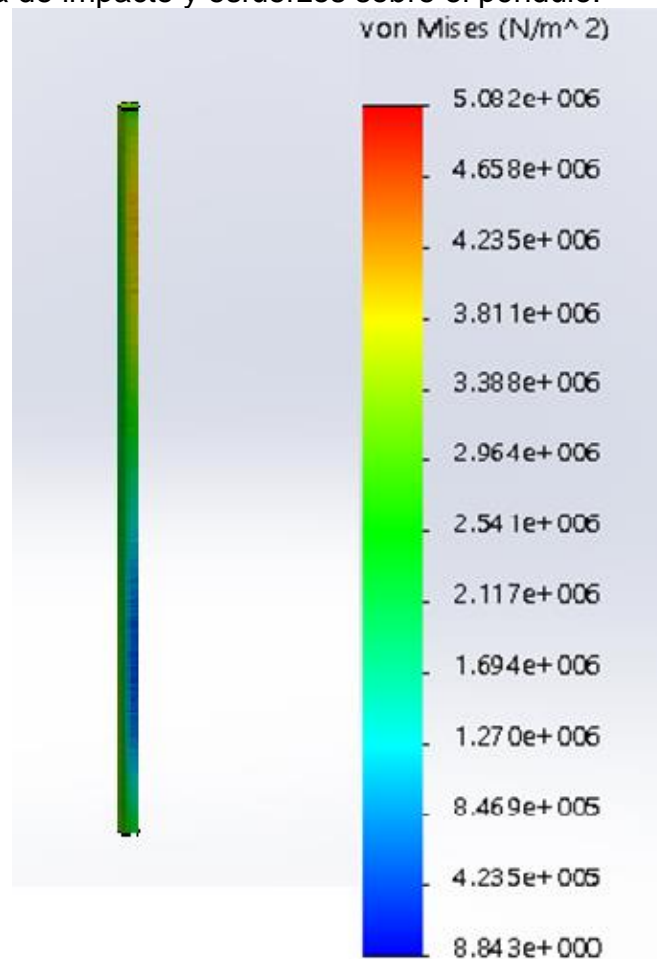
El material del péndulo es acero AISI SAE 1045. En la figura 17 se observa el péndulo diseñado y en la figura 18 se ve el resultado de la simulación de la prueba de impacto sobre el péndulo.

Figura 17. Péndulo de la nariz de golpeo.



Fuente: El autor.

Figura 18. Prueba de impacto y esfuerzos sobre el péndulo.



Fuente: El autor.

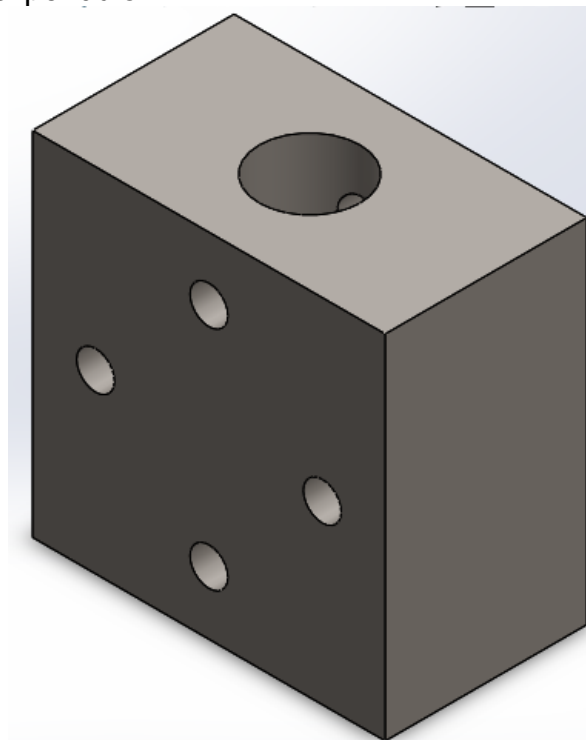
En la prueba realizada el esfuerzo máximo hallado fue de 5.08 MPa el cual es un valor por debajo del límite de fluencia del material. El valor pico representa aproximadamente el 2% del esfuerzo de fluencia del Acero 1045, por lo cual el péndulo no debe sufrir daños durante los ensayos. El plano de la pieza está en el anexo B.

7.1.6 Acople del péndulo. Este acople es para unir el sistema de entre el eje y el péndulo.

Está fijado al eje por medio de tornillos y asegura el péndulo por medio de dos prisioneros. Además el sensor del ángulo también está fijado sobre esta pieza. El material utilizado para el acople del péndulo es acero AISI SAE 1045. En la figura 19 se ve el acople diseñado, y en la figura 20 se observa la simulación de la prueba de esfuerzos realizada a esta pieza.

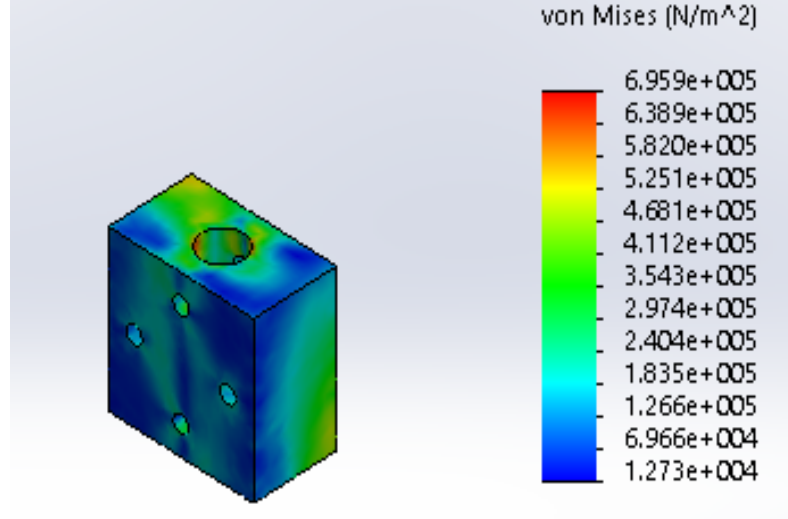
El espacio para el péndulo es de 8 mm, tiene un alto de 28 mm y un ancho de 16 mm. El plano completo de esta pieza se encuentra en el anexo B de este libro.

Figura 19. Acople del péndulo.



Fuente: El autor.

Figura 20. Prueba de esfuerzos sobre el acople del péndulo.



Fuente: El autor.

En la simulación realizada el valor pico hallado fue de 0.695 MPa que comparado con el valor de fluencia del acero AISI SAE 1045 que es de 310 MPa no representa ni el 1%, esto se debe principalmente a que esta pieza no hace parte de la estructura principal de la máquina y los tornillos que la unen al eje son los que sufren mayores esfuerzos durante los ensayos de impacto.

7.1.7 Nariz de golpe. La nariz de impacto, como su nombre lo indica, será la pieza que chocara la probeta durante el ensayo, y esta pieza debe de romper la muestra sin tener daño sobre su propia estructura. El material de esta pieza es acero AISI D2.

A la nariz de golpeo se le realizó un par de piezas denominadas detalles de la nariz de golpe. Estas partes sirven como acople para unir la masa de impacto con el péndulo. Dos tornillos aseguran (un tornillo por la parte arriba de la nariz lo une con el detalle superior y el segundo tornillo junta el detalle inferior con la nariz por

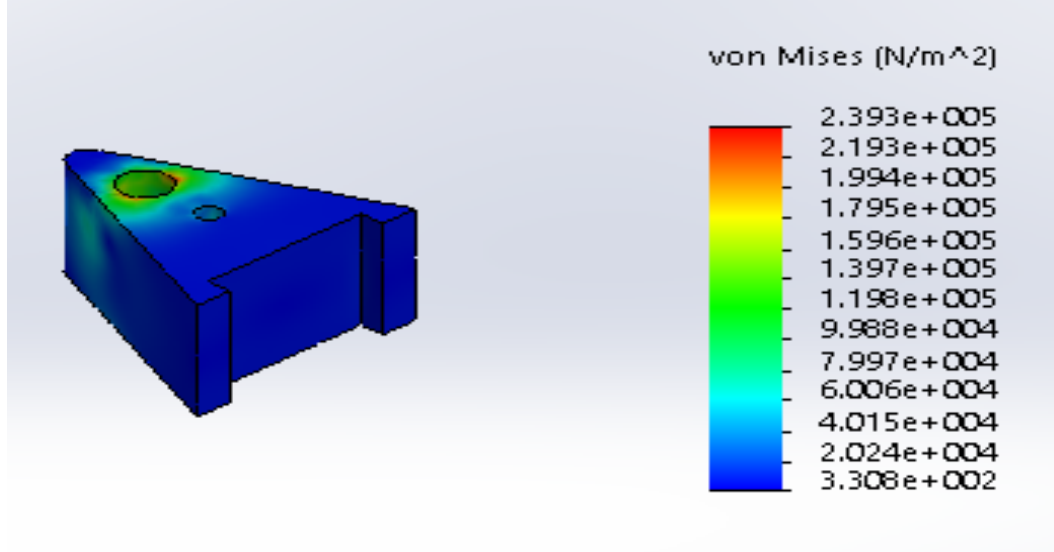
la parte de abajo) estas piezas entre sí. El péndulo atraviesa estas partes hasta llegar a la parte inferior del segundo detalle. El material del detalle también es acero AISI D2. En la figura 21 se observan el diseño de estas piezas, y en la figura 22 la prueba de impacto sobre ellas. El diseño de la nariz es explicado en el numeral 7.1.1 de este libro. La nariz tiene una masa de 480 g, una altura de 23 mm y un largo máximo de 40 en el extremo posterior, además de un espacio que lo atraviesa completamente de diámetro 8 mm, para el péndulo y otros dos huecos para los tornillos que unen esta pieza con los detalles. Los detalles tienen un ancho máximo de 10 mm en su parte central, los mismo orificios de la nariz de golpeo y un largo de 68.2 mm.

Figura 21. Nariz de golpeo y los detalles.



Fuente: El autor.

Figura 22. Prueba de impacto y esfuerzos en la nariz de golpeo.



Fuente: El autor.

En la simulación realizada el esfuerzo máximo hallado fue de 0.29 MPa, el cual se centra principalmente en el área de contacto con el péndulo. Este valor es muy inferior al límite de fluencia del acero D2 que es de 1385 MPa, esta diferencia garantiza un desgaste mínimo de la pieza durante las pruebas. En el anexo B se encuentran los planos de la nariz de golpeo y de los detalles.

7.1.8 Piezas retención. El sistema de retención de la máquina de impacto se encarga de mantener el péndulo en el lugar de partida de la prueba y también de soltarlo. Las estructuras propuestas en la literatura para esta parte del banco de ensayos son de uso manual, esto quiere decir que un usuario debía liberar y asegurar la o las piezas de retención.

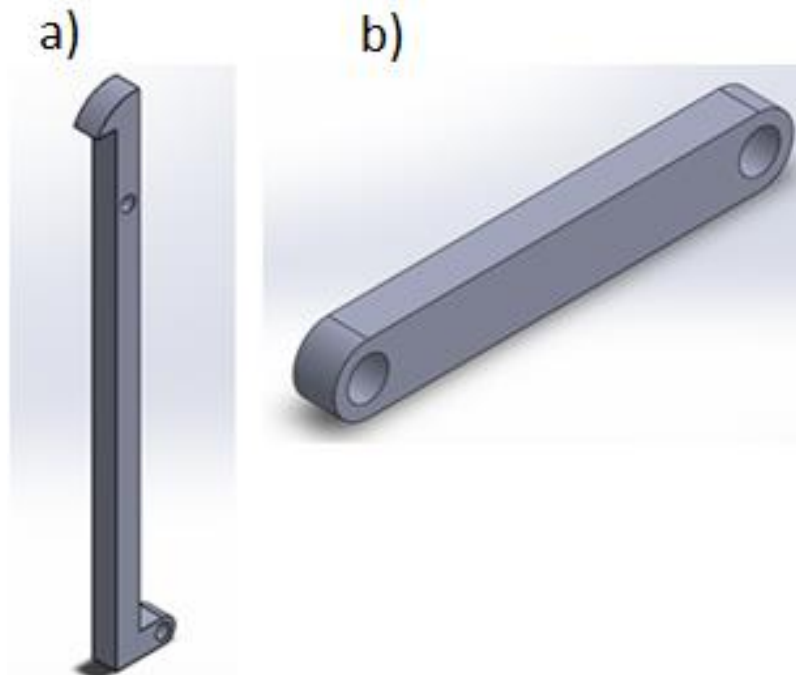
Para el proyecto se desarrolla un sistema automatizado para la liberación y sujeción del péndulo de impacto.

El mecanismo de retención del péndulo en un clásico retenedor con un sistema de palanca para así disminuir la fuerza al momento de liberar el péndulo.

El mecanismo es sencillo y cumple con la función de retener el péndulo y liberarle sin ninguna fuerza extra, además este estará sincronizado con el sensor, ya que cuando este a 30 grados el péndulo lo bloqueará, y lo liberará al momento de la prueba de impacto.

Diferentes mecanismos de retención se pueden encontrar en la literatura, pero para una tarea sencilla en el banco de ensayos se tomó y se implementó el sistema que se observa en las siguientes imágenes (además de las piezas que lo componen en las figuras 23 y 24). La rueda dentada tiene un diámetro interno de 9 mm (mismo del eje) y un diámetro externo de 15 y el diente es de 5 mm de largo. La pieza de retención tiene un largo de 100 mm y el conector de 30 mm.

Figura 23. a) Pieza de retención y b) conector.



Fuente: El autor.

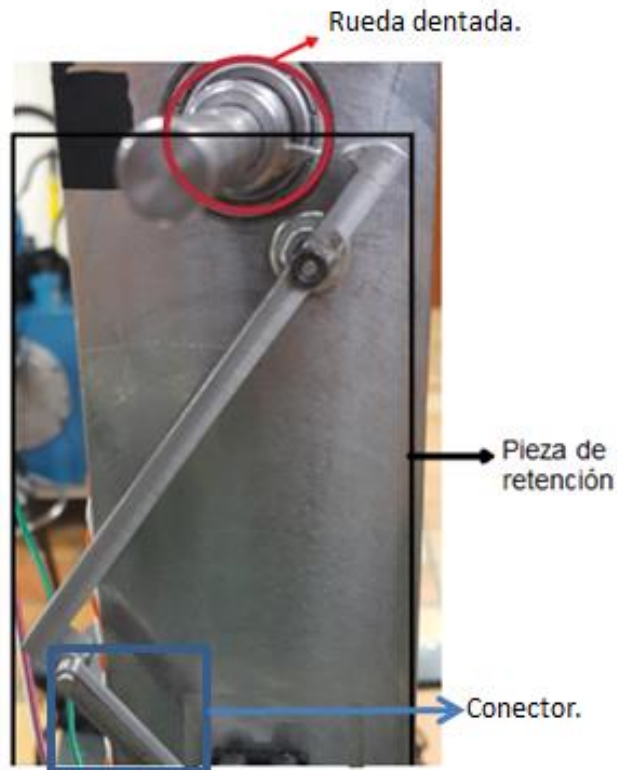
Figura 24. Rueda dentada.



Fuente: El autor.

En la figura 25 se observan las piezas mecánicas y el servomotor, en conjunto estas partes forman el sistema de retención. El mecanismo funciona de la siguiente forma: Cuando el péndulo sube hasta la posición inicial del ensayo, la rueda dentada se localiza por debajo de la pieza de retención, y en ese instante el arduino gira su accesorio, que mueve el conector y esta hace que la pieza de retención se cierre sobre la rueda dentada, el espacio entre ambas debe ser mínimo para garantizar altura de inicio de la prueba de impacto.

Figura 25. Sistema de retención.



Fuente: El autor.

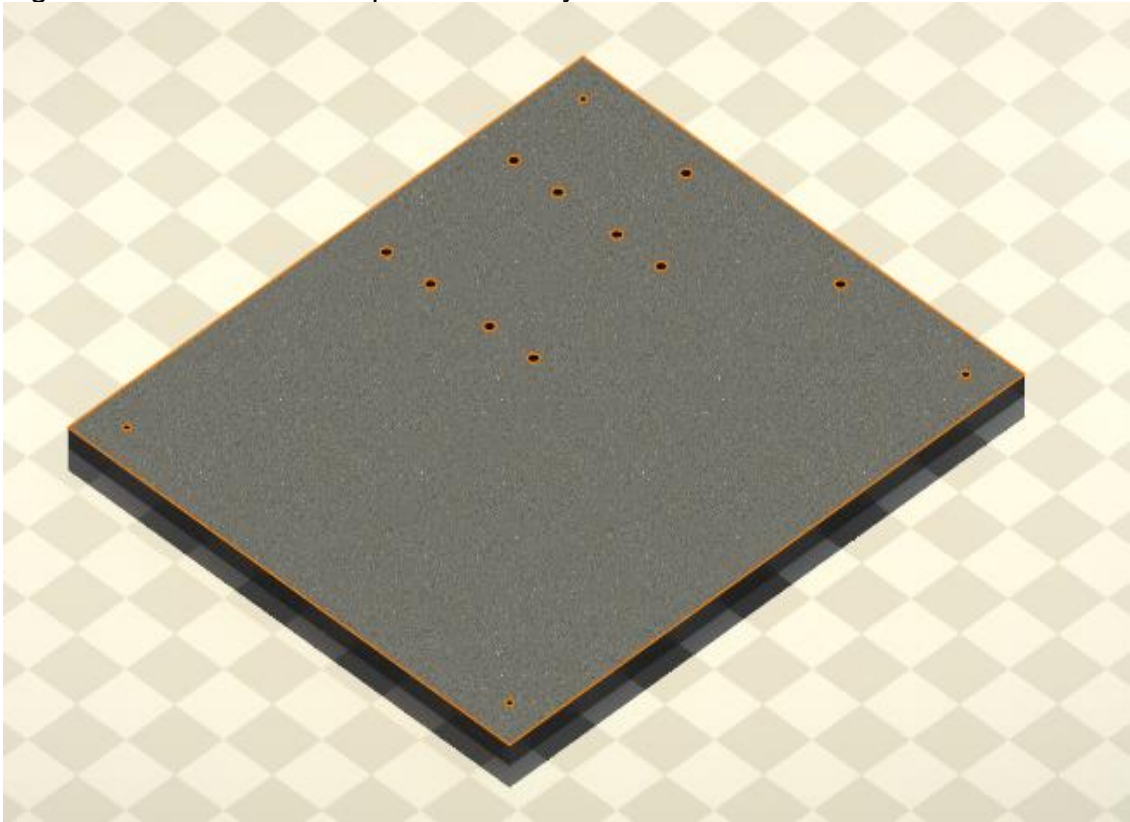
7.1.9 Base de la máquina. La base de la máquina es el elemento en el cual se anclaran el soporte principal y el soporte de las probetas, esta base no irá pegada o unida al piso, solo estará sobre él, y será el peso de todos los elementos los que soporten la fuerza del impacto en la prueba, pero a la vez la base asegurara la precisión de las piezas que están en ella, con lo cual asegura el correcto desarrollo de la prueba.

El material de la base es acero ASTM A36. Para su diseño se consideraron todas las piezas que debían sujetarse a la base (por medio de tornillos) y se colocaron los huecos en el lugar donde se deben ubicar las piezas (soporte principal y soporte a la base), además para el ancho de 10 mm se utiliza este por ser un valor

comercial de lámina de este tipo de acero y el largo es de 300 mm para lograr ubicar todos los componentes mecánicos sobre ella. En el anexo B está el plano completo de esta pieza.

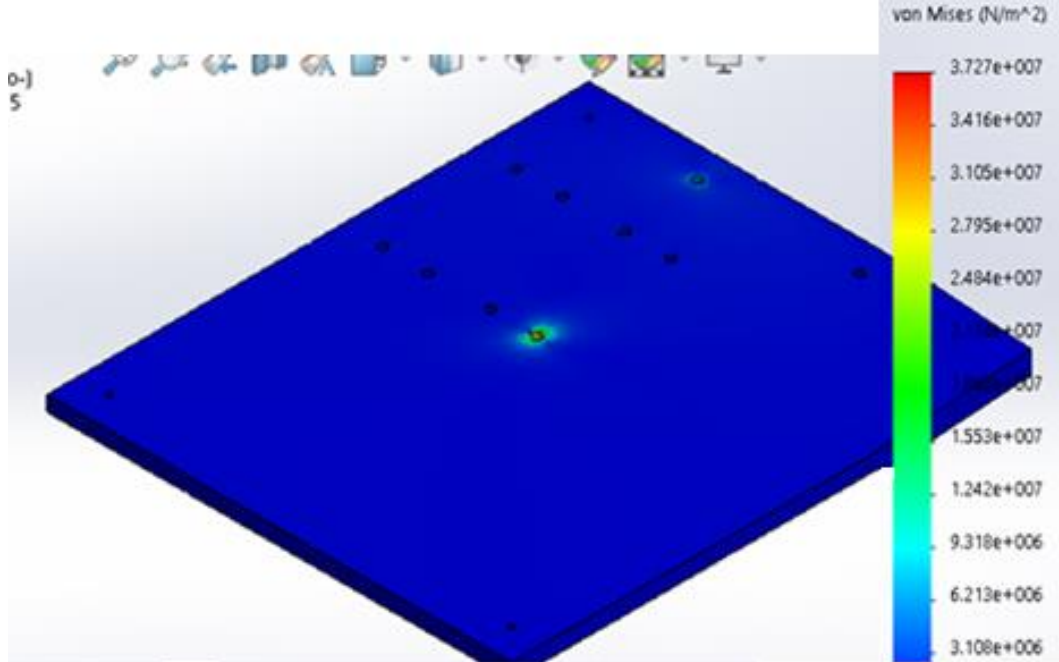
En la figura 26 se observa la base diseñada, y en la figura 27 se muestra la prueba de impacto y los esfuerzos que actúan sobre la base de la máquina de impacto, al instante del golpeo de la nariz sobre la probeta.

Figura 26. Base de la máquina de ensayos.



Fuente: El autor.

Figura 27. Prueba de impacto y esfuerzos en la base de la máquina.



Fuente: El autor.

En la simulación el esfuerzo máximo hallado sobre la base fue de 37.2 MPa, que frente al esfuerzo de fluencia del acero A-36 de 250 MPa se logra un factor de seguridad alto (la diferencia es aproximadamente del 85% del valor límite) y se asegura que la pieza no sufra rupturas ni deformaciones mientras que funciona el banco de ensayos.

7.1.10 Mecanismo de levantamiento. El mecanismo de levantamiento del banco de ensayos se basó en el mecanismo de rueda de ginebra también conocida como cruz de malta, es un sistema que convierte un movimiento circular continuo en un movimiento circular intermitente.

Cada vez que el rodillo que se encuentra ubicado en la rueda conductora, contacta con la cruz de malta, provoca el giro de esta dependiendo de la cantidad de ranuras que tenga. Es decir que, si posee N ranuras, entonces rotara $1/N$ por cada vuelta del rodillo. O también se puede decir que cada N vueltas del rodillo, la cruz de malta realizara un giro completo.

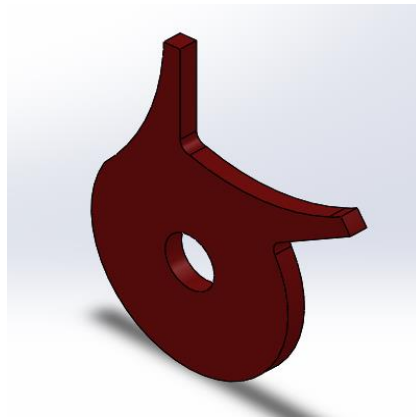
Se modificó este mecanismo para que funcionara en dos tiempos continuos, mientras que se sube el péndulo al ángulo deseado, y quede después libre para hacer la caída y proceder a romper la probeta.

Este mecanismo es apto ya que al momento de liberar el péndulo no hay ningún contacto con el mecanismo de levantamiento y no hay ningún tipo de fricción que impida frenar el péndulo al momento de la caída.

Se revisó varios mecanismos de levantamiento como engranajes, cadenas, correas, entre otros pero estos tipos de sistemas no clasificaban, ya que las piezas quedarían acopladas directamente con el eje y al momento de la liberación actuarían fuerzas que impedirían la toma de datos exacta, como por ejemplo la fricción entra la cadena y piñones.

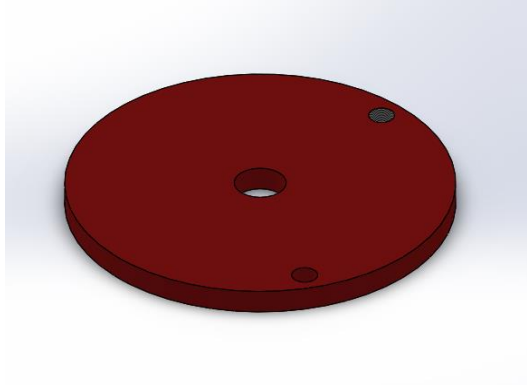
En la figura 28 y 29 se muestran las piezas de este sistema de levantamiento.

Figura 28. Pieza de levantamiento.



Fuente: El autor.

Figura 29. Pieza de acople al motor.

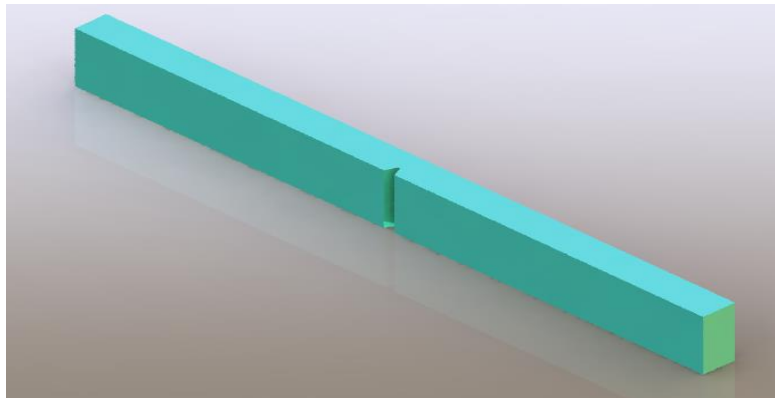


Fuente: El autor.

7.1.11 Probeta. La probeta está tomada de la norma ASTM D6110-04, y para las pruebas a realizar va a ser de material plástico.

Todas las dimensiones de la probeta están especificadas en el anexo B (planos), de este libro y estas medidas están de acuerdo a la norma, los valores que permite la norma están en la tabla 2 del subcapítulo 6.8 de este libro, y a partir de ellos se diseñó la probeta con un largo de 127 mm, un ancho de 6.35 mm y un alto de 12.7 mm. En la figura 30 se observa la probeta simulada en solidworks.

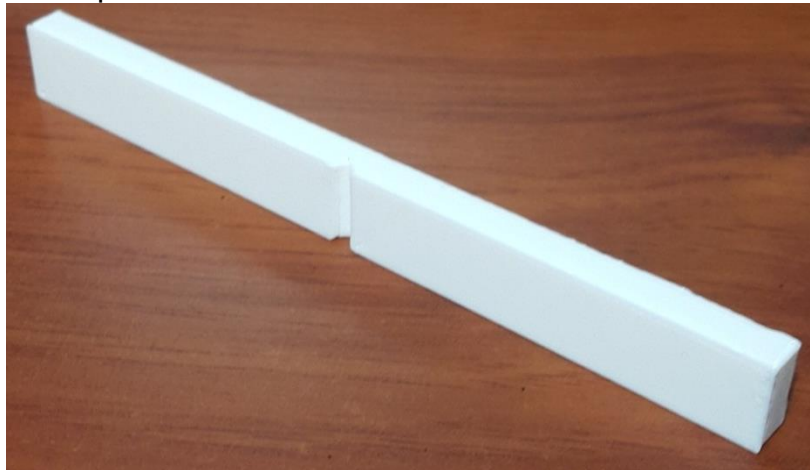
Figura 30. Probeta realizada en solidworks.



Fuente: El autor.

Los valores de alto y largo son los máximo que la norma permite, y se ajustan al soporte de la muestra. Para el ancho la norma recomienda un espesor de entre 3 a 12.7 mm, pero en un numeral posterior de la misma norma esta indica que, después de pruebas realizadas, los especímenes con un ancho menor a 6.35 mm absorben más energía debido al aplastamiento, flexión y torsión que las probetas más anchas, por lo que recomiendan, de ser posible, un ancho superior a 6.35mm, aunque dejan a decisión del investigador este valor, por lo tanto la elección de 6,35mm sigue esta recomendación, y también el coste de la pieza aumenta a mayor grosor, por lo cual se elige este valor. En la figura 31 se puede observar la probeta plástica, de material PLA (poliácido láctico), diseñada a partir de lo mencionado en este numeral.

Figura 31. Probeta plástica.



Fuente: El autor.

La norma establece que únicamente se puede probar la maquina utilizando materiales plásticos. Para probar otros materiales es necesario utilizar otras

normas, como la ASTM D6110-02, cuya diferencia es la cantidad máxima de energía que permite que entregue el banco de ensayos.

Además la norma estipula que las probetas a usar no deben absorber más del 85% de la energía que es capaz de suministrar el péndulo (una prueba no se reconocerá como válida si la probeta usada absorbe más del 85% de la energía total inicial). Para estimar la energía de ruptura de una probeta se puede de dos formas: Primero revisar experimentos similares realizados al material y verificar los resultados obtenidos. Si esta información no existe o las pruebas de laboratorio no se realizaron en condiciones similares, la segunda forma de confirmar la energía de ruptura es realizar una prueba con el material utilizando la máquina (si por experiencia, el realizador de la prueba reconoce que el material es muy resistente, no se debe realizar la prueba).

Materiales plásticos utilizados para pruebas Charpy incluyen resina fenólica, nilón, policarbonato, polipropileno, ABS (acrilonitrilo butadieno estireno), acrílico y PVC (policloruro de vinilo). Estos materiales son los más comunes para estas pruebas, pero plásticos como el PLA o cualquier otro que se verifique que absorbe menos del 85% de la energía máxima capaz de entregar el banco pueden ser utilizados.

Para las pruebas se utilizaron tres materiales: PLA y ABS, por su facilidad para moldearlos a través de impresoras 3d, y el acrílico por su abundancia en el mercado.

7.1.12 Rodamientos. Los rodamientos son esenciales para permitir el libre movimiento del eje del péndulo y del propio péndulo.

Los rodamiento para el eje disminuyen la fricción entre el eje y el soporte principal, y deja que el sistema pueda caer, esto nos ayuda a tener menos pérdida de energía por fricción.

Para la selección de este elemento se tiene en consideración el ancho del eje diseñado, el diámetro del espacio en el soporte principal el cual alojara el rodamiento, las revoluciones por minuto del sistema y la carga que soportara el rodamiento.

Para el diámetro exterior se escogió 26mm, que es el espacio que hay en el soporte principal, para el diámetro interior 9mm que es el diámetro del eje que va a ir por el rodamiento (se aseguró que fueran valores comerciales). Para el límite de velocidad del rodamiento se sabe por catálogo que este es de 30000 rpm, por la norma conocemos que la velocidad máxima será 3.46 m/s (esta sería la velocidad si se hubieran escogido el límite máximo de ángulo de inclinación y longitud del péndulo), sabiendo que la relación entre velocidad angular y lineal está representada por la ecuación (3):

$$V = w * r \quad (3)$$

Donde w es velocidad angular, V es velocidad lineal y r es el radio de curvatura, podemos obtener la velocidad angular máxima para la norma, que sería de 8.522 rad/s, que convertido a revoluciones por minuto son 81.38 rpm (el diseño final presenta un valor menor de rpm al seleccionar una longitud de péndulo menor, y este afecta la altura con la cual hallamos la velocidad lineal, pero consideramos este valor máximo como un límite de diseño), que es un valor muy inferior al límite del catálogo del rodamiento.

Respecto a la carga que puede soportar (1.96KN) la sumatoria de las masas de todos los elementos que soporta el rodamiento (eje, péndulo, acople, nariz de golpeo completa, cables y elementos electrónicos) es de aproximadamente 1 Kg, este valor por la gravedad (9.81 m/s^2) entrega la carga que soporta el rodamiento, que será de 9.81 N, al colocarle un factor de seguridad de 2 se encuentra que cada elemento debía soportar una carga estática de 19.62 N.

La tabla 7 muestra las características técnicas del rodamiento seleccionado, el SKF 629-2Z.

Tabla 7. Características del rodamiento SKF 629-2Z.

Diámetro interior	9mm
Diámetro exterior	26mm
Ancho	8mm
Peso	0.02 Kg
Velocidad limite	30000 rpm
Capacidad de carga	1.96 KN

Fuente: SKF.com

En la figura 32 se observa el rodamiento SKF 629-2Z.

Figura 32. Rodamiento SKF 629-2Z/C3.



Fuente: El autor.

7.1.13 Tornillos. Para la unión de las partes metálicas de la máquina de ensayo se utilizan tornillos. Este elemento es importante para el banco de pruebas porque deben soportar bien los esfuerzos a los que están sometidos las piezas de la máquina (en sus partes de unión), y que no se aflojen durante el funcionamiento de las pruebas de impacto.

Por ello se escogen tornillos de rosca cilíndrica que la literatura recomienda para uniones metálicas. En concreto los tornillos a utilizar en el ensamble de las piezas de la máquina de ensayo son: tornillo Bristol milimétrico g5-8.8 de 6x35 (dos unidades, para unión del soporte principal y la base), tornillo Bristol milimétrico g5-8.8 de 6x16 (16 unidades, para uniones del soporte de la muestra con la base), tornillo Bristol inox UNC 1/4x5/8 (cuatro unidades, para unir los casquillos con el soporte de la muestra), tornillo Bristol milimétrico g5-6.6 de 4x25 (dos unidades, para ensamblar el acople al eje), tornillo Bristol milimétrico g5-2.2 de 1x5 (dos unidades, para fijar el motor a su posición), tornillo Bristol milimétrico g5-4.4 de 2x6 (cuatro unidades para sostener el servomotor en su lugar) y tornillo Bristol inox UNC 5/32x3/4 (dos unidades para anclar la nariz de golpeo con los detalles de la nariz de golpeo). El material de los tornillos Bristol es acero 1020. La siguiente imagen corresponde a un tornillo Bristol milimétrico de 6x35.

Figura 33. Tornillo Bristol milimétrico de 6x35.

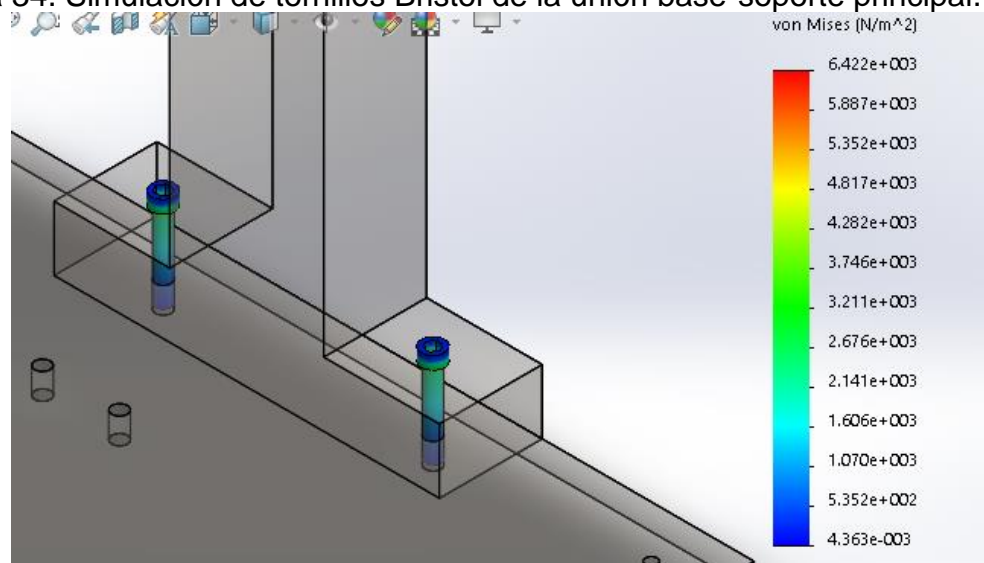


Fuente: El autor.

Los tornillos aseguran la unión entre las piezas en el banco de ensayos, por lo tanto también están expuestos a esfuerzos durante la prueba de impacto. Las siguientes figuras muestran las simulaciones realizadas a los tornillos que se encuentran en puntos críticos de la máquina (los que se ubican entre la base y el soporte principal, así como entre la base y el soporte de la muestra).

En la figura 34 se observa la simulación realizada a los dos tornillos que unen la base con el soporte principal.

Figura 34. Simulación de tornillos Bristol de la unión base-soporte principal.

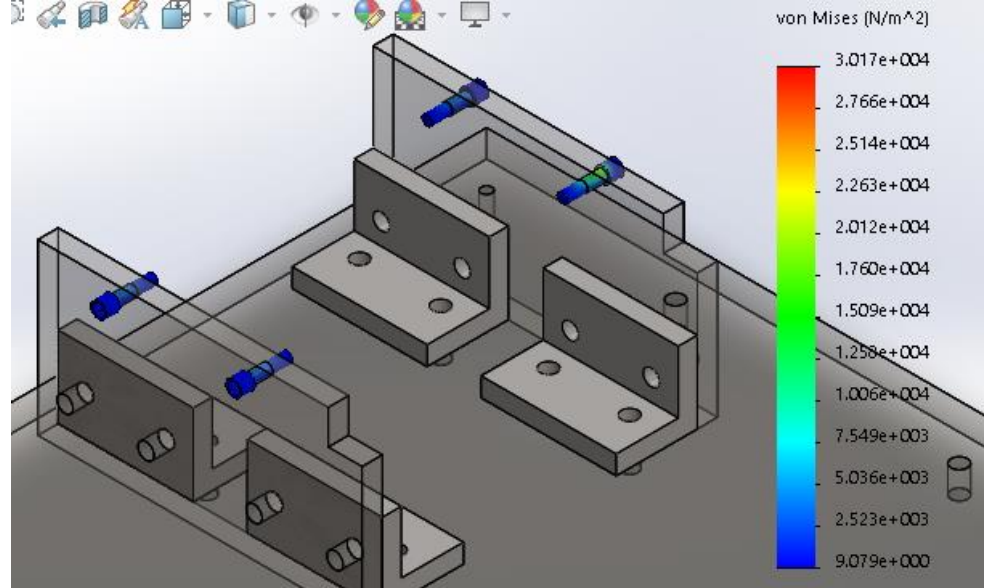


Fuente: El autor.

El esfuerzo máximo sobre los tornillos de esta unión es de 6.42 kPa, siendo los tornillos bristol de acero 1020 y con un esfuerzo de fluencia de 205 MPa, estos no se romperán o doblarán durante la ejecución de las pruebas de impacto.

En la figura 35 se aprecia la simulación realizada a los cuatro tornillos de la unión entre los soportes de la muestra y los casquillos de la muestra.

Figura 35. Simulación de tornillos Bristol de la unión casquillos-soportes muestra.

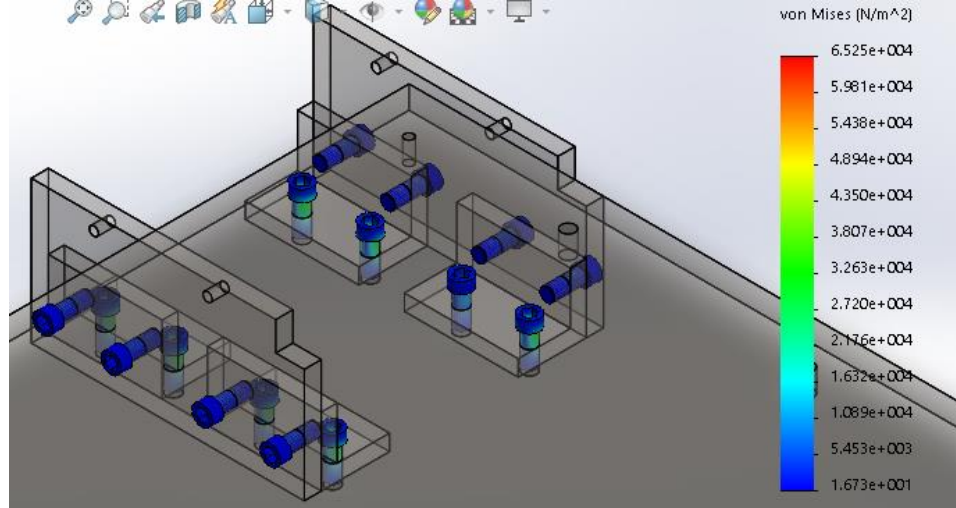


Fuente: El autor.

Los tornillos de la unión casquillos-soporte de la muestra muestran un pico (esfuerzo) en la simulación de 30.17 kPa, siendo este valor muy inferior al valor de fluencia (205 MPa) del acero 1020.

En la figura 36 se ve la simulación de los tornillos ubicados entre los soportes de la muestra y los soportes a la base.

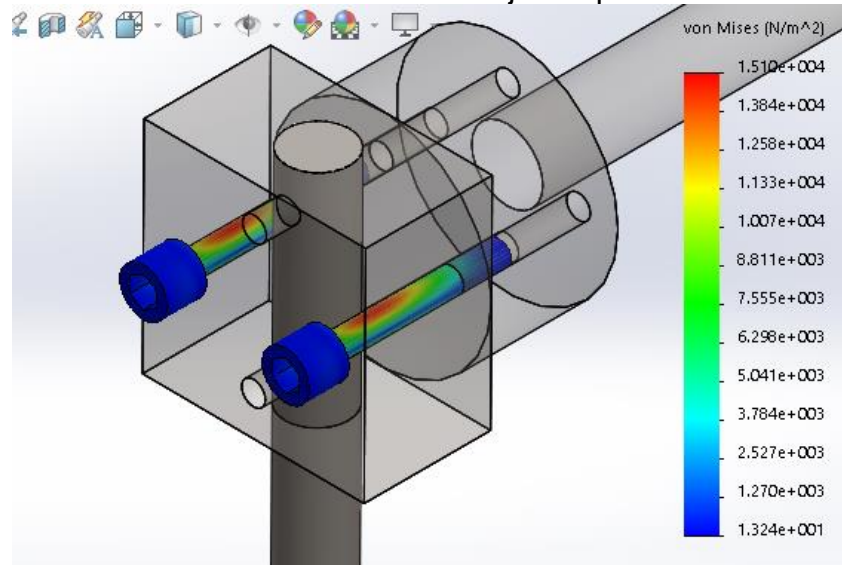
Figura 36. Simulación de tornillos de la unión soportes muestra-soportes a la base.



Fuente: El autor.

En la figura 37 se puede observar la simulación hecha a los dos tornillos que unen el eje con el acople del péndulo.

Figura 37. Simulación de tornillos de la unión eje-acople.



Fuente: El autor.

En las cuatros simulaciones se pueden observar que los esfuerzos máximos van entre 0.0064 MPa (en la figura 34) a 0.0652 MPa (en la figura 36). Para el acero 1020 su límite de fluencia se encuentra en 205 MPa, por lo cual los tornillos superaran las pruebas de impacto sin fallar durante la realización de las mismas.

7.2 DISEÑO ELECTRÓNICO

El desarrollo del sistema electrónico se llevó a cabo de forma simultánea con el diseño mecánico, para continuar así lo planteado en la metodología de diseño.

El diseño electrónico soluciona las consideraciones iniciales planteadas en el proyecto, principalmente respecto a los siguientes asuntos: toma de datos de forma automática, muestra de los datos, interacción con el usuario, inicialización de la prueba y subida del péndulo por un medio automático.

7.2.1 Selección componentes electrónicos. Teniendo como punto de inicio los requerimientos de la norma ASTM D6110-04, los objetivos y problemas planteados, y en algunos casos (motor) después de simulaciones de prueba, se determinó la siguiente lista (tabla 8) con los componentes electrónicos para el banco de ensayos:

Tabla 8. Componentes electrónicos.

Componentes electrónicos
Tarjeta de adquisición de datos (Arduino) (29)
Pantalla <i>touch</i> Arduino
Motor (12)
Sensor de ángulo
Fuente de voltaje
Alimentación Arduino
L298N (30)
Servomotor (15)
Cableado

Fuente: El autor.

Los números que aparecen entre paréntesis corresponden a la ubicación del elemento dentro de la vista explosionada de la figura 8 de la sección 7.1.1, las partes sin número no aparecen en la imagen mencionada.

7.2.2 Tarjeta de adquisición de datos. La tarjeta de adquisición de datos a seleccionar será el cerebro del sistema embebido a diseñar, esta debe ser capaz de trabajar con pantallas tipo TFT, además de los sensores y actuadores a utilizar. Dentro de las marcas de placas más comunes en el mercado (y la que se trabajó de forma más repetitiva durante la carrera) está la marca Arduino. La marca arduino presenta diferentes tipos de placas, siendo las más comunes (y disponibles en el mercado) el Arduino uno, el Leonardo y el Arduino mega (ya sea 2560 o ADK). Entre las tres opciones mencionadas, es el Arduino mega la que tiene una mayor cantidad de pines digitales (en total 54), los cuales se necesitan para poder interactuar con todos los elementos electrónicos del proyecto. La necesidad

de tener la cantidad de pines surge de la pantalla “*touch*” a utilizar. La selección de este componente se realizó en paralelo con la de la pantalla, para facilidad (para oprimir órdenes y visualizar datos) y comodidad del usuario del banco de ensayos se selecciona una pantalla para arduino de 3.97 pulgadas (una de las más grandes disponibles en el mercado) con una “*shield*” para tarjeta arduino ya incorporada.

La pantalla ocupa los pines de “*power*”, análogos del 0 al 5 y los pines digitales del 0 al 13, además físicamente dificulta el uso de los pines análogos del 6 al 15 y los digitales del 14 al 21. Si se usara una placa de arduino uno (la pantalla solo es compatible con las placa tipo mega y uno de la marca arduino) la pantalla ocuparía todos los pines. A parte de la pantalla esta la necesidad de usar pines de alimentación (5v para el servo, el sensor y la parte lógica del driver del motor), pines de tierra (para unir las tierras de los dispositivos), dos pines digitales para la activación y desactivación del motor (a través del driver), un pin digital adicional para la señal del servo y los pines SDA y SCL para la línea de datos y reloj del sensor (comunicación con el sensor). Para integrar todos los componentes electrónicos y pines necesarios de comunicación o activación necesarios se llegó a la selección de la placa arduino mega.

El Arduino Mega es probablemente el microcontrolador más capaz de la familia Arduino. Posee 54 pines digitales que funcionan como entrada/salida; 16 entradas análogas, un cristal oscilador de 16 MHz, una conexión USB, un botón de “*reset*” y una entrada para la alimentación de la placa. [25]

Figura 38. Arduino mega ADK.



Fuente: El autor.

En la tabla 9 están las características técnicas del Arduino mega ADK. Se selecciona este componente por su fácil programación, para trabajar la pantalla touch Arduino con ella, para adquirir los datos del ángulo final y dar solución a los problemas planteados en el proyecto. Al no presentar mayores diferencias con el Arduino mega 2560 se selecciona el Arduino mega ADK por su disponibilidad.

Tabla 9. Características Arduino mega.

Microcontrolador	ATmega2560
Voltaje operación	5V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12V
Voltaje de entrada (limite)	6-20V
Pines digitales I/O	54 (15 PWM output)

Continuación tabla 9. Características Arduino mega.	
Pines de entrada análogos	16
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	256 KB
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Speed	16 MHz
Largo	101.52 mm
Ancho	53.3 mm
Peso	36 g

Fuente: Arduino.cc

7.2.3 Pantalla touch Arduino. La pantalla touch para Arduino permite la interacción entre el banco de ensayos y sus usuarios. Las pantallas varían según su tamaño y su compatibilidad con diferentes placas de Arduino. En el numeral 7.2.2 de este libro se explica que la selección del tamaño de la pantalla se debe principalmente a la comodidad del usuario al trabajar con ella. Pantallas de mayor tamaño facilitan la visualización de los elementos que se quieren mostrar y la selección de acciones por parte de la persona que maneje este elemento. Para el banco de ensayos se utiliza la pantalla LCD TFT de 3.97 pulgadas para Arduino mega, esta presenta una shield para su acople a la placa Arduino. Otras pantallas en el mercado no tienen esta shield, que dificultaría el uso de la pantalla con la placa.

Figura 39. Pantalla LCD TFT de 3.97pulgadas para Arduino mega, acoplada a un Arduino mega.



Fuente: El autor.

La tabla 10 presenta las características de la pantalla TFT para Arduino. La selección de esta pantalla se debe a la posibilidad de trabajarla con la placa Arduino, además con ella se puede cumplir los objetivos planteados, y con ella podremos visualizar el valor de la energía absorbida en la prueba, podemos dar el arranque a la prueba y la posibilidad de llevar el péndulo a su posición inicial.

Tabla 10. Características pantalla LCD TFT de 3.97 pulgadas para Arduino mega.

Tamaño	3.97 pulgadas
Compatibilidad	TFTLCD pantalla táctil para arduino Uno O MEGA
Resolución	400x240
Controlador	ILI7793 0x7793 o ILI9326, 0x9326

Continuación tabla 10. Características pantalla LCD TFT de 3.97 pulgadas para Arduino mega.	
IC Especificación	IC Especificación ILI7793 o ILI9326 microcontrolador controlador ARM
Tamaño	9.7 cm x 6.4 cm
Voltaje	3.3V ~ 5V

Fuente: Vistronica.com

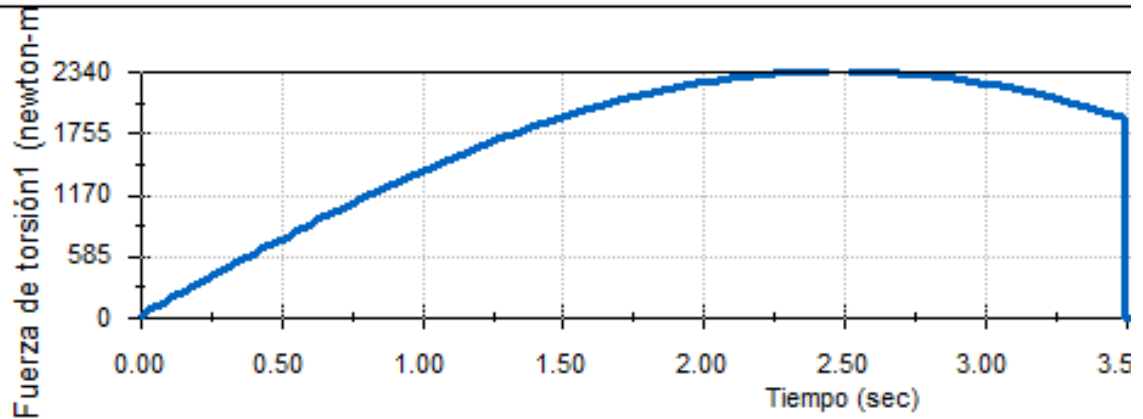
7.2.4 Motor. El motor a seleccionar debe garantizar el torque necesario para subir el péndulo y la nariz de golpeo a la posición inicial de la prueba de impacto.

Para garantizar esto se realizó una simulación por medio del software Solidworks, en la prueba se observa el torque necesario para levantar el péndulo desde cuando el péndulo está completamente detenido, en una posición perpendicular al eje, hasta la posición inicial del ensayo de impacto.

La prueba consiste básicamente en simular el uso de un motor, en este caso acoplado al sistema de levantamiento diseñado, observar que en conjunto la estructura se mueva y ver el torque que se requiere en cada instante de la simulación.

En la figura 40 se observa la gráfica obtenida de la simulación realizada por medio de las herramientas del software Solidworks.

Figura 40. Prueba de torque.



Fuente: El autor.

En la prueba realizada a través de Solidworks, se observa un valor de torque máximo necesario igual a 23.4 kg-cm (o 2340 newton*mm como se ve en la simulación). Este valor límite se produce cuando el péndulo se encuentra en posición horizontal (que corresponde a 0 grados de inclinación respecto al eje).

Este ensayo inicio con el péndulo en posición vertical (que corresponde a 90 grados de inclinación respecto del plano x del eje) y termino cuando llego a la posición de donde se suelta para dar inicio la prueba de impacto.

A partir de esta prueba y el valor máximo de torque se inicia la selección de un motor. El motoreductor con caja reductora 4632-12V-6RPM SKU 385033 puede generar un torque de 30 kg-cm con carga. La diferencia que hay entre el valor límite hallado en la simulación de 23.4 kg-cm y los 30 kg-cm nos da una ventana de seguridad de aproximadamente el 22%. Otros motores de características similares no se hayan disponibles en el mercado, también hay motoreductores que se acercan mucho al valor extremo (de entre 20 a 24 kg-cm), por lo cual se prefiere una ventana de seguridad mayor, además en precios estos no difieren mayormente.

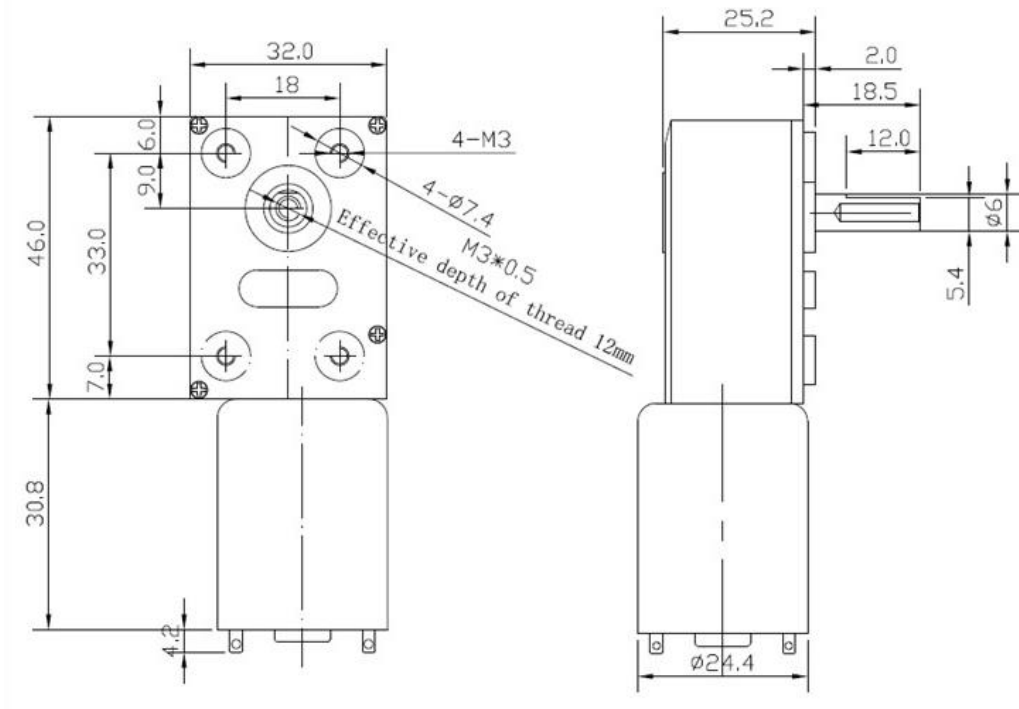
En la figura 41 se observa al motoreductor SKU 385033, mientras que, en la figura 42 se ve las dimensiones del motor, las cuales se tuvieron en cuenta en el diseño del soporte principal. Al seleccionar el motor se logra obtener las medidas para generar el espacio donde el motor está anclado al soporte principal.

Figura 41. Motoreductor SKU 385033.



Fuente: Vistronica.com. [26]

Figura 42. Dimensiones del motor.



Fuente: Vistronica.com.

En la tabla 11 se encuentran las características del motoreductor.

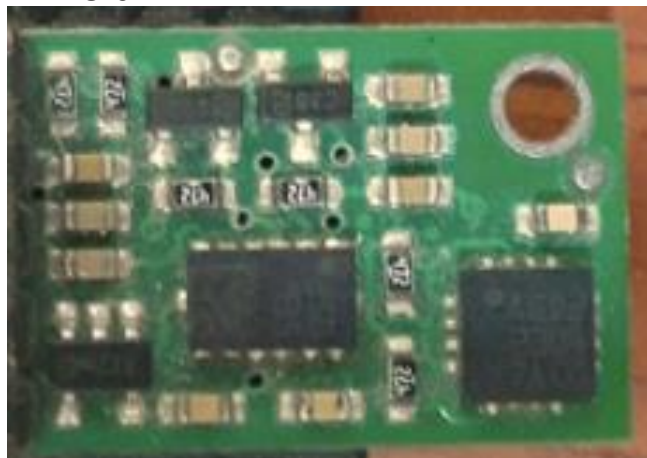
Tabla 11. Características del motoreductor.

Característica	Valor
Tensión de trabajo	12 v
Corriente sin carga	50 mA
Velocidad sin carga	6 RPM
Relación piñones	1:1019
Torque con carga	30 Kg-cm
Potencia	3 W
Torque con motor bloqueado	219 Kg-cm
Corriente con motor bloqueado	1.8 A

Fuente: Vistronica.com

7.2.5 Sensor de ángulo. Una parte esencial de la prueba por impacto tipo Charpy es obtener el valor de la altura final del péndulo y la nariz de impacto, con el objetivo de hallar la energía absorbida por la probeta durante el choque. Para esto se necesita el valor del ángulo final, respecto a la vertical, del péndulo, y para medir ese ángulo se utiliza el sensor Pololu MinIMU-9 v2 (tiene un L3GD20 3-axis giroscopio, un LSM303DLHC 3-axis acelerómetro y un 3-axis magnetómetro). El sensor Pololu MinIMU-9 v2 es una IMU (dispositivo que mide aceleración y velocidad), consta de un acelerómetro y un giroscopio (además de un magnetómetro), ambos de tres ejes, por lo tanto tiene 6 grados de libertad, pero su característica principal es su compatibilidad con la placa Arduino y su software, por lo que se reciben los datos de IMU en la placa de forma entendible y de forma deseable. La IMU no mide de forma directa el ángulo, por lo que requiere de algunos cálculos en la programación del Arduino para ello, después de programado mide el ángulo requerido, con una gran sensibilidad ya que detecta cambios muy pequeños en la variación del ángulo. El voltaje de alimentación del sensor es de 5v, utiliza el protocolo de comunicación I2C, y los puertos SCL y SDA son los puertos de comunicación con Arduino.

Figura 43. Pololu MinIMU-9 v2.



Fuente: El autor.

Su selección sobre otros sensores de ángulo se debe principalmente a su compatibilidad con Arduino, su facilidad para alimentarlo a 5v, su fácil programación en código de Arduino y su tamaño relativamente pequeño (sus dimensiones son: 20 x 13 x 3 mm, lo cual lo hace fácil de ubicar).

La comunicación del sensor con la placa se realiza a través del protocolo I2C. El sensor actúa como esclavo y la tarjeta como maestro. El sensor posee dos líneas de señal, una SCL para el reloj y una SDA para los datos (trabaja con lógica positiva). El sensor por defecto se encuentra en modo apagado y debe el maestro indicar el inicio del pedido de registros a través de la línea de reloj. La tarjeta arduino mega ADK cuenta con un puerto SDA y uno SCL, la conexión es directa entre estos puertos y los pines del sensor que se ocupan de esta tarea. A través de la línea SDA el sensor envía los datos registrados en tiempo real. Los datos son enviados en un formato de 16 bit (obtenido de la combinación de valores de dos registros de 8 bit para cada eje), donde los 4 bit menores son siempre 0. El sensor entrega valores convertidos a ángulo entre -90 y 90 grados.

7.2.6 Fuente de voltaje. La fuente conmutada 12v-5 A S-60-12 Wansen , es el elemento que le entrega la energía al motor, además de asegurar la corriente del motor, además su tamaño, relativamente pequeño, hace que no ocupe un gran espacio ni que sea necesario adaptar una parte específica del banco de ensayo para ubicación.

Figura 44. Fuente conmutada 12v – 5 A.



Fuente: El autor.

En la tabla 12 se observa las especificaciones de la fuente de energía.

Tabla 12. Especificaciones de la fuente conmutada 12v-5 A Wansen.

Potencia de salida	60w
Rango de Voltajes y Frecuencias de Entrada	85~264VAC/47~63Hz
Voltaje de salida	12 VDC
Corriente de salida Máxima	5 A
Temperatura y humedad de Trabajo	-10°C ~ +50 °C, 20% ~ 95%RH (Sin Condensación)
Protección contra sobrecarga	105% ~ 200% (Carga Nominal)
Protección contra sobretensiones	115% ~ 135% (tensión de salida nominal)
Dimensiones	8.6x5.8x3.3 cm
Peso	145 Gramos

Fuente: Vistronica.com

7.2.7 Alimentación Arduino. Para la alimentación de la placa Arduino se usa un cable USB para Arduino conectado en su extremo USB a un adaptador de voltaje AC/DC. Este adaptador de entrada recibe de 100-240 Vac a una frecuencia de 50-60 Hz y 0.5 A y entrega a la salida 5V dc y hasta 2 A. La salida del adaptador va a través del cable USB para alimentar el Arduino.

Figura 45. Cable de alimentación y adaptador de voltaje.

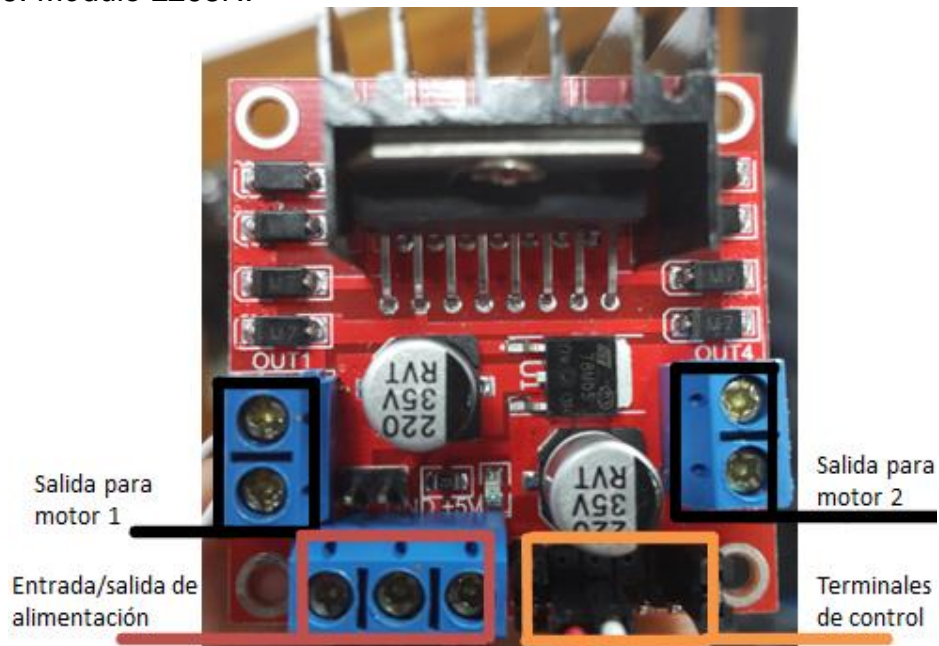


Fuente: El autor.

Se selecciona este elemento para que el banco pueda alimentarse de una toma eléctrica común, o inclusive de un ordenador que se requiera para trabajos futuros. Otra razón es que al usar un cable USB se garantiza un voltaje de alrededor de 5v. Al usar adaptadores con cables incorporados, para la entrada Jack del Arduino, estos sobrecalentaban al Arduino a los pocos segundos, esto porque entregan un voltaje superior a 12v (12.3 v en mediciones realizadas) y al entregar un voltaje superior a 12v el regulador de tensión de la placa Arduino comienza a calentarse.

7.2.8 L298N. El módulo driver L298N es un módulo para el control de motores DC con el driver L298N, puede manejar dos motores DC o un motor paso a paso, con un consumo máximo de corriente de 2A por canal (o máximo 4 A con fuente externa de voltaje) y hasta 46V de voltaje de alimentación.

Figura 46. Módulo L298N.



Fuente: El autor.

En la figura 46 se observan las salidas para los motores 1 y 2, que se utilizan para alimentar el motor que esté conectado a alguna de ella. Las terminales de control habilitan el paso de voltaje y corriente para las salidas de los motores, se activan por medio de un jumper (uno para cada salida), cuando el jumper está activo habilita dos terminales de control para una salida (para habilitar los terminales de la otra salida se debe activar el otro jumper). Para que el motor funcione se debe activar uno de los dos terminales de control asociados a esa salida cuando el

jumper este activo (los dos terminales no pueden estar activos a la vez, puesto que estos controlan el sentido de giro del motor, uno debe estar en alto y el otro en bajo para que funcione el motor).

También se observa en la figura 46 la entrada/salida de alimentación, los dos primeros terminales (de izquierda a derecha en la imagen) son para una fuente externa dc (la que alimenta a los motores), la de la izquierda para el voltaje de hasta 46v y la central para la tierra, el terminal de la derecha será una salida de 5v (cuando el jumper de esta terminal está activo) o será una entrada que puede recibir 5v si el jumper esta desactivado. Esta última terminal alimenta la parte lógica del L298N cuando el jumper esta desactivado por lo que se le debe conectar una fuente de 5v (puede ser del Arduino que en las placas tiene salidas de 5v). Cuando este jumper esta desactivado la entrada de voltaje para los motores puede ir desde 12v hasta los 46v, así es como trabaja este elemento en el banco de ensayos.

Este elemento se selecciona como prevención ante un pico de corriente del motor, cuyo pico es de 1.8 A con rotor bloqueado, este módulo permite trabajar hasta 2 A, la corriente va por el modulo y no por la placa Arduino que no funciona con valores altos de corriente.

7.2.9 Servomotor. El servomotor Hitec HS-311 se encarga de retener y soltar el eje del péndulo (por medio de la estructura de retención). A través del código y programación del Arduino y de la ubicación del péndulo, el servomotor se encarga de soltar el péndulo y con esto iniciar la prueba, y de retenerlo cuando este vuelva a la posición inicial. La selección de este elemento se debe a su facilidad de trabajar con la placa Arduino, además de su alimentación se puede realizar por medio de las misma placa, además puede trabajar con los pines digitales y con pines PWM.

Figura 47. Servomotor HS-311.



Fuente: El autor.

La tabla 13 muestra las características principales del servomotor Hitec HS-311.

Tabla 13. Características técnicas del servomotor Hitec HS-311.

Dimensiones	39.88 x 19.81 x 36.32mm
Peso	43 g
Rango de voltaje	4.8v – 6.0v
Torque	3.0 kg/cm (a 4.8v), 3.7 kg/cm (a 6v)
Velocidad sin carga	0.19sec/60° (4.8v), 0.15sec/60° (6v)
Rango de señal de PWM máximo	575-2460µsec

Fuente: Servocity.com

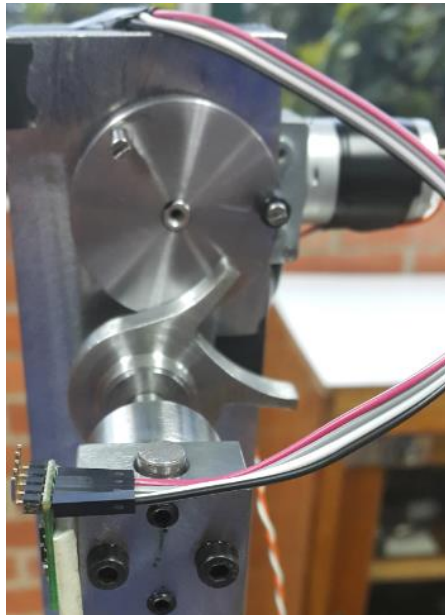
7.2.10 Cableado. El cableado que utiliza el banco de ensayos esencialmente uno los diferentes elementos o componentes electrónicos ya mencionados en este libro, sin interferir con la prueba de impacto ni con la posición de ciertos elementos como la IMU que no se debe alterar para realizar una correcta medición.

Para los componentes de menor potencia como el arduino, el sensor IMU, el servomotor y la parte lógica del L298N se utilizan cables de arduino hembra-macho y/o macho-macho, los cuales se adecuan mejor para estos sistemas.

Para el motor y la conexión con el L298N se usa cable AWG 20, que puede soportar hasta 20 A de corriente pico, y una corriente nominal de 1.8 A, esta cantidad de corriente es la máxima que pide el motor, pero bloqueado, al no suceder eso la corriente que necesita el motor no llega a ese valor límite.

En la figura 48 se observa parte del cableado que va de la IMU al arduino.

Figura 48. Cables hembra-macho de arduino.



Fuente: El autor.

8. PRESUPUESTO

En las siguientes tablas, tabla 14 y tabla 15, está el presupuesto de la parte mecánica y electrónica respectivamente, y en la tabla 16 se muestra el total del presupuesto del proyecto, más una cantidad adicional llamada “imprevistos y envíos”, esta última categoría es un presupuesto que se coloca ante el surgimiento de cualquier contratiempo que se tenga durante la fase de construcción y/o prueba de la máquina de ensayos, además de también usarlo para los costos de envío de cada elemento.

8.1 PARTE MECÁNICA

Tabla 14. Presupuesto parte mecánico.

Soporte principal	\$3.280.000
Soporte de la muestra	
Eje del péndulo	
Péndulo	
Acople del péndulo	
Nariz de golpe	
Piezas retención	
Base de la máquina	
Mecanismo de levantamiento	
Tornillos (x36)	
Rodamientos (x2)	\$27.370
Probeta (x10)	\$85.000
Total	\$3.392.400

Fuente: El autor.

8.2 PARTE ELECTRÓNICA

Tabla 15. Presupuesto parte electrónica.

Arduino	\$50.000
Pantalla touch Arduino	\$54.740
Motor	\$56.763
Sensor de ángulo	\$16.000
Fuente de voltaje	\$33.320
Alimentación Arduino	\$9.401
L298N	\$15.000
Servomotor	\$39.500
Cableado	\$35.000
Total	\$309.750

Fuente: El autor.

8.3 PRESUPUESTO GENERAL

Tabla 16. Presupuesto general.

Parte mecánica	\$3.442.400
Parte electrónica	\$309.750
Imprevistos y envíos	\$245.400
Total	\$3.947.550

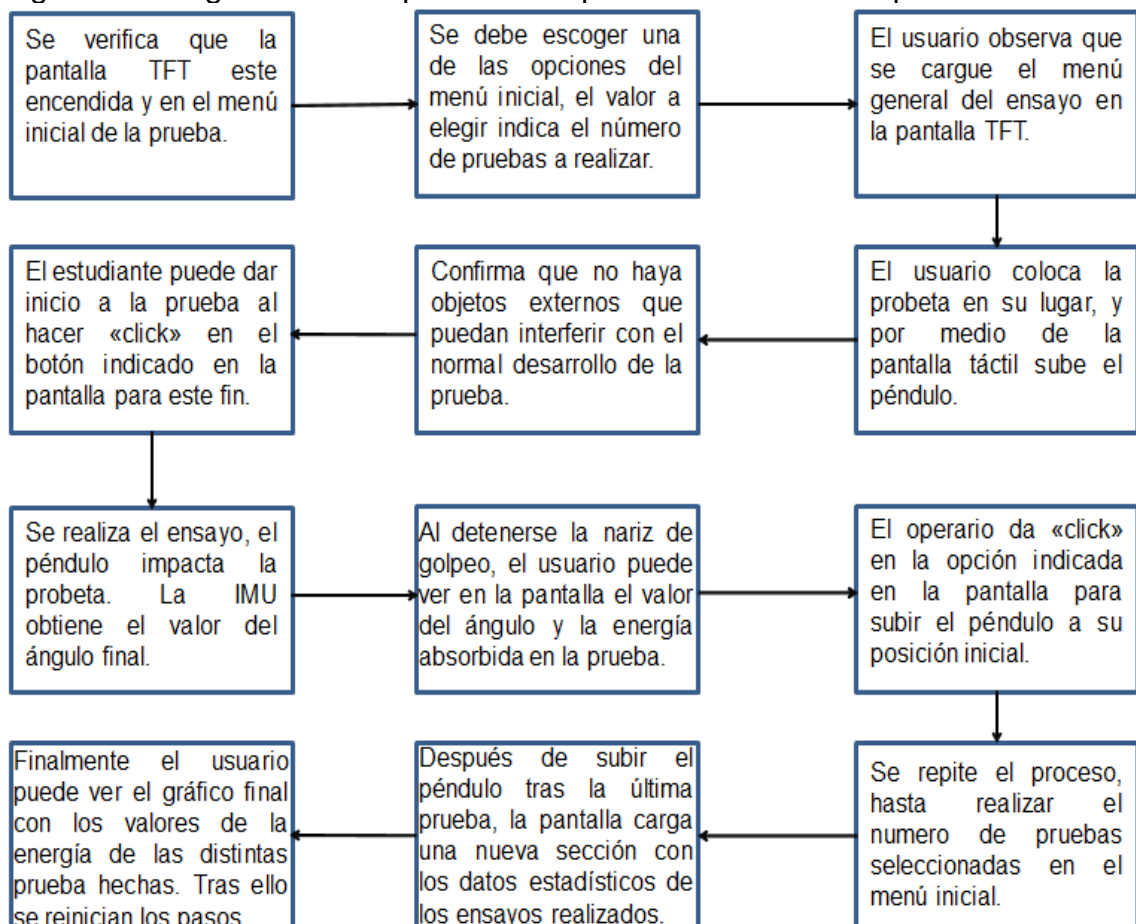
Fuente: El autor.

9. DESARROLLO DEL SOFTWARE Y CÓDIGO DE ARDUINO

Para el funcionamiento del banco de ensayos se desarrolló un software en código de Arduino, el cual es esencial para la realización de la prueba y la obtención de resultados.

En el siguiente diagrama de bloques se observa un diagrama de flujo resumido del comportamiento de la máquina de ensayos.

Figura 49. Diagrama de bloques del comportamiento de la máquina.



Fuente: El autor.

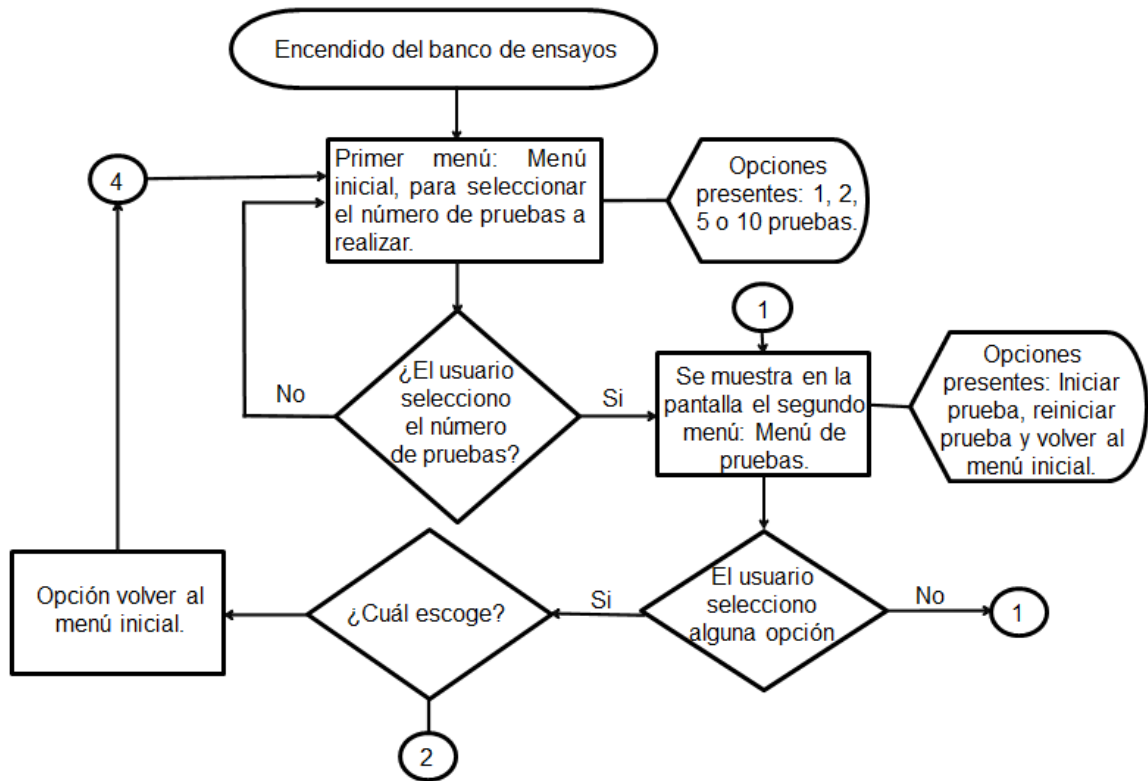
En resumen el código contiene diferentes librerías y partes específicas de código para los elementos electrónicos más importantes, tales como la pantalla TFT, el sensor IMU, el servomotor, el L298N y el motor.

Las librerías y código en específico de cada sección del sketch general serán explicados en los siguientes numerales (9.1, 9.2, 9.3 y 9.4) de este libro y el total del código se encuentra en el Anexo A de este libro.

Pero en síntesis el código permite visualizar, a través de la pantalla TFT, un menú inicial con cuatro opciones que corresponden al número de pruebas que puede realizar un usuario en un laboratorio, luego de seleccionar alguna opción la pantalla cargara otra parte en donde se podrá dar inicio a la prueba, subir el péndulo, se podrán observar los valores de ángulo final y de la energía absorbida durante el impacto de la prueba inmediatamente anterior. Al completar el número de pruebas seleccionado en el menú la pantalla cargara una nueva parte donde estarán los valores de energía absorbida de todas las pruebas realizadas, así como la media de las pruebas y la desviación estándar de ellas, y finalmente el usuario puede indicar una opción que le permite a la pantalla ir a la sección final donde estará una gráfica en la cual la energía versus el número de pruebas y la ecuación de la recta que se genera al unir los resultados de cada prueba, luego de ello se podrá volver al menú inicial.

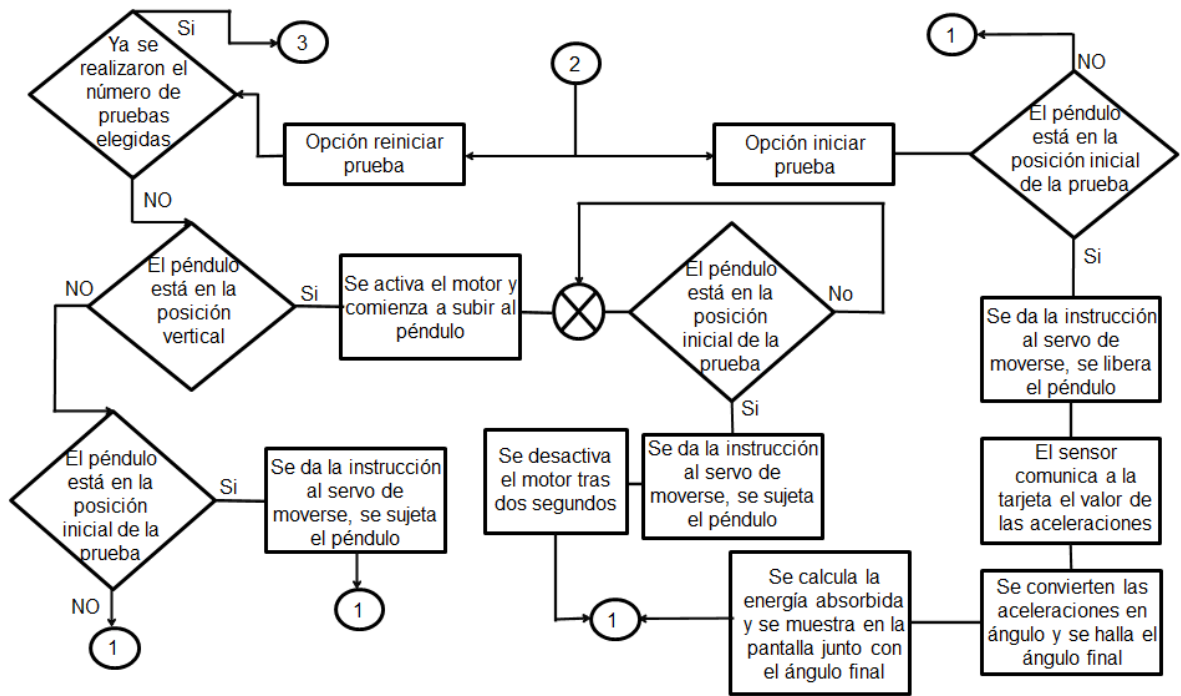
En las figuras 50, 51 y 52 se puede observar el diagrama de flujo del programa en arduino. Este representa el camino o lógica que seguirá el código diseñado para el funcionamiento del banco de ensayos.

Figura 50. Diagrama de flujo del programa en arduino, primera parte.



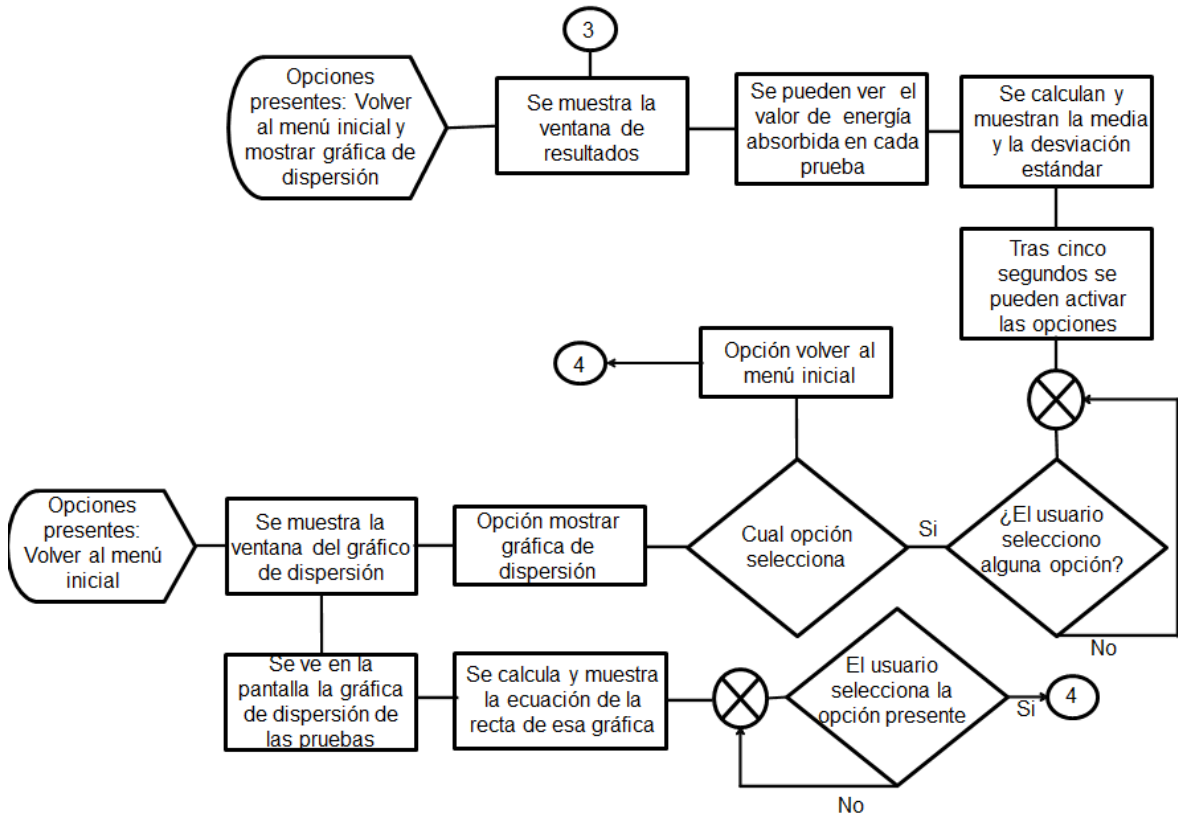
Fuente: El autor.

Figura 51. Diagrama de flujo del programa en arduino, segunda parte.



Fuente: El autor.

Figura 52. Diagrama de flujo del programa en arduino, tercera parte.



Fuente: El autor.

Los subcapítulos 9.1, 9.2, 9.3 y 9.4 de este libro explican las secciones del código completo que se destinaron a la pantalla, IMU, servo y motor respectivamente (estos no son cuatro códigos distintos, es un solo código completo).

9.1 CÓDIGO PANTALLA

El código empleado para la pantalla LCD TFT de 3.97 pulgadas permite su uso como pantalla táctil, a la vez que permite visualizar opciones, datos y graficas referentes a la prueba de impacto.

Se incluyen las librerías `Adafruit_GFX.h`, `Mcufriend_kbv.h` y `TouchScreen.h` para las funciones gráficas y “*touch*” de la pantalla, además para definir los pines de Arduino que están conectados con la “*shield*” de la pantalla.

En síntesis esta sección del sketch es el encargado de mostrar las imágenes, figuras, números y letras que aparecen durante el ensayo de impacto, a la vez reconoce cuando un usuario toca la pantalla para mandar a ejecutar una orden.

Para su configuración se definen primero lo pines de la “*shield*” de la pantalla que están conectados al Arduino, y cuya función es el empleo de las funciones “*touchscreen*” disponibles.

En un primer momento se realiza una calibración de la pantalla con los ejemplos disponibles de las librerías mencionadas, esta consistía básicamente en asegurar que el punto de contacto realizado (donde se toca la pantalla) fuera el mismo que percibía las funciones “*touchscreen*” de la LCD TFT.

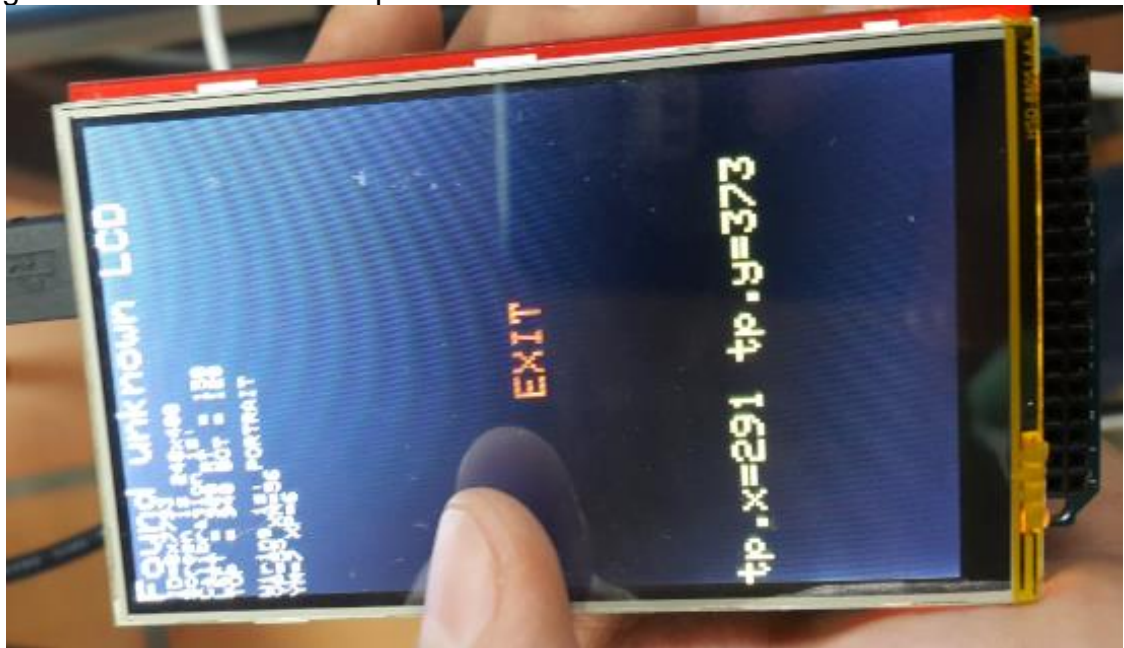
Para el código final ya no es requerida esta parte de la calibración dentro del mismo por lo cual se eliminó, posterior al paso inicial ya se inicia como tal con la configuración del sketch. Para insertar y mostrar texto a través de la pantalla se utilizan las funciones “`setCursor (x, y)`”, “`setTextSize ()`”, “`setTextColor ()`” y “`print ()`”, la primera de ellas ubica el punto (x, y) y en ese lugar se escribirán las palabras, el segundo define el tamaño de las letras, el tercero determina el color del mismo y la última función es la encargada de imprimir los que se programe. Todas estas funciones están en la librería “`Mcufriend_kbv.h`”.

Con la librería `TouchScreen.h` y los atributos `"TSPoint"`, `"getPoint ()"` y `"TouchScreen"` de esta se hallan los valores del plano x, y del LCD donde una persona hace contacto con ella, para evitar confusiones del código se coloca un valor mínimo y máximo de roce con el fin de evitar la activación de alguna tarea que no se requiera en ese momento.

Otras aplicaciones de utilidad dentro de las librerías son las siguientes: `"fillScreen ()"`, `"drawRect ()"`, `"fillRect ()"`, `"setRotation ()"`, `"width ()"`, `"height ()"`, `"drawLine ()"` y `"fillCircle ()"`. Todas estas se repinten con frecuencia en el programa, y se usan principalmente para crear o rellenar círculos, rectángulos o espacios, así como para definir el ancho, largo y el sentido de la pantalla.

En la figura 53 se observa el paso inicial de calibración de la pantalla táctil, se ve el valor del punto (x-y) en donde el usuario hace contacto con la pantalla.

Figura 53. Calibración de la pantalla táctil.



Fuente: El autor.

9.2 CÓDIGO SENSOR IMU

Para el funcionamiento del sensor Pololu MinIMU-9 v2, con el cual se hallará el ángulo final de la prueba, se utilizan las librerías Wire.h y LSM303.h, cuya función principal es la comunicación entre la IMU y el Arduino.

Para el inicio de la comunicación se inicializa la librería *Wire* en el *setup* con el comando “*begin*” y la creación de una variable tipo LSM303.

En la parte principal del código la variable tipo LSM303 inicia la lectura de datos con la función “*read* ()”, y a través de esa lectura se pueden conocer los valores de la aceleración de los tres ejes x, y, z, aunque para la prueba de impacto solo se usa el valor de x, puesto que este dato entrega el valor que el ensayo requiere.

Luego la literatura indica que se halla el valor de una magnitud “R” (se le puede dar cualquier nombre, la literatura utiliza este), este número se encuentra al sacar la raíz cuadrada de la suma del cuadrado de las tres aceleraciones (x, y, z), y posteriormente para hallar el ángulo se debe calcular el coseno inverso de la aceleración (de la cual se requiera el ángulo, en este caso la aceleración en x) dividida por el valor de la magnitud R recientemente calculada.

Finalmente se usa la ecuación (4):

$$Anglex = (Anglex * 57.29577951) - 90 \quad (4)$$

Esto para entregar el valor del ángulo en grados, y no en radianes como se halló hasta el paso anterior, y se le resta noventa (90) para que entregue el número en ese plano (en x) requerido.

Para la interacción con los demás códigos, el sensor toma datos cuando sea requerido, eso es principalmente en dos momentos claves, primero en la prueba de impacto y la segunda en la subida del péndulo a su lugar inicial. Para ello una

serie de condiciones (condiciones “*if*” del código en arduino lograra desde obtener el valor del ángulo final hasta señalar que el péndulo está en la posición requerida.

9.3 CÓDIGO SERVOMOTOR

Para el uso del servomotor Hitec-311 HS se debe incluir la librería Servo.h en el sketch. Esta librería permite de forma sencilla crear un objeto tipo servo (objeto que usa librería para identificar y controlar un servomotor y enviar fácilmente PWM) al cual con el comando “*write ()*” se le indica la posición a la cual debe llegar el servomotor. Como primer paso se creó el objeto servo en la parte de variables del código. Posteriormente en el “*setup*” del programa se indica el pin al cual ira la señal de PWM al servo a través de la función “*attach ()*”.

Para el banco de ensayos ese pin es el 45, el arduino mega ADK tiene quince pines de PWM, pero la pantalla ocupa de los pines 2 al 13, siendo los pines 44 al 46 de PWM se escogió el 45 para llevar la señal al servomotor.

Para enviar el accesorio del servo al ángulo deseado se utiliza el ya mencionado comando “*write ()*” con el valor deseado dentro del paréntesis

9.4 CÓDIGO L298N Y MOTOR

El elemento L298N no necesita como tal programación, su parte lógica está alimentada siempre a través del arduino, y esta perpetuamente trabajando desde el inicio del ensayo de impacto. El caso del motor es similar, solo que está continuamente apagado, puesto que hasta que el arduino lo indique (para esto el péndulo debe estar detenido en posición vertical) no activa el pin necesario para

permitir el paso del corriente en el L298N, por lo tanto está apagado hasta que llegue ese instante. Cuando su condición de activación se cumpla (esto es cuando la prueba haya finalizado, el péndulo este quieto, el usuario oprima la pantalla en el lugar indicado y el programa verifique que se cumpla lo mencionado) simplemente se activara el pin con el comando “*digitalWrite ()*” de arduino.

El sketch general del banco de ensayos está ubicado en el Anexo A de este libro.

10. ENSAMBLAJE Y PRUEBAS

El ensamblaje del banco de ensayos se realizó según las ubicaciones que se observa en la norma (que también se ve en la parte del diseño), pero sin seguir ningún orden en especial. El resultado final del ensamble es la máquina de impacto, a la cual se le realizaron pruebas para comprobar el funcionamiento de los elementos que la componen y la prueba general de impacto tipo Charpy.

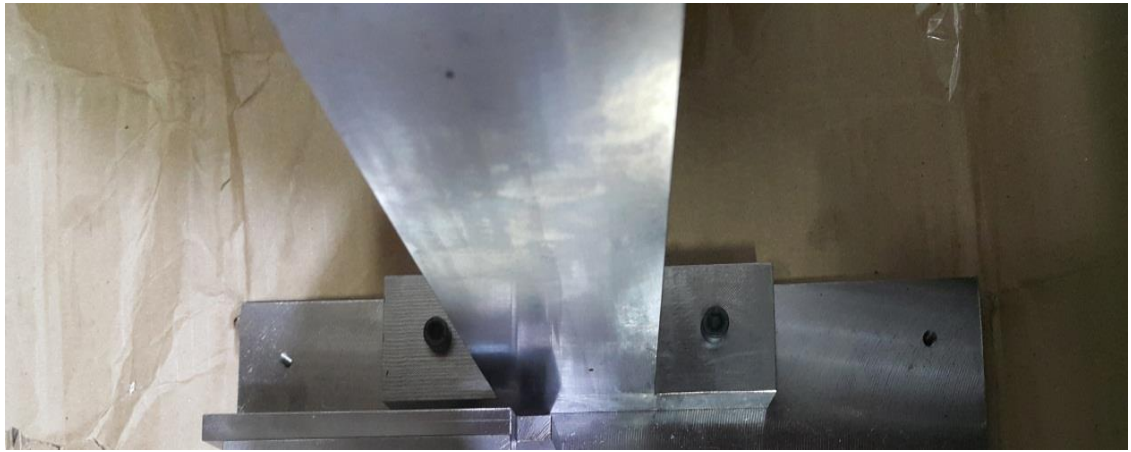
10.1 ENSAMBLAJE GENERAL

Para el ensamblaje primero se colocan las piezas mecánicas, aunque con algunas piezas electrónicas como el motor, el cual esta acoplado al sistema de levantamiento. Luego se ubican los demás componentes eléctricos, con la precaución de que las partes estén correctamente alineadas (en especial el péndulo el cual debe impactar por todo el medio a la probeta), para evitar posibles daños antes o durante las pruebas (por ejemplo que el cableado interfiera con la prueba o dañe la toma de datos).

10.1.1 Ensamblaje parte central. Se considera parte central de la máquina de ensayos a las piezas que dan soporte a la prueba, como lo son la base, el soporte principal y el soporte de la muestra (con sus distintos componentes). La base y el soporte principal son las partes más pesadas del banco, porque deben soportar la fuerza del impacto de la nariz a la probeta sin moverse del lugar donde están.

Para juntar estos dos elementos se utilizaron tornillos Bristol M6x35, un par, los cuales se ubicaron en los huecos diseñados con este fin, como se aprecia en la siguiente imagen que corresponde a la figura 54.

Figura 54. Unión de la base con el soporte principal.

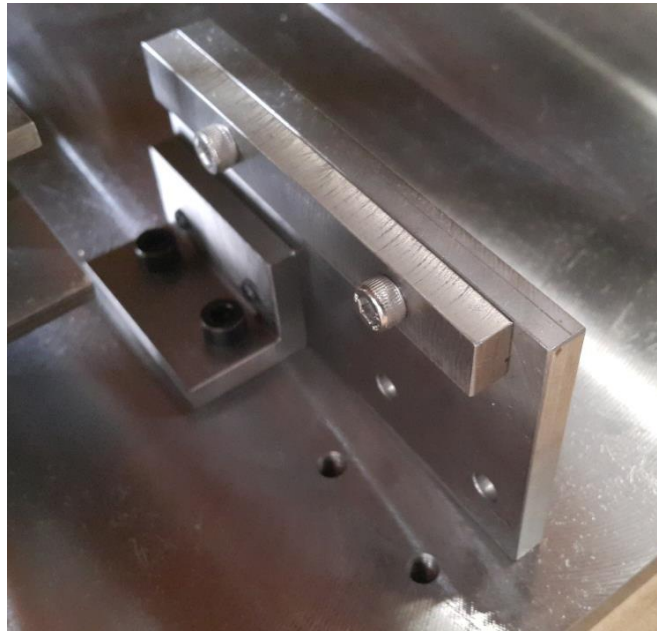


Fuente: El autor.

En la imagen anterior se observan las cabezas de los tornillos que unen la base con el soporte principal.

Tras ensamblar estas dos partes se unen a la base las piezas correspondientes al soporte de la muestra, estas incluyen los casquillos, los soportes a la base y los soportes de la probeta. Estos también se unen por medio de los tornillos Bristol milimétricos a la base de la máquina, aunque para unir los casquillos con los soportes se usaron los tornillos Bristol inoxidable, lo mencionado se observa en la siguiente figura 55.

Figura 55. Unión de las piezas de soporte de la muestra con la base.



Fuente: El autor.

En la figura anterior se observa la unión del casquillo con el soporte de la muestra, con los tornillos color gris (Bristol inox), además de la unión de la base, con la base de la muestra y el soporte de la muestra con cuatro tornillos color negro (Bristol M6x16). También se observa el espacio vacío en el cual debe ir ubicado el soporte a la base con los cuatro huecos diseñados para este fin.

Con estas piezas ensambladas se continúa con las partes involucradas en la prueba de impacto de forma directa, como lo son el eje y el péndulo, además de los mecanismos de levantamiento y retención.

10.1.2 Ensamblaje eje-péndulo. La unión entre el eje y el péndulo se da por medio de la pieza de acople al péndulo. Esta parte se une al eje con dos tornillos, y al péndulo por el hueco diseñado para tal fin y es asegurado a través de dos

prisioneros, además el acople posee dos tonillos adicionales donde estará fijado el sensor IMU (esto se observa más adelante en el numeral 10.1.4 de este libro), todo esto se puede apreciar en la siguiente imagen que corresponde a la figura 56.

Figura 56. Unión eje-acople-péndulo.



Fuente: El autor.

Para encajar el eje al soporte principal se utilizaron dos rodamientos SKF, los cuales encajaron en la estructura del soporte principal y se encuentran firmemente unidos a él. Unos prisioneros se aseguran que el eje no se deslice de forma horizontal a través de los rodamientos, todo esto se ve en la imagen de la figura 57.

Figura 57. Unión del soporte principal, rodamiento y el eje.



Fuente: El autor.

La posición final de las piezas de retención y levantamiento que se aprecian en la figura 54 se explica a detalle en el siguiente numeral de este subcapítulo.

Para la unión del eje, los detalles de la nariz de golpeo y la nariz de impacto se realiza en dos etapas, primero la nariz y los detalles están unidos por medio de dos tornillos (un tornillo por detalle), los cuales aseguran estas tres piezas fuertemente, luego la segunda etapa el péndulo atraviesa las piezas para terminar en el segundo detalle, así se logra unir las partes que ejecutan la acción de impacto a la probeta, esto se aprecia en la siguiente figura.

Figura 58. Ensamblaje eje y nariz de golpeo.



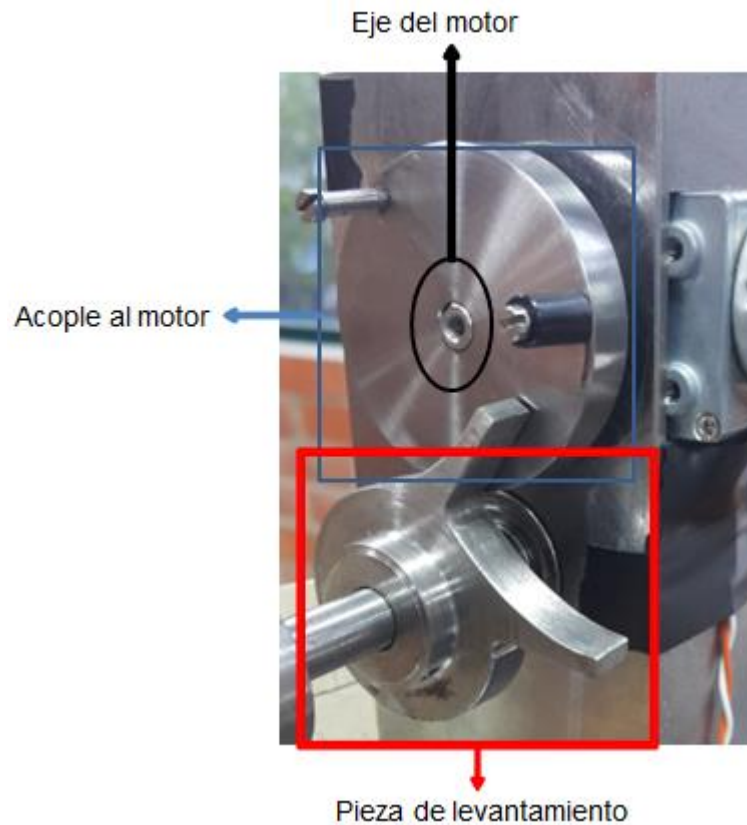
Fuente: El autor.

Esta parte del ensamblaje no sigue estrictamente un orden preestablecido, por lo cual las uniones descritas en este numeral se pueden realizar en cualquier orden, esto para trabajos futuros similares al explicado en este libro.

10.1.3 Ensamblaje de piezas de retención y levantamiento. El ensamblaje de estos dos mecanismos se realizó de forma tal que el mecanismo de levantamiento pueda subir el péndulo a su posición de inicio de la prueba, y que el sistema de retención logre sostenerlo en ese lugar.

Para ello se inició con el ensamblaje del sistema de levantamiento, el cual está compuesto principalmente de tres piezas: El motor, el acople del motor y la pieza de levantamiento. Estas tres partes se pueden apreciar en la figura 59.

Figura 59. Ensamble del mecanismo de levantamiento.

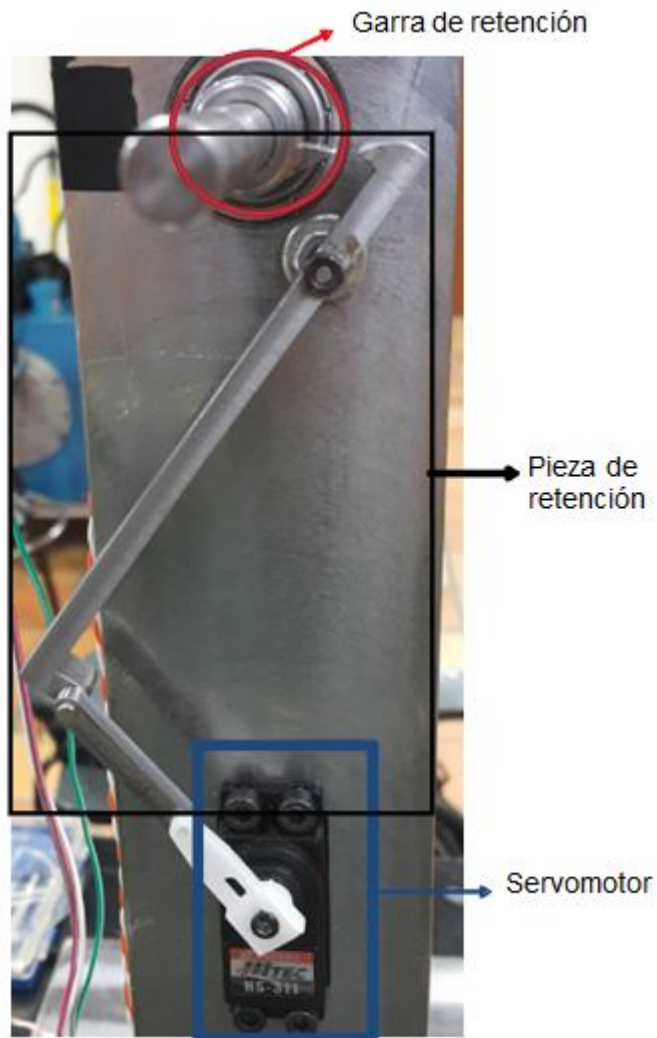


Fuente: El autor.

Para asegurar la pieza de levantamiento al eje de la máquina se utilizan un par de prisioneros, para anclar el acople del motor al eje de este se usa otros dos tornillos Bristol. La ubicación entre sí de la pieza de levantamiento y el acople del motor logra que el motor pueda subir el péndulo hasta la posición inicial de la prueba de impacto.

El sistema de retención del péndulo consta de tres partes: El servomotor, la pieza de retención y la rueda dentada (garra de retención en la siguiente imagen). Estas piezas se pueden observar en la figura 60.

Figura 60. Ensamblaje de las piezas de retención.



Fuente: El autor.

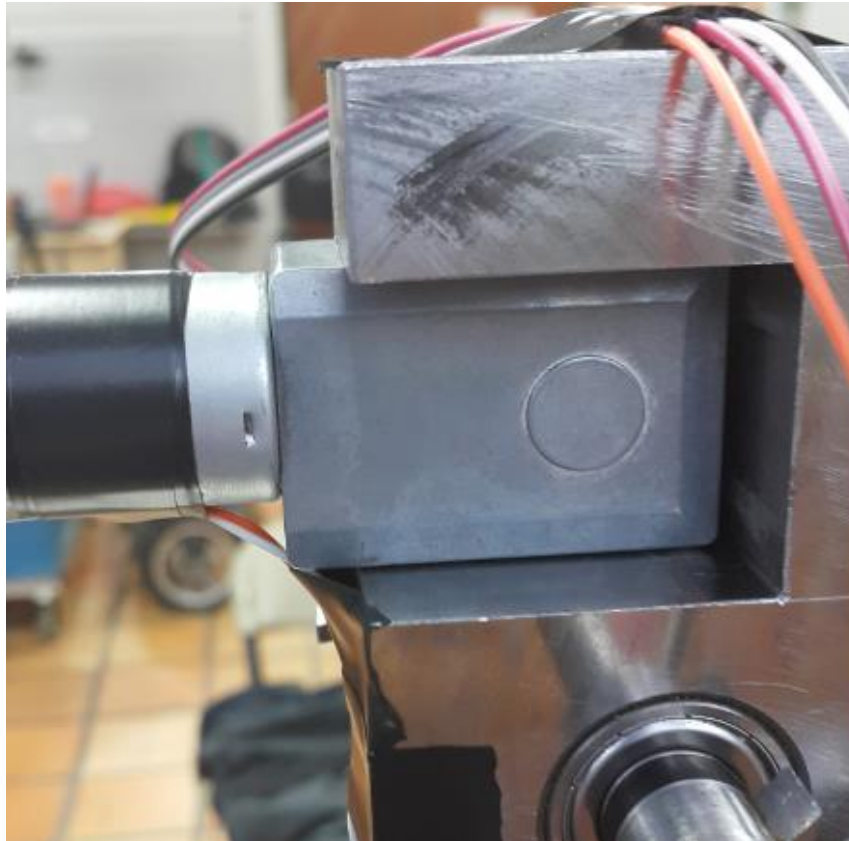
El servomotor mueve la pieza de retención a través del conector de la parte inferior, ya sea para liberar o asegurar la rueda dentada. Un tornillo une esas dos piezas. Otro tornillo con dos tuercas y un par de arandelas fija la pieza de retención horizontalmente. La rueda dentada se sujeta al eje principal de la máquina de ensayos por medio de dos prisioneros, de 4 mm cada uno.

10.1.4 Ubicación componentes electrónicos. Los elementos electrónicos se dividen en dos grupos para la ubicación. El primer grupo son los componentes que van fijos en la estructura de la máquina de ensayos (al soporte principal o al acople del péndulo). El segundo grupo se encuentra en la parte inferior, a un lado de la base de la máquina de ensayos.

En el primer grupo se encuentran el motor, el servomotor y el sensor IMU. Dentro del segundo se aprecian el arduino, la pantalla táctil, el L298N y la fuente de voltaje.

El motor va fijo, por dos tornillos Bristol, al soporte principal, al cual se le adecuó un espacio para este fin. Esto se observa en la figura 61.

Figura 61. Ubicación del motor.



Fuente: El autor.

El servomotor va fijo al soporte principal, en un espacio diseñado para este y el paso de los cables de alimentación, tierra y señal. Está sujeto por medio de cuatro tornillos Bristol, esto se puede apreciar en la figura 62.

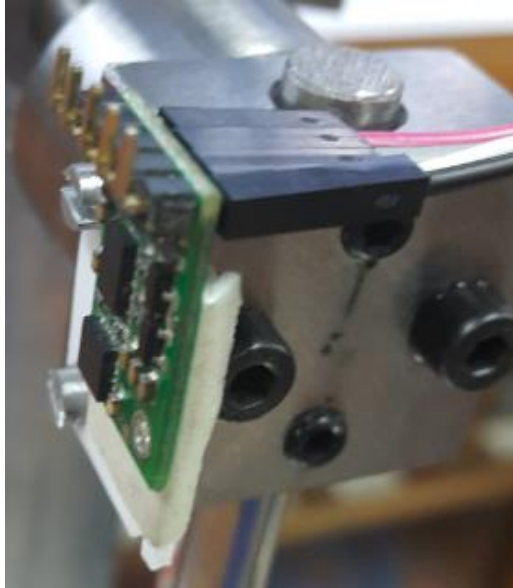
Figura 62. Ubicación del servomotor.



Fuente: El autor.

El sensor IMU se ubica en el acople del péndulo, sobre una cama plástica sujeta al acople por medio de dos tornillos. Esto se puede observar en la figura 63.

Figura 63. Ubicación del sensor IMU.



Fuente: El autor.

El segundo grupo se ubica a un costado de la máquina de ensayos, al lado de la base y del soporte principal. Para la conexión del arduino con los demás elementos se adiciono una mini protoboard. En ella se ubican la tierra del arduino, y 5 v de este, puesto que los pines de la tarjeta están ocupados por la pantalla táctil mayormente. Si la máquina se encuentra en una superficie metálica se debe adicionar una cama de un material no conductor. Todo esto se aprecia en la figura 64.

Figura 64. Ubicación segundo grupo de componentes electrónicos.



Fuente: El autor.

10.2 PRUEBAS GENERALES

Las pruebas realizadas a distintos componentes de la máquina de impacto obedecen la necesidad de comprobar, primero por separado, y al final en conjunto todos los elementos del banco de ensayos.

Estas pruebas también aseguran el correcto desarrollo de las etapas previamente mencionadas en este libro.

El probar el sensor, el movimiento del péndulo, el mecanismo de levantamiento y el sistema de retención también prueban el funcionamiento del resto de la máquina y de sus componentes, en el caso de la IMU se comprueba el arduino y la alineación del eje. En el movimiento del péndulo se verifica el mismo sensor,

que las otras piezas no detengan el avance de la nariz de golpeo y que la ubicación de los soportes de la muestra y probeta sean los indicados.

Con la prueba de los sistemas de levantamiento y retención también se comprueban el funcionamiento del motor, del servomotor, de la pantalla táctil para iniciar el movimiento, y de la fuente de alimentación y el L298N para entregar la corriente necesaria al motoreductor.

Después de probar estos elementos por separado se realizan pruebas con todos los elementos en conjunto hasta lograr el desarrollo correcto de una prueba de impacto.

Los siguientes subcapítulos de este libro muestran estas pruebas y sus resultados.

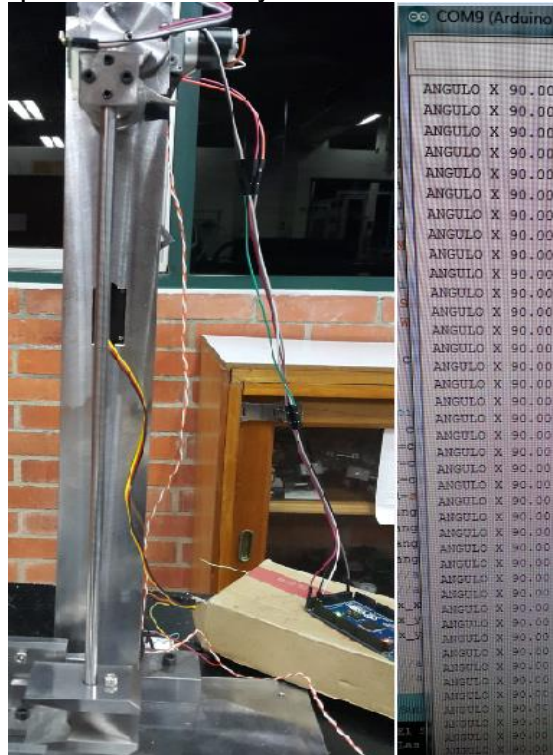
10.2.1 Pruebas sensor IMU. El sensor se encarga de obtener el ángulo durante la prueba de impacto. Se probó este elemento en su ubicación final para ver su tiempo de respuesta, además de observar si el dato hallado corresponde con la ubicación real del péndulo.

Esto se logró sin el uso de la pantalla, observando los resultados en el monitor serial de arduino. Se obtuvieron respuestas en tiempo real, además las siguientes figuras muestran parte de las pruebas realizadas y sus resultados.

En la figura 65 se observa cuando el péndulo está en posición vertical y el valor del ángulo que obtiene el sensor.

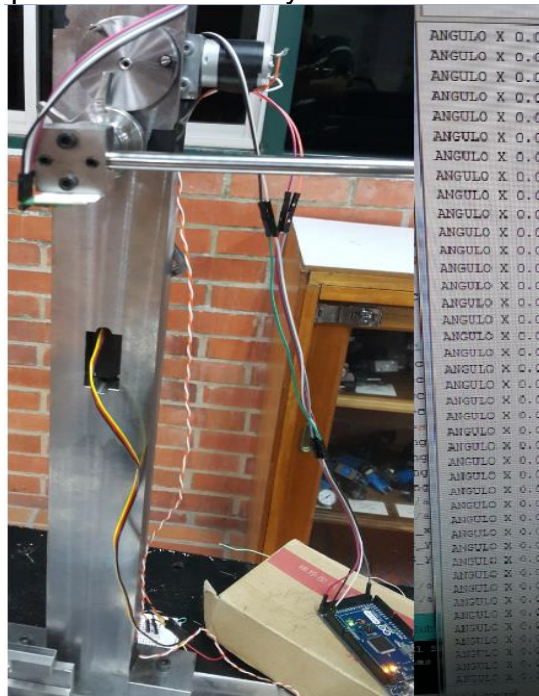
En la figura 66 se observa cuando el péndulo está en posición horizontal y el valor del ángulo que obtiene el sensor.

Figura 65. Péndulo en posición vertical y lectura del sensor.



Fuente: El autor.

Figura 66. Péndulo en posición horizontal y lectura del sensor.



Fuente: El autor.

La prueba con el ángulo solo se vio afectada por la superficie del laboratorio, puesto que se observó que en ciertas partes en posición vertical lee el ángulo de 90 (el correcto), pero en otras el ángulo variaba entre los 86 a los 90 grados. Para la prueba de impacto la superficie tanto del laboratorio como del lugar sobre el cual se ubica el banco de ensayos debe ser totalmente plana, para obtener los mejores resultados posibles.

10.2.2 Prueba de movimiento del péndulo. Para la realizar esta prueba se movió manualmente el péndulo, para observar que la fricción fuera la mínima posible, y que el péndulo pueda alcanzar todos los lugares que podría alcanzar durante una prueba de impacto. Además se observó la respuesta de los rodamientos y del eje, puesto que estos se deben mantener fijos (no se pueden mover horizontalmente, si permitir el giro del péndulo) durante los ensayos de impacto. También se comprobó que los cables del sensor no interfieran con la prueba y puedan alcanzar la posición inicial de la prueba y una posición final ideal (sin fricción, si el péndulo se deja caer de un ángulo de 30 grados sobre la horizontal debería llegar hasta ese valor en el lado contrario).

La figura 67 muestra una secuencia de una de las pruebas, donde se dejó caer el péndulo.

Figura 67. Secuencia de prueba de caída libre del péndulo.



Fuente: El autor.

También se realizaron pruebas con el sensor para comprobar las pérdidas por fricción. En estas pruebas se dejó caer el péndulo de una posición de 0 grados (horizontal) y se pudo observar en múltiples ocasiones la pérdida mínima de ángulo (por lo tanto de altura) por la fricción, pero no solo la fricción del eje sino la del aire contra la nariz de impacto. All ejecutar la prueba con ángulos menores (más cercanos a la posición vertical) la pérdida de ángulo era menor. Para la prueba de impacto despreciaremos el valor de la pérdida de energía por fricción

tanto del eje como del aire por ser estas pérdidas inferiores a 1 grado por cada 180 grados de recorrido del péndulo.

Como se describió en la sección 6.5 la velocidad de la nariz del golpeo al momento del impacto debe ser de 3.43 m/s, por lo cual se realizaron una serie de pruebas para verificar este valor de diseño.

Las pruebas consistieron en dejar caer el péndulo desde la altura inicial del ensayo de impacto, totalmente quieto al inicio, y medir su aceleración (con el sensor) en el instante que pasara por el lugar de impacto con la probeta (ese lugar se encuentra cuando el ángulo en el plano x señala 90°), además se midió el tiempo entre cuando se soltaba el péndulo hasta que pasaba por la posición mencionada.

La tabla 17 muestra los valores de aceleración y tiempo obtenidos durante las pruebas.

Tabla 17. Prueba de velocidad del péndulo.

Número de prueba	Tiempo (s)	Aceleración (rad/s²)
1	0,4	21,6
2	0,37	22,1
3	0,39	21,9
4	0,35	22,6
5	0,39	22,1
6	0,39	22,1
7	0,38	22,6
8	0,44	21,6
9	0,41	21,9
10	0,35	22,6

Fuente: El autor.

El promedio del tiempo después de diez pruebas fue de 0.387 s, mientras que el de la aceleración fue de 22.11 rad/s², y con la ecuación (5) se halló la velocidad:

$$w = w_0 + at \quad (5)$$

Donde w es la velocidad angular, w_0 es la velocidad angular inicial, a es la aceleración y t el tiempo. Al partir del reposo la velocidad angular inicial es igual a cero. El promedio de la velocidad angular de las pruebas fue de 8.556 rad/s, y ahora aplicando la ecuación (3), explicada en la sección 7.1.12, se obtiene que la velocidad promedio de la experimentación realizada fue de 3.422 m/s, el cual es un valor cercano al teórico presente en la norma que es de 3.43 m/s (trabajos consultados en el estado del arte afirman valores experimentales de entre 3.42 m/s y 3.46 m/s para el ángulo seleccionado de 30 grados). El porcentaje de error entre el valor experimental hallado y el teórico de la norma fue de 0.23% (el porcentaje de error corresponde al cociente entre el valor teórico menos el experimental sobre el valor teórico).

10.2.3 Prueba de funcionamiento del mecanismo de retención y de levantamiento. Para el mecanismo de levantamiento se realizaron dos pruebas (en múltiples ocasiones), la primera consiste en conectar directamente la fuente de voltaje con el motor, esto se realiza para revisar la polaridad que se desea que tenga el motor y para comprobar que el motor puede subir el péndulo hasta su posición inicial para la prueba de impacto.

La segunda prueba consiste en conectar el motor al L298N y al arduino, el motor recibirá la corriente del L298N. Esto para probar que el motor recibe la corriente necesaria, de estos elementos en conjunto, para subir el péndulo y también para revisar el valor de corriente necesaria para esta acción. Durante las pruebas se observó, por medio de un multímetro, que la corriente necesaria para subir el péndulo está entre 1.0 a 1.1 A. El valor máximo de corriente que entrega la fuente

es de 5 A, el L298N resiste hasta los 2 A y la corriente máxima que puede pedir el motor (con rotor bloqueado) es 1.8 A, por lo cual se asegura que el mecanismo de levantamiento funcione durante las pruebas generales de la máquina y las pruebas de impacto. En la figura 68 se observan las piezas del mecanismo de levantamiento.

Figura 68. Piezas del mecanismo de levantamiento.



Fuente: El autor.

La flecha que aparece en la imagen de la figura 61 indica el sentido de giro de la pieza (y también del motor). El sistema consiste en que el motor hace girar el acople del motor, el tornillo con accesorio negro (el que está al lado derecho de la flecha) choca suavemente con la pieza de levantamiento y la hace girar hasta que el accesorio del acople termina su recorrido por la primera pata de la pieza, pero inmediatamente el segundo tornillo entra en contacto con la segunda pata y este

completa el movimiento hasta llegar a la altura que se requiere para la prueba de impacto.

Para el mecanismo de retención se realizan pruebas de manera individual (solo en el mecanismo, moviéndolo manualmente), y en conjunto con los otros sistemas. Durante el ensayo manual se constató el movimiento del mecanismo y la posición de sujeción cuando el péndulo está en el lugar inicial de la prueba de impacto. La figura 66 corresponde a ese momento exacto.

Figura 69. Sistema de retención en el instante de sujeción del péndulo.



Fuente: El autor.

Para las pruebas con otros elementos de la máquina, se utilizan el arduino (para mover el servo) y la fuente para levantar el péndulo. La clave de los ensayos es lograr la sujeción del péndulo por medio del mecanismo de retención tras la subida del péndulo a través del sistema de levantamiento.

Si el sistema de sujeción se activa antes de tiempo simplemente el péndulo caerá, lo mismo sucede si se activa demasiado tarde. También si el servo no alcanza la posición ideal de retención, la rueda dentada se puede deslizar de la pieza de retención y el péndulo caerá también. Tras las pruebas se aseguró que la interacción de estos sistemas lograra sostener el péndulo en la posición inicial de la prueba de impacto.

10.2.4 Prueba de funcionamiento general de la máquina de ensayos. Las pruebas de funcionamiento generales se realizaron para comprobar el funcionamiento de todas las partes de la máquina de forma combinada y coordinada, pero sin impactar probetas. Las pruebas de impacto a probetas de materiales plásticos están expuestas en el siguiente numeral (10.2.5) de este libro.

Durante las pruebas se observó una dificultad inicial con el cableado de la IMU, puesto que el sensor dejaba de transmitir datos en momentos claves como la subida del péndulo y la caída libre del mismo, además de un problema en el sketch de arduino (algunos ciclos “*while*” frenaban la toma de datos del sensor). Ambos fueron solucionados oportunamente y se procedió a continuar con la experimentación.

En la figura 70 se puede observar el banco de ensayos antes del inicio de estas pruebas.

Figura 70. Banco de ensayos antes de las pruebas de funcionamiento general.



Fuente: El autor.

En la tabla 18 se puede observar los resultados sin probetas obtenidos en diez pruebas, divididas en dos partes, las primeras cinco de forma individual y las últimas cinco realizadas de forma consecutiva con la opción “5” del menú de inicio de la pantalla.

Tabla 18. Resultados de las pruebas generales de funcionamiento.

Número de prueba	Ángulo (grados)	Energía (J)
1	116,57	0,1
2	115,02	0,15

Continuación tabla 18. Resultados de las pruebas generales de funcionamiento.		
3	116,57	0,1
4	114,78	0,15
5	116,57	0,1
6	114,78	0,15
7	114,78	0,15
8	116,57	0,1
9	114,78	0,15
10	114,78	0,15

Fuente: El autor.

Como se puede ver la energía perdida en las pruebas fue baja, y se debió principalmente a la fricción del aire (y un poco a la fricción del eje) que choca contra la nariz de golpeo.

El promedio del ángulo final en estas pruebas fue de 115.52 grados, con una desviación estándar de 0.822. El promedio de energía perdida fue de 0.13 J y la desviación estándar es de 0.00067. Sin presencia de probeta las pruebas tienen una desviación estándar mínima y la pérdida de energía muy baja.

Para las pruebas de la sección 10.2.5 se agrega la probeta (se realizaron con tres materiales distintos) y se realizan las pruebas de impacto completas.

10.2.5 Pruebas de impacto. Para las pruebas de impacto realizadas se coloca la probeta en los soportes, se alinea la ranura (de la probeta) con la nariz de golpeo, y se realiza el ensayo simulando una prueba real de laboratorio.

Las probetas utilizadas durante estas pruebas son de PLA o ácido poliláctico, ABS y acrílico, que son plásticos utilizados comúnmente en la elaboración de objetos o productos.

Se realizaron diez pruebas de impacto (por cada material), las cuales entregaron como resultados los valores que se pueden observar en las tablas 19, 20 y 21.

Tabla 19. Resultados pruebas de impacto en PLA.

Número de prueba	Ángulo (grados)	Energía (J)	Modulo (J/m)
1	109,91	0,3	67,64
2	99,99	0,61	136,77
3	110,56	0,2	63,13
4	104,93	0,46	102,77
5	111,8	0,24	54,54
6	105,95	0,43	95,53
7	98,13	0,68	152,06
8	108,43	0,35	77,93
9	107,35	0,38	85,55
10	104,04	0,49	109,18

Fuente: El autor.

Para las probetas de PLA el promedio de ángulo final es de 106.109 grados, de energía absorbida es de 0.414 J y del módulo de tenacidad es de 94.51 J/m. La desviación estándar del ángulo es 4.47, de la energía es de 0.153 y del módulo es de 31.696. Estas probetas fueron realizadas a través de la técnica de impresión 3d

y en formato hexagonal, no macizo por lo que su estructura interna podría variar de probeta a probeta, lo cual explicaría la diferencia existente entre pruebas realizadas.

Tabla 20. Resultados pruebas de impacto en ABS.

Número de prueba	Ángulo (grados)	Energía (J)	Modulo (J/m)
1	100,26	0,61	136,48
2	97,42	0,7	157,24
3	102,96	0,52	116,95
4	101,29	0,58	129,05
5	96,71	0,94	210,76
6	102,09	0,55	123,18
7	100,26	0,61	136,48
8	98,13	0,68	152,06
9	97,13	0,7	158,73
10	102,09	0,55	123,18

Fuente: El autor.

En la tabla 20 se presentaron los resultados al usar probetas de ABS, en estas experimentaciones el promedio del ángulo final fue de 99.834 grados con una desviación estándar de 2.31, mientras que en la energía absorbida se observa un promedio de 0.644 J con una desviación de 0.1223, y para el módulo de tenacidad el promedio fue de 144.411 J/m con una desviación de 27.58. El proceso de fabricación de esta probeta fue similar a las de PLA, se empleó la misma técnica y mallado interno de la probeta.

Tabla 21. Resultados pruebas de impacto en acrílico.

Número de prueba	Ángulo (grados)	Energía (J)	Modulo (J/m)
1	94,04	0,8	181,4
2	94,04	0,8	181,4
3	98,43	0,66	149,24
4	99,44	0,63	141,89
5	97,35	0,7	157,13
6	97,35	0,7	157,13
7	93,24	0,83	187,28
8	90,26	0,93	209,24
9	92,09	0,87	195,75
10	98,43	0,66	149,24

Fuente: El autor.

En la tabla 21 están los resultados al utilizar una probeta de acrílico, estas probetas a diferencia de las anteriores si era maciza. El promedio de ángulo fue de 95.467 grados con una desviación de 3.12. Para la energía absorbida el promedio fue de 0.762 y la desviación de 0.102, mientras que en el módulo de tenacidad se calculó un promedio de 170.973 con una desviación de 22.93.

Frente a las pruebas generales sin probeta se observa que el ángulo final disminuye por lo tanto la energía absorbida fue mayor, pero la desviación estándar también lo es. Lo anterior se debe que aunque dos probetas sean del mismo material esto no quiere decir que dos probetas sean exactamente iguales, ya que en su proceso de fabricación y generación de la muesca puede haber pequeñas diferencias que contribuyeron a aumentar la desviación estándar en las pruebas.

Entre los diferentes materiales se apreció que el acrílico en promedio fue el más tenaz, pero esto se puede deber principalmente a la composición de las probetas, mientras que las de acrílico eran macizas las otras no lo eran.

En las siguientes imágenes se pueden observar lo que muestra la pantalla táctil antes, durante y después de una prueba de impacto.

En la figura 71 se observa la pantalla antes de subir el péndulo para la primera prueba de impacto.

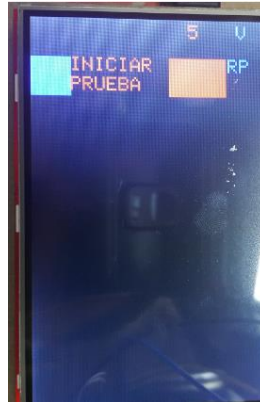
Figura 71. Pantalla antes de subir el péndulo (menú de prueba).



Fuente: El autor.

En la figura 72 se puede ver lo que muestra la pantalla durante el levantamiento del péndulo, está también se observa durante la caída de la nariz de golpeo.

Figura 72. Pantalla durante levantamiento y caída del péndulo.



Fuente: El autor.

La figura 73 muestra el resultado en la pantalla después de la realización de una prueba de impacto.

Figura 73. Pantalla táctil tras prueba de impacto.



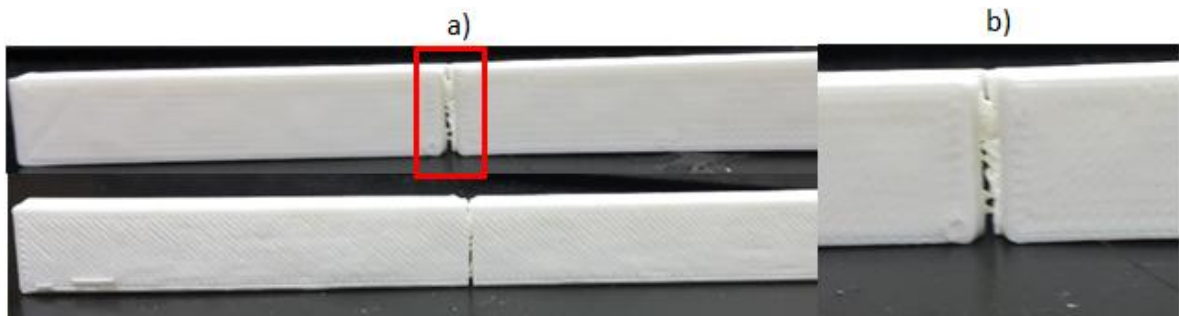
Fuente: El autor.

Entre pruebas y tras subir el péndulo, los valores del ángulo, de la energía y el módulo se reinician y la pantalla muestra lo que se observa en la figura 70, que también es el momento previo a dejar caer la nariz de impacto.

En la siguiente imagen se puede observar el corte (fractura) de la probeta vista de frente y desde la parte posterior, y se ve que la fractura de la muestra ocurre por todo el medio de la probeta, que es la forma adecuada en la cual se debe romper.

En la figura 74 se encierra la parte de la probeta donde ocurre la ruptura (a) y en (b) se observa un acercamiento a esta fractura.

Figura 74. Ruptura de la probeta de PLA, a) vista frontal y posterior y b) acercamiento de la ruptura.



Fuente: El autor.

11. CONCLUSIONES

- Se diseñó y construyó un banco de ensayos para probetas plásticas, basados en la norma ASTM 6110, la máquina permite la adquisición de datos y la ejecución de la prueba de impacto de forma automática.
- Se escribió un manual para los usuarios de la máquina, donde se detallan los elementos de seguridad y los cuidados que debe tener el operario, antes, durante y después de la prueba de impacto. El manual también detalla paso a paso las acciones a seguir para la realización de un ensayo tipo Charpy.
- Se desarrolló una interfaz utilizando la tarjeta de marca arduino y una pantalla táctil, que permite la realización de la prueba, y además de ejecutar acciones como: levantar el péndulo, dejar caer el péndulo, adquirir el dato del ángulo final y mostrar los datos estadísticos de los ensayos.
- Se realizaron simulaciones a los componentes mecánicos que permitieron definir el diseño de los mismos (junto con la norma). Estos diseños presentan factores de seguridad altos con los cuales las piezas soportaran la realización de pruebas de impacto sin sufrir mayor deformación ni daños. Además se realizó la simulación de torque para la selección del motor, que con un buen factor de seguridad agregado se aseguró que este componente pueda cumplir su función durante el tiempo que este activado.
- Durante las pruebas se pudo observar dificultades con la parte del cableado de la IMU hacia la tarjeta de adquisición de datos, puesto que la señal se perdía y la toma de datos se detenía, siendo este el mayor problema observado durante el funcionamiento de la máquina, pero este fenómeno se logró solventar y no afecta la realización de ensayos de impacto.
- El banco de ensayos rompe las probetas utilizadas para las pruebas y realiza los ensayos de impacto de forma adecuada siguiendo la norma y requerimientos estandarizados.

Anexo A

En el anexo A se presenta el total del sketch de arduino desarrollado para el banco de ensayos.

Inicio del código:

```
//Inicio sección de librerías y variables//
#include <Adafruit_GFX.h> // gráficas para la pantalla
#include <MCUFRIEND_kbv.h>//para la pantalla
#include <TouchScreen.h> //para la pantalla
#include <Servo.h>//PARA EL SERVO
#include <Wire.h>//comunicar con IMU
#include <LSM303.h>// librería para IMU
Servo myservo; // crea objeto servo para control del servo
double x=0,y=0,z=0,R=0;//variables sensor
double anglex=0,angley=0,anglez=0,x_x=0,x_y=0;//variables sensor
double xmg=0;//ángulo magnometro
double xmgi=0;//ángulo magnometro inicial
LSM303 compass;//objeto compass sensor
//Ángulos
double mayor=0.0;//mayor ángulo
int cm=0;//contador del mayor
double ga=-90;//guardar anterior ángulo
//variables formulas de la energía
double m=0.482;//masa //E_a=mgL[cos(β)-cos(α)]
double L=0.4;//longitud
double g=9.81;//gravedad
//variables para el servo
int pos = 0;//para pos servo
int cservo=0;//contador servo
// definiciones para la pantalla
#if defined(__SAM3X8E__)
```

```

#undef __FlashStringHelper::F(string_literal)
#define F(string_literal) string_literal
#endif

// pines para la pantalla
uint8_t YP = A1; // must be an analog pin, use "An" notation!
uint8_t XM = A2; // must be an analog pin, use "An" notation!
uint8_t YM = 7; // can be a digital pin
uint8_t XP = 6; // can be a digital pin
uint8_t SwapXY = 0;
uint16_t TS_LEFT = 920;
uint16_t TS_RT = 150;
uint16_t TS_TOP = 940;
uint16_t TS_BOT = 120;
char *name = "Unknown controller";
// definir objeto TouchScreen para la pantalla
TouchScreen ts = TouchScreen(XP, YP, XM, YM, 300); // objeto para pantalla
TSPoint tp;// punto para función touch de la pantalla
#define MINPRESSURE 20 //define la presión mínima que siente la pantalla
#define MAXPRESSURE 1000 //define la presión máxima que siente la pantalla
#define SWAP(a, b) {uint16_t tmp = a; a = b; b = tmp;}//para sentido pantalla
//variables a usar en el código general
double maxg=0.0;//max valor en los datos a graficar
double ming=10000.0;//min valor en los datos a graficar
int recta=0;//para crear la recta en grafica
double yg=0.0;// y para grafica
double xg=0.0;// x para grafica
double bg=0.0;// b para ecuación recta
double mg=0.0;// m para ecuación recta
int dist=0;//variable de grafica
float media=0.0;//media

```

```

float des=0.0;//desviación estándar
double temp=0.0;// variable temporal energía
int nump=0;//número de pruebas
int conp=0;//contador de pruebas
double ang=0.0;// ángulo final
int cont=0;// contador de ejemplo
int ci=0;//contador inicial para subir el péndulo
double energia=0.0;// energía absorbida
double modulo=0.0;// módulo energía absorbida
//para funciones lcd de la pantalla, como color y orientacion
int16_t BOXSIZE;//tamaño de cajas en la pantalla
uint16_t identfier, oldcolor, currentcolor;//color a mostrar en pantalla
uint8_t Orientation = 0; //orientación de la pantalla
//variables del motor
int pinIN1=35;//pines motor
int pinIN2=37;//pines motor
// nombres de los colores segun formato de valores de 16-bit :
#define BLACK 0x0000
#define BLUE 0x001F
#define RED 0xF800
#define GREEN 0x07E0
#define CYAN 0x07FF
#define MAGENTA 0xF81F
#define YELLOW 0xFFE0
#define WHITE 0xFFFF
//fin sección de variables y librerías
//
//Función show_tft para mostrar pantalla inicial o menú inicial
//inicio de función
void show_tft(void)

```

```

{ conp=0;//variable
  reg=0;//variable
  tft.setTextSize(2);//tamaño del texto a colocar
    tft.setTextColor(BLUE);//color del texto a colocar
  tft.setCursor(30,100 ); // el cursor se coloca en la posición indicada
  tft.print("1");//MENU 1, imprime lo que este entre comillas en la pantalla
    tft.setTextColor(BLUE);//color
  tft.setCursor(30,170 );//ubicación
  tft.print("2");//MENU 2, imprime
    tft.setTextColor(BLUE);//color
  tft.setCursor(30,240 );//ubicación
  tft.print("5");//MENU 5, imprime
    tft.setTextColor(BLUE);//color
  tft.setCursor(30,310 );// ubicación
  tft.print("10");//MENU 10,imprime
    tft.setTextSize(1.5);//tamaño texto
  tft.setTextColor(RED);//color
  tft.setCursor(10,50);//ubicación
  tft.print("Elija número de pruebas:");//NUMERO DE PRUEBAS, imprime
    tft.setTextSize(2);//tamaño texto
  tft.setTextColor(YELLOW, BLACK);//color
//sección con while para que el usuario seleccione el número de pruebas a realizar
while (1) {
  tp = ts.getPoint();//para hallar donde toca el usuario
  pinMode(XM, OUTPUT);//lectura pin pantalla
  pinMode(YP, OUTPUT); //lectura pin pantalla
  pinMode(XP, OUTPUT); //lectura pin pantalla
  pinMode(YM, OUTPUT); //lectura pin pantalla
  if (tp.z < MINPRESSURE || tp.z > MAXPRESSURE) continue;
//condiciones if para saber que selecciona el usuario

```

```

    if (tp.x >= 720 && tp.x <= 850 && tp.y >= 290 && tp.y <= 350) {
        nump=1;
        break;
    }
    if (tp.x >= 720 && tp.x <= 850 && tp.y >= 410 && tp.y <= 520) {
        nump=2;
        break;
    }
    if (tp.x >= 720 && tp.x <= 850 && tp.y >= 570 && tp.y <= 640) {
        nump=5;
        break;
    }
    if (tp.x >= 720 && tp.x <= 850 && tp.y >= 740 && tp.y <= 820) {
        nump=10;
        break;
    }
}
} // fin del while
//fin de la funcion
//
//Inicio del setup del código arduino
void setup(void)
{
  Serial.begin(9600);//para la comunicaiion
  Wire.begin();//Comunicacion con la IMU
  compass.init();//Inicia objeto compass de la IMU
  compass.enableDefault();//Conexión objeto compass de la IMU
  pinMode(pinIN1,OUTPUT);//pin para activar motor señalado como salida
  pinMode(pinIN2,OUTPUT);// pin para activar motor señalado como salida
  myservo.attach(45); // pin 45 de pwm atado al objeto servo
  myservo.write(0); //ubicar el servo en posición indicada
}

```

```

uint16_t tmp;//variable de uso para la pantalla
tft.begin(9600);//comunicacion con las funciones tft de la pantalla
tft.reset();//reset de funcion tft pantalla
identifier = tft.readID();//identifica la pantalla
switch (Orientation) { // para ajustar aspectos de la pantalla
    case 0: break;
    case 1: tmp = TS_LEFT, TS_LEFT = TS_BOT, TS_BOT = TS_RT, TS_RT =
TS_TOP, TS_TOP = tmp; break;
    case 2: SWAP(TS_LEFT, TS_RT); SWAP(TS_TOP, TS_BOT); break;
    case 3: tmp = TS_LEFT, TS_LEFT = TS_TOP, TS_TOP = TS_RT, TS_RT =
TS_BOT, TS_BOT = tmp; break;
}
ts = TouchScreen(XP, YP, XM, YM, 300); //para hallar donde toca el usuario
tft.setRotation(Orientation);//define la orientacion de la pantalla
tft.fillScreen(BLACK);//para dejar la pantalla de color negro
show_tft();//llamado de la función show_tft
BOXSIZE = tft.width() / 6;//variable para tamaño de cuadro
tft.fillScreen(BLACK); //para dejar la pantalla de color negro
delay(1000);//retraso para aparecer el segundo menú
}
//fin del setup del codigo arduino
//
//inicio del loop del código de arduino
void loop()
{ double arraye[nump];//variable para guardar los resultados de la energia
while(conp<nump){// para realizar el numero de pruebas que indico el usuario
    tft.setTextSize(2);//tamaño del texto
    tft.setTextColor(RED);//color
    tft.setCursor(160,5);//ubicación
    tft.print(nump);//imprime numero de pruebas

```



```

    tft.setTextSize(2);
tft.setTextColor(BLUE);
tft.setCursor(210,5);
    tft.print("V");//imprime letra V para opción volver
tft.setTextSize(2);
tft.setTextColor(RED);
tft.setCursor(40,40);
tft.print("INICIAR");// imprime INICIAR
tft.setCursor(40,60);
tft.print("PRUEBA");// imprime PRUEBA para la función iniciar prueba
    tft.setTextColor(BLUE);
tft.setCursor(201,40);
tft.print("RP");//imprime RP para la función REINICIAR PRUEBA
    tft.fillRect(0, BOXSIZE, BOXSIZE, BOXSIZE, BLUE);//crea rectangulo
    tft.fillRect(140, 40, 60, BOXSIZE,RED);// crea rectangulo
    tft.setTextColor(RED);
tft.setCursor(100,160);
tft.print(ang);//imprime valor angulo final
    tft.setTextColor(RED);
    tft.setCursor(0,160);
tft.print("Angulo:");//imprime palabra Angulo
    tft.setTextColor(BLUE);
tft.setCursor(100,240);
    tft.print(energia);// imprime valor energia absorbida
    tft.setTextColor(BLUE);
tft.setCursor(160,240);
tft.print("J");//imprime unidad J de la energia
    tft.setTextColor(BLUE);
tft.setCursor(0,240);//48
    tft.print("Energia:");//imprime palabra energía

```

```

tft.setTextSize(2);
tft.setTextColor(RED);
tft.setCursor(0,300);
tft.print("Modulo:");// imprime palabra modulo
    tft.setTextSize(2);
tft.setTextColor(RED);
tft.setCursor(180,300);
tft.print("J/m");//imprime unidad del módulo J/m
    tft.setTextSize(2);
tft.setTextColor(RED);
tft.setCursor(100,300);
tft.print(modulo);//imprime valor hallado del modulo

```

uint16_t xpos, ypos; variables para posición donde toca el usuario

tp = ts.getPoint(); //tp.x, tp.y are ADC values

pinMode(XM, OUTPUT);

pinMode(YP, OUTPUT);

pinMode(XP, OUTPUT);

pinMode(YM, OUTPUT);

//para iniciar la prueba, dejar caer la nariz

if ((ypos >= 20)&&(ypos<=120)&&(xpos>=0)&&(xpos<=80)) { //codicion para
//saber que selecciona el usuario.

tft.fillRect(0, BOXSIZE*2, tft.width(), tft.height() - BOXSIZE, BLACK); //pantalla

//negra, para no sobrescribir lo que ya este

ang=0;//reinicio de variables

cservo=0;

anglex=0;

while(anglex<-21){//sensor toma datos de posición inicial

for(int toma=0;toma<4;toma++){

```

    compass.read();//seccion del codigo para el sensor
x=compass.a.x/1000;
y=compass.a.y/1000;
z=compass.a.z/1000;
R=sqrt((x*x)+(y*y)+(z*z));
anglex=acos(x/R);
angley=acos(y/R);
anglez=acos(z/R);
anglex=(anglex*57.29577951)-90;//fin de toma de datos del sensor
}
}
if(cservo==0){
myservo.write(0);//cero suelta el pendulo
}

    cm=0;//reinicio variables
    mayor=180;
    anglex=0;
    ga=90;
    while(1){//inicio de toma datos de ángulo final
    compass.read();
x=compass.a.x/1000;
y=compass.a.y/1000;
z=compass.a.z/1000;
R=sqrt((x*x)+(y*y)+(z*z));
anglex=acos(x/R);
angley=acos(y/R);
anglez=acos(z/R);
anglex=(anglex*57.29577951)-90;
    Serial.println(anglex);
xmg=compass.m.x;

```

```

Serial.println(xmg);
//condiciones para la toma de datos del angulo final
if(xmg>=ga&&cm!=4){
  if(xmg==ga){
    if(anglex<mayor){
      mayor=anglex;
    }
  }else{
    mayor=anglex;
  }
  ga=xmg;
}else{
  if(xmg>(xmgj+90)&&xmg<xmgj)//1450
  {
    cm=5;
    Serial.println("aqui");
  }
  else{
    if(xmg>=xmgj&&anglex<=mayor)//1450
    {
      mayor=anglex;
      cm=4;
    }else{
      if(xmg>=(xmgj-20))//1450
      {
        cm=5;}
      }
    }
  }
}

```

```

if(cm==4){
    if(anglex<=mayor){
        mayor=anglex;
    }else{
        cm=5;
    }
}
if(cm==5){
    break;}
} //fin de la toma de datos del angulo final, se debe de haber hallado ese angulo
//conversión del angulo hallado para ecuación de la energia
if(mayor>=0){
    mayor=90-mayor;
}
else{
    mayor=90+abs(mayor);
}
ang= mayor; //angulo final
energia=m*g*L*(cos(ang*DEG_TO_RAD)-cos(120*DEG_TO_RAD)); //energia
//absorvida
modulo=(energia/4.46)*1000; //modulo de tenacidad
} //fin de sección de opción iniciar prueba
//Inicio sección para opcion reiniciar la prueba, reiniciar datos y subir la nariz
if ((ypos >= 40)&&(ypos<=140)&&(xpos>=130)&&(xpos<=240)) {
    if(ci==0)//condicion para saber si es la primera prueba
    {ci=1;
    }
    else{
        arraye[conp]=temp;
        conp=conp+1;
    }
}

```

```

    }
//colocar la pantalla en negro
    tft.fillRect(0, BOXSIZE*2, tft.width(), tft.height() - BOXSIZE, BLACK);
    ang=0;//reiniciar variables
    cont=0;
    ga=-90;
    cm=0;
    energia=0;
    modulo=0;
    temp=0.0;
    mayor=180;
    anglex=0;

    if(numpl!=conp){// condicion para saber si se debe realizar otra prueba o no
for(int tres=0; tres<4;tres++){
    compass.read();
x=compass.a.x/1000;
y=compass.a.y/1000;
z=compass.a.z/1000;
R=sqrt((x*x)+(y*y)+(z*z));
anglex=acos(x/R);
angley=acos(y/R);
anglez=acos(z/R);
anglex=(anglex*57.29577951)-90;
if(anglex>=85 && anglex<=90 ){
xmgj=compass.m.x-20;
}
}

    if(anglex<=-21 && anglex>=-80 ){//si el usuario sube con la mano la nariz
while(1){
    compass.read();

```

```

x=compass.a.x/1000;
y=compass.a.y/1000;
z=compass.a.z/1000;
R=sqrt((x*x)+(y*y)+(z*z));
anglex=acos(x/R);
angley=acos(y/R);
anglez=acos(z/R);
anglex=(anglex*57.29577951)-90;
break;
}
cservo=0;
if(anglex<=-21 && anglex>=-83 ){
    if(cservo==0){
for (pos = 0; pos <=180; pos++ ) { //para mover servo
    myservo.write(70);    //el servo se ubica en posicion indicada
    delay(15);
if(pos==180){
    cservo=2;}
}
}
    }
} else{
    compass.read();
x=compass.a.x/1000;
y=compass.a.y/1000;
z=compass.a.z/1000;
R=sqrt((x*x)+(y*y)+(z*z));
anglex=acos(x/R);
angley=acos(y/R);
anglez=acos(z/R);

```

```

anglex=(anglex*57.29577951)-90;
if(anglex>=85 && anglex<=90 ){// si usuario espera que el motor suba el péndulo
for (pos = 0; pos <=180; pos++ ) {//para mover servo
    myservo.write(0); //mueve servo a posición indicada
    delay(15);
}
    digitalWrite(pinIN1,HIGH);//activación del motor
    digitalWrite(pinIN2,LOW);// este pin en bajo para el sentido de giro
    ga=0;
    while(anglex>0){//condiciones para saber si en pendulo ya lleo a la posicion
inicial.
        compass.read();
x=compass.a.x/1000;
y=compass.a.y/1000;
z=compass.a.z/1000;
R=sqrt((x*x)+(y*y)+(z*z));
anglex=acos(x/R);
angley=acos(y/R);
anglez=acos(z/R);
anglex=(anglex*57.29577951)-90;
    if(abs(anglex)-abs(ga)>=10&&anglex<10&&ga<15){anglex=ga;}
    ga=anglex;
    xmg=compass.m.x;
    }
        ga=0;
        while(anglex>-21){
            compass.read();
x=compass.a.x/1000;
y=compass.a.y/1000;
z=compass.a.z/1000;

```



```

R=sqrt((x*x)+(y*y)+(z*z));
anglex=acos(x/R);
angley=acos(y/R);
anglez=acos(z/R);
anglex=(anglex*57.29577951)-90;
Serial.println(anglex);
  if(abs(anglex)-abs(ga)>=10&&anglex<0&&ga<5){anglex=ga;}
  if(anglex<=-26){
    anglex=ga;
  }
  ga=anglex;
  xmg=compass.m.x;
}
anglex=-20;
  while(anglex>-21&& xmg>=(xmg-280))
  {
    compass.read();
x=compass.a.x/1000;
y=compass.a.y/1000;
z=compass.a.z/1000;
R=sqrt((x*x)+(y*y)+(z*z));
anglex=acos(x/R);
angley=acos(y/R);
anglez=acos(z/R);
anglex=(anglex*57.29577951)-90;
  xmg=compass.m.x;
  }
  if(anglex<=-20 && anglex>=-82){
    delay(50);// tiempo de demora en funcionar del servo
  for (pos = 0; pos <=180; pos++ ) { //para mover servo

```

```

myservo.write(80); //servo se ubica en la posicion indicada para sujetar
delay(5);
}

    delay(1550); //retraso de desactivacion del motor
    digitalWrite(pinIN1,LOW); //desctivar motor
    digitalWrite(pinIN2,LOW); //desctivar motor
        }
    }
cservo=0;
}
} //fin sección de la opción reiniciar prueba
//para volver al menu de numero de pruebas, opción volver menú
if ((ypos >= 0)&&(ypos<=25)&&(xpos>=200)&&(xpos<=240)) {
tft.fillRect(0, BOXSIZE, tft.width(), tft.height() - BOXSIZE, BLACK); //pantalla negro
    show_tft(); //llama de nuevo la función show_tft
    ang=0; //reinicio de variables
    cont=0;
    energia=0;
    modulo=0;
    temp=0.0;
    mayor=0.0;
    cservo=0;
    for(int c=0;c<=conp;c++){ arraye[c]=0.0;}
    conp=0;
    ci=0;
tft.fillRect(0, 0, tft.width(), tft.height() - BOXSIZE, BLACK); //pantalla en negro
    }
}
} //fin de la sección volver menú

```

```

    delay(1000);// retraso para menu de pruebas
    tft.fillRect(0, BOXSIZE, tft.width(), tft.height() - BOXSIZE, BLACK);//pantalla negro
    tft.fillRect(0, 0, 40, 40, BLACK); //pantalla negro
    tft.fillRect(200, 0, 240, 40, BLACK); //pantalla negro
    for (int v=0;v<nump;v++){//para escribir el resultado de la energia de cada prueba
        tft.setTextSize(2);
        tft.setTextColor(RED);
        tft.setCursor(10,35*(v));//48
        tft.print(arraye[v]);//imprime los resultados de cada prueba
        media=media+arraye[v];
        if(maxg<arraye[v]){
            maxg=arraye[v];
        }
        if(ming>arraye[v]){
            ming=arraye[v];
        }
    }
    media=(media/nump);//para hallar la media
    maxg=maxg+10.0;//valor usado en la creación de la grafica
    if(ming-10.0>0){
        ming=ming-10; ;//valor usado en la creación de la grafica
    }
    else{
        ming=1.0;
    }
    delay(100);
    for (int ka=0;ka<nump;ka++){
        des=des+((arraye[ka]-media)*(arraye[ka]-media));//para hallar la desviación
//estandar
    }

```

```

if(nump!=1){des=(des/(nump-1));
des=sqrt(des);
}
//para escribir letras de la opción volver al menú
tft.setTextSize(2);
tft.setTextColor(RED);
tft.setCursor(200,10);//48
tft.print("VM");//volver a menu
//para escribir letras de la opción mostrar grafica dispersión
tft.setTextSize(2);
tft.setTextColor(CYAN);
tft.setCursor(120,320);//48
tft.print("GD");//VER GRAFICO
// para escribir la MEDIA
tft.setTextSize(2);
tft.setTextColor(RED);
tft.setCursor(120,100);
tft.print("MEDIA");
tft.setCursor(120,150);
tft.print(media);
//para escribir la DESVIACION ESTANDAR
tft.setTextSize(2);
tft.setTextColor(BLUE);
tft.setCursor(120,200);
tft.print("DS");
tft.setCursor(120,250);
tft.print(des);
delay(5000);//retraso para observer resultados y tomar nota de ellos
while (1) { // para saber que opción selecciona el usuario
uint16_t xpos, ypos; //screen coordinates

```

```

tp = ts.getPoint(); //tp.x, tp.y are ADC values
pinMode(XM, OUTPUT);
pinMode(YP, OUTPUT);
pinMode(XP, OUTPUT);
pinMode(YM, OUTPUT);
if (tp.z > MINPRESSURE && tp.z < MAXPRESSURE) {
    if (SwapXY != (Orientation & 1)) SWAP(tp.x, tp.y);
    xpos = map(tp.x, TS_LEFT, TS_RT, 0, tft.width());
    ypos = map(tp.y, TS_BOT,TS_TOP, 0, tft.height());// ypos = map(tp.y,
TS_TOP, TS_BOT, 0, tft.height());
}
//para volver al menú de número de pruebas, opción volver menú
if ((ypos >= 0)&&(ypos<=30)&&(xpos>=200)&&(xpos<=240)) {
    tft.fillRect(0, 0, tft.width(), tft.height(), BLACK);//pantalla en negro
    show_tft();//llamado de funcion
    ang=0;//reinicio de variables
    cont=0;
    energia=0;
    modulo=0;
    temp=0.0;
    for(int c=0;c<=conp;c++){ arraye[c]=0.0;}
    conp=0;
    media=0.0;
    des=0.0;
    maxg=0.0;
    ming=10000.0;
    ci=0;
    ang=0;
    cont=0;
    energia=0;

```

```

temp=0.0;
mayor=0.0;
cservo=0;
for(int c=0;c<=conp;c++){ arraye[c]=0.0;}
conp=0;
ci=0;
tft.fillRect(0, 0, tft.width(), tft.height() , BLACK);
break;
}
//para seleccionar la opcion de mostrar la grafica
if ((ypos >= 280)&&(ypos<=380)&&(xpos>=80)&&(xpos<=200)) {
    // para graficar
    tft.fillRect(0, 50, tft.width(), tft.height(), BLACK);
    tft.fillRect(0, 0, 190, tft.height(), BLACK);
    media=0.0;
    break;
}
}
delay(1000);//retraso para mostrar la grafica
while(1){
    if (des==0.0){
        break;
    }
uint16_t xpos, ypos; //coordenadas de posciones
tp = ts.getPoint(); //para obtener puntos de la pantalla
pinMode(XM, OUTPUT);
pinMode(YP, OUTPUT);
pinMode(XP, OUTPUT);
pinMode(YM, OUTPUT);

```

```

    if (tp.z > MINPRESSURE && tp.z < MAXPRESSURE) {
        if (SwapXY != (Orientation & 1)) SWAP(tp.x, tp.y);
        xpos = map(tp.x, TS_LEFT, TS_RT, 0, tft.width());
        ypos = map(tp.y, TS_BOT,TS_TOP, 0, tft.height());// ypos = map(tp.y,
TS_TOP, TS_BOT, 0, tft.height());
    }
//para creacion de la grafica, lineas y puntos
tft.drawLine(20,100,20,300,WHITE);// dibuja linea
    tft.setTextSize(1);
    tft.setTextColor(RED);
    tft.setCursor(10,300);
    tft.print("0");
tft.setTextSize(1);
    tft.setTextColor(RED);
    tft.setCursor(10,80);
    tft.print("E");
tft.drawLine(20,300,200,300,WHITE);
tft.setTextSize(1);
    tft.setTextColor(RED);
    tft.setCursor(20,310);//
    tft.print("0");//
    tft.setTextSize(1);
    tft.setTextColor(RED);
    tft.setCursor(210,310);//
    tft.print("NP");//
if(nump==2){//condicion para distanciar segun numero de pruebas
    dist=50;
}
else{
if(nump==5){

```

```

dist =20;
} else{
    dist=15;
}
}
}
mg=(maxg-ming)/nump;//para crear la grafica
for(int ru=0;ru<nump;ru++){
    bg=200/nump;
    //marcas de grafica Energia
    tft.setTextSize(0.5);
    tft.setTextColor(RED);
    tft.setCursor(1,300-bg*(ru+1));
    recta=300-(300-bg*(ru+1));
    tft.print(int(ming+ru*mg));//
bg=0.0;
recta=0;
    //marcas de grafica NP, número de pruebas
    tft.setTextSize(1);
    tft.setTextColor(RED);
    tft.setCursor(20+dist*(ru+1),310);//
    tft.print(ru+1);//
}
for(int ra=0;ra<nump;ra++){
    bg=200/nump;
    mg=(maxg-ming)/nump;
    xg=(((ra+1)*dist)+20);
    yg=(300-bg)-bg*((arraye[ra]-ming)/mg);
    tft.fillCircle(xg,yg,2.5, RED);//dibuja los puntos de la grafica
    if(ra+1!=nump){

```



```

tft.drawLine(xg,yg,xg+dist,(300-bg)-bg*((arraye[ra+1]-ming)/mg),BLUE);}
arraye[ra+1]
}
mg=(arraye[nump-1]-arraye[0])/(nump-1);
bg=arraye[0]-(1*mg);
tft.setTextSize(1);
tft.setTextColor(BLUE);
tft.setCursor(20,350);
tft.print("y="+String(mg)+"x "+String(bg));
//para escribir la ecuación de la recta
//para volver al menú de número de pruebas, opción volver menú
if ((ypos >= 0)&&(ypos<=30)&&(xpos>=200)&&(xpos<=240)) {
// press the bottom of the screen to erase
tft.fillRect(0, 0, tft.width(), tft.height(), BLACK);
show_tft();
ang=0;
cont=0;
energia=0;
temp=0.0;
for(int c=0;c<=conp;c++){ arraye[c]=0.0;}
ang=0;
cont=0;
energia=0;
temp=0.0;
mayor=0.0;
cservo=0;
//for(int c=0;c<=conp;c++){ arraye[c]=0.0;}
conp=0;
ci=0;
conp=0;
media=0.0;

```


BIBLIOGRAFÍA

- [1] Universidad tecnológica de Pereira (2012). Propiedades mecánicas de los materiales. Obtenido de la red el día 02 de Mayo de 2017, de la dirección URL: <http://blog.utp.edu.co/metalografia/2-propiedades-mecanicas-de-los-materiales/>
- [2] Universidad de Oviedo (ND). Introducción a los materiales. Obtenido de la red el día 02 de Mayo de 2017, de la dirección URL: <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Tema1.Introduccion.pdf>
- [3] Universidad de Oviedo (ND). Resistencia de polímeros. Obtenido de la red el día 02 de Mayo de 2017, de la dirección URL: <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion14.ResistenciaPolimeros.pdf>
- [4] Universidad de Oviedo (ND). Resistencia de polímeros. Imagen obtenida de la red el día 02 de Mayo de 2017, de la dirección URL: <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion14.ResistenciaPolimeros.pdf>
- [5] Castillo Pérez Edgar Leonardo, Romo Uribe Ángel. (2011). Diseño y construcción de máquina para prueba de impacto en polímeros. Obtenido de la red el día 22 de Febrero de 2016, de la dirección URL: http://somim.org.mx/articulos2010/memorias/memorias2011/pdfs/A1/A1_25.pdf
- [6] Castillo Pérez Edgar Leonardo, Romo Uribe Ángel. (2011). Diseño y construcción de máquina para prueba de impacto en polímeros. Obtenido de la red el día 22 de Febrero de 2016, de la dirección URL: http://somim.org.mx/articulos2010/memorias/memorias2011/pdfs/A1/A1_25.pdf
- [7] Ortega. Y (2006). Prueba de impacto ensayo Charpy. Obtenido de la red el día 25 de Febrero de 2016, de la dirección URL: http://rmf.smf.mx/pdf/rmf-e/52/1/52_1_51.pdf

[8] García González, Anthony. (2013). Guía básica de Arduino. Obtenido de la red el día 08 de Marzo de 2016, de la dirección URL: <http://panamahitek.com/guia-de-arduino-para-principiantes/>

[9] Dynamoelectronics. (2016). LCD TFT táctil 2.8". Obtenido de la red el día 08 de Marzo de 2016, de la dirección URL: http://www.dynamoelectronics.com/index.php?option=com_virtuemart&page=shop.product_details&flypage=dynamo.tpl&category_id=137&product_id=1049&Itemid=58

[10] Universidad de Valladolid. (2016). Sensores. Obtenido de la red el día 08 de Marzo de 2016, de la dirección URL: <http://www.isa.cie.uva.es/~maria/sensores.pdf>

[11] Definiconabc. (2016). Definición de sensor. Obtenido de la red el día 08 de Marzo de 2016, de la dirección URL: <http://www.definicionabc.com/motor/sensor.php>

[12] González de la Rosa, Juan J. (ND). Transductores de desplazamiento angular. Obtenido de la red el día 08 de Marzo de 2016, de la dirección URL: http://www2.uca.es/grup-invest/instrument_electro/ppjjgdr/Electronics_Instrum/Electronics_Instrum_Files/temas/T14_desang.PDF

[13] Universidad nacional experimental del Táchira. (ND). Sensores. Obtenido de la red el día 08 de Marzo de 2016, de la dirección URL: <http://www.unet.edu.ve/~ielectro/sensores.pdf>

[14] ELECTONILAB (2014). Uso del driver L298N para motores DC. Obtenido de la red el día 02 de Mayo de 2017, de la dirección URL: <https://electronilab.co/tutoriales/tutorial-de-uso-driver-dual-l298n-para-motores-dc-y-paso-a-paso-con-arduino/>

[15] Electronica-electronics (2017). Fuentes de alimentación. Obtenido de la red el día 02 de Mayo de 2017, de la dirección URL: <https://electronica-electronics.com/fuentes/>

[16] Ayala Lizcano, Miguel A. y Castro Villarreal, Oscar E. CONSTRUCCIÓN de una máquina PARA AUTOMATIZAR ENSAYOS DE FATIGA EN MATERIALES METÁLICOS POR FLEXIÓN CANTILEVER. Bucaramanga 2008, tesis de grado (Ingeniería Mecatrónica). Universidad Autónoma de Bucaramanga. Facultad de Ingeniería Mecatrónica. Disponible en CD en la biblioteca de la Universidad Autónoma de Bucaramanga.

[17] Castillo Pérez Edgar Leonardo, Romo Uribe Ángel. (2011). Diseño y construcción de máquina para prueba de impacto en polímeros. Obtenido de la red el día 22 de Febrero de 2016, de la dirección URL: http://somim.org.mx/articulos2010/memorias/memorias2011/pdfs/A1/A1_25.pdf

[18] Max.book118. (ND). Norma ASTM 6110-04. Obtenido de la red el día 29 de Marzo de 2016, de la dirección URL: <http://max.book118.com/html/2015/0513/16894258.shtm>

[19] Soporte de la muestra, nariz de golpe y probeta. Imagen obtenida el 29 de Marzo de 2016, de la dirección URL: <http://max.book118.com/html/2015/0513/16894258.shtm>

[20] Probeta para prueba de impacto para polímeros, establecida por la norma ASTM D6110-04. Imagen obtenida el 29 de Marzo de 2016, de la dirección URL: <http://max.book118.com/html/2015/0513/16894258.shtm>

[21] Aceros Otero. (ND). Planchas de acero carbono ASTM A36. Obtenido de la red el día 02 de Mayo de 2016, de la dirección URL: http://www.acerosotero.cl/planchas_acero_carbono_astm_a36.html

[22] Aceros SISA. (2012). Acero SISA D2, acero para trabajo en frio. Obtenido de la red el día 02 de Mayo de 2016, de la dirección URL: <http://www.sisa1.com.mx/pdf/Acero%20SISA%20D2.pdf>

[23] Jan Mayén Chaires, José Ángel Segura, Sergio A. Serna Barquera, Arturo Molina Ocampo, Osvaldo Flores Cedillo, Bernardo Campillo Illianes. (2010). Evaluación de propiedades mecánicas de dos aceros grado herramienta AISI-O1, AISID2 y obtención de la concentración de esfuerzos en la geometría de mordazas de sujeción de especímenes compactos de tensión. Obtenido de la red el día 02 de Mayo de 2016, de la dirección URL: http://smcsyv.fis.cinvestav.mx/supyvac/23_S/SV23S1010.pdf

[24] SUMITEC SA. (ND). Acero grado maquinaria AISI 1045. Obtenido de la red el día 02 de Mayo de 2016, de la dirección URL: <http://www.sumiteccr.com/Aplicaciones/Articulos/pdfs/AISI%201045.pdf>

[25] García González, Anthony. (2013). Arduino Mega: Características, Capacidades. Obtenido de la red el día 02 de Mayo de 2016, de la dirección URL: <https://panamahitek.com/arduino-mega-caracteristicas-capacidades-y-donde-conseguirlo-en-panama/>

[26] VISTRONICA. (ND). Motorreductor con Caja Reductora 4632 12V 6RPM 30Kg.cm. Imagen obtenida de la red el día 02 de Febrero de 2017, de la dirección URL: <https://www.vistronica.com/robotica/motores/motorreductores/motorreductor-con-caja-reductora-4632-12v-6rpm-30kgcm-detail.html>