

**DISEÑO DE UNA MÁQUINA DIGITAL DE ENSAYOS  
A IMPACTO TIPO CHARPY, PARA LA  
CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES  
COMPUESTOS CON MATRIZ POLIMÉRICA**

**JAN KARLO SUAREZ LIZCANO**

**PROGRAMA DE INGENIERIA MECANICA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA,  
MECATRONICA E INDUSTRIAL  
FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURAS**



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**  
PAMPLONA, septiembre 9 de 2021

# **DISEÑO DE UNA MÁQUINA DIGITAL DE ENSAYOS A IMPACTO TIPO CHARPY, PARA LA CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS CON MATRIZ POLIMÉRICA**

**JAN KARLO SUAREZ LIZCANO**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de  
INGENIERO MECÁNICO**

**Director:**  
**JORGE ANTONIO VELASCO PARRA**  
Ingeniero Mecánico  
**Email:**  
[antonio.velasco@unipamplona.edu.co](mailto:antonio.velasco@unipamplona.edu.co)

**Codirector:**  
**EFRAIN ANDRES RODRIGUEZ**  
PhD. (c) M.Sc. Sistemas Mecatrónicos  
**Email:**  
[efrain.andres@unidesc.edu.br](mailto:efrain.andres@unidesc.edu.br)

**PROGRAMA DE INGENIERIA MECANICA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA,  
MECATRONICA E INDUSTRIAL  
FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURAS  
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**

Pamplona, septiembre 9 de 2021

## DEDICATORIA

*Este trabajo está dedicado a mis padres Juan Carlos Suarez, Tilcia Lizcano y a mi hermanita Jansy, el amor, el apoyo incondicional y la confianza que ponen en mí se ve reflejado en cada uno de mis logros, nada de esto sería posible sin ellos, son mi orgullo, mi ejemplo y mi motivación, siempre estos logros serán para ellos y por ellos. Los amo*

*A Natalia, mi compañera de aventuras por más de 7 años, por entregarme su amor, por estar ahí siempre incondicional, por ayudarme a ser una mejor persona día a día, por preocuparse por mi bienestar y mi felicidad, este logro es también para ella, es el comienzo del futuro que queremos vivir. Gracias mi amor*

*A mi familia, a la familia de mi novia que me acogió y me brindó su apoyo, a mis amigos por los consejos y la buena energía, a Dios y a mis seres queridos que ya no están.*

*A mis directores de tesis, Jorge Antonio Velasco Parra y Efraín Andrés Rodríguez Gasca, por su calidad humana, por siempre atenderme con excelente actitud y energía y por el esfuerzo que le imprimieron desinteresadamente a la realización de este trabajo.*

*Finalmente, este trabajo está dedicado a mis profesores, a mis tutores de tesis y a mis compañeros de carrera, por el crecimiento profesional y personal, por compartir su tiempo, sus conocimientos y sus historias de vida.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*A mis padres y a mi hermanita, por todo lo que soy, sin ellos nada de lo que hago tendría un sentido o razón de ser, este logro y los logros que vienen son gracias a ellos, dedicare mi vida a hacerlos felices.*

*A mi novia por compartir conmigo durante este camino siendo mi apoyo y mi luz, también a su familia por el aprecio que me demuestran y el apoyo.*

*A mis familiares por sus consejos, por el apoyo y por creer en mí.*

*A mis tutores, Jorge Antonio Velasco Parra y Efraín Andrés Rodríguez Gasca, por su acompañamiento, por su gran aporte a la realización de este trabajo, por la orientación y por el tiempo invertido en reuniones y asesorías.*

*A la Universidad de Pamplona por permitirme ser parte de este proceso.*

## TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN</b> .....	<b>11</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>13</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>16</b>
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
<b>3. ESTADO DEL ARTE</b> .....	<b>17</b>
3.1 MARCO TEORICO .....	17
3.1.1 Materiales Compuestos.....	17
3.1.2 Materiales compuestos con matriz polimérica.....	20
3.1.3 Caracterización de materiales .....	20
3.1.4 Ensayos a impacto para caracterizar materiales.....	21
3.1.5 Máquina de ensayo de impacto Charpy .....	22
3.1.6 Norma ASTM D6110 .....	22
3.1.7 Elementos que componen el péndulo .....	23
3.1.8 Método de elementos finitos .....	27
3.1.9 ANSYS.....	28
3.2 MARCO CONCEPTUAL.....	29
3.2.1 Tenacidad .....	29
3.2.2 ley de la conservación de la energía.....	29
3.2.3 Energía potencial gravitacional .....	30
3.2.4 Energía cinética.....	30
3.2.5 Péndulo Simple .....	31
3.2.6 Fuerza dinámica.....	33
3.2.7 Coeficiente dinámico .....	33
3.3 ANTECEDENTES.....	34
<b>4. METODOLOGIA</b> .....	<b>37</b>
4.1 PLANEACIÓN.....	37
4.1.1 Identificación de las necesidades.....	37
4.1.2 Especificaciones del equipo .....	37
4.2 DESARROLLO DEL CONCEPTO .....	38
4.2.1 Generación de conceptos .....	40

4.2.2	Selección del concepto .....	49
4.3	DISEÑO DE DETALLE .....	49
4.3.1	Diseño Mecánico.....	49
4.3.2	Automatización.....	79
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS Y ANÁLISIS.....</b>	<b>91</b>
5.1	DISEÑO MECÁNICO.....	91
5.1.1	Péndulo de 10 J .....	91
5.1.2	Péndulo de 5 J .....	97
5.1.3	Eje de la masa móvil .....	104
5.1.4	Columnas .....	106
5.1.5	Yunque.....	108
5.2	AUTOMATIZACIÓN.....	111
5.2.1	Funcionamiento del programa.....	111
5.3	MODELO 3D.....	117
	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>118</b>
	<b>RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....</b>	<b>120</b>
	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>121</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Ventajas y desventajas de un eje auxiliar para posicionar el péndulo.....	43
Tabla 2. Ventajas y desventajas de la implementación de un embrague.....	44
Tabla 3. Ventajas y desventajas de un sensor de temperatura LM35. ....	45
Tabla 4. Ventajas y desventajas de un Sensor infrarrojo MLX90614 GY-906.....	46
Tabla 5. Ventajas y desventajas de un Encóder.....	47
Tabla 6. Ventajas y desventajas de un sistema de manecilla. ....	48
Tabla 7. Ventajas y desventajas de presentar los datos en computador.....	48
Tabla 8. Combinación de conceptos.....	49
Tabla 9. Propiedades de la fibra de vidrio tipo S. ....	55
Tabla 10. Propiedades del Acero AISI 1045.....	57
Tabla 11. Propiedades del Acero AISI 4340.....	61
Tabla 12. Propiedades de la fibra de vidrio tipo E. ....	64
Tabla 13. Propiedades del Acero AISI 1020.....	72
Tabla 14. Componentes electrónicos y su función.....	80

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Formas físicas posibles de las fases incrustadas en los materiales compuestos.....	18
Figura 2. Orientación de las fibras en un material compuesto .....	19
Figura 3. Péndulo Charpy simple.....	24
Figura 4. Esquema del soporte de las probetas.....	26
Figura 5. Dimensiones de la probeta .....	27
Figura 6. Análisis del péndulo simple.....	31
Figura 7. Esquema del método de generación de conceptos. ....	39
Figura 8. Caja negra del péndulo Charpy. ....	40
Figura 9. Diagrama funcional de la máquina Charpy. ....	41
Figura 10. Grupos de subfunciones de la máquina Charpy .....	42
Figura 11. Yunque de la máquina. ....	45
Figura 12. Sensor analógico LM35 .....	45
Figura 13. Sensor de temperatura infrarrojo MLX90614 GY906.....	46
Figura 14. Partes de la máquina .....	50
Figura 15. Condiciones de impacto.....	52
Figura 16. Sección transversal de la probeta.....	54
Figura 17. Condiciones del análisis estático estructural a la probeta.....	56
Figura 18. Grafica de Fuerza vs Factor de seguridad.....	56
Figura 19. Radio del borde de impacto del percutor. ....	57
Figura 20. Geometría del percutor del péndulo de 10J.....	58
Figura 21. Condiciones del análisis estático estructural al percutor del péndulo de 10J .....	59
Figura 22. CAD del martillo del péndulo de 10J.....	60
Figura 23. Condiciones del análisis estático estructural al martillo del péndulo de 10J .....	61
Figura 24. Geometría del vástago y la unión del péndulo de 10J .....	62
Figura 25. Condiciones del análisis estático estructural al vástago y la unión del péndulo de 10J .....	63
Figura 26. Condiciones del análisis estático estructural a la probeta de fibra de vidrio tipo E. ....	65
Figura 27. Grafica de Fuerza vs Factor de seguridad.....	66
Figura 28. Radio del borde de impacto del percutor. ....	67
Figura 29. Geometría del percutor del péndulo de 5J.....	67
Figura 30. Condiciones del análisis estático estructural al percutor del péndulo de 5J .....	68
Figura 31. Geometría del martillo del péndulo de 5J. ....	69
Figura 32. Condiciones del análisis estático estructural al martillo del péndulo de 5J. ....	70
Figura 33. Geometría del vástago y la unión del péndulo de 5J. ....	71
Figura 34. Condiciones del análisis estático estructural del vástago y la unión del péndulo de 5J. ....	72

Figura 35. Geometría del eje de la masa móvil.....	73
Figura 36. Condiciones del análisis estático estructural al eje de la masa móvil. ..	74
Figura 37. Geometría de las columnas de la máquina.....	75
Figura 38. Condiciones del análisis estático estructural a las columnas de la máquina. ....	76
Figura 39. Especificaciones para el diseño del yunque según la norma.....	77
Figura 40. Geometría del yunque de la máquina. ....	78
Figura 41. Condiciones del análisis estático estructural al yunque de la máquina.	79
Figura 42. Componentes de Automatización. ....	80
Figura 43. Motor nema 34.....	84
Figura 44. Encóder incremental rotativo .....	85
Figura 45. Sensor de temperatura infrarrojo MLX90614 GY906.....	85
Figura 46. Aduino Diecimila .....	87
Figura 47. Esquema de la programación del microcontrolador.....	87
Figura 48. Panel de control.....	88
Figura 49. Final de carrera de 13.5 mm.....	89
Figura 50. Diagrama esquemático conexiones eléctricas de control .....	89
Figura 51. Diagrama esquemático de conexiones eléctricas del termómetro infrarrojo y display LCD.....	90
Figura 52. Deformación del percutor del péndulo de 10J. ....	91
Figura 53. Esfuerzo equivalente del percutor del péndulo de 10J. ....	92
Figura 54. Factor de seguridad del percutor del péndulo de 10J.....	92
Figura 55. Deformación del martillo del péndulo de 10J. ....	93
Figura 56. Esfuerzo equivalente del martillo del péndulo de 10J. ....	94
Figura 57. Factor de seguridad del martillo del péndulo de 10J .....	94
Figura 58. Deformación del vástago del péndulo de 10J. ....	95
Figura 59. Esfuerzo equivalente del vástago del péndulo de 10J.....	96
Figura 60. Factor de seguridad del vástago del péndulo de 10J.....	96
Figura 61. Geometría del péndulo de 10J.....	97
Figura 62. Deformación del percutor del péndulo de 5J. ....	98
Figura 63. Esfuerzo equivalente del percutor del péndulo de 5J. ....	98
Figura 64. Factor de seguridad del percutor del péndulo de 5J.....	99
Figura 65. Deformación del martillo del péndulo de 5J. ....	100
Figura 66. Esfuerzo equivalente del martillo del péndulo de 5J.....	100
Figura 67. Factor de seguridad del martillo del péndulo de 5J. ....	101
Figura 68. Deformación del vástago del péndulo de 5J. ....	102
Figura 69. Esfuerzo equivalente del vástago del péndulo de 5J.....	102
Figura 70. Factor de seguridad del vástago del péndulo de 5J. ....	103
Figura 71. Geometría del péndulo de 5J.....	104
Figura 72. Deformación del eje de la masa móvil. ....	105
Figura 73. Esfuerzo equivalente del eje de la masa móvil. ....	105
Figura 74. Factor de seguridad del eje de la masa móvil.....	106
Figura 75. Deformación de las columnas.....	107
Figura 76. Esfuerzo equivalente en las columnas.....	107
Figura 77. Factor de seguridad de las columnas .....	108

Figura 78. Deformación del yunque.....	109
Figura 79. Esfuerzo equivalente del yunque.....	109
Figura 80. Factor de seguridad del yunque .....	110
Figura 81. Inicio del programa .....	111
Figura 82. Cálculo del área de impacto de la probeta.....	112
Figura 83. Activación del motor y el embrague .....	112
Figura 84. Péndulo en posición de inicio .....	113
Figura 85. Inicio de la prueba.....	114
Figura 86. Recolección de datos.....	115
Figura 87. Fin de la prueba .....	116
Figura 88. Vista frontal y lateral del equipo .....	117
Figura 89. Máquina de impacto tipo Charpy .....	117

## **RESUMEN**

Los péndulos de impacto tipo charpy son máquinas empleadas en el testeo de diversos materiales desde metales hasta polímeros y materiales compuestos, con el fin de identificar las propiedades mecánicas a impacto que estos tienen, este dispositivo consiste como su nombre lo indica de un péndulo que se eleva a una altura previamente establecida y luego se deja caer libremente para posteriormente impactar una probeta normalizada del material a probar. En este proyecto se desarrolla el diseño y la automatización de una máquina de impacto tipo charpy enfocada principalmente a materiales compuestos con matriz polimérica. Dicho diseño se realiza teniendo en cuenta el proceso de desarrollo de un producto mecatrónico, primero se desarrolla el concepto del equipo teniendo en cuenta la norma ASTM 6110 e implementando el método de cinco pasos propuesto por Ulrich y Eppinger, obteniendo una descripción aproximada de la tecnología, principios de operación y forma del producto, posterior a esto, mediante un análisis teórico y con ayuda de software se realiza un modelo 3D el cual es simulado y puesto a prueba mediante el método de elementos finitos usando el software para ingeniería asistida por computadora ANSYS. Una vez se tienen las dimensiones óptimas de la máquina se procede a la selección de las partes de automatización con su respectiva programación y su montaje en el modelo 3D.

Palabras clave: Péndulo Charpy, Materiales compuestos, Modelo 3D, Elementos finitos.

## **Abstract**

The charpy pendulum impact testers are machines used in the testing of various materials from metals to polymers and composites, in order to identify the mechanical properties to impact that these have, this device consists as its name suggests of a pendulum that rises to a previously established height and then is allowed to fall freely and then impact a standardized specimen of the material to test. This project develops the design and automation of a charpy impact machine focused mainly on composite materials with polymeric matrix. This design is carried out taking into account the development process of a mechatronic product, first the concept of the equipment is developed taking into account the ASTM 6110 standard and implementing the five-step method proposed by Ulrich and Eppinger, obtaining an approximate description of the technology, principles of operation and shape of the product, after this, through a theoretical analysis and with the help of software a 3D model is made which is simulated and tested by the finite element method using the software for computer aided engineering ANSYS. Once the optimal dimensions of the machine are obtained, we proceed to the selection of the automation parts with their respective programming and assembly in the 3D model.

Keywords: Charpy Pendulum, Composite materials, 3D Model, Finite Elements.

## Lista de símbolos

Símbolo	Termino	Unidad SI
$E_{mec}$	Energía mecánica	$J$
$E_c$	Energía cinética	$J$
$E_p$	Energía potencial	$J$
$E_{pg}$	Energía potencial gravitacional	$J$
$m$	Masa	$kg$
$g$	Gravedad	$m/s^2$
$h$	Altura	$m$
$v$	Velocidad	$m/s$
$W$	Peso	$N$
$\theta$	Angulo inicial	$rad$
$\theta'$	Angulo final	$rad$
$F_i$	Fuerza dinámica	$N$
$k_d$	Coefficiente dinámico	
$D_{max}$	Deflexión máxima	$m$
$h_c$	Altura de caída del péndulo	$m$
$\eta$	Factor de corrección	
$h_T$	Altura total	$m$
$L_p$	Longitud de luz de la probeta	$m$
$E$	Coefficiente de elasticidad	$Gpa$
$I$	Momento de inercia	$m^4$
$w$	Velocidad angular	$rad/s$
$T$	Torque	$N \cdot m$
$\alpha$	Aceleración angular	$rad/s^2$
$P_m$	Potencia del motor	$hp$

## 1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico está marcado por el tipo de materiales que se usan en ingeniería. La selección del material correcto se ha convertido en un factor crucial para determinar el éxito en cualquier proyecto, las aplicaciones ingenieriles cada vez exigen una gama más amplia de propiedades y características en los materiales. Para 1960, la mayoría de los materiales avanzados para el uso en ingeniería se asociaban a los resultantes de los procesos de metalurgia [1]. La industria del acero alrededor del mundo está disminuyendo su relevancia en comparación con los materiales compuestos debido a ventajas que estos brindan en sus propiedades, entre ellas resaltan un aumento de la resistencia en relación al peso, la densidad, la fatiga, la resistencia a la corrosión y la alta resistencia dieléctrica [2].

Al momento de caracterizar estos materiales compuestos los principales ensayos que se utilizan para determinar propiedades mecánicas son: tracción, flexión y compresión, y al analizar estas propiedades se está dejando a un lado la resistencia al impacto, al no tener en cuenta este factor al momento de escoger un material, ha producido grandes pérdidas, fallas catastróficas renombradas como el buque Liberty, el cual se fracturo antes de ser puesto en servicio [3]. En función a esta necesidad entra a formar parte el ensayo Charpy con el cual se puede establecer la resistencia al impacto y tenacidad a materiales metálicos, poliméricos, así como los materiales compuestos.

El presente trabajo corresponde al diseño de los componentes mecánicos y selección de los elementos eléctricos óptimos para la implementación de un Péndulo Charpy, destinado a realizar ensayos de impacto en materiales compuestos con matriz polimérica. En el presente trabajo se implementa parte del proceso plasmado en el libro de Karl Ulrick y Steven Eppinger, "*Diseño y desarrollo de productos*", como guía y con el fin de exponer dicho proceso para su futura implementación en trabajos relacionados. Inicialmente se identificaron las

necesidades que existían por las cuales diseñar la máquina así como las especificaciones de la misma, para luego generar conceptos de lo que sería la máquina y basándose en un análisis de estos poder seleccionar el concepto más idóneo, una vez elegido el concepto se procedió a desarrollar el diseño mecánico del equipo de acuerdo a los parámetros establecidos por la norma ASTM D6110 e incluyendo un análisis estructural de las piezas usando software de modelado 3D y simulación, con el fin de avalar las geometrías propuestas. Una vez culminado el proceso de diseño mecánico y basándose en el concepto previamente elegido, se seleccionó el conjunto de elementos de automatización del equipo y se desarrolló y programo un circuito electrónico con el fin de automatizar el proceso de toma de datos y de ejecución de las pruebas.

Por otra parte, es de vital importancia para la Universidad de Pamplona como institución, en búsqueda de la acreditación institucional de alta calidad, contar con todos los elementos necesarios para brindar un servicio óptimo, tanto a los estudiantes que se capacitan en este centro de formación, como a las industrias o particulares que así lo requieran.

El laboratorio de materiales está ubicado en la primera planta del complejo científico y tecnológico Simón Bolívar del campus principal de la Universidad de Pamplona y cuenta con equipos para la realización de ensayos de tracción y compresión, metalografía, análisis de aceites, ensayo de dureza y mufla para tratamientos térmicos. En este laboratorio SB-102 se imparten 10 clases teórico-prácticas a la semana a estudiantes de cinco carreras. Adicionalmente, este laboratorio es utilizado para prácticas extra y sirve como soporte fundamental para el grupo de investigación en Ingeniería Mecánica de la Universidad de Pamplona, GIMUP, que cuenta con un alto reconocimiento por el nivel de sus investigaciones y así mismo cuenta con una línea de investigación en materiales y procesos de manufactura, el cual requiere de una máquina de impacto para realizar la caracterización mecánica de diferentes materiales. Realizar esta prueba complementaria los resultados obtenidos en muchas investigaciones realizadas.

Estudiantes, investigadores y particulares se verán beneficiados, por este motivo se hace necesario tener una máquina de impacto, ya que esta se encarga de entregar resultados a pruebas claves realizadas a diferentes materiales, Por otra parte, dicha máquina es irremplazable al momento de ejecutar el ensayo de tenacidad, debido a su construcción y funcionamiento. Este ensayo cubre además una amplia gama de materiales para su estudio, entre ellos los materiales compuestos.

Con la realización de este proyecto se busca beneficiar de igual forma a la institución en la calidad del aprendizaje de sus estudiantes y en los servicios que pueda ofrecer a las industrias y comunidad en general, además de amortiguar económicamente, ya que la adquisición de dicha maquinaria requiere de una mayor inversión en comparación con el diseño, modelado y automatización mediante este proyecto.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Diseñar una máquina digital de ensayos a impacto tipo Charpy, para la caracterización de materiales compuestos con matriz polimérica.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Aplicar metodología de desarrollo de producto mecatrónico como modelo de referencia para el diseño de la máquina.
- Construir un modelo preliminar 3D con ayuda de herramientas CAD y CAE.
- Desarrollar un sistema electrónico programable para adquisición de datos de los ensayos de impacto.

### 3. ESTADO DEL ARTE

#### 3.1 MARCO TEÓRICO

##### 3.1.1 Materiales Compuestos

Un material compuesto es un sistema de materiales compuesto por dos o más fases distintas físicamente cuya combinación produce propiedades agregadas diferentes de las de sus componentes. En ciertos aspectos, los compuestos son los materiales más interesantes de la ingeniería debido a que su estructura es más compleja que la de los demás tipos. El interés tecnológico y comercial de los materiales compuestos proviene del hecho de que sus propiedades no solo son distintas de las de sus componentes, sino que con frecuencia son mucho mejores.[4] En el desarrollo de nuevos materiales, los compuestos forman parte esencial en la consecución de nuevos campos de acción, donde la combinación de las propiedades del refuerzo y la matriz son parte fundamental propiciando el estudio de nuevos materiales de refuerzo que generen mayor resistencia, disminuyendo del peso y bajando los costos de producción.[5]

##### ❖ Clasificación de los materiales compuestos

En cuanto a materiales compuestos existe una clasificación de materiales compuestos en función de la naturaleza de la matriz[6]:

- **Compuestos de matriz polimérica:** son los más comunes. También se los conoce como polímeros (o plásticos) reforzados con fibras. La matriz es un polímero y una variedad de fibras, tales como las de vidrio, las de carbono o las aramídicas, se utilizan como refuerzo.
- **Compuestos de matriz metálica:** se utilizan cada vez más en la industria automotriz. Estos materiales están formados por metales “livianos” como el aluminio como matriz y fibras de refuerzo como las de carburo de silicio.

- **Compuestos de matriz cerámica:** se utilizan en aplicaciones de alta temperatura. Estos materiales están formados por una matriz cerámica y un refuerzo de fibras cortas, o whiskers de carburo de silicio o nitruro de boro.

De acuerdo a la forma que posea el refuerzo, es posible clasificar a los materiales compuestos, Es importante entender que el papel jugado por la fase secundaria es reforzar a la matriz. Lo más común es que la fase incrustada tenga una de las formas que se observan en la siguiente ilustración: a) fibras, b) partículas, c) hojuelas.



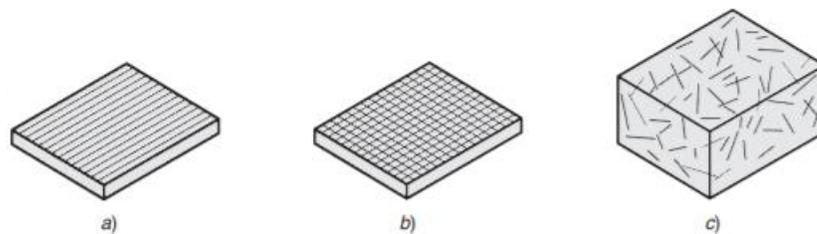
**Figura 1.** Formas físicas posibles de las fases incrustadas en los materiales compuestos.  
Fuente: [4].

- **Materiales compuestos reforzados con fibras:** La mayoría de los compuestos reforzados con fibra consiguen una mejor resistencia a la fatiga, mejor rigidez y una mejor relación resistencia-peso, al incorporar fibras resistentes y rígidas, aunque frágiles, en una matriz más blanda y dúctil. El material de la matriz transmite la fuerza a las fibras, las cuales soportan la mayor parte de la fuerza aplicada. La resistencia del compuesto puede resultar alta a temperatura ambiente y a temperaturas elevadas. Se emplean muchos tipos de materiales de refuerzo. Por ejemplo, en las estructuras de concreto se introducen varillas de acero de refuerzo. Las fibras de vidrio en una matriz polimérica producen un material para aplicaciones en el transporte y la industria aeroespacial.[6]

La orientación de las fibras es otro factor en las piezas compuestas. Se distinguen tres casos:

- a) se representa el refuerzo unidimensional, en el que la resistencia y rigidez máximas se obtienen en la dirección de la fibra.

- b) se muestra el refuerzo plano, que en ciertos casos es en forma de tejido bidimensional.
- c) se muestra la orientación al azar o tridimensional, en la que el material compuesto tiende a poseer propiedades isotrópicas.



**Figura 2.** Orientación de las fibras en un material compuesto  
Fuente: [4].

- **Materiales compuestos reforzados con partículas:** El tamaño de las partículas varía entre microscópico y macroscópico. La distribución de las partículas en la matriz del compuesto es al azar, y por ello la resistencia y otras propiedades del material por lo general son isotrópicas. El mecanismo para dar resistencia depende del tamaño de las partículas [4]. En general, el refuerzo con partículas se utiliza para incrementar la resistencia y rigidez mecánicas, pero también, para mejorar el comportamiento a altas temperaturas o la resistencia a la abrasión.[6]
- **Materiales compuestos reforzados con hojuelas:** Las *hojuelas* son básicamente partículas bidimensionales, plaquetas planas y pequeñas. Dos ejemplos de esta forma son los minerales de mica y talco, que se usan como agentes reforzadores en los plásticos. Por lo general son materiales de costo menor que el de los polímeros, y dan resistencia y rigidez a los compuestos de plástico moldeado. Por lo general, los tamaños de las plaquetas están en el rango de 0.01 a 1 mm en su sección transversal, con espesor de 0.001 a 0.005 mm.[4]

### 3.1.2 Materiales compuestos con matriz polimérica

El compuesto de polímero reforzado con fibra (FRP) es un material compuesto de fibras como refuerzo y polímero como matriz. Los materiales compuestos de FRP se desarrollaron principalmente para la industria de la aviación.[7] La tecnología de los compuestos poliméricos ha sido impulsada en gran medida por aplicaciones aeroespaciales y militares.[8] En 1944, los materiales compuestos de vidrio FRP (GFRP) se aplicaron por primera vez en la piel del fuselaje del avión de entrenamiento Vultee BT-15.[9] Estos materiales utilizan una resina a base de polímero como matriz y una variedad de partículas y fibras como vidrio, carbono y aramida como refuerzo. Los materiales de la matriz son polímeros termoendurecibles o termoplásticos. Las fibras de refuerzo son continuas o cortadas. En general, el procesamiento de compuestos poliméricos incluye la contracción del polímero y las fibras, la conformación, el calentamiento controlado y / o las reacciones y el enfriamiento.[8]

#### ❖ Ventajas de los compuestos con matriz polimérica

Los compuestos poliméricos son ampliamente usados, destacan por su facilidad de fabricación, bajo costo y buenas propiedades.[8] Además, tienen:

- Propiedades de alta resistencia específica (20-40% de ahorro de peso)
- Capacidad para fabricar propiedades mecánicas direccionales
- Excelente resistencia a la corrosión
- Excelente resistencia a la fatiga y a la fractura
- Alternativas de menor costo de herramientas
- Propiedades de expansión térmica más bajas

### 3.1.3 Caracterización de materiales

Cuando se manipulan materiales es muy importante conocer e identificar las diferentes características y propiedades mecánicas que éstos poseen. [10] El

estudio de los materiales tiene sentido desde el momento en el que se piensa que van a tener una función útil en la vida. Atendiendo a la función que va a tener un material, es necesario que éste posea una serie de propiedades que van a ser útiles para poder desempeñar dicha función de manera adecuada y duradera.[11] La medición y prueba de materiales abarcan propiedades desde mecánicas hasta eléctricas y térmicas; clases de materiales desde metales, semiconductores, aislantes, con cerámicas, polímeros y compuestos en algún punto intermedio; escalas desde atómicas hasta nano, micro, meso y macroscópicas; y tiempos que van desde picosegundos hasta años en la práctica, hasta eones en simulación.[12] ahora bien concretamente la caracterización de materiales consiste en la obtención de información acerca de un material bajo estudio a partir de la interacción de una señal con una porción de dicho material. Por tanto, toda caracterización de un material supone una agresión al mismo, es decir, una perturbación del mismo. El estudio de la respuesta del material a dicha perturbación nos permite conocer las propiedades o más concretamente, las peculiaridades del mismo.[11]

#### 3.1.4 Ensayos a impacto para caracterizar materiales

Los ensayos de impacto son test de corta duración que nos brindan información sobre el comportamiento de fallo de materiales o componentes sometidos a cargas breves y a temperaturas variables. Los ensayos de impacto están afectados por las condiciones externas que definen el ensayo, como puede ser la velocidad de aplicación de carga, tamaños y formas de las probetas, temperatura externa durante el ensayo, etc. Es por esto que pueden existir diferentes procedimientos para estimar la tenacidad de un material, como son, Charpy, Izod, tracción dinámica, torre de impacto, etc.[13] Los sistemas utilizados para ese tipo de ensayos son péndulos de impacto o máquinas de ensayos de caída libre. El mercado de componentes para mejorar la seguridad de los humanos avanza

notablemente debido a la investigación en nuevos materiales, así como su aplicación a nuevos ámbitos. [14]

### 3.1.5 Máquina de ensayo de impacto Charpy

El nombre de este ensayo se debe a su creador, el francés Augustin Georges Albert Charpy (1865-1945). Se trata de una máquina de ensayo muy simple desde el punto de vista mecánico, Sin embargo, a pesar de esa sencillez mecánica, con este instrumento se pueden diseñar varias pruebas de impacto donde se demuestra de forma rápida y didáctica, la influencia que tienen determinados factores en el comportamiento mecánico de los materiales.[15]

#### ❖ Generalidades del método de prueba

Una probeta con muesca es apoyada como una viga horizontal simple y se rompe por un solo giro del péndulo a medio camino con una línea de impacto entre los soportes y directamente opuesto a la muesca. Este método de prueba requiere que la muestra se rompa completamente. Para materiales resistentes el péndulo puede no tener la energía necesaria para completar la rotura de las fibras extremas y tirar la pieza o piezas rotas. Los resultados obtenidos a partir de probetas no rotas o de otros tipos de probetas parcialmente rotas se considerarán como una desviación de la norma y no deben ser reportados como un resultado estándar.[16]

### 3.1.6 Norma ASTM D6110

La norma describe los métodos estándar de prueba para determinación de la resistencia al impacto Charpy en materiales plásticos, así como en compuestos y maderas.

Los métodos de ensayo se utilizan para determinar la resistencia de los materiales a la rotura por choque flexional, indicando la energía extraída del péndulo tipo

martillo estandarizado, montado en máquinas estandarizadas, rompiendo probetas estándar con una oscilación del péndulo. Se requieren que las probetas se hagan con una muesca fresada, la muesca produce una concentración de esfuerzos que promueven una fractura quebradiza, más que una fractura dúctil. Los resultados de los métodos de ensayo se presentan en términos de energía absorbida por unidad de ancho de la probeta.[16]

### 3.1.7 Elementos que componen el péndulo

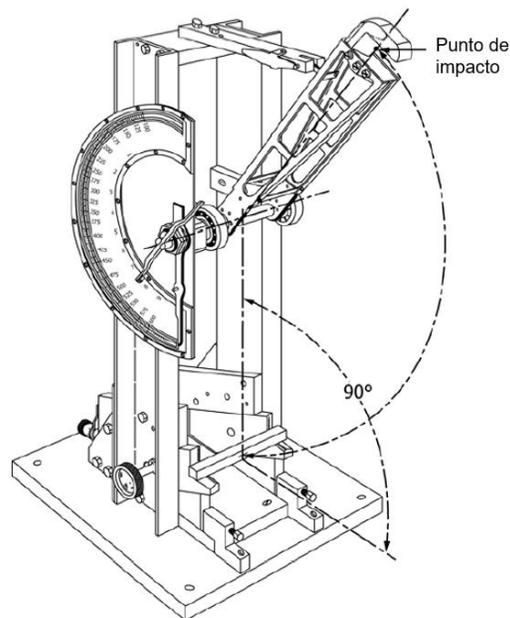
La máquina consistirá en una base maciza sobre la cual se montan un par de soportes para sostener la probeta y a la que está conectada, a través de un bastidor rígido y cojinetes, un martillo de péndulo con una energía inicial adecuada para su uso con la probeta a ensayar, además de un mecanismo de sujeción y liberación del péndulo y un mecanismo para indicar el exceso de energía que queda en el péndulo después de romper la probeta. El soporte de la probeta, el péndulo y el bastidor deben ser suficientemente rígidos para mantener el alineamiento correcto del borde de impacto y de la muestra, tanto en el momento del impacto como durante la propagación de la fractura, y para minimizar las pérdidas de energía debidas a la vibración. La base debe ser suficientemente maciza para que el impacto no haga que se mueva. La máquina debe ser diseñada y construida de tal manera que las pérdidas de energía debidas a la resistencia del aire del péndulo, la fricción en los cojinetes del péndulo, la fricción y la inercia en el mecanismo de posicionamiento se mantengan al mínimo.[16]

#### ❖ Péndulo

El péndulo simple consistirá en un brazo de uno o varios miembros con un cojinete en un extremo y un cabezal en el otro extremo, que contiene el martillo de impacto. Aunque una gran proporción de la masa del péndulo debe concentrarse en la cabeza, el brazo debe ser suficientemente rígido para mantener las

distancias adecuadas y las relaciones geométricas entre las partes de la máquina y la probeta y así minimizar las pérdidas de energía vibratoria que siempre se incluyen en el valor de impacto medido.

Según lo dicta la norma la longitud efectiva del péndulo estará comprendida entre 0,325 y 0,406 [m], de manera que la elevación requerida de la nariz de impacto puede obtenerse elevando el péndulo hasta un ángulo entre 60 y 30 grados por encima de la horizontal.



**Figura 3.** Péndulo Charpy simple.  
**Fuente:** [16].

#### ❖ Borde de impacto

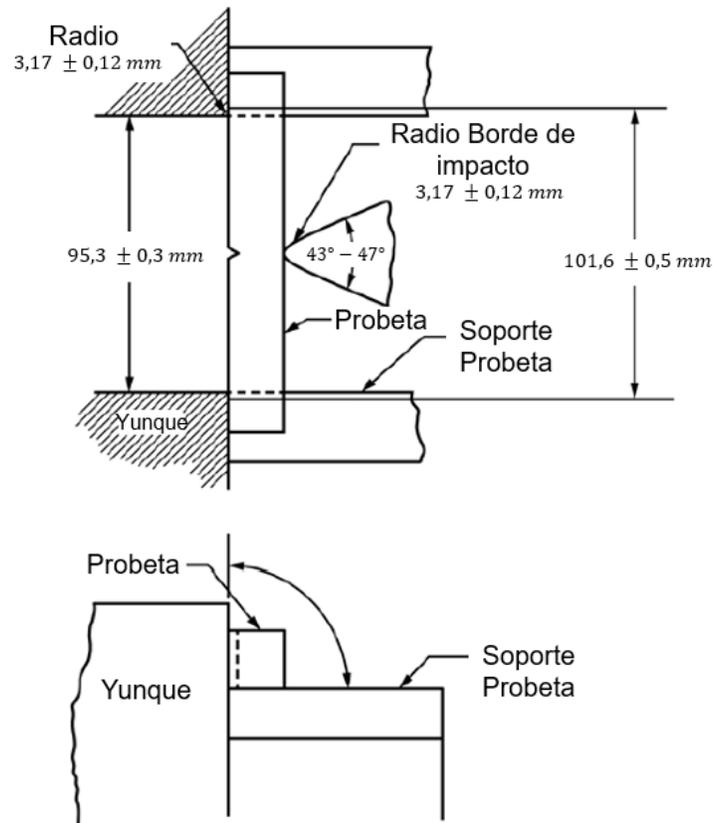
El borde de impacto del péndulo será de acero templado, con un ángulo de inclinación de  $45 \pm 2^\circ$  y redondeado a un radio de  $3,17 \pm 0,12$  [mm]. El péndulo debe estar alineado de tal manera que cuando esté en su posición de suspensión libre, el centro de percusión del péndulo se encuentre a 2,54 mm del centro de la línea de contacto realizada por la nariz de impacto sobre la cara de una probeta estándar de sección transversal cuadrada.[16]

#### ❖ Mecanismo de retención y liberación del péndulo

El mecanismo debe ser diseñado, construido y operado de manera que libere el péndulo sin impartir aceleración o vibración al péndulo. La posición del mecanismo de sujeción y liberación del péndulo deberá ser tal que la altura vertical de caída de la punta de impacto sea de  $610 \pm 2$  [mm]. Esto producirá una velocidad de la nariz del percutor en el momento del impacto de aproximadamente 3,46 m/s.[16]

#### ❖ Soporte de probetas

La probeta de prueba estará apoyada contra dos soportes rígidos en una posición tal que su centro de gravedad y el centro de la muesca se encuentre sobre la tangente al arco de desplazamiento del centro de percusión del péndulo dibujado en la posición de impacto. Los bordes de los soportes deberán ser redondeados a un radio de  $3,17 \pm 0,12$  [mm] y las líneas de contacto de los soportes con la muestra deberán estar a  $101,6 \pm 0,5$  [mm] entre sí como lo muestra la Fig. 12:



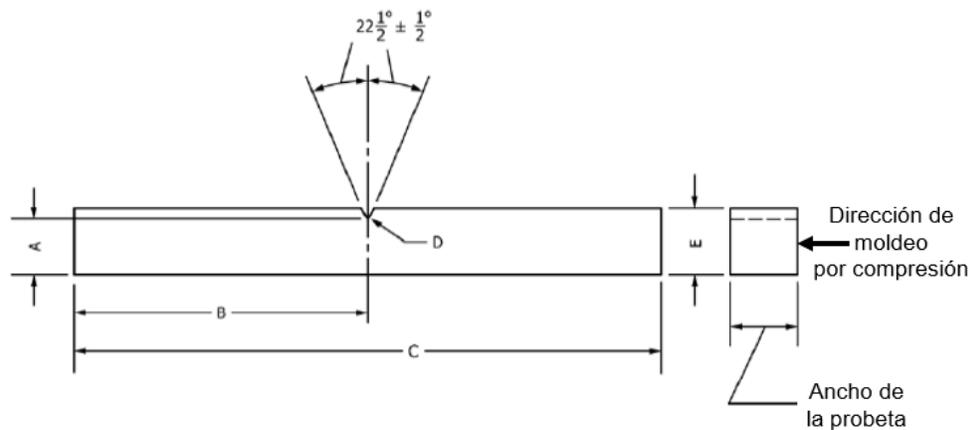
**Figura 4.**Esquema del soporte de las probetas.  
**Fuente:** [16].

❖ Indicador de exceso de energía

Deberán proporcionarse medios para determinar la energía que queda en el péndulo después de romper una muestra. Esto puede consistir en un puntero y un mecanismo de marcación que indican la altura de ascenso del péndulo más allá del punto de impacto en términos de energía extraída de ese péndulo específico. Opcionalmente, se puede usar una pantalla digital electrónica o un ordenador para medir la pérdida de energía e indicar la energía de ruptura de la muestra.[16]

❖ Probeta

Las probetas moldeadas deben tener un ancho de entre 3,00 y 12,7 mm. Utilice el ancho de la muestra según sea la especificación del material o según lo acordado entre el proveedor y el cliente.



	mm
A	$10.16 \pm 0.05$
B	63.5 max
C	127.0 max
	124.5 min
D	$0.25R \pm 0.05$
E	$12.70 \pm 0.15$

**Figura 5.** Dimensiones de la probeta  
Fuente: [16].

### 3.1.8 Método de elementos finitos

Modernamente, el método de los elementos finitos ha venido empleándose con éxito en el análisis de estructuras sometidas a cargas dinámicas y en particular a cargas de impacto.[17]

El método de elementos finitos es una herramienta de fácil acceso para el cálculo de estructuras complejas, evitando así la experimentación que aumenta considerablemente los costos y el trabajo asociado. El método en sí, constituye una forma de obtener resultados basados en las soluciones de las ecuaciones diferenciales que gobiernan el problema ingenieril que se está analizando.[18] En

general el método de elementos finitos consiste en tomar un cuerpo y subdividirlo en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos, las ecuaciones que rigen el comportamiento del cuerpo regirán también el comportamiento de cada elemento. De esta manera se puede pasar de un sistema continuo con infinitos grados de libertad que es gobernado por una ecuación diferencial o un sistema de ecuaciones diferenciales a un sistema con un número de grados de libertad finito.[19]

El MEF permite realizar un modelo matemático de cálculo del sistema real, más fácil y económico de modificar que un prototipo. Sin embargo, no deja de ser un método aproximado de cálculo debido a las hipótesis básicas del método. Los prototipos, por lo tanto, siguen siendo necesarios, pero en menor número, ya que el primero puede acercarse bastante más al diseño óptimo.[20]

### 3.1.9 ANSYS

ANSYS Inc. fundada en 1970 (Swanson Analysis Systems, Inc.), desarrolla y presta soporte a la ingeniería introduciendo nuevos métodos para conseguir productos y procesos de fabricación más innovadores – logrando una reducción tanto de los costes como del tiempo invertido hasta la comercialización del producto – con programas de elementos finitos destinados a la simulación, que predicen cómo funcionará y reaccionará determinado producto bajo un entorno real[19]

El método de los elementos finitos (MEF) ha adquirido con el uso de los ordenadores una gran importancia en la solución de problemas de ingeniería, física, etc., ya que permite resolver casos que hasta hace poco tiempo eran prácticamente imposibles de resolver por métodos matemáticos tradicionales. Esta circunstancia obligaba a realizar prototipos, ensayarlos e ir realizando mejoras de forma iterativa, lo que traía consigo un elevado coste tanto económico como en tiempo de desarrollo.[20]

## 3.2 MARCO CONCEPTUAL

### 3.2.1 Tenacidad

Es la propiedad que cuantifica la energía que es capaz de absorber un material luego de un impacto hasta que rompe, es decir hasta que alcanza la tensión de rotura. Los resultados pueden ser influenciados frente a imperfecciones que tenga el material en su constitución, dónde interviene la teoría de la mecánica de la fractura[14]

El impacto es importante en ingeniería porque representa una gran parte de las cargas dinámicas existentes en sistemas mecánicos[21]

### 3.2.2 ley de la conservación de la energía

Este principio afirma que en un sistema la energía no se crea ni se destruye, simplemente se transforma de una forma a otra, pero la cantidad total de energía permanece, por ejemplo: La energía mecánica en tal sistema se conserva: la suma de las energías cinética y potencial permanece constante.[22] Dicho concepto se puede representar en la siguiente ecuación:

$$\Delta E_{mec} = 0 \quad (1)$$

$$E_{cA} + E_{pA} = E_{cB} + E_{pB} \quad (2)$$

Donde;

$E_{mec}$ : Energía Mecánica

$E_c$ : Energía Cinética

$E_p$ : Energía Potencial

En aquellos casos, cuando resulta dificultosa la determinación de las fuerzas de inercia, como, por ejemplo, en el caso de las fuerzas de impacto, para el cálculo de las tensiones deformaciones dinámicas se recurre a la ley de conservación de la energía. [23]

### 3.2.3 Energía potencial gravitacional

Al levantar una roca, existe la posibilidad de que la fuerza de gravitación realice trabajo sobre ella, pero sólo si la roca se deja caer al suelo. Por ello, la energía asociada con la posición se llama energía potencial. Lo dicho sugiere que hay energía potencial asociada al peso de un cuerpo y a su altura sobre el suelo la energía potencial gravitacional. [24] Esta se expresa de la siguiente manera mediante la Ec. (3):

$$E_{pg} = mgh \quad (3)$$

Donde;

$E_{pg}$ : Energía potencial gravitacional

$m$ : Masa

$g$ : Gravedad

$h$ : Altura

### 3.2.4 Energía cinética

Es la energía que posee un cuerpo debido a su movimiento. Se la conoce como el trabajo necesario para acelerar un cuerpo de una masa establecida desde el reposo hasta la velocidad indicada. El cuerpo mantiene su energía cinética salvo que cambie su velocidad.[22] Se define con la Ec. (4) de la siguiente manera:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (4)$$

Donde;

$E_c$ : Energía Cinética

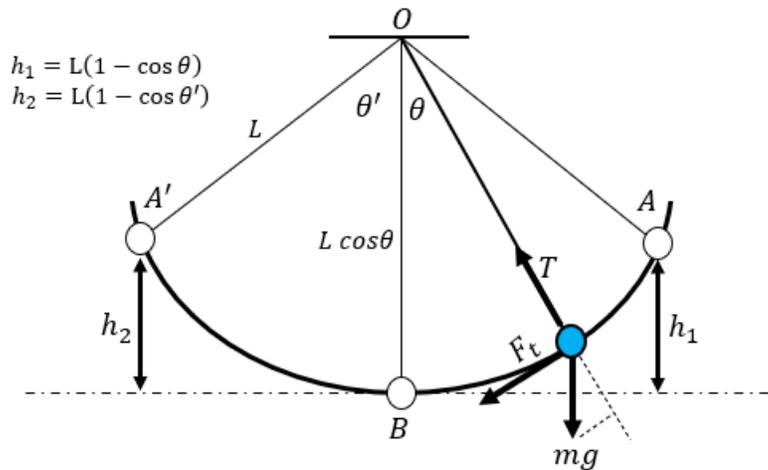
$m$ : Masa

$v$ : Velocidad

### 3.2.5 Péndulo Simple

Se define como una partícula de masa suspendida de un punto (O) por un hilo inextensible de longitud (L) y de masa despreciable.[24]

Según la ley de conservación de la energía, el péndulo posee solamente energía potencial cuando se encuentre en la posición inicial A, cuando el péndulo pasa por la posición de equilibrio en B, la energía potencial se transforma en energía cinética (se toma cero como referencia en B), como se indica en la siguiente ilustración:



**Figura 6.** Análisis del péndulo simple  
Fuente: Autor.

Por lo tanto, utilizando la ley de la conservación de la energía cuando sobre una partícula actúa una fuerza se establece la siguiente ecuación:

$$E_{CB} = E_{PA} \tag{5}$$

$$\frac{1}{2}m(v_2)^2 = mgh_1 \tag{6}$$

Despejando de la Ec. (6) se obtiene la velocidad

$$v_2 = \sqrt{2gh_1} \quad (7)$$

Por medio del análisis del péndulo simple mostrado en la ilustración, la altura es:

$$h_1 = L(1 - \cos \theta) \quad (8)$$

Donde;

$\theta$ : Ángulo inicial

$L$ : Distancia al centro de gravedad

Bajo el mismo criterio se calcula  $h_2$ , cuando el péndulo pasa por el punto B

$$h_2 = L(1 - \cos \theta') \quad (9)$$

Donde;

$\theta'$ : Ángulo final

$L$ : Distancia al centro de gravedad

Por tanto, la energía perdida por el péndulo, es la energía que tiene la masa antes de soltarla, menos la energía que tiene la masa cuando llega a la altura  $h_2$ , como lo indica la Ec. (10):

$$E_p = W(h_1 - h_2) \quad (10)$$

Remplazando las alturas se tiene:

$$E_p = W \cdot L((\cos \theta') - (\cos \theta)) \quad (11)$$

Donde;

$W$ : Peso

$L$ : Distancia al centro de gravedad

$\theta$ : Ángulo inicial

$\theta'$ : Ángulo final

### 3.2.6 Fuerza dinámica

La fuerza dinámica de impacto es la carga estática aplicada, amplificada  $n$  veces la cantidad de alargamiento estático producto de efectos dinámicos de impacto.[23] Y está representado por la Ec. (12):

$$F_i = K_d \cdot W \quad (12)$$

Donde;

$F_i$ : Fuerza dinámica

$K_d$ : Coeficiente dinámico

$W$ : Peso del péndulo

### 3.2.7 Coeficiente dinámico

La relación entre la respuesta dinámica de la estructura y la respuesta estática para la misma carga se la denomina coeficiente dinámico o factor dinámico de impacto y se representa con el símbolo  $K_d$ . Este factor representa la cantidad que el alargamiento estático se amplifica como consecuencia de los efectos dinámicos de la carga de impacto. [3] Se expresa con la Ec. (13):

$$K_d = \sqrt{\frac{2h_c}{D_{max}}} \quad (13)$$

Donde;

$K_d$ : Coeficiente dinámico

$D_{max}$ : Deflexión máxima

$h_c$ : Altura de caída del péndulo

### 3.3 ANTECEDENTES

En un trabajo conjunto de la Universidad Estatal de Amazonas (Brasil), el Instituto de Tecnología y Educación Galileo da Amazônia (Brasil) y la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas (Cuba), Realizaron el dimensionamiento de una máquina de ensayo de impacto tipo Charpy para la verificación de la tenacidad y la ductilidad de materiales como polímeros y maderas, basada en el principio de conservación de la energía y la norma ASTM E-23. El laboratorio de ensayos mecánicos de la Universidad Estatal de Amazonas (UEA) trabaja en tres líneas de investigación de construcciones de prototipos, que son: BAJA, Urutau Aerodesign e Jaraquí. Una de sus tareas es escoger los materiales adecuados para sus prototipos. Sin embargo, la UEA tiene limitaciones de máquinas para la realización de ensayos de fractura por falta de recursos, además de que los precios de estas máquinas comerciales son cada día más elevados. Para el diseño de la misma se tuvieron en cuenta las normas que reglamentan tales ensayos como la NBR NM 281-2 y la ASTM E-23. [25]

Los ingenieros mecatrónicos Brusil Andrade, María José Cifuentes Muñoz y Alexis Germán de la Universidad de las fuerzas armadas ESPE de Ecuador desarrollaron un trabajo que consistió en el diseño y construcción de los componentes mecánicos, así como la selección de los elementos eléctricos óptimos para la implementación de un Péndulo Charpy, destinado a realizar ensayos de impacto en polímeros. Inicialmente se realizó el diseño mecánico del equipo de acuerdo a los parámetros establecidos por la norma ASTM D6110 – 02, incluye el análisis estático por medio de software de los componentes mecánicos más importantes que conforman el péndulo Charpy. Diseñaron la base, las mordazas, el martillo y percutor, el brazo del péndulo, el eje de soporte y el sistema de elevación. A continuación, se analizó e implementó el sistema electrónico-informático que permitió el posicionamiento automático del péndulo y el manejo e interpretación de

los resultados mediante un HMI. Para esto se tomó en cuenta la secuencia de funcionamiento del ensayo y se acondicionaron las señales de los sensores que permiten la toma de datos del proceso. Una vez implementado el equipo se realizaron los ensayos de impacto en polímeros de material acrílico a temperatura ambiente y con los resultados obtenidos se efectuaron los respectivos análisis y comparaciones con base a la norma establecida. Lo que permitió a su vez la calibración del equipo [26].

Verônica S.Candido de la Facultad de Ingeniería de Materiales de la Universidad Federal de Pará (UFPA), y Noan Tonini Simonassi del Instituto Militar de Ingeniería (IME), Río de Janeiro, Brasil, investigaron las fibras extraídas del bagazo de la caña de azúcar como posible refuerzo para compuestos de matriz polimérica. El uso de estos compuestos en aplicaciones de ingeniería, asociadas con condiciones tales como armaduras balísticas, requiere información sobre la resistencia al impacto, para ello se realizaron pruebas de Charpy en muestras estándar ASTM de compuestos de matriz de poliéster, reforzados con 10%, 20% y 30% en volumen de fibras de bagazo de caña de azúcar continuas y alineadas, para evaluar la energía de impacto. Dentro de la desviación estándar, la energía de impacto absorbida compuesta aumentó con la fracción de volumen de la fibra de bagazo de caña de azúcar. Este rendimiento de dureza se encontró mediante microscopía electrónica de barrido asociado con la delaminación de fibra-matriz. [27]

Adnan Fazal y Kevin S. Fancey del departamento de Ingenierías de la Universidad de Hull en el Reino Unido, realizaron una investigación sobre un compuesto de matriz polimérica pretensado visco-elástico (VPPMC), este estudio investigó los mecanismos considerados responsables de mejorar la resistencia al impacto en este compuesto mediante la realización de pruebas de impacto Charpy en muestras unidireccionales de resina de fibra de poliéster de nylon, encontrando

entre sus principales resultados una mejora en la absorción de energía de impacto del pretensado generado visco-elásticamente y que esta mejora depende principalmente de los esfuerzos cortantes que activan la desunión (delaminación) de fibra-matriz mejorada con pretensado durante el proceso de impacto.[28]

Daniel Prada y Jonathan Rojas de la escuela de ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander, realizaron el desarrollo y análisis del comportamiento de una viga de perfil W12x40, simplemente apoyada y sometida a una carga uniformemente distribuida, resolviendo el modelo analítico o teórico y comparándolo con la solución numérica por el método de elementos finitos utilizando como apoyo el software de simulación ANSYS. Estableciendo como parámetro de comparación el valor de la deformación máxima obtenida por ambos métodos, logrando evidenciar que el error al realizar la comparación de los resultados obtenidos por la evaluación del método analítico y del método de los elementos finitos, aun cuando tiene un valor mayor al que se desearía (de cero), es una muestra de la robustez del método, y permite ver que es capaz de lograr muy buenas aproximaciones en cuanto a la obtención de resultados se refiere.[29]

En todas estas investigaciones se aprecia la importancia que tiene implementar el ensayo de impacto charpy en la caracterización de materiales, así mismo hacen evidente la fiabilidad y solidez del empleo de las herramientas de Diseño Asistido por Computadora (CAD) y el empleo de los métodos de Análisis por Elementos Finitos en el diseño y desarrollo de estructuras y piezas sometidas a cargas dinámicas y en particular a cargas de impacto. Estas experiencias internacionales recalcan el avance y los aportes de estos métodos al campo de la ingeniería en la última década.

## 4. METODOLOGIA

La metodología toma como guía el planteamiento por etapas presentado en el libro *Diseño y desarrollo de productos*, de Karl Ulrick y Steven Eppinger [30].

### 4.1 PLANEACIÓN

#### 4.1.1 Identificación de las necesidades

El laboratorio de materiales de la Universidad de Pamplona cuenta con equipos para la realización de ensayos de tracción y compresión, metalografía, análisis de aceites, ensayo de dureza y mufla para tratamientos térmicos, pero carece de una máquina de impacto, dicha máquina es irremplazable al momento de ejecutar el ensayo de tenacidad, debido a su construcción y funcionamiento, esta se encarga de entregar resultados a pruebas claves realizadas a diferentes materiales.

Se busca beneficiar a la institución en la calidad del aprendizaje de sus estudiantes y en los servicios que pueda ofrecer a las industrias y comunidad en general, además de amortiguar económicamente, ya que la adquisición de dicha maquinaria requiere de una mayor inversión en comparación de ser diseñada, modelada y automatizada mediante este proyecto.

#### 4.1.2 Especificaciones del equipo

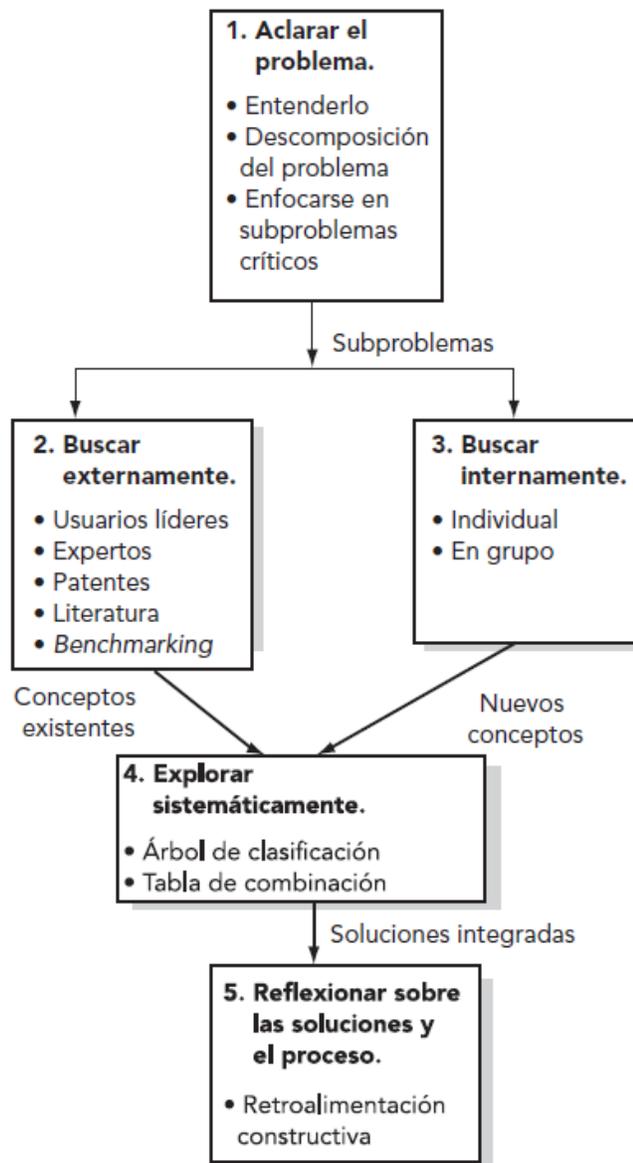
- Equipo diseñado de acuerdo con la norma ASTM D6110.
- Materiales de alta calidad.
- Panel de control fácil de operar.
- Toma de datos digital.
- Percutor intercambiable de fácil instalación.
- Yunque compatible con probetas de tamaño estándar y miniaturizadas completamente adaptable.
- Diseño moderno con alta estética.
- Estructura modular.

## 4.2 DESARROLLO DEL CONCEPTO

El concepto de un producto es una descripción aproximada de la tecnología, principios de operación y forma del producto. El grado en que un producto satisface a clientes y puede ser comercializado con éxito, depende en gran medida de la calidad del concepto básico.[30]

El método de generación de conceptos presentado por Ulrich y Eppinger consiste en cinco pasos:

1. *Aclarar el problema.* Entender el problema y descomponerlo en subproblemas más sencillos.
2. *Buscar externamente.* Reunir información de usuarios líderes, expertos, patentes, literatura publicada y productos relacionados.
3. *Buscar internamente.* Usar métodos individuales y de grupo para recuperar y adaptar el conocimiento del equipo.
4. *Explorar sistemáticamente.* Usar árboles de clasificación y tablas de combinación para organizar el pensamiento del equipo y sintetizar fragmentos de solución.
5. *Reflexionar sobre las soluciones y el proceso.* Identificar oportunidades para mejorar en las subsiguientes iteraciones o en proyectos futuros.



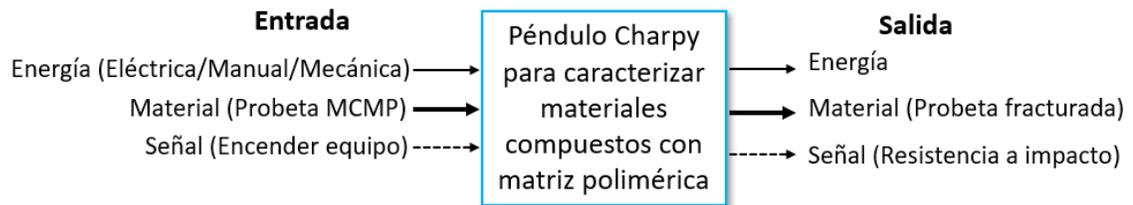
**Figura 7.** Esquema del método de generación de conceptos.  
Fuente: [30].

A pesar de la presentación lineal del proceso de generación de conceptos, es probable que se regrese varias veces a cada uno de los pasos del proceso, incluso que se intercalen. La iteración es particularmente común cuando se está desarrollando un producto.

#### 4.2.1 Generación de conceptos

Aclarar el problema consiste en desarrollar un entendimiento general y luego, si es necesario, descomponer el problema en subproblemas o subfunciones.

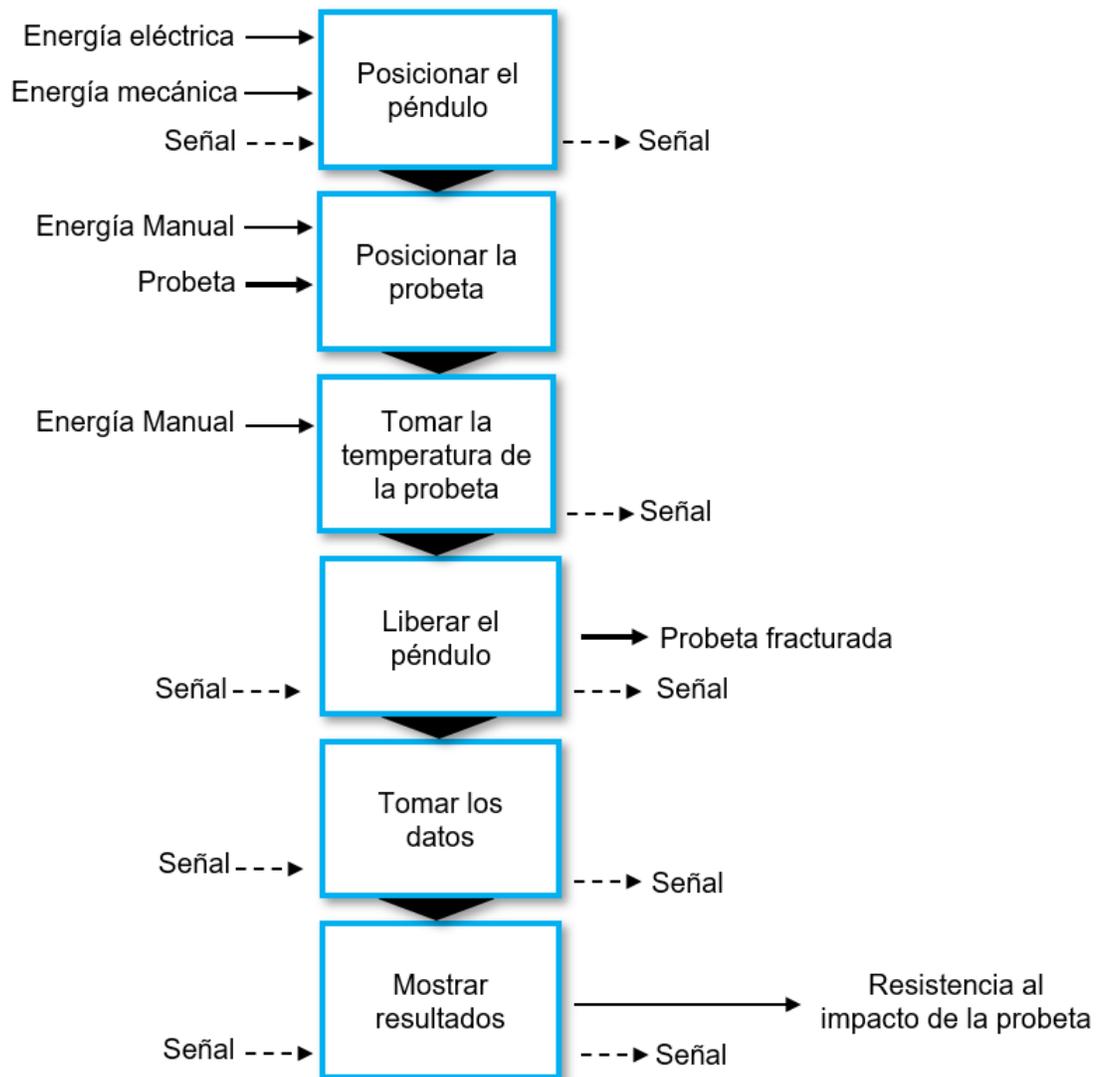
El primer paso para descomponer un problema funcionalmente es representarlo como una *caja negra* que opera en flujos de material, energía y señales, como se ve en la Fig. 8.



**Figura 8.** Caja negra del péndulo Charpy.  
**Fuente:** Autor.

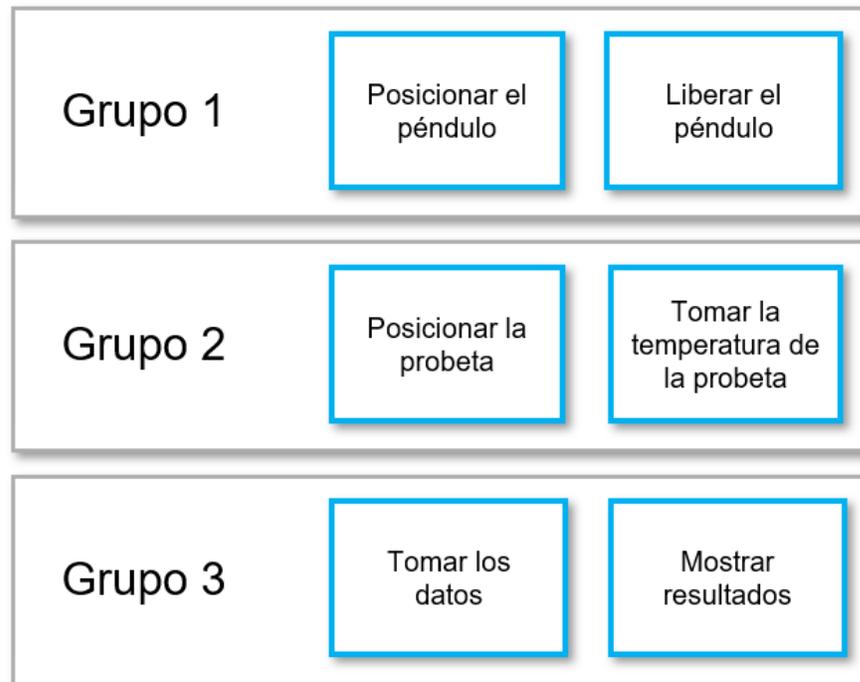
Las líneas continuas finas denotan la transferencia y conversión de energía, las continuas gruesas representan el movimiento de material dentro del sistema y las líneas discontinuas son las señales de flujos de control y retroalimentación dentro del sistema. Esta caja negra representa la función general del producto.

El siguiente paso en la descomposición funcional es dividir la caja negra en subfunciones para crear una descripción más específica de lo que los elementos del producto podrían hacer para implementar la función general del producto.



**Figura 9.** Diagrama funcional de la máquina Charpy.  
**Fuente:** Autor.

Analizando cuidadosamente el diagrama funcional se pueden identificar subfunciones que pueden ser agrupadas con el fin de dar solución de una forma más efectiva a cada uno de estos bloques, encontrando así tres grupos:



**Figura 10.** Grupos de subfunciones de la máquina Charpy  
**Fuente:** Autor.

A continuación, se proponen las posibles soluciones para cada uno de los grupos de subfunciones, se determinará cuál de ellas será la propuesta idónea que se utilizará para el diseño final

#### Grupo 1

- Posicionar el péndulo
- Liberar el péndulo

El control de posición del péndulo debe ser preciso con bajo porcentaje de error, según la norma ASTM D 6110-02. Debido a esto se proponen las siguientes soluciones:

## 1. Eje auxiliar para posicionar el péndulo con anclaje al martillo

Por medio de un eje extra anclado al péndulo, un motor paso a paso se encarga de ubicar el péndulo en el ángulo requerido, para anclar el eje al péndulo es necesario utilizar energía manual

**Tabla 1.** Ventajas y desventajas de un eje auxiliar para posicionar el péndulo

Ventajas	<ul style="list-style-type: none"><li>- Un motor paso a paso es de fácil configuración.</li><li>- El eje se posiciona mediante el trabajo de un eje auxiliar.</li><li>- Facilita el mantenimiento.</li></ul>
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"><li>- Se debe mecanizar un eje extra y un anclaje para el péndulo.</li><li>- El proceso de anclar y desanclar el péndulo del eje se debe hacer manual.</li><li>- Las especificaciones de la máquina dictan que los procesos se efectúen con facilidad mediante un panel de control.</li><li>- Anclar y desanclar el eje puede generar un desgaste en el martillo.</li></ul>

Fuente: Autor.

## 2. Embrague y transmisión de movimiento mediante poleas

El motor paso a paso transfiere el giro a un sistema de polea-embrague que posiciona el péndulo en un ángulo deseado, al retirar el estímulo electromagnético el eje con el péndulo se desliza independientemente provocando el choque y rotura de la probeta.

**Tabla 2.** Ventajas y desventajas de la implementación de un embrague.

Ventajas	<ul style="list-style-type: none"><li>- Permite automatizar el acople y liberación del eje del péndulo.</li><li>- Es un sistema con una alta eficiencia.</li><li>- El mecanismo es muy útil para permitir la caída libre del péndulo.</li><li>- El proceso se puede efectuar desde un panel de control sin entrar en interacción directa con el péndulo.</li></ul>
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"><li>- Puede llegar a significar un costo elevado adquirir las piezas.</li></ul>

Fuente: Autor.

## Grupo 2

- Posicionar la probeta
- Medir la temperatura de la probeta

### 1. Soporte de dos apoyos estandarizado

Para los ensayos de impacto tipo Charpy la colocación y tipo de probetas están normalizadas, por lo tanto, la solución para esta función es única y debe cumplir con los requerimientos indicados en la sección 6, numeral 1.4 de la norma ASTM D6110.

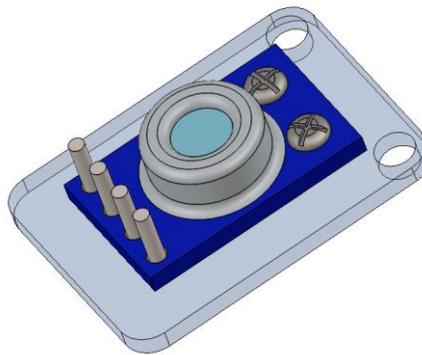


	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se debe diseñar un mecanismo extra para ponerlo en contacto con la probeta.</li> <li>- Requiere de un lapso de tiempo para equilibrarse y entregar el resultado.</li> </ul>
--	--

Fuente: Autor.

### 3. Medir la temperatura de la probeta con Sensor de temperatura infrarrojo sin contacto MLX90614 GY-906

El Sensor de temperatura infrarrojo MLX90614 GY906 es un chip de silicio con una fina membrana micro mecanizada, diseñada para ser sensible a la radiación infrarroja emitida por un objeto a distancia. El sensor posee una etapa de amplificación y digitalización de la señal procedente de la membrana. La salida del sensor es lineal y se compensa de acuerdo a las variaciones de la temperatura ambiente.



**Figura 13.** Sensor de temperatura infrarrojo MLX90614 GY906

Fuente: Autor.

**Tabla 4.** Ventajas y desventajas de un Sensor infrarrojo MLX90614 GY-906.

Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Controlable por medio de un Arduino.</li> </ul>
----------	--

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No requiere de un mecanismo extra para tomar la temperatura.</li> <li>- La temperatura es medida en tiempo real.</li> <li>- La medición es más precisa.</li> </ul>
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Costo relativamente alto.</li> </ul>

Fuente: Autor.

### Grupo 3

- Tomar los datos de la prueba.
- Mostrar los resultados de la prueba.

#### 1. Tomar los datos de la prueba por medio de un Encóder

Un Encóder es un dispositivo electromecánico que convierte la posición angular de un eje, directamente a un código digital y que entrega además la velocidad y aceleración del mismo.

**Tabla 5.** Ventajas y desventajas de un Encóder

Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Es controlable por medio de un Arduino.</li> <li>- Entrega la posición con un margen de error muy pequeño.</li> <li>- Entrega datos de aceleración y velocidad del eje.</li> </ul>
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alto costo.</li> <li>- Requiere de programación extra.</li> </ul>

Fuente: Autor.

#### 2. Toma de datos por medio de un sistema de manecilla

Este sistema consta de un tablero graduado con una manecilla que sigue el movimiento del péndulo e indica la posición final del mismo.

**Tabla 6.** Ventajas y desventajas de un sistema de manecilla.

Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Es un sistema muy sencillo.</li> <li>- No requiere de programación alguna.</li> </ul>
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No cumple con las especificaciones de máquina digital.</li> </ul>

**Fuente:** Autor.

### 3. Interpretación y presentación de los resultados conectando el microcontrolador a un computador

Tanto el microcontrolador como el computador se pueden encargar de la interpretación y el manejo de los datos obtenidos en la prueba, por estética y practicidad los datos pueden presentarse en el computador utilizando un software.

**Tabla 7.** Ventajas y desventajas de presentar los datos en computador

Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Los datos se entregan rápidamente en forma ordenada.</li> <li>- Se pueden realizar varias pruebas y entregar varios resultados.</li> <li>- Facilita la estandarización de la entrega de resultados.</li> </ul>
----------	---

Desventajas	- El uso de un software.
-------------	--------------------------

Fuente: Autor.

#### 4.2.2 Selección del concepto

Luego de generar cada una de las subfunciones y posteriormente proponer posibles soluciones de debe desarrollar una tabla de combinación de conceptos, la cual contiene una forma de considerar en forma sistemática combinaciones de fragmentos de solución. Las soluciones potenciales al problema general se forman al combinar un fragmento de cada columna y luego trazar una línea de flujo tal y como se muestra en la Tabla 8.

**Tabla 8.** Combinación de conceptos

Posicionar el péndulo	Liberar el péndulo	Posicionar la probeta	Medir la temperatura	Tomar los datos	Mostrar resultados
Motor y Eje auxiliar	Mecanismo de anclaje al martillo	Posicionar la probeta sobre el yunque	Sensor infrarrojo	Sistema de manecillas	Microcontrolador y Computador
Motor y Sistema de poleas	Embrague electromagnético		Sensor de contacto	Encóder	

Fuente: Autor.

Cada una de las soluciones es estudiada detenidamente teniendo en cuenta las ventajas y desventajas presentadas, de esta forma se tiene el concepto general y especificaciones de lo que será el equipo a diseñar.

### 4.3 DISEÑO DE DETALLE

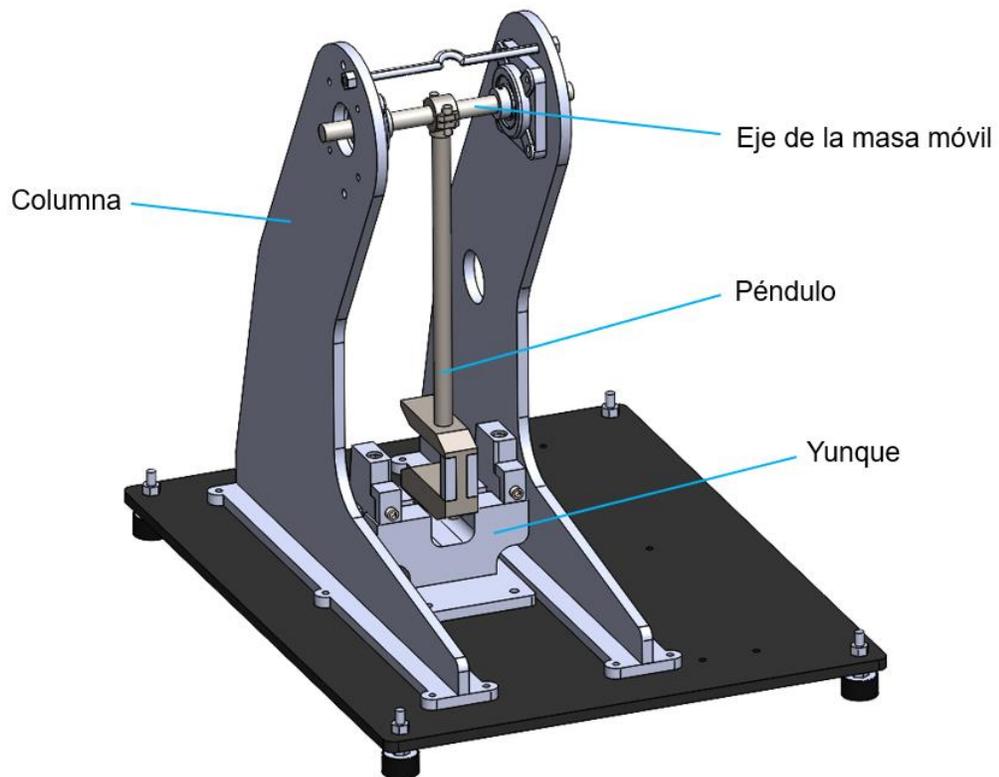
#### 4.3.1 Diseño Mecánico

##### ❖ Bases del diseño

Dentro de la norma ASTM D6110 se pueden encontrar especificaciones que deben ser tenidas en cuenta para el diseño de las siguientes partes de la máquina de ensayos:

- ✓ Péndulos
- ✓ Percutor
- ✓ Soportes de la probeta

Estas especificaciones se verán resaltadas a lo largo del proceso del diseño mecánico de la máquina, a continuación, se presenta un esquema general de máquina con sus respectivas partes:



**Figura 14.** Partes de la máquina  
**Fuente:** Autor.

La norma establece la energía que debe producir el impacto del péndulo ( $2.7 \pm 0.14$  [J]) para materiales poliméricos, los cuales presentan una resistencia de impacto menor a la de la mayoría de materiales compuestos, para péndulos más

pesados la energía deberá duplicar al anterior y tener una altura de caída de 610 [mm].

El equipo será diseñado de tal forma que pueda operar con dos diferentes masas móviles, todas con un vástago de 0.325 [m] para entregar una energía aproximada de 5 [J] y 10 [J], teniendo en cuenta las especificaciones de la norma, otras máquinas presentes en el mercado y las condiciones críticas de operación. A partir de ello, se puede calcular la masa que se requiere para producir dicha energía en base a la Ec. (3) de energía potencial, despejando la masa, se obtiene entonces:

$$m = \frac{E_p}{g \cdot h} \quad (14)$$

Obteniendo respectivamente para las diferentes energías:

$$m_{10} = \frac{10}{9.81 \cdot 0.61} \approx 1.67 [kg] \quad (15)$$

$$m_5 = \frac{5}{9.81 \cdot 0.61} \approx 0.84 [kg] \quad (16)$$

Mediante la ley de la conservación de la energía, al momento del impacto la energía potencial se convierte en energía cinética, por ende, para el cálculo de la velocidad del martillo se tiene:

$$\frac{1}{2}mv^2 = mgh \quad (17)$$

Despejando  $v$  de la Ec. (17) se obtiene:

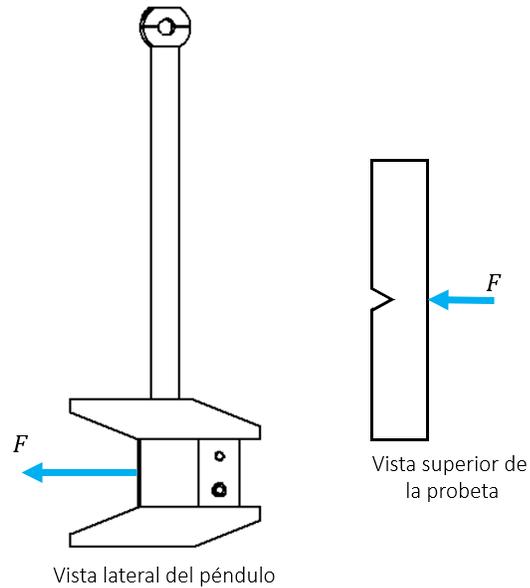
$$v = \sqrt{2gh} \quad (18)$$
$$v = \sqrt{2(9.81)(0.61)} = 3.46 \left[ \frac{m}{s} \right]$$

Obteniendo la velocidad que indica la respectiva norma.

#### ❖ Diseño de los péndulos

Esta parte del equipo debe estar sometida a esfuerzos de flexión únicamente, por lo tanto, el plano de oscilación del péndulo debe ser perpendicular al eje de la

muestra, de esta forma el percutor impacta la probeta en el plano de simetría del entalle, como se observa en la siguiente figura:



**Figura 15.** Condiciones de impacto.  
Fuente: Autor.

❖ Análisis de fuerzas y reacciones en el péndulo de 10 J

En este análisis se desprecia el acople del péndulo en el eje, se emplea una probeta normalizada de fibra de vidrio tipo S y se considera que la fuerza aplicada a la probeta es el respectivo peso del péndulo, de esta manera, para obtener la fuerza dinámica que actúa en el péndulo se debe tener en cuenta la siguiente expresión [3]:

$$F_i = \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{2\eta h_T}{D_{max}}} \right) \cdot W \quad (19)$$

Donde;

$F_i$ : Fuerza dinámica

$\eta$ : Factor de corrección

$h_T$ : Altura total (0,61 m)

$W$ : Peso del péndulo (16.38 N)

$D_{max}$ : Deflexión máxima

Para calcular el factor de corrección se debe tener en cuenta la Ec. (20) y también que conforme aumenta la razón masa golpeadora/masa golpeada, el factor de corrección  $\eta$  se aproxima asintóticamente a uno [3].

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{m_b}{3m}} \quad (20)$$

Donde;

$m_b$  : Masa del objeto golpeado

$m$  : Masa del objeto que golpea

Entonces reemplazando en la Ec. (20) se obtiene el factor de corrección:

$$\eta_{10} = \frac{1}{1 + \frac{0.01}{3 \cdot 1.67}} = 0.998$$

Ahora, en cuanto a la deflexión máxima para una viga simplemente apoyada en 2 extremos y carga central [31] se tiene:

$$D_{max} = \frac{WL_p^3}{48EI} \quad (21)$$

Donde;

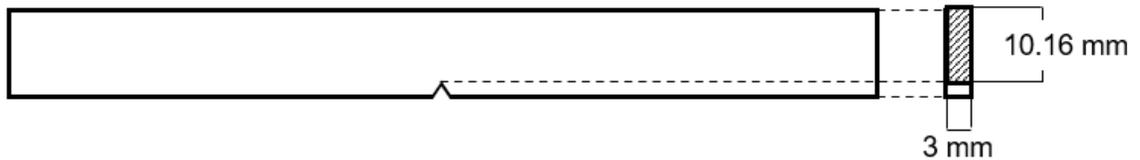
$L_p$ : Longitud de luz de la probeta

$W$ : Peso del péndulo

$E$ : Coeficiente de elasticidad del material (MCMP con fibra de Vidrio=45 Gpa)

$I$ : Momento de inercia de la sección transversal

En la siguiente figura se muestra la sección transversal de la probeta especificada por la norma en milímetros, sobre la cual se produce el impacto



**Figura 16.** Sección transversal de la probeta.  
Fuente: [16].

El momento de inercia de la sección esta dado por la Ec. (22)

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (22)$$

$$I = \frac{0.003 \cdot 0.01016^3}{12}$$

$$I = 2.62 \times 10^{-10} \text{ [m}^4\text{]}$$

Con la Ec. (21) se procede a hallar la deflexión máxima:

$$D_{max_{10}} = \frac{16.38 \cdot 0.0953^3}{48 \cdot 45 \times 10^9 \cdot 2.62 \times 10^{-10}} = 2.51 \times 10^{-5} \text{ [m]}$$

Con lo cual de la Ec. (19) se obtiene la fuerza dinámica:

$$F_{i_{10}} = \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot 0.99 \cdot 0.61}{2.51 \times 10^{-5}}} \right) \cdot 16.38 = 3609.56 \text{ [N]}$$

Ahora, según la norma este péndulo se utiliza para probetas que extraigan menos del 85% de esta fuerza al romper una muestra, es decir:

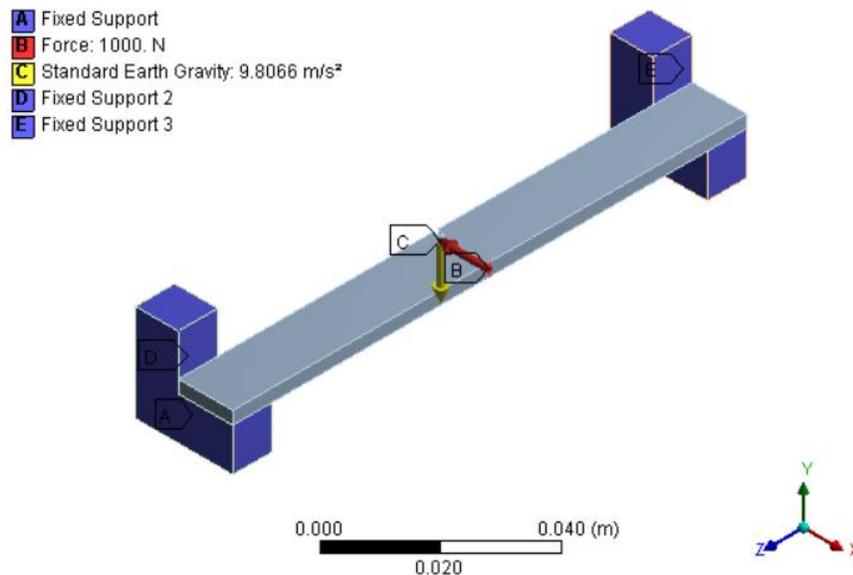
$$3609.56 \cdot 0.85 = 3068.1 \text{ [N]}$$

Por esto, se debe encontrar la fuerza crítica que soporta la probeta antes de fracturarse; Para ello se realiza la siguiente simulación por medio del software ANSYS, donde como se observa en la fig. 17, se tienen dos apoyos y una probeta normalizada con las respectivas propiedades de la fibra de vidrio tipo S mostradas en la tabla 9, de igual forma se evidencian las condiciones de la prueba. Es importante resaltar que, se utilizaron elementos HEX8 de 1 mm para discretizar el modelo de la probeta.

**Tabla 9.** Propiedades de la fibra de vidrio tipo S.

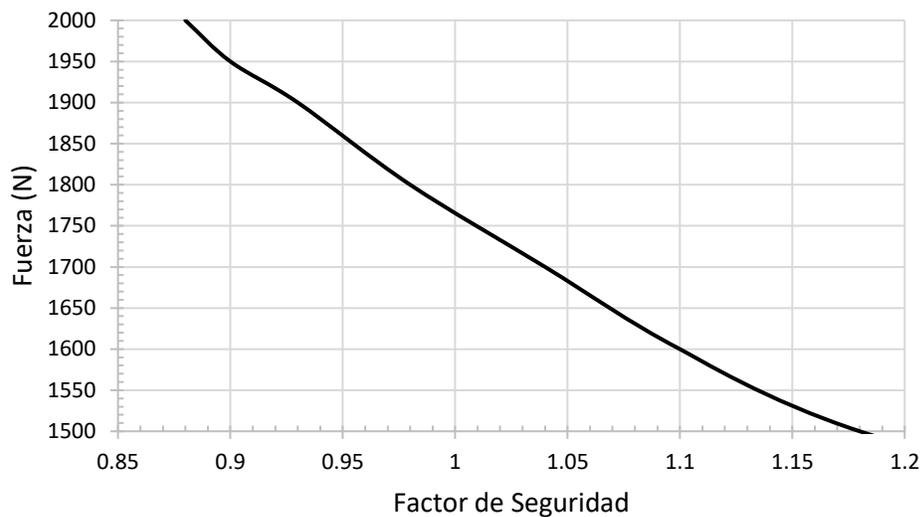
Propiedad	Valor	Unidades
Densidad	1950	$kg/m^3$
Resistencia a la tracción	1100	$Mpa$
Limite elástico por compresión	880	$Mpa$
Módulo de Young	45	$Gpa$
Radio de Poisson	0.4	-

Fuente: Autor.



**Figura 17.** Condiciones del análisis estático estructural a la probeta  
**Fuente:** Autor.

La fuerza que se aplica a la probeta es parametrizada, esto con el objetivo de encontrar en que valor el factor de seguridad es menor a 1, indicando que la probeta falla. Los resultados de la parametrización se presentan en la siguiente gráfica:



**Figura 18.** Grafica de Fuerza vs Factor de seguridad.  
**Fuente:** Autor.

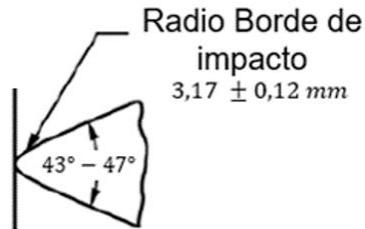
En una fuerza de aproximadamente 1770 N el valor del factor de seguridad es igual a 1, pero para asegurar que las condiciones de diseño sean críticas se tomara el valor de fuerza encontrado cuando el factor de seguridad es igual a 0.9, el cual es 1950 N, con este valor se realizan las respectivas pruebas al péndulo y sus piezas.

❖ Geometría del péndulo de 10 J

Para definir la geometría del péndulo se deben tener en cuenta los parámetros establecidos en la norma ASTM D6110, y que sea una geometría cómoda de manufacturar con materiales comerciales y de fácil mantenimiento.

- *Percutor 10 J*

Según la norma para el diseño del percutor se debe tener en cuenta el radio del borde de impacto y el ángulo tal y como se muestra en la Fig. 19.



**Figura 19.** Radio del borde de impacto del percutor.  
**Fuente:** [16]

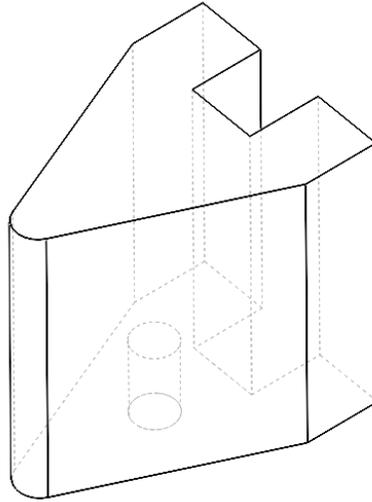
La pieza es diseñada y modelada cumpliendo con las especificaciones, en acero AISI 1045 el cual fue seleccionado por su buena soldabilidad, su fácil acceso, buena maquinabilidad y propiedades de alta resistencia e impacto, ya sea en estado normalizado o laminado en caliente, las principales propiedades de este acero se presentan a continuación en la tabla 10

**Tabla 10.** Propiedades del Acero AISI 1045.

Propiedad	Valor	Unidades
Densidad	7870	$kg/m^3$
Resistencia a la tracción	310	$Mpa$
Limite elástico por compresión	450	$Mpa$
Módulo de Young	200	$Gpa$
Radio de Poisson	0.29	-

**Fuente:** Autor.[32]

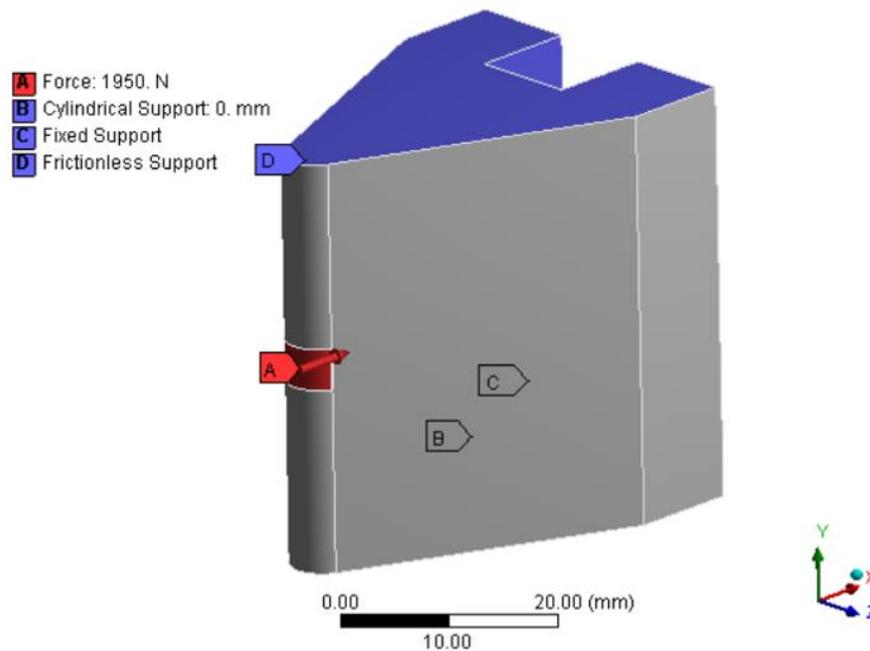
La pieza también cuenta con un agujero roscado el cual fijara la pieza al martillo de la masa móvil, tal y como se aprecia en la Fig. 20, allí se puede observar una vista isométrica de la pieza con las líneas ocultas visibles, la pieza se modelo con ayuda del software SolidWorks



**Figura 20.** Geometría del percutor del péndulo de 10J.  
**Fuente:** Autor.

Por medio del software se pudo establecer que la pieza tiene una masa de 221.71 *gr* y un volumen de 28268.3 *mm*<sup>3</sup>.

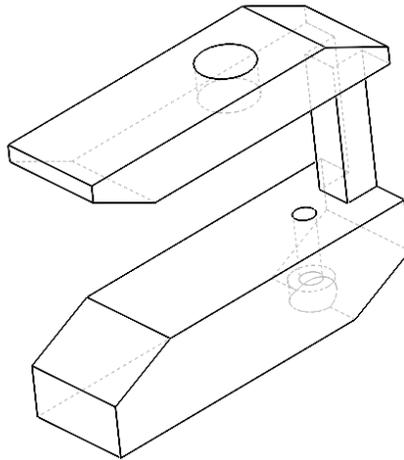
Una vez se tiene establecida la posible geometría de la pieza se procede a evaluar el comportamiento que esta presenta al ser sometida a las condiciones críticas de operación, para ello se realiza un Análisis estático estructural de la pieza con ayuda del software ANSYS, tal y como se observa en la Fig. 21, la fuerza que se le aplica es la que se halló con anterioridad en la probeta, a la pieza se le asignan soportes fijos en la parte posterior, la cual está en contacto con el martillo, y soportes sin fricción en las caras inferior y superior. Es importante resaltar que, se utilizaron elementos TET10 de 1 mm para discretizar el modelo del percutor.



**Figura 21.** Condiciones del análisis estático estructural al percutor del péndulo de 10J  
**Fuente:** Autor.

- *Martillo 10 J*

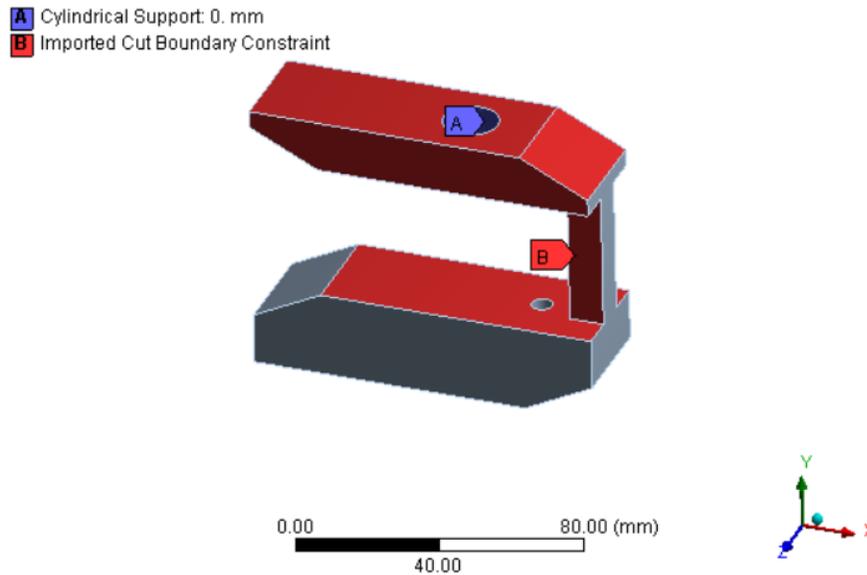
Según la norma la mayor concentración de masa debe estar ubicada en el martillo y el percutor. Al igual que el percutor, el martillo es diseñado y modelado con ayuda del software SolidWorks, en acero AISI 1045 gracias a las cualidades y propiedades previamente expuestas, este se modela en forma de "C" teniendo en cuenta que el centro de masa se encuentre cerca de la zona de impacto; En la Fig. 22 se presenta la geometría del martillo con las líneas ocultas visibles para poder apreciar mejor su forma, el posicionamiento y anclaje del percutor se da por medio de un tornillo Allen normalizado M6 de 30 mm (Anexo 1), ubicado en la parte inferior, el martillo también cuenta con un agujero en la cara superior por medio del cual se unirá al vástago del péndulo



**Figura 22.** CAD del martillo del péndulo de 10J  
**Fuente:** Autor.

Por medio del software es posible establecer que el martillo tiene una masa de 860 *gr* y un volumen de 110019.43 *mm*<sup>3</sup>.

Una vez establecida la posible geometría del martillo se procede a evaluar el comportamiento que este presenta al ser sometido a las condiciones críticas de operación, para ello se realiza un análisis estático estructural de la pieza con ayuda del software ANSYS, tal y como se observa en la Fig. 23, se define un soporte cilíndrico en el agujero de la cara superior y se importan las condiciones de frontera con el percutor. Es importante resaltar que, se utilizaron elementos TET10 de 1 mm para discretizar el modelo del martillo.



**Figura 23.** Condiciones del análisis estático estructural al martillo del péndulo de 10J  
**Fuente:** Autor.

- *Vástago y Unión 10 J*

La norma establece que la longitud total desde el eje hasta el punto de impacto debe ser de 325 mm a 410 mm, dependiendo del ángulo que sea elegido como el inicial de la prueba, la máquina se diseña para que el péndulo inicie su movimiento a 60° sobre la horizontal del eje, por tanto, la longitud total debe ser exactamente 325 mm.

El vástago y la unión se diseñan en Acero AISI 4340 el cual tiene alta tenacidad y resistencia en la condición de tratamiento térmico y es usado de igual forma en máquinas similares, las principales propiedades de este acero se presentan en la tabla 11.

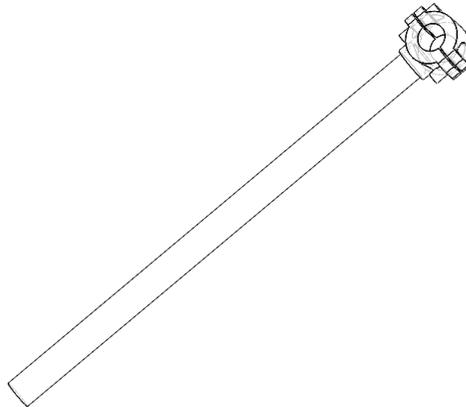
**Tabla 11.** Propiedades del Acero AISI 4340.

PROPIEDAD	VALOR	UNIDADES
Densidad	7850	$kg/m^3$
Resistencia a la tracción	745	$Mpa$

Limite elástico por compresión	470	<i>Mpa</i>
Módulo de Young	210	<i>Gpa</i>
Radio de Poisson	0.3	-

Fuente:[33].

La longitud del vástago luego de restarle las medidas presentes en el martillo y la unión con el eje es de  $290\text{ mm}$  y se diseña y moldea de forma cilíndrica con un diámetro nominal de  $15.88\text{ mm}$  equivalente a  $5/8$  de pulgada, la unión se compone de dos piezas unidas con dos tornillos Allen normalizados M6 de  $15\text{ mm}$ , las piezas comprimen el eje fijando el péndulo; A continuación, en la Fig. 24 se presenta la geometría de estas piezas con líneas ocultas visibles

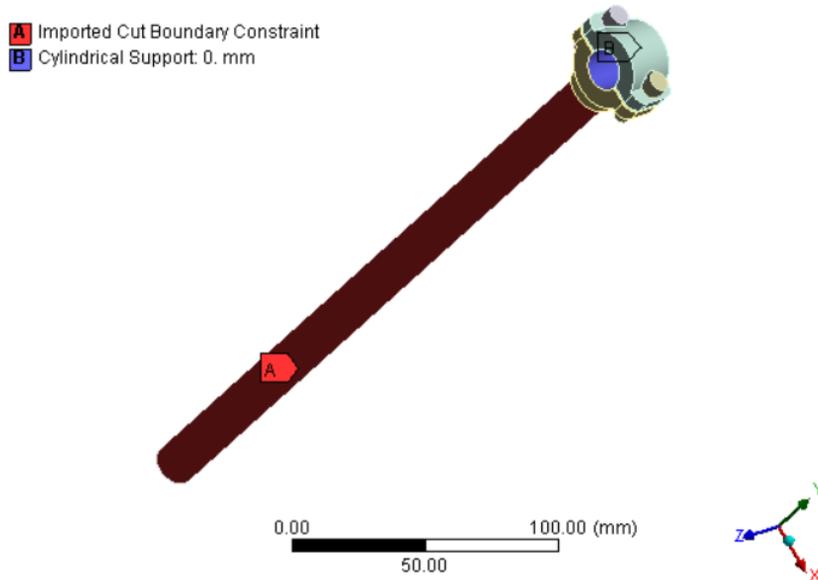


**Figura 24.** Geometría del vástago y la unión del péndulo de  $10\text{ J}$   
Fuente: Autor.

Por medio del software es posible establecer que el vástago y la unión tienen una masa de  $543.31\text{ gr}$  y un volumen de  $68446.73\text{ mm}^3$ .

Una vez establecida la posible geometría del vástago y la unión se procede a evaluar el comportamiento que este presenta al ser sometido a las condiciones críticas de operación, para ello se realiza un análisis estático estructural de la pieza con ayuda del software ANSYS, tal y como se observa en la Fig. 25, se define un soporte cilíndrico en la unión del eje y se importan las condiciones de

frontera desde el martillo. Es importante resaltar que, se utilizaron elementos TET10 de 1 mm para discretizar el modelo del vástago.



**Figura 25.** Condiciones del análisis estático estructural al vástago y la unión del péndulo de 10J  
**Fuente:** Autor.

❖ **Análisis de fuerzas y reacciones en el péndulo de 5 J**

En este análisis se desprecia el acople del péndulo en el eje, se emplea una probeta normalizada de fibra de vidrio tipo E y se considera que la fuerza aplicada a la probeta es el respectivo peso del péndulo, de esta manera, se debe calcular la fuerza dinámica que actúa en el péndulo teniendo en cuenta la Ec. (19), para ello, se calcula el factor de corrección con la Ec. (20) teniendo en cuenta que conforme aumenta la razón masa golpeadora/masa golpeada, el factor de corrección  $\eta$  se aproxima asintóticamente a uno [3], de la siguiente manera:

$$\eta_5 = \frac{1}{1 + \frac{0.01}{3 \cdot 0.84}} = 0.996$$

Ahora, para calcular la deflexión máxima para una viga simplemente apoyada en 2 extremos y carga central [31] se tiene la Ec. (21), para esta ecuación se usa el mismo momento de inercia calculado con la Ec. (22) debido a que la probeta es normalizada y tiene las mismas dimensiones, pero se cambia el coeficiente de elasticidad por 28 *Gpa* debido a que varía de un material al otro y el peso del péndulo, se obtiene entonces la deflexión máxima:

$$D_{max_5} = \frac{8.24 \cdot 0.0953^3}{48 \cdot 28 \times 10^9 \cdot 2.62 \times 10^{-10}} = 2.03 \times 10^{-5} [m]$$

Con lo cual de (4.1) se obtiene la fuerza dinámica que actúa en el péndulo:

$$F_{i_5} = \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot 0.99 \cdot 0.61}{2.03 \times 10^{-5}}} \right) \cdot 8.24 = 2018.17 [N]$$

Ahora, según la norma estos péndulos se utilizarán para probetas que extraigan menos del 85% de esta fuerza al romper una muestra, es decir:

$$2018.17 \cdot 0.85 = 1715.44 [N]$$

Por esto, se debe encontrar la fuerza crítica que soporta la probeta antes de fracturarse; Para ello se realiza la siguiente simulación por medio del software ANSYS, donde como se observa en la Fig. 26, se tienen dos apoyos y una probeta normalizada con las respectivas propiedades de la fibra de vidrio tipo E mostradas en la tabla 12, de igual forma se evidencian las condiciones de la prueba. Es importante resaltar que, se utilizaron elementos HEX8 de 1 mm para discretizar el modelo del eje.

**Tabla 12.** Propiedades de la fibra de vidrio tipo E.

Propiedad	Valor	Unidades
Densidad	1970	<i>kg/m<sup>3</sup></i>
Resistencia a la tracción	241	<i>Mpa</i>

Limite elástico por compresión	207	<i>Mpa</i>
Módulo de Young	28	<i>Gpa</i>
Radio de Poisson	0.315	-

Fuente: Autor.

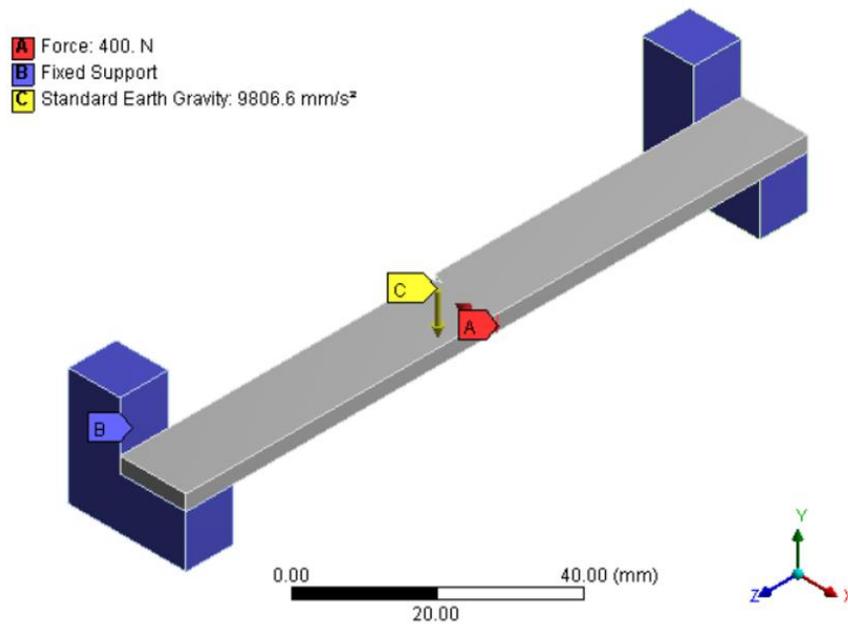
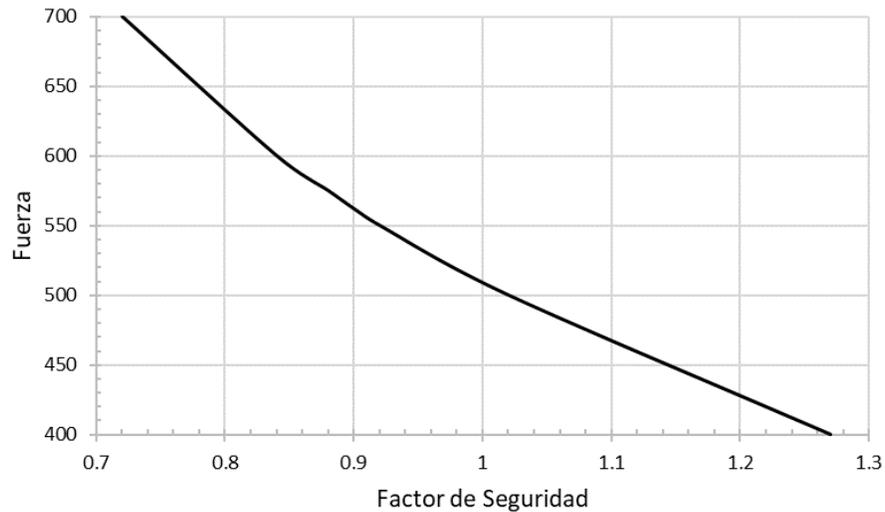


Figura 26. Condiciones del análisis estático estructural a la probeta de fibra de vidrio tipo E.  
Fuente: Autor.

La fuerza que se aplica a la probeta es parametrizada, esto con el objetivo de encontrar en que valor el factor de seguridad es menor a 1, indicando que la probeta falla. Los resultados de la parametrización se presentan en la Fig. 27



**Figura 27.** Grafica de Fuerza vs Factor de seguridad.  
**Fuente:** Autor.

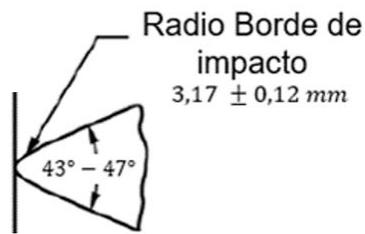
En una fuerza de aproximadamente 512 N el valor del factor de seguridad es igual a 1, pero para asegurar que las condiciones de diseño sean críticas se tomara el valor de fuerza encontrado cuando el factor de seguridad es igual a 0.9, el cual es 562 N, con este valor se realizan las pruebas al péndulo y sus piezas.

❖ Geometría del péndulo de 5 J

Para definir la geometría del péndulo se deben tener en cuenta los parámetros establecidos en la norma ASTM D6110, y que sea una geometría cómoda de manufacturar con materiales comerciales y de fácil mantenimiento.

- *Percutor*

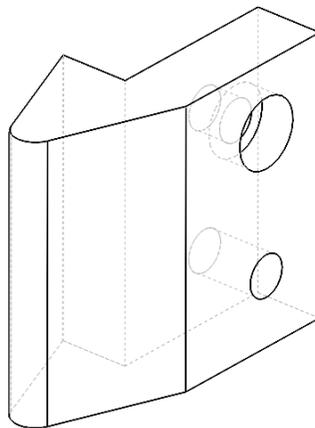
Según la norma para el diseño del percutor se debe tener en cuenta el radio del borde de impacto y el ángulo tal y como se muestra en la figura 28



**Figura 28.** Radio del borde de impacto del percutor.  
**Fuente:** [16].

La pieza es diseñada y modelada cumpliendo con las especificaciones, en acero AISI 1045 el cual fue seleccionado por su buena soldabilidad, su fácil acceso, buena maquinabilidad y propiedades de alta resistencia e impacto, ya sea en estado normalizado o laminado en caliente, las principales propiedades de este acero son mostradas con anterioridad en la tabla 10.

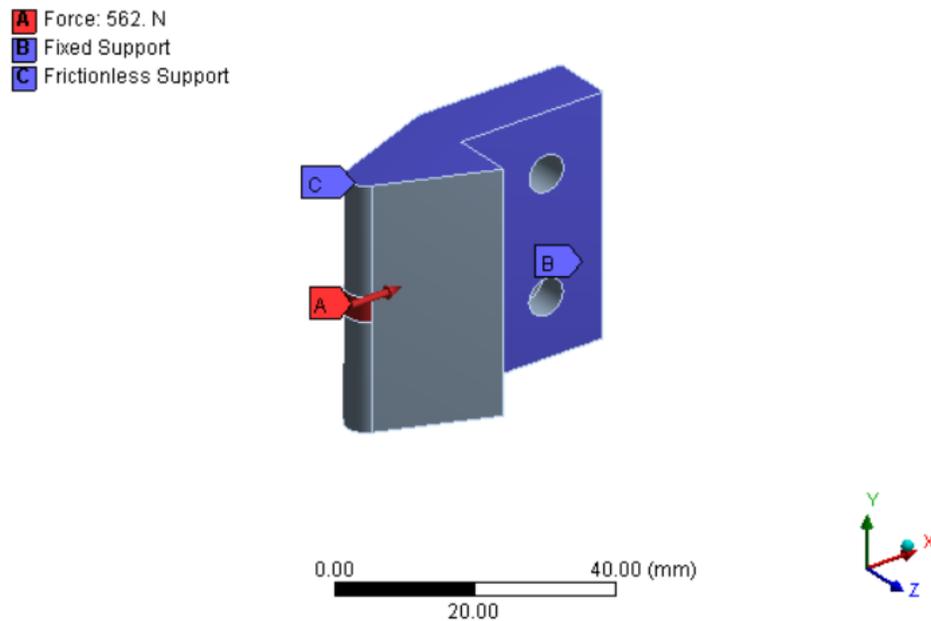
La pieza cuenta con dos agujeros roscados los cuales fijan la pieza al martillo de la masa móvil, tal y como se aprecia en la Fig. 29, allí se puede observar una vista isométrica de la pieza con las líneas ocultas visibles, la pieza se modelo con ayuda del software SolidWorks



**Figura 29.** Geometría del percutor del pendulo de 5J  
**Fuente:** Autor.

Por medio del software se pudo establecer que la pieza tiene una masa de 148.04 *gr* y un volumen de 18858.4 *mm*<sup>3</sup>.

Una vez se tiene establecida la posible geometría de la pieza se procede a evaluar el comportamiento que esta presenta al ser sometida a las condiciones críticas de operación, para ello se realiza un estudio estático estructural de la pieza con ayuda del software ANSYS, tal y como se observa en la Fig. 30, la fuerza que se le aplica es la que se halló con anterioridad en la probeta de fibra de vidrio tipo E, a la pieza se le asignan soportes fijos en la parte posterior, la cual está en contacto con el martillo, y soportes sin fricción en las caras inferior y superior. Es importante resaltar que, se utilizaron elementos HEX8 de 1 mm para discretizar el modelo del percutor.

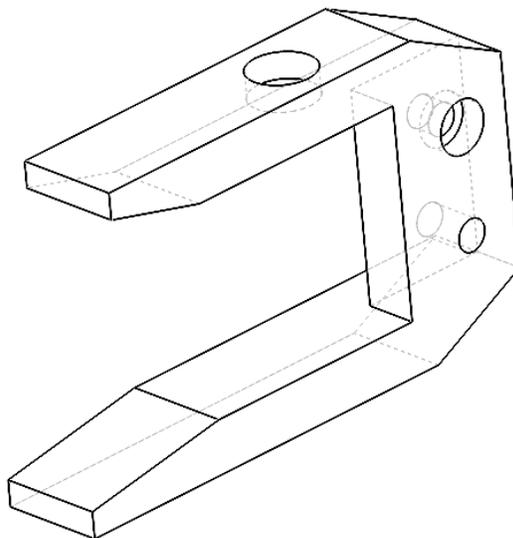


**Figura 30.** Condiciones del análisis estático estructural al percutor del péndulo de 5J  
**Fuente:** Autor.

- *Martillo 5 J*

Según la norma la mayor concentración de masa debe estar ubicada en el martillo y el percutor. Al igual que el percutor, el martillo es diseñado y

modelado con ayuda del software SolidWorks, en acero AISI 1045 gracias a las cualidades y propiedades previamente expuestas, este se modela en forma de "C" teniendo en cuenta que el centro de masa se encuentre cerca de la zona de impacto; En la Fig. 31 se presenta la geometría del martillo con las líneas ocultas visibles para poder apreciar mejor su forma, el posicionamiento y anclaje del percutor se da por medio de dos tornillos Allen normalizados M6 de 15 mm ubicados de tal forma que no modifiquen el centro de masa del péndulo, el martillo también cuenta con un agujero en la cara superior por medio del cual se unirá al vástago del péndulo.

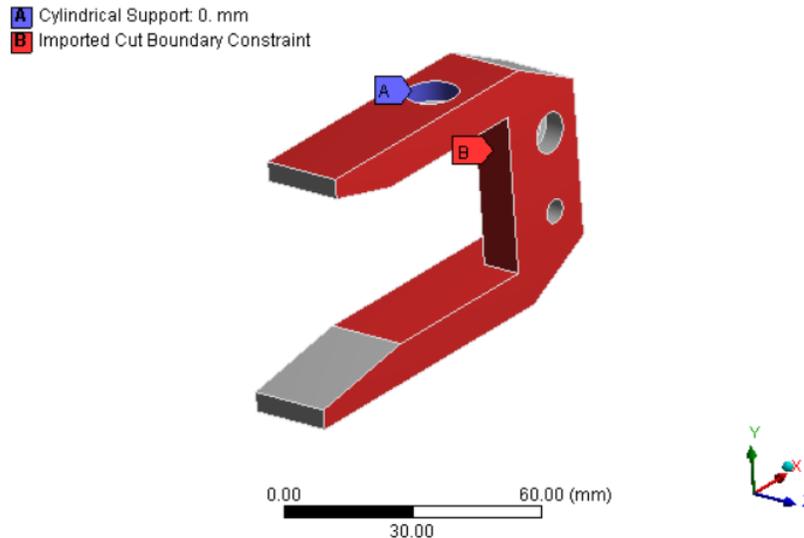


**Figura 31.** Geometría del martillo del péndulo de 5J.  
**Fuente:** Autor.

Por medio del software es posible establecer que el martillo tiene una masa de 314.39 *gr* y un volumen de 40049.8 *mm*<sup>3</sup>.

Una vez establecida la posible geometría del martillo se procede a evaluar el comportamiento que este presenta al ser sometido a las condiciones críticas de operación, para ello se realiza un estudio estático estructural de la pieza con

ayuda del software ANSYS, tal y como se observa en la Fig. 32, se define un soporte cilíndrico en el agujero de la cara superior y se importan las condiciones de frontera con el percutor. Es importante resaltar que, se utilizaron elementos TET10 de 1 mm para discretizar el modelo del martillo.



**Figura 32.** Condiciones del análisis estático estructural al martillo del péndulo de 5J.  
**Fuente:** Autor.

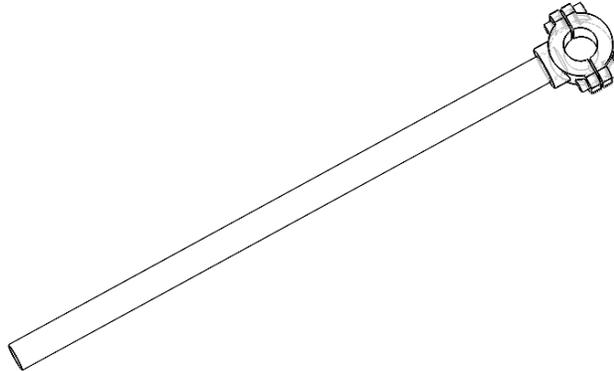
- *Vástago y unión*

La norma establece que la longitud total desde el eje hasta el punto de impacto debe ser de 325 mm a 410 mm, dependiendo del ángulo que sea elegido como el inicial de la prueba, la máquina se diseña para que el péndulo inicie su movimiento a 60° sobre la horizontal del eje, por tanto, la longitud total debe ser exactamente 325 mm.

El vástago y la unión se diseñan en Acero AISI 4340 el cual tiene alta tenacidad y resistencia en la condición de tratamiento térmico y es usado de igual forma en máquinas similares, las principales propiedades de este acero se presentan con anterioridad en la tabla 11.

La longitud del vástago luego de restarle las medidas presentes en el martillo y la unión con el eje es de 290 mm y se diseña y moldea de forma cilíndrica con

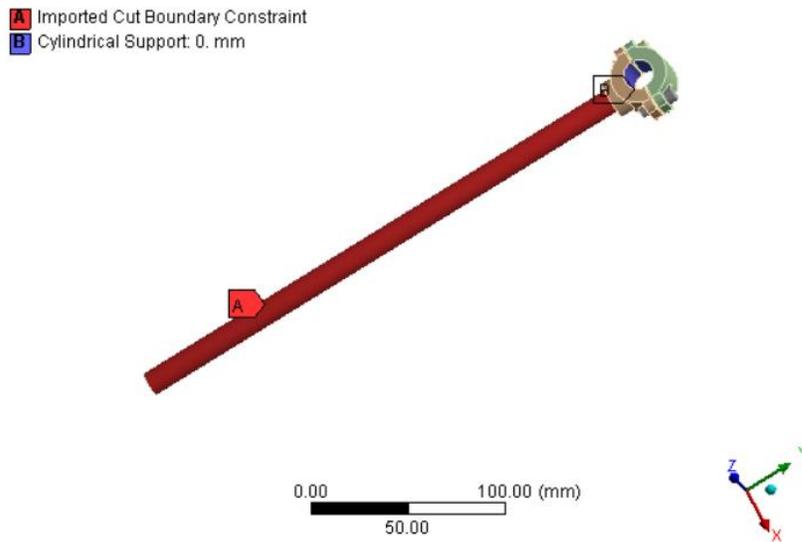
un diámetro nominal de  $12.7\text{ mm}$  equivalente a  $1/2$  pulgada, la unión se compone de dos piezas unidas con dos tornillos Allen normalizados M6 de 15 mm, estas piezas comprimen el eje fijando el péndulo; A continuación, en la Fig. 33 se presenta la geometría de estas piezas con líneas ocultas visibles.



**Figura 33.** Geometría del vástago y la unión del péndulo de 5J.  
**Fuente:** Autor.

Por medio del software es posible establecer que el vástago y la unión tienen una masa de  $390.4\text{ gr}$  y un volumen de  $49704.05\text{ mm}^3$ .

Una vez establecida la posible geometría del vástago y la unión se procede a evaluar el comportamiento que este presenta al ser sometido a las condiciones críticas de operación, para ello se realiza un estudio estático estructural de la pieza con ayuda del software ANSYS, tal y como se observa en la Fig. 34, se define un soporte cilíndrico en la unión del eje y se importan las condiciones de frontera desde el martillo. Es importante resaltar que, se utilizaron elementos TET10 de 1 mm para discretizar el modelo del vástago.



**Figura 34.** Condiciones del análisis estático estructural del vástago y la unión del péndulo de 5J.  
**Fuente:** Autor.

❖ Diseño del eje

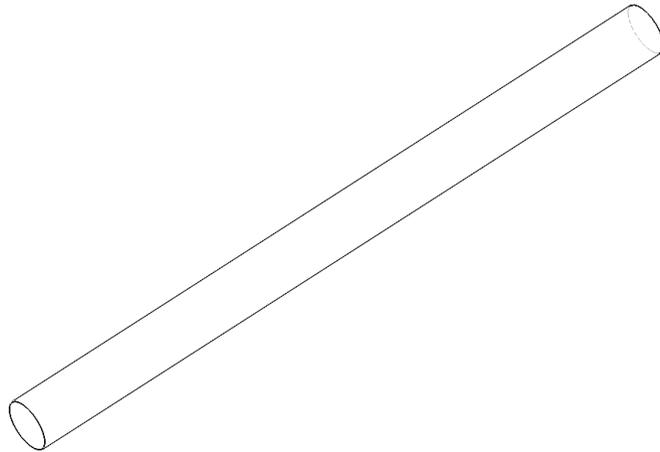
La norma no especifica ningún parámetro en especial para el eje de la máquina, se diseña un eje solido sin muescas para prevenir los concentradores de esfuerzos, en Acero AISI 1020, el cual es ampliamente usado para ejes y cuyas principales propiedades se exponen en la tabla 13

**Tabla 13.** Propiedades del Acero AISI 1020

Propiedad	Valor	Unidades
Densidad	7870	$kg/m^3$
Resistencia a la tracción	420	$Mpa$
Limite elástico por compresión	350	$Mpa$
Módulo de Young	200	$Gpa$
Radio de Poisson	0.29	-

**Fuente:** [34].

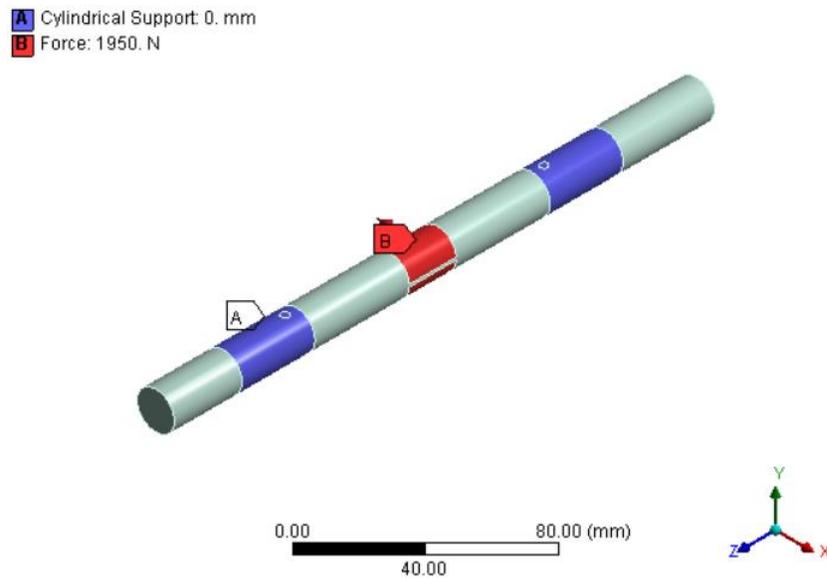
El diámetro nominal del eje es de  $15.88\text{ mm}$  equivalentes a  $5/8$  de pulgada (Anexo 8) y la longitud es de  $230\text{ mm}$ , la geometría se puede apreciar con líneas ocultas visibles en la Fig. 35.



**Figura 35.** Geometría del eje de la masa móvil.  
**Fuente:** Autor.

Por medio del software es posible establecer que el vástago y la unión tienen una masa de  $359.87\text{ gr}$  y un volumen de  $45553.18\text{ mm}^3$ .

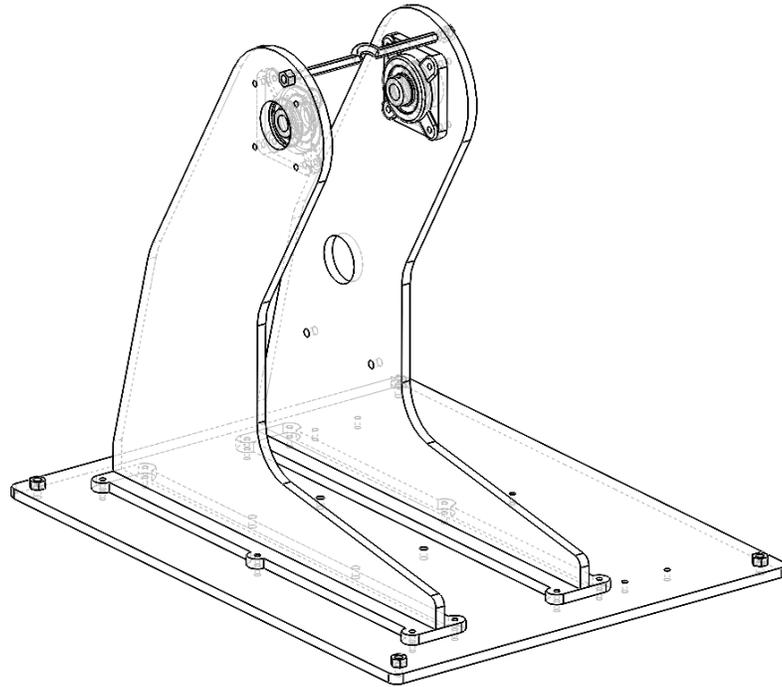
Una vez establecida la posible geometría del eje se procede a evaluar el comportamiento que este presenta al ser sometido a las condiciones críticas de operación, para ello se realiza un estudio estático estructural de la pieza con ayuda del software ANSYS, se definen dos soportes cilíndricos equivalentes a los rodamientos y se le aplica una fuerza, tal y como se observa en la Fig. 36. Es importante resaltar que, se utilizaron elementos TET10 de  $1\text{ mm}$  para discretizar el modelo del eje.



**Figura 36.** Condiciones del análisis estático estructural al eje de la masa móvil.  
**Fuente:** Autor.

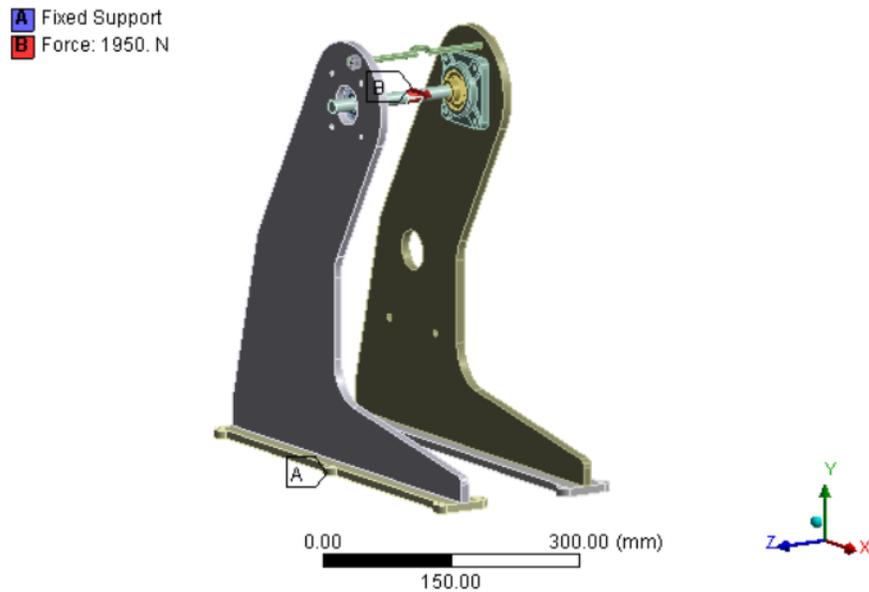
#### ❖ Diseño de las columnas

La norma no especifica la forma de las columnas, solo indica que deben ser lo suficientemente sólidas para sostener el peso de la masa móvil y evitar las vibraciones al momento del impacto con la muestra. Las columnas se diseñan en Acero AISI 1020 ya que este acero es de fácil mecanizado y buena soldabilidad, el eje se une a las columnas por medio de unas chumaceras de pared comerciales con rodamientos insertables UC202-10 los cuales cuentan con una capacidad de carga dinámica de 12800 N, carga superior a la encontrada por medio de la Ec. 19 para el péndulo de 10 J, las características y dimensiones de los rodamientos seleccionados se indican en el Anexo 2, además tienen un soporte en la parte superior atornillado, las columnas se unen a la base por medio de tornillos Allen M8 con el fin de realizar un diseño modular y facilitar el mantenimiento, la geometría de las columnas se puede observar con líneas ocultas visibles en la Fig. 37.



**Figura 37.** Geometría de las columnas de la máquina.  
**Fuente:** Autor.

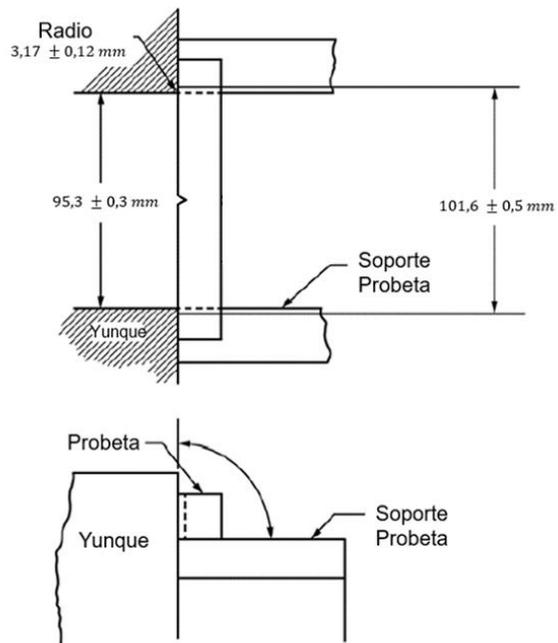
Una vez se establece la posible geometría de las columnas se procede a evaluar el comportamiento que este presenta al ser sometido a las condiciones críticas de operación, para ello se realiza un estudio estático estructural de la pieza con ayuda del software ANSYS, se define un soporte fijo para la base de las columnas y se le aplica una fuerza crítica, tal y como se observa en la Fig. 38, para la base de las columnas se seleccionaron pies de nivelación GN439.5-32-M8-40-70 (Anexo 10) los cuales previenen vibraciones y desplazamientos indeseados de la máquina, estos son de fácil instalación con el fin de facilitar el mantenimiento del equipo. Es importante resaltar que, se utilizaron elementos HEX20 de 2 mm para discretizar el modelo de la columna.



**Figura 38.** Condiciones del análisis estático estructural a las columnas de la máquina.  
**Fuente:** Autor.

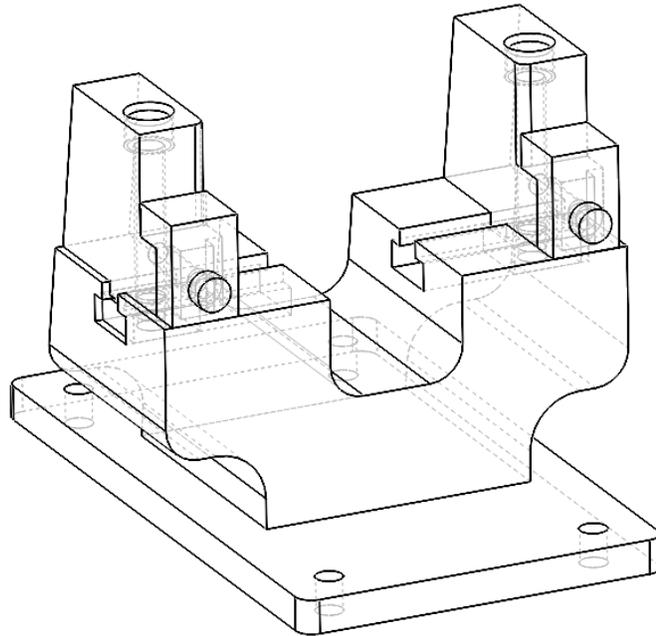
❖ Diseño del yunque

La norma especifica la distancia de separación de los soportes de la probeta y el respectivo ángulo de redondeo que deben presentar los bordes que presentan contacto con la parte posterior de la muestra tal y como se muestra en la Fig.39



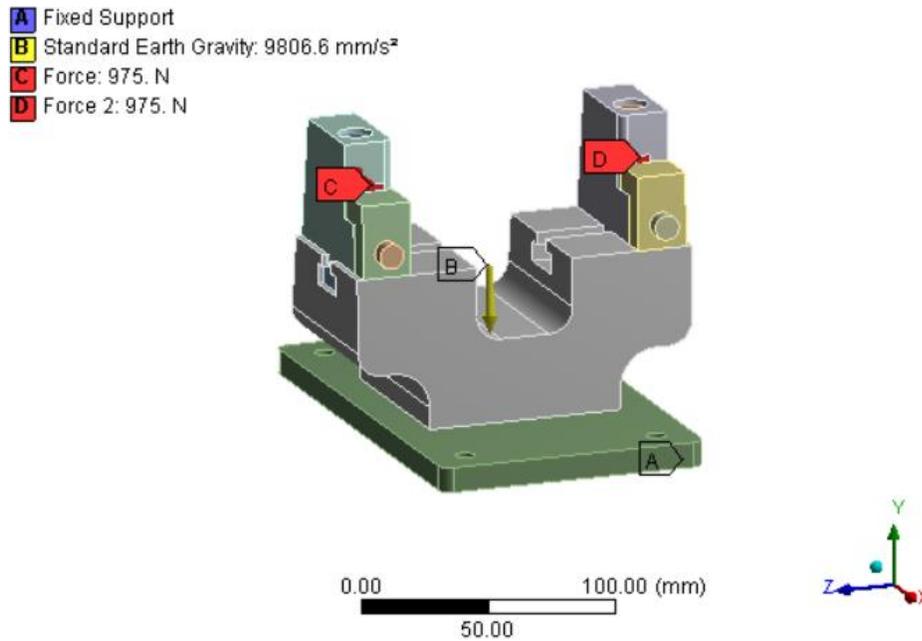
**Figura 39.** Especificaciones para el diseño del yunque según la norma.  
**Fuente:** [16].

El yunque se diseña y modela en Acero AISI 1045 teniendo en cuenta las cualidades y las propiedades previamente expuestas en la tabla 10, además se diseña con una geometría que permita graduar la altura a la que se pone la muestra y la distancia que separa a los soportes con el fin de ajustar el yunque a todas las posibles pruebas que se puedan realizar a los distintos materiales compuestos con matriz polimérica, la geometría es presentada con líneas ocultas visibles en la Fig. 40



**Figura 40.** Geometría del yunque de la máquina.  
**Fuente:** Autor.

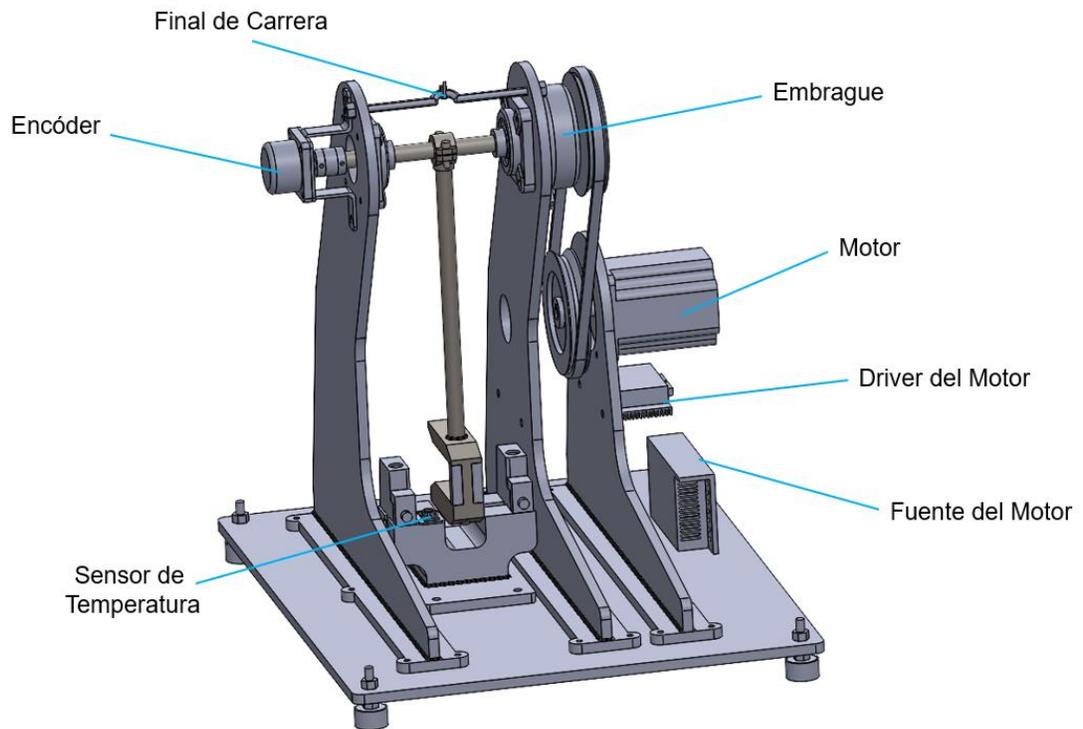
Una vez se establece la posible geometría del yunque se procede a evaluar el comportamiento que este presenta al ser sometido a las condiciones críticas de operación, para ello se realiza un estudio estático estructural de la pieza con ayuda del software ANSYS, se define un soporte fijo para la base del yunque, la cual va atornillada a la base de la máquina con tornillos Allen M8, y se le aplica una fuerza crítica equivalente a las reacciones de la probeta sobre la cara frontal del soporte, tal y como se observa en la Fig. 41



**Figura 41.** Condiciones del análisis estático estructural al yunque de la máquina.  
**Fuente:** Autor.

#### 4.3.2 Automatización

La finalidad de acondicionar de manera adecuada la máquina se orienta a brindar al operario no solo el despliegue de resultados reales sino también a facilitar el manejo de la misma a través de una automatización conveniente que garantice el buen funcionamiento.[35] A continuación en la Fig. 42 se pueden apreciar cada uno de los elementos electrónicos que conforman el circuito, los cuales se presentan en la tabla 14, junto con su respectiva función.



**Figura 42.** Componentes de Automatización.  
**Fuente:** Autor.

**Tabla 14.** Componentes electrónicos y su función

Componente	Función
Motor	Se encarga de elevar la masa móvil la posición inicial de la prueba
Driver del Motor	Se encarga del control y funcionamiento correcto del motor
Encóder	Permite obtener y guardar la posición inicial y final de la masa móvil
Final de carrera	Indica cuando la masa móvil se encuentra en la posición inicial y manda una señal para que el motor se detenga
Sensor de	Obtiene la temperatura de la probeta antes de ser ensayada

temperatura	
Embrague	Es utilizado para el acople y caída libre de la masa móvil luego de llegar a la posición inicial
Microcontrolador	Realiza las acciones o instrucciones para las cuales se le programa, en este caso calcula la diferencia entre la altura inicial y la final y entrega los resultados de resistencia del material testeado
Panel de control	Permite controlar las acciones que efectúan cada uno de los componentes durante la prueba

Fuente: Autor.

#### ❖ Selección del Motor

El componente principal para sistema de elevación del péndulo es un motor a pasos, el cual puede iniciar su movimiento y detenerse en un instante y posición específica, además cuenta con alta capacidad de torque a baja velocidad.

- *Torque, velocidad y potencia del motor*

Para el cálculo de los parámetros de desempeño del motor se tienen como datos: la velocidad tangencial (3,46 [ms]) y el radio de giro (0,32 [m]); dado por la distancia del centro de rotación al centro de impacto. La velocidad angular viene dada por la Ec. (23)

$$w = \frac{V}{r} \quad (23)$$

Reemplazando los datos se tiene:

$$w = \frac{3,46}{0,32} = 10.81 \left[ \frac{rad}{s} \right]$$

La velocidad angular es:

$$w = 103,23 [rpm]$$

Para el cálculo del torque necesario se utiliza la Ec. (24)

$$T = \Sigma I \cdot \alpha \quad (24)$$

Donde:

$T$ : Torque

$I$ : Momento de inercia

$\alpha$ : Aceleración angular

La aceleración angular del péndulo está dada por la Ec. (25)

$$\alpha = \frac{a_t}{r} \quad (25)$$

Reemplazando se tiene:

$$\alpha = \frac{9.81}{0.32} = 30.63 \left[ \frac{rad}{s^2} \right]$$

Utilizando los valores de inercia del péndulo calculado con anterioridad mediante software ( $0.137 [kg \cdot m^2]$ ) y aceleración angular ( $30.63 \left[ \frac{rad}{s^2} \right]$ ) se tiene el torque necesario para levantar el péndulo:

$$T = 0.137 \cdot 30.63 = 4.2 [N \cdot m]$$

Para calcular la velocidad es necesario conocer el número total de pasos para obtener un giro completo del motor, para ello se emplea la Ec. (26)

$$Total \ de \ pasos = \frac{360}{Grados \ en \ cada \ paso} \quad (26)$$

Según la ficha técnica del motor cada paso tiene  $1,8^\circ$  por ende el total de pasos es:

$$Total \ de \ pasos = \frac{360}{1.8} = 200 \ pasos$$

Según el programa cada paso está configurado a 10 ms de estado alto y 10 ms de estado bajo lo que equivale a 20 ms por cada paso, por medio de la Ec. (27) obtiene el tiempo en que el eje del motor da un giro es decir 360°

$$200 \text{ pasos} \cdot 20 \text{ ms} = 4000 \text{ ms} = 4 \text{ s} \quad (27)$$

Conociendo este dato obtenemos el número de revoluciones del eje en un minuto y esta es la velocidad del motor implementando la Ec. (28)

$$\frac{60 \text{ s}}{4 \text{ s}} = 15 \text{ rpm} \quad (28)$$

La velocidad del motor es de 15rpm, por esto para calcular el tiempo que le toma al motor elevar el péndulo desde la posición de reposo hasta la posición inicial de la prueba se debe tener en cuenta que 15 revoluciones equivalen a 5400° y que el recorrido desde la posición de inicio hasta la posición de reposo es de 150°, entonces:

$$\left. \begin{array}{l} 5400^\circ \rightarrow 60 \text{ s} \\ 150^\circ \rightarrow x \end{array} \right\} x = \frac{60 \text{ s} \cdot 150^\circ}{5400^\circ} = 1.66 \text{ s}$$

Para el cálculo de la potencia del motor se toma en cuenta:

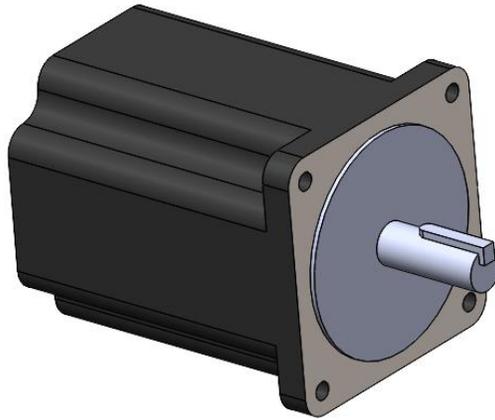
- ✓ Torque requerido 4.2 [N · m]
- ✓ Velocidad de subida del péndulo 15 [rpm]
- ✓ Eficiencia del motor a pasos, no existen datos específicos que determinen este parámetro, aplicando un criterio conservador se establece una eficiencia del 80%.

$$P_m = \frac{T \cdot v_s}{9550 \cdot \eta_m} \quad [kW] \quad (29)$$

$$P_m = \frac{4.2 \cdot 15}{9550 \cdot 0.8} = 0.0082 \quad [kW]$$

$$P_m = 0.011 [Hp]$$

Según los cálculos se debe seleccionar un motor con un torque superior a  $4.2 [N \cdot m]$ , por este motivo se elige el Motor Paso a Paso Nema 34 34HS38-4204D-E1000 con Torque de  $7.0 [N \cdot m]$ . (Anexo 3).



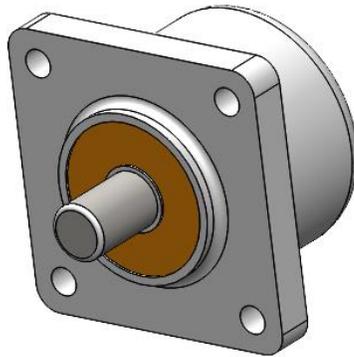
**Figura 43.** Motor nema 34.  
**Fuente:** Autor.

- *Driver del motor*

El DM860 es un controlador paso a paso totalmente digital desarrollado con un algoritmo de control avanzado basado en la última tecnología de control de movimiento. Ha logrado un nivel único de suavidad del sistema, proporcionando un par óptimo. En comparación con los accionamientos analógicos tradicionales, el DM860 puede accionar un motor paso a paso con un ruido mucho más bajo, un calentamiento más bajo y un movimiento más suave. Sus características lo hacen una opción ideal para aplicaciones de alta exigencia. (Anexo 4)

- ❖ Selección del Encóder

El FNC 63K - 63D Series, de brida cuadrada, es un Encóder incremental que determina el ángulo de posición por medio de realizar cuentas incrementales. Este instrumento permite medir la posición inicial  $\theta_1$  y final del martillo  $\theta_2$ , así como otros datos del ensayo, los cuales son enviados para ser procesados al microcontrolador (Anexo 5), para realizar el acople del Encóder con el eje de la masa móvil se emplea un acoplamiento CFP80 (Anexo 9).

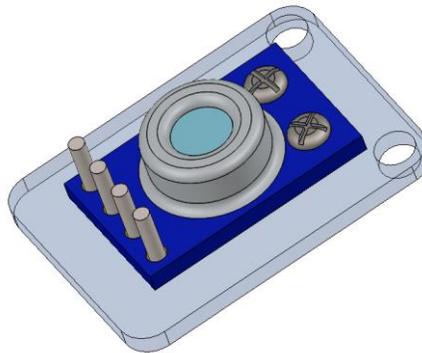


**Figura 44.** Encóder incremental rotativo

**Fuente:** Autor.

#### ❖ Selección sensor de temperatura

El Sensor MLX90614 es un chip de silicio con una fina membrana micro mecanizada, diseñada para ser sensible a la radiación infrarroja emitida por un objeto a distancia. El sensor posee internamente una etapa de amplificación y digitalización de la señal procedente de la membrana.



**Figura 45.** Sensor de temperatura infrarrojo MLX90614 GY906

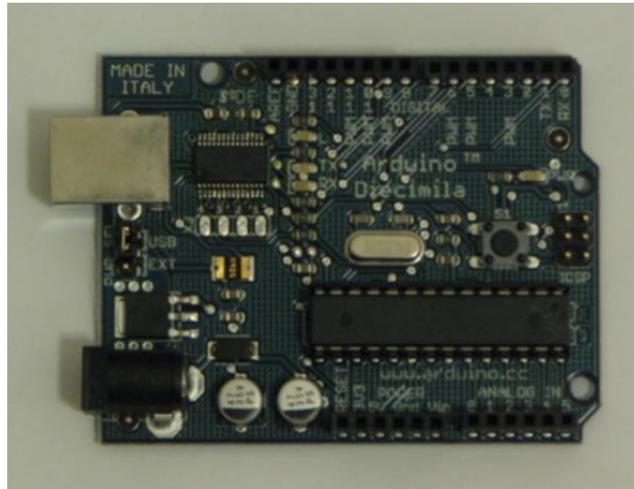
**Fuente:** Autor.

#### ❖ Embrague electromagnético

Un embrague electromagnético funciona según el principio básico de atracción magnética. Cerrar un interruptor envía corriente eléctrica a un electroimán o "campo", produciendo una fuerte atracción magnética que se concentra alrededor de los polos magnéticos del campo. La atracción magnética salta el pequeño espacio de aire entre el campo y el rotor, lo que hace que el rotor sea un imán giratorio. Este "imán" atrae la armadura, la agarra con fuerza y hace que gire con el rotor. Al abrir el interruptor, se apaga el imán y se desacopla el embrague. Debido a las condiciones de operación de bajo torque se selecciona el modelo de menor capacidad TG-105. (Anexos 6 y 7)

#### ❖ Selección del microcontrolador

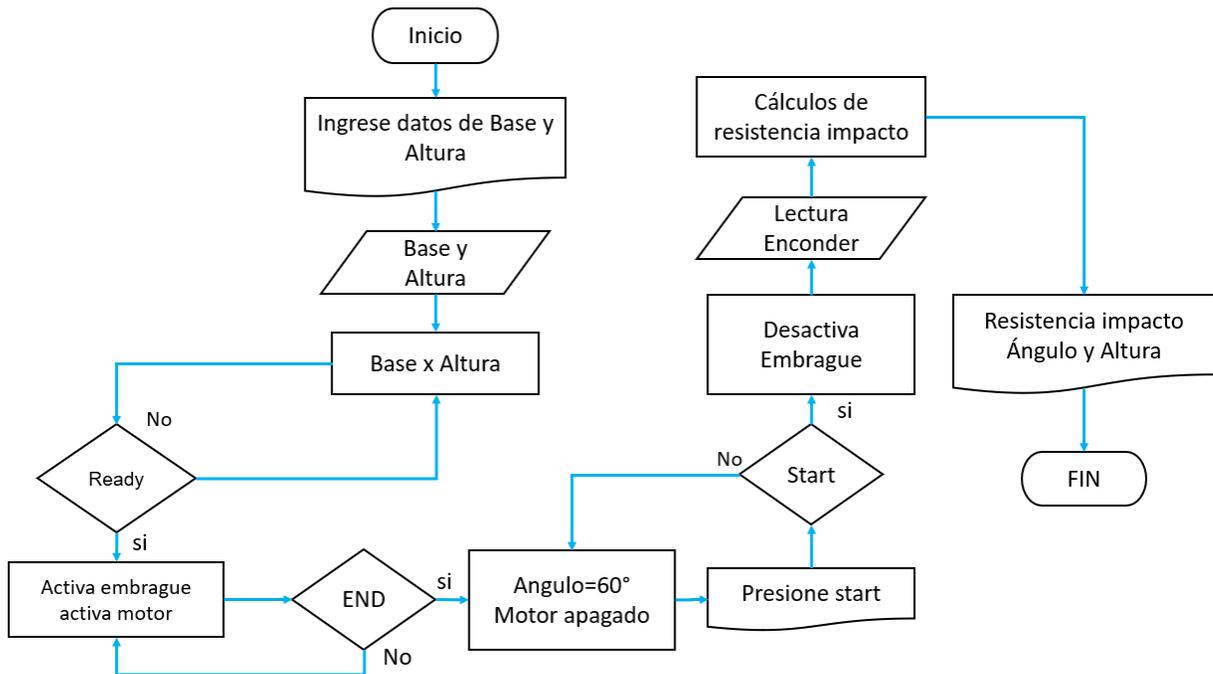
Arduino es una plataforma de prototipos electrónica de código abierto basada en hardware y software flexibles y fáciles de usar. Está pensado para artistas, diseñadores, como hobby y para cualquiera interesado en crear objetos o entornos interactivos. Arduino puede sentir el entorno mediante la recepción de entradas desde una variedad de sensores y puede afectar a su alrededor mediante el control de luces, motores y otros artefactos. El microcontrolador de la placa se programa usando el Arduino Programming Language y el Arduino Development Environment. Los proyectos de Arduino pueden ser autónomos o se pueden comunicar con software en ejecución en un ordenador (por ejemplo, con Flash, Processing, MaxMSP, etc.). El software se puede descargar gratuitamente.[36]



**Figura 46.** Aduino Diecimila  
Fuente: [36].

- *Programación del microcontrolador*

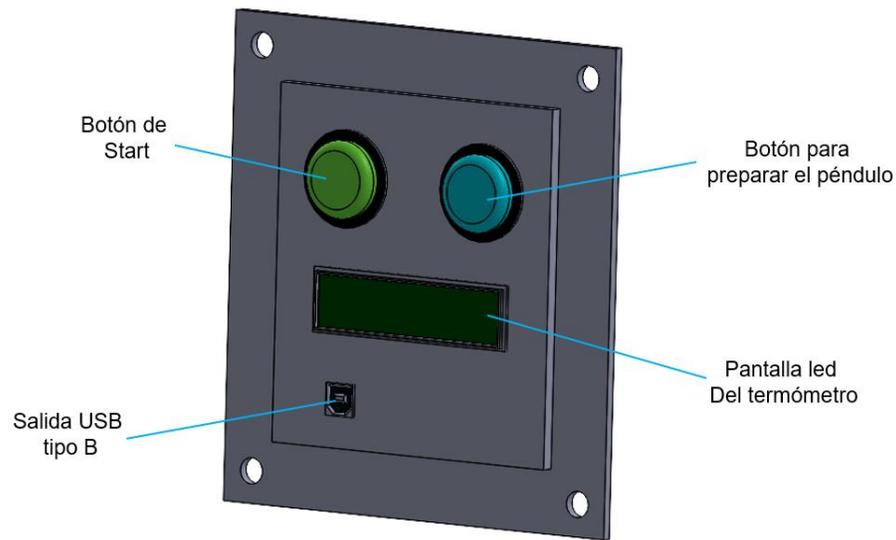
En la Fig. 47 se presenta el esquema de la programación del microcontrolador



**Figura 47.** Esquema de la programación del microcontrolador  
Fuente: Autor.

#### ❖ Panel de Control

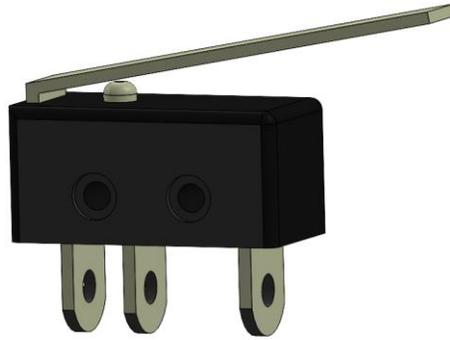
El panel de control se diseña de forma modular al igual que las demás partes del equipo con el fin de facilitar su mantenimiento y su instalación, los componentes del panel de control son el botón para preparar el péndulo, el botón para iniciar la prueba, la pantalla led que muestra la temperatura y una salida USB tipo B que conecta el microcontrolador con el Computador para entregar los datos de las pruebas, su geometría se presenta en la Fig. 48



**Figura 48.** Panel de control  
**Fuente:** Autor.

#### ❖ Final de carrera

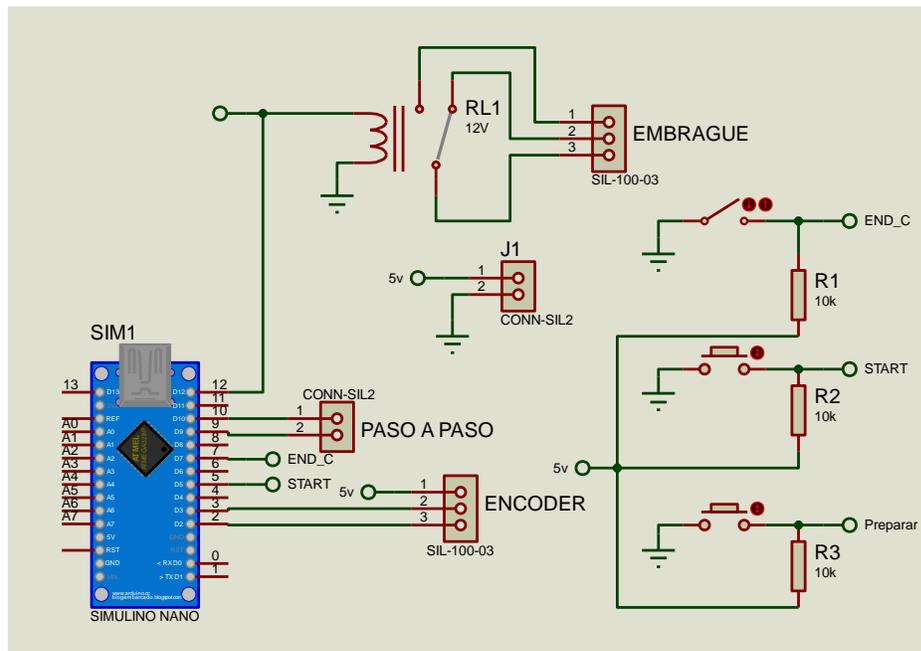
Este pequeño interruptor puede ser utilizado como un interruptor de propósito general o final de carrera en máquinas o robots. Es mucho más pequeño de lo normal ya que tan sólo mide 12.8x6x6.5mm y su palanca mide 13.5mm de largo terminada recta. Tiene un pin central y dos laterales (SPDT) y soporta hasta 1A a 250VAC. Es el final de carrera ideal cuando el espacio es escaso.



**Figura 49.** Final de carrera de 13.5 mm  
**Fuente:** Autor.

❖ Diagrama esquemático conexiones eléctricas de control

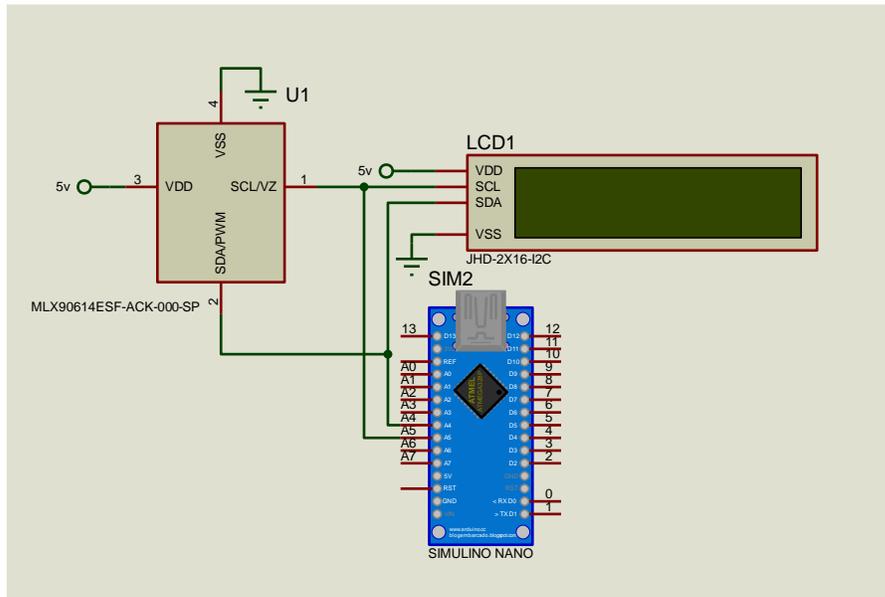
En la Fig. 50 se puede apreciar cada una de las partes que conforman el circuito electrónico programable con cada una de sus respectivas conexiones



**Figura 50.** Diagrama esquemático conexiones eléctricas de control  
**Fuente:** Autor.

❖ Diagrama esquemático conexiones termómetro infrarrojo

En la Fig. 51 se puede apreciar el diagrama esquemático del termómetro infrarrojo con su respectiva conexión al microcontrolador y a la pantalla LCD



**Figura 51.** Diagrama esquemático de conexiones eléctricas del termómetro infrarrojo y display LCD  
**Fuente:** Autor.

## 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

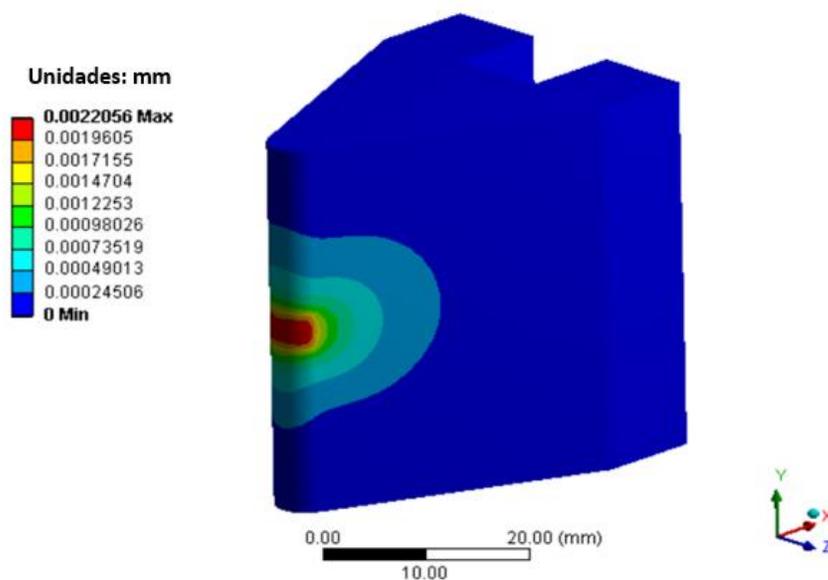
### 5.1 DISEÑO MECÁNICO

En esta sección se presentan los resultados obtenidos luego del análisis estático estructural realizado a las piezas por medio del software, de igual forma se realiza un análisis a los mismos en el cual se tendrá en cuenta las magnitudes que presenten la deformación y el esfuerzo equivalente, así como el valor que arroje el factor de seguridad, para así corroborar la geometría final que tendrá la pieza.

#### 5.1.1 Péndulo de 10 J

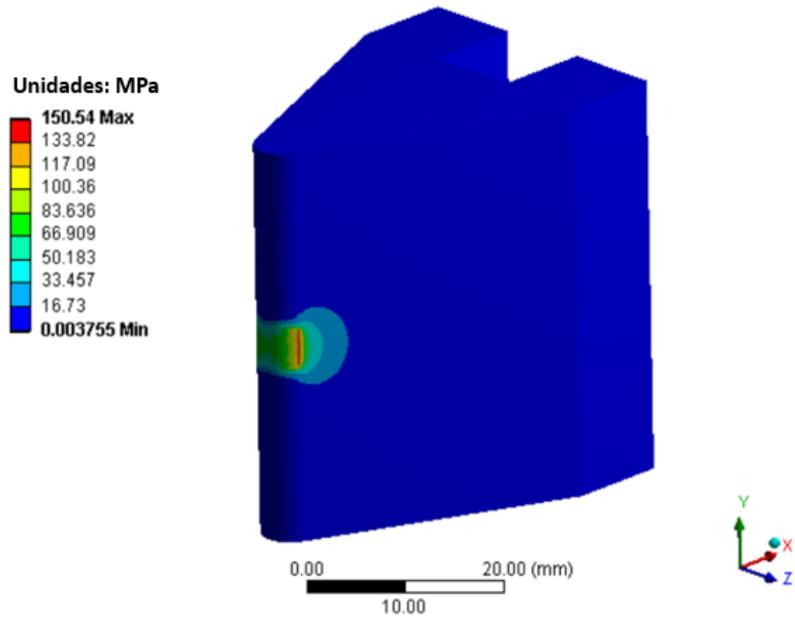
##### ❖ Percutor del péndulo de 10 J

Los resultados del análisis estático estructural sobre la pieza son presentados a continuación, la deformación en la Fig. 52, el esfuerzo equivalente en la Fig. 53 y el factor de seguridad en la Fig. 54, donde se puede observar que, la deformación es mínima, el esfuerzo equivalente es mucho menor al permisible y el factor de seguridad que encuentra en la zona de impacto, es aceptable y superior a 1, avalando así la geometría para ser implementada en el péndulo de la máquina.

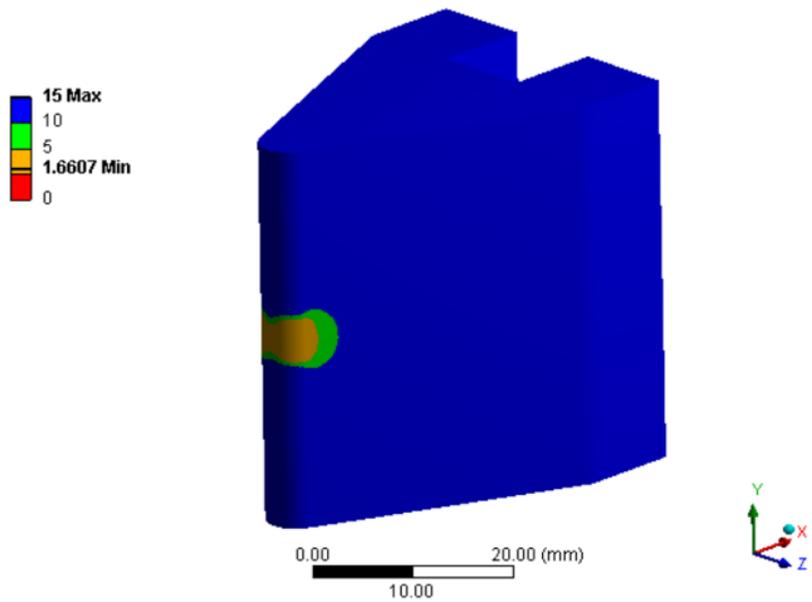


**Figura 52.** Deformación del percutor del péndulo de 10J.

**Fuente:** Autor.



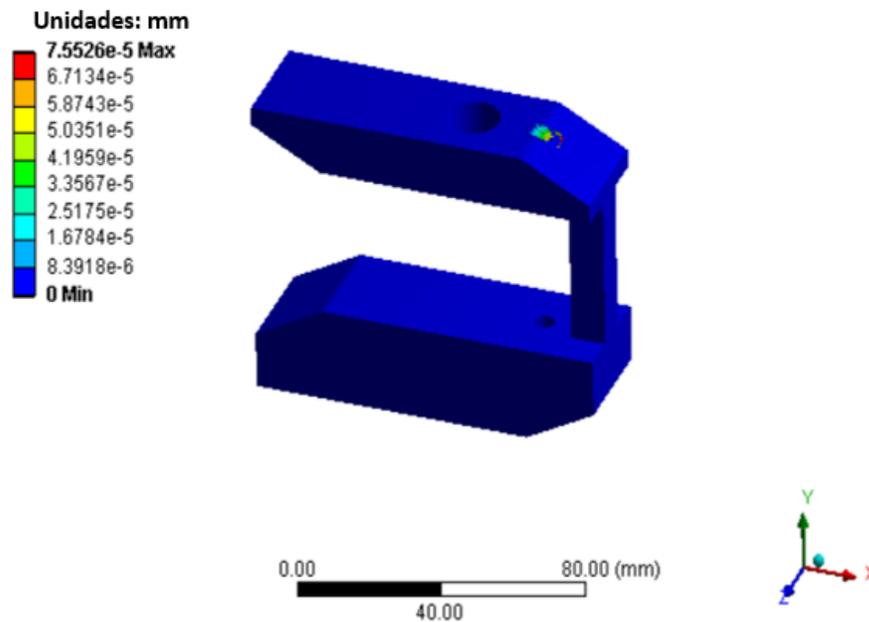
**Figura 53.** Esfuerzo equivalente del percutor del péndulo de 10J.  
**Fuente:** Autor.



**Figura 54.** Factor de seguridad del percutor del péndulo de 10J  
**Fuente:** Autor.

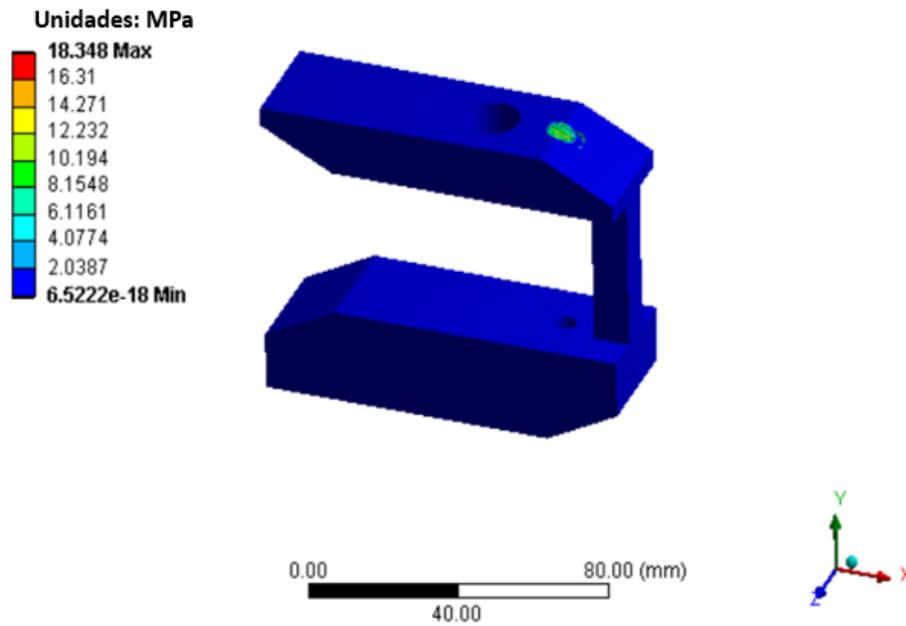
❖ Martillo del péndulo de 10 J

Los resultados del análisis estático estructural sobre la pieza son presentados a continuación, la deformación en la Fig. 55, el esfuerzo equivalente en la Fig. 56 y el factor de seguridad en la Fig. 57, donde se puede observar que, la deformación esta por el orden de  $10^{-5}mm$ , el esfuerzo equivalente es mucho menor al esfuerzo permisible del material y el factor de seguridad indica que la pieza no presenta ninguna falla, avalando así la geometría para ser implementada en el péndulo de la máquina

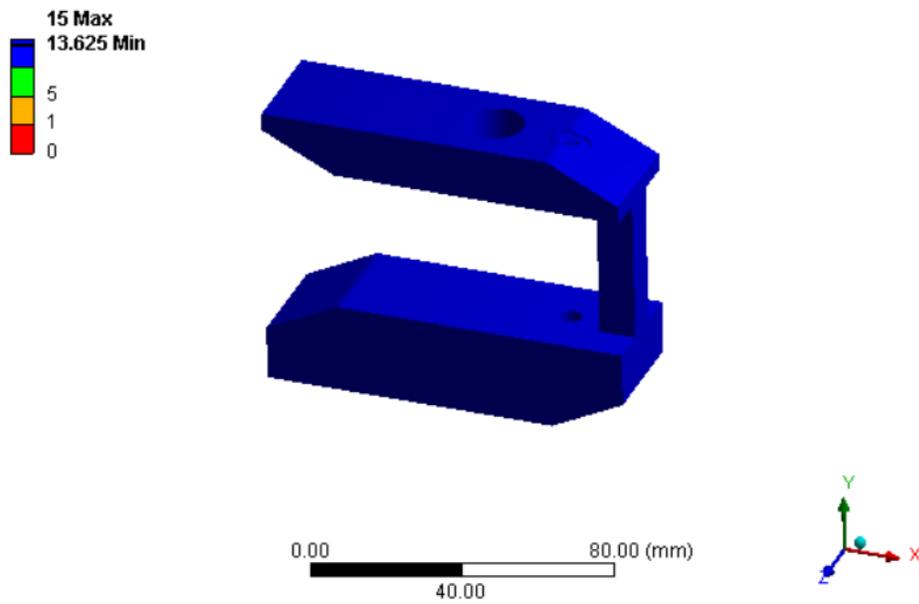


**Figura 55.** Deformación del martillo del péndulo de 10J.

**Fuente:** Autor.



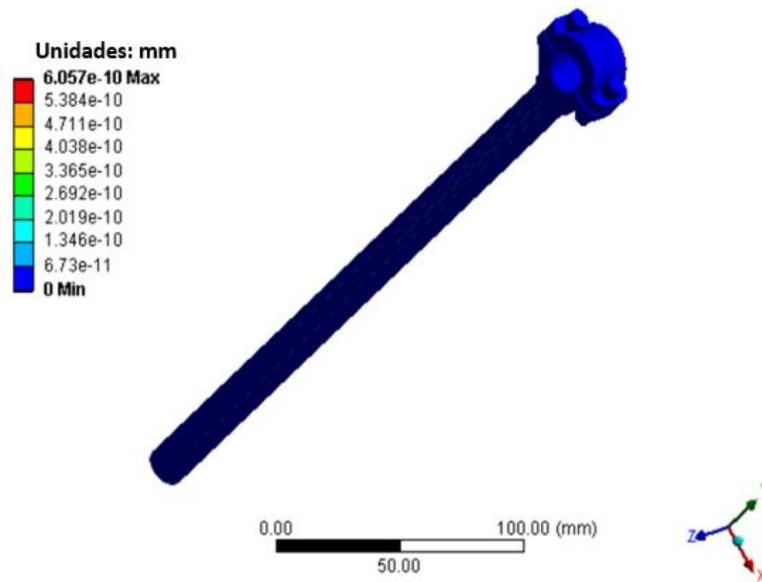
**Figura 56.** Esfuerzo equivalente del martillo del péndulo de 10J.  
**Fuente:** Autor.



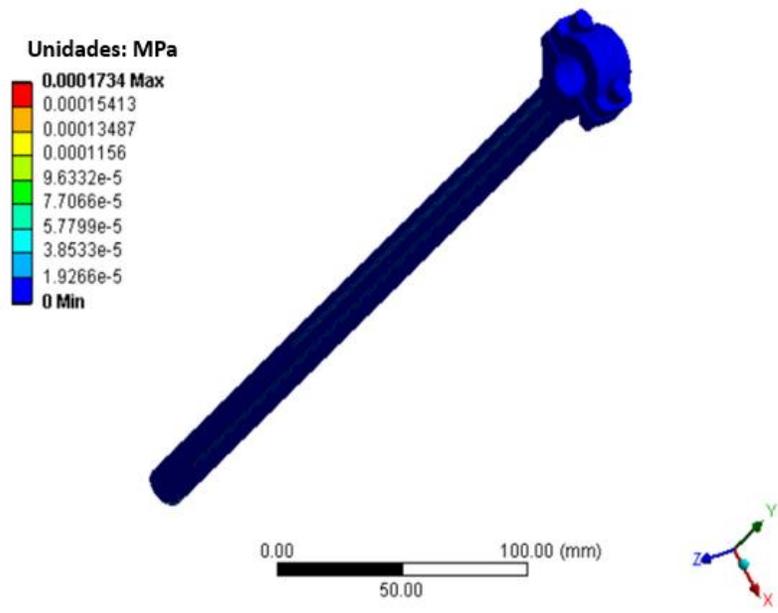
**Figura 57.** Factor de seguridad del martillo del péndulo de 10J  
**Fuente:** Autor.

❖ Vástago y unión del péndulo de 10 J

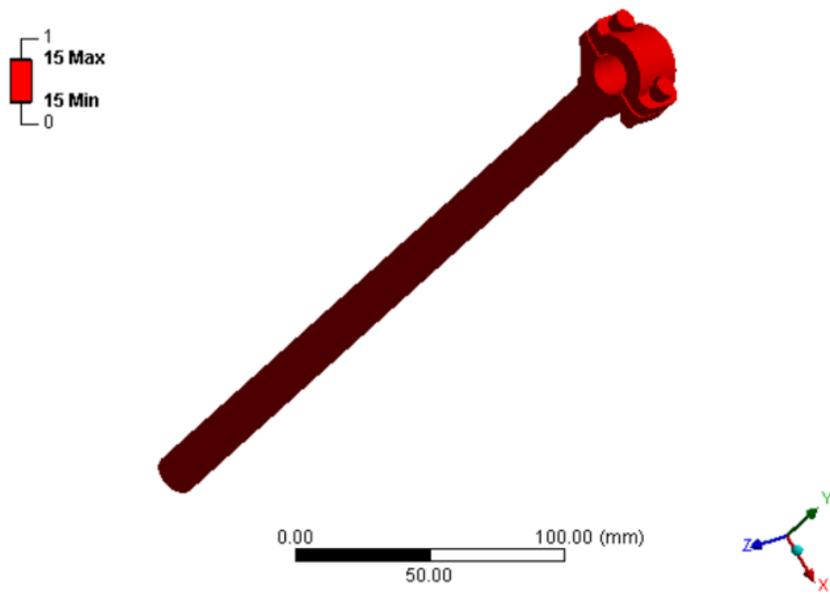
Los resultados del análisis estático estructural sobre la pieza son presentados a continuación, la deformación en la Fig. 58, el esfuerzo equivalente en la Fig. 59 y el factor de seguridad en la Fig. 60, donde se puede observar que, la deformación esta por el orden de  $10^{-10}mm$ , el esfuerzo equivalente es mucho menor al esfuerzo permisible del material y el factor de seguridad indica que la pieza no presenta ninguna falla, avalando así la geometría para ser implementada en el péndulo de la máquina



**Figura 58.** Deformación del vástago del péndulo de 10J.  
**Fuente:** Autor.



**Figura 59.** Esfuerzo equivalente del vástago del péndulo de 10J.  
**Fuente:** Autor.



**Figura 60.** Factor de seguridad del vástago del péndulo de 10J.  
**Fuente:** Autor.

❖ Geometría final del péndulo de 10 J

En la Fig. 61, se puede observar la geometría del péndulo diseñado para entregar 10 J



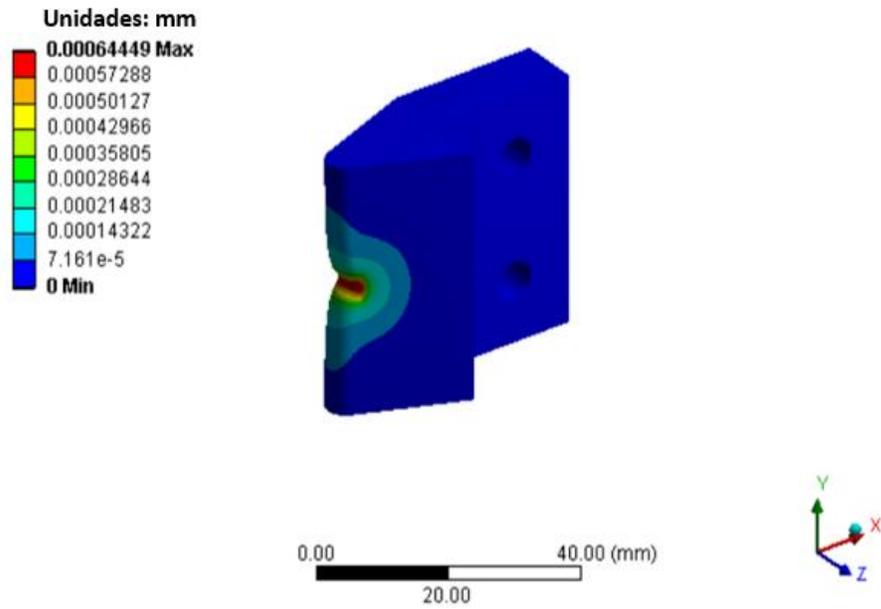
**Figura 61.** Geometría del péndulo de 10J.  
**Fuente:** Autor.

Por medio del software se pudo establecer que el péndulo tiene una masa de 1658.05 *gr* y un volumen de 208644.62 *mm*<sup>3</sup>.

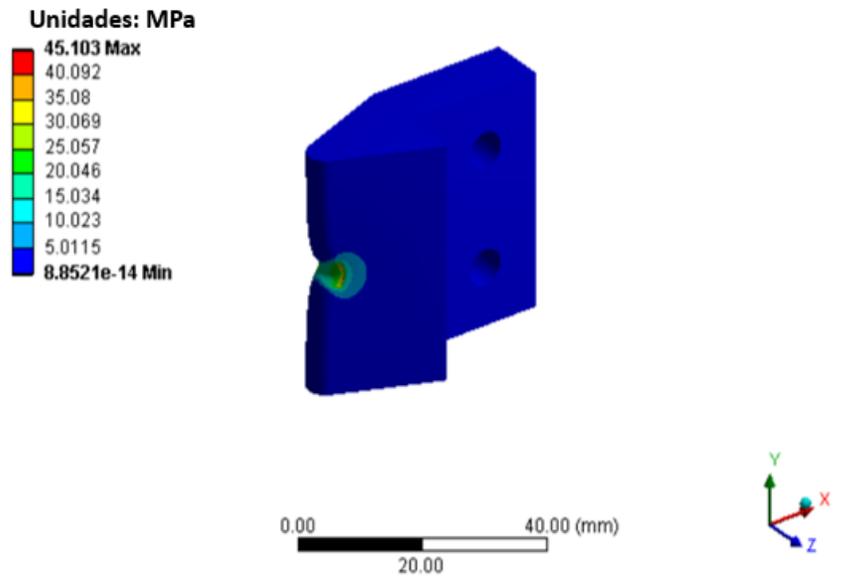
### 5.1.2 Péndulo de 5 J

❖ Percutor del péndulo de 5 J

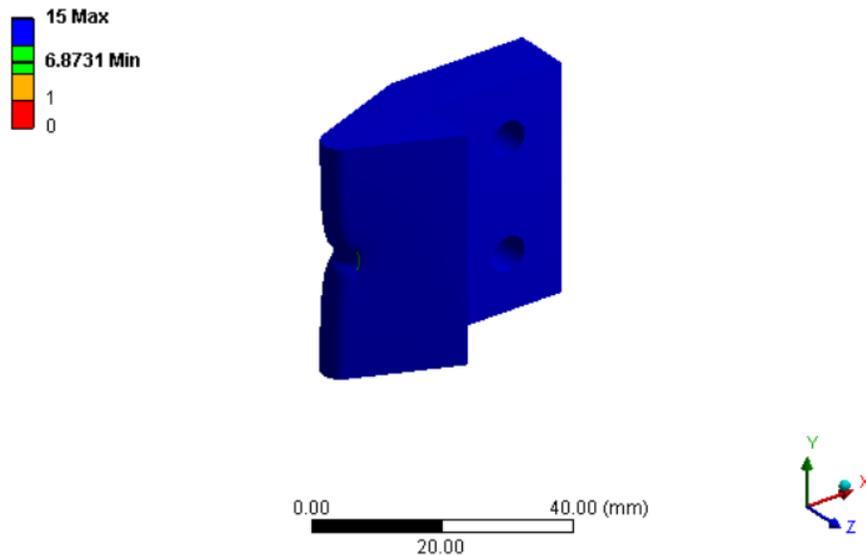
Los resultados del análisis estático estructural sobre la pieza son presentados a continuación, la deformación en la Fig. 62, el esfuerzo equivalente en la Fig. 63 y el factor de seguridad en la Fig. 64, donde se puede observar que, la deformación presentada en la zona de impacto es mínima, el esfuerzo equivalente es mucho menor al permisible y por ende el factor de seguridad mínimo, que encuentra en la zona de impacto, es aceptable y superior a 1, avalando así la geometría para ser implementada en el péndulo de la máquina



**Figura 62.** Deformación del percutor del péndulo de 5J.  
Fuente: Autor.



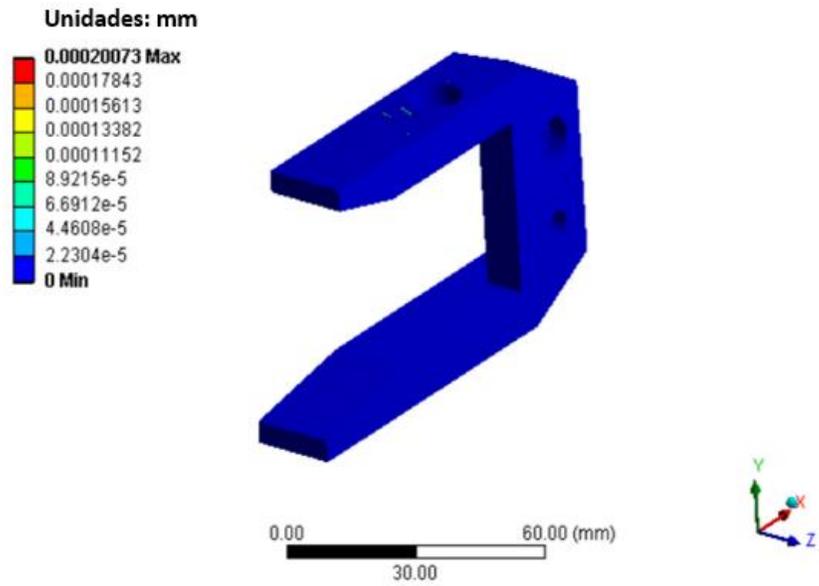
**Figura 63.** Esfuerzo equivalente del percutor del péndulo de 5J.  
Fuente: Autor.



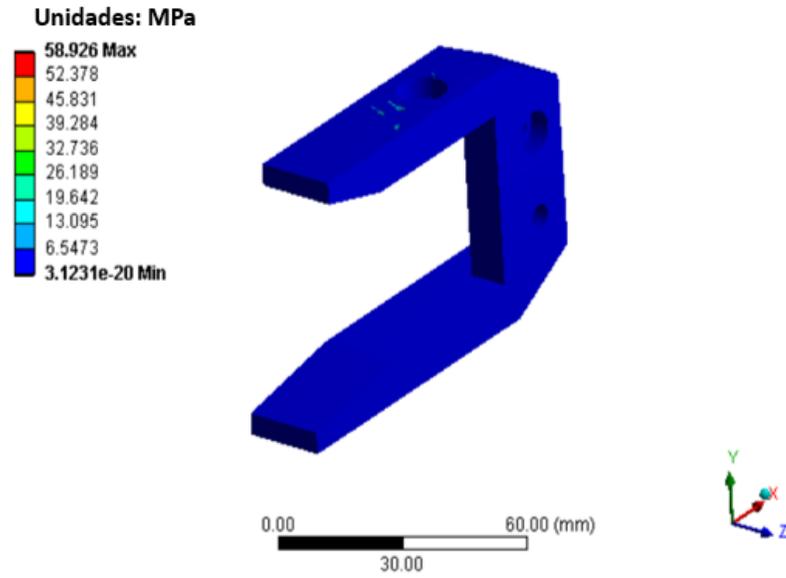
**Figura 64.** Factor de seguridad del percutor del péndulo de 5J  
**Fuente:** Autor.

❖ Martillo del péndulo de 5 J

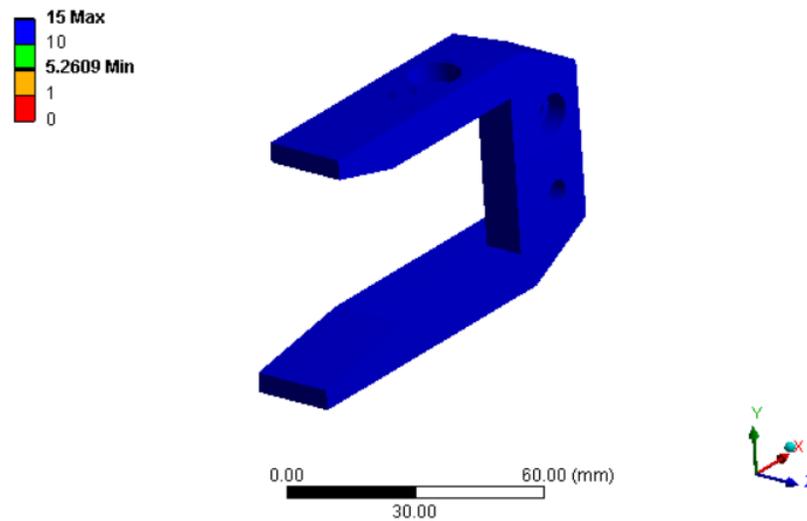
Los resultados del análisis estático estructural sobre la pieza son presentados a continuación, la deformación en la Fig. 65, el esfuerzo equivalente en la Fig. 66 y el factor de seguridad en la Fig. 67, donde se puede observar que, la deformación esta por el orden de  $10^{-4}mm$ , el esfuerzo equivalente es mucho menor al esfuerzo permisible del material y el factor de seguridad indica que la pieza no presenta ninguna falla, avalando así la geometría para ser implementada en el péndulo de la máquina



**Figura 65.** Deformación del martillo del péndulo de 5J.  
**Fuente:** Autor.



**Figura 66.** Esfuerzo equivalente del martillo del péndulo de 5J.  
**Fuente:** Autor.



**Figura 67.** Factor de seguridad del martillo del péndulo de 5J.  
**Fuente:** Autor.

❖ Vástago y unión del péndulo de 5 J

Los resultados del análisis estático estructural sobre la pieza son presentados a continuación, la deformación en la Fig. 68, el esfuerzo equivalente en la Fig. 69 y el factor de seguridad en la Fig. 70, donde se puede observar que, la deformación esta por el orden de  $10^{-10}mm$ , el esfuerzo equivalente es mucho menor al esfuerzo permisible del material y el factor de seguridad indica que la pieza no presenta ninguna falla, avalando así la geometría para ser implementada en el péndulo de la máquina

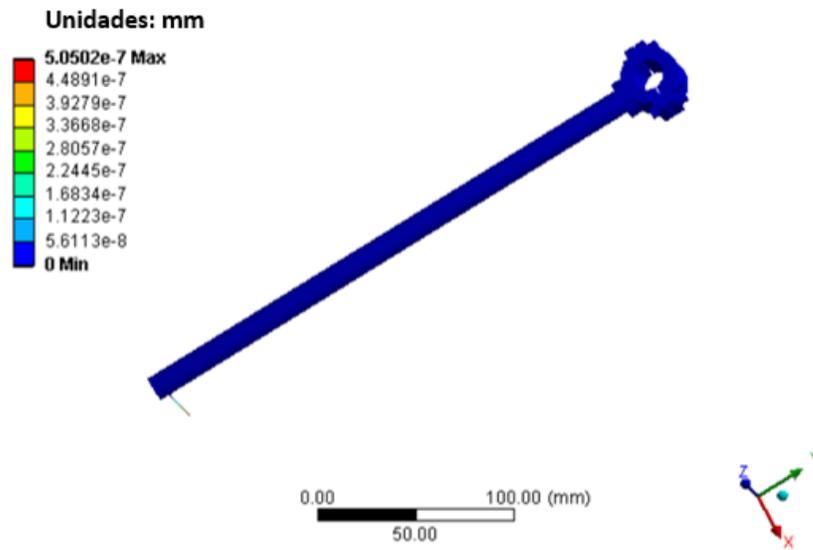


Figura 68. Deformación del vástago del péndulo de 5J.  
 Fuente: Autor.

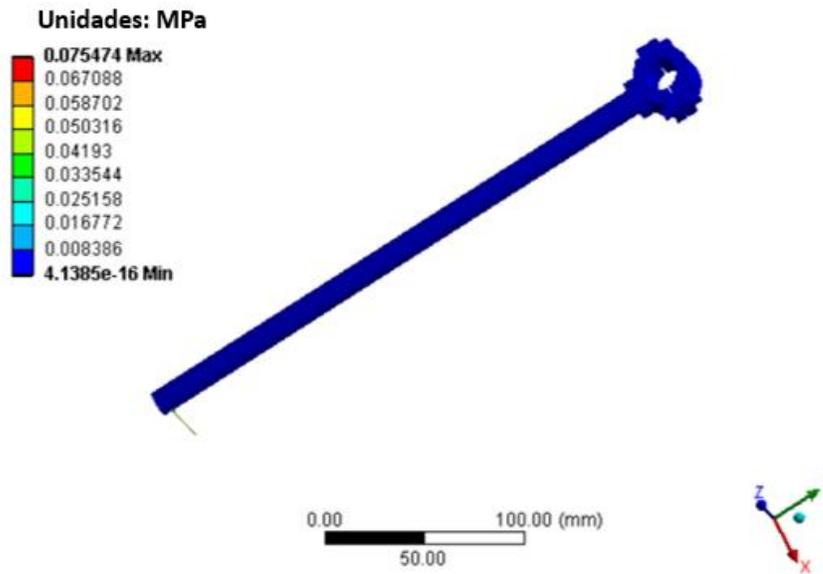
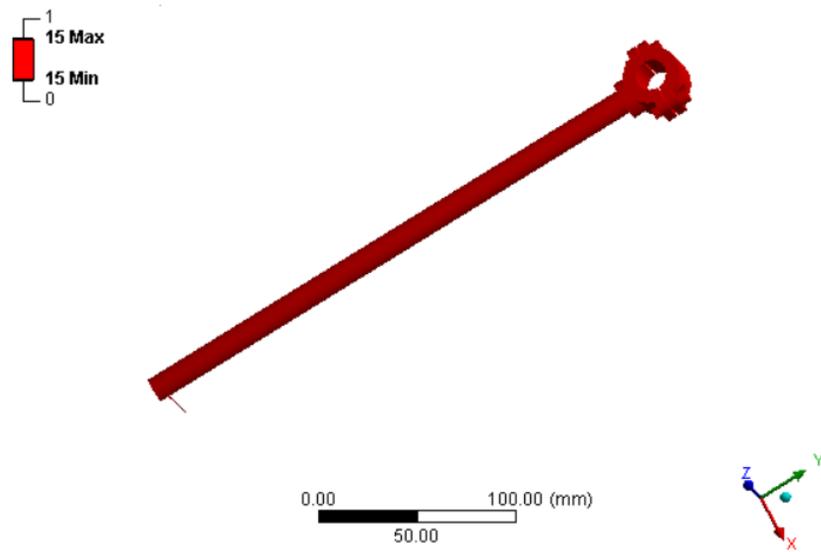


Figura 69. Esfuerzo equivalente del vástago del péndulo de 5J.  
 Fuente: Autor.



**Figura 70.** Factor de seguridad del vástago del péndulo de 5J.  
**Fuente:** Autor.

❖ Geometría Final del péndulo de 5 J

En la Fig. 71, se puede observar la geometría del péndulo diseñado para entregar 5 J

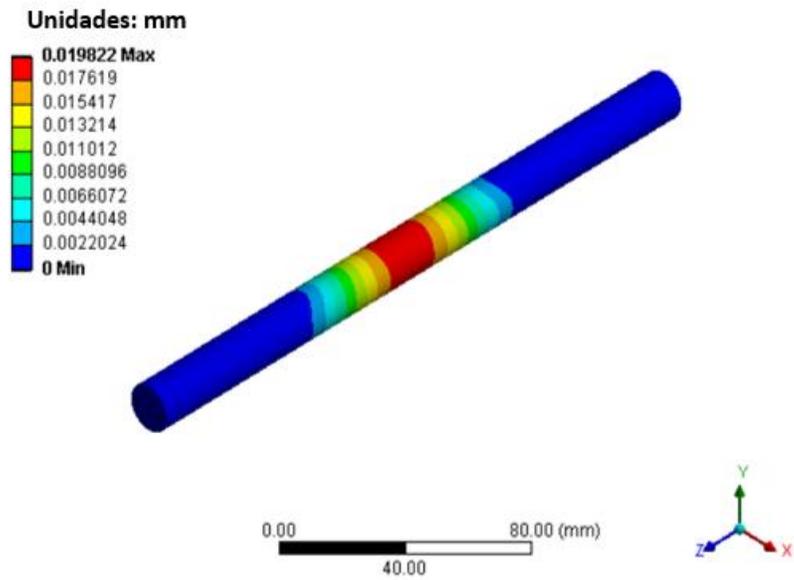


**Figura 71.** Geometría del péndulo de 5J.  
**Fuente:** Autor.

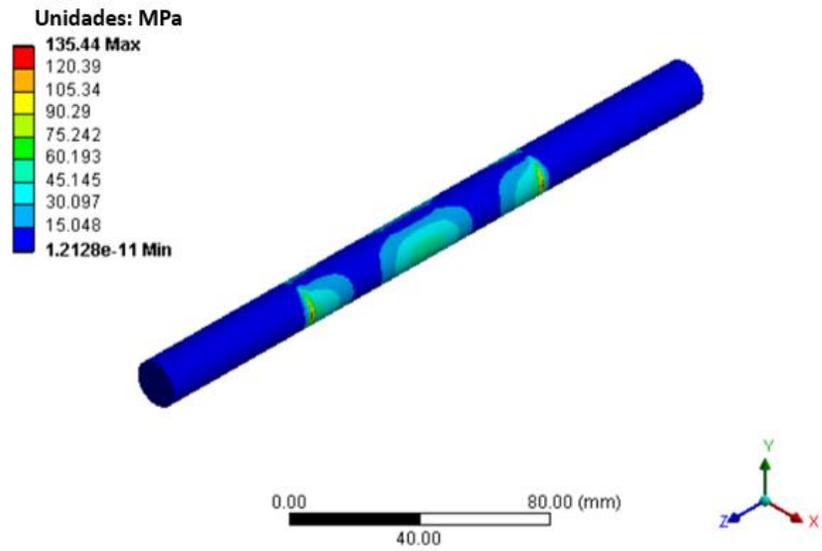
Por medio del software es posible establecer que el péndulo tiene una masa de 863.64 *gr* y un volumen de 109966.14 *mm*<sup>3</sup>.

### 5.1.3 Eje de la masa móvil

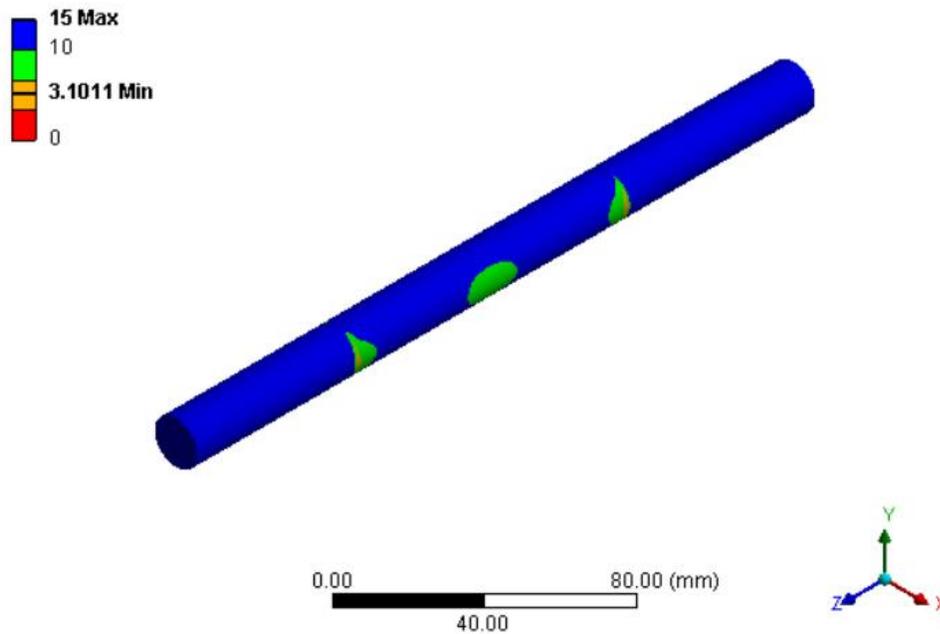
Los resultados del análisis estático estructural sobre la pieza son presentados a continuación, la deformación en la Fig. 72, el esfuerzo equivalente en la Fig. 73 y el factor de seguridad en la Fig. 74, donde se puede observar que, la deformación es mínima, el esfuerzo equivalente es menor al esfuerzo permisible del material y el factor de seguridad indica que la pieza no presenta ninguna falla, avalando así la geometría para ser implementada la máquina



**Figura 72.** Deformación del eje de la masa móvil.  
**Fuente:** Autor.



**Figura 73.** Esfuerzo equivalente del eje de la masa móvil.  
**Fuente:** Autor.



**Figura 74.** Factor de seguridad del eje de la masa móvil  
**Fuente:** Autor.

#### 5.1.4 Columnas

Los resultados del análisis estático estructural sobre la pieza son presentados a continuación, la deformación en la Fig. 75, el esfuerzo equivalente en la Fig. 76 y el factor de seguridad en la Fig. 77, donde se puede observar que, la deformación es mínima tratándose de columnas con una geometría alargada, el esfuerzo equivalente es menor al esfuerzo permisible del material y el factor de seguridad indica que la pieza no presenta ninguna falla al ser sometida a condiciones críticas de funcionamiento, avalando así la geometría para ser implementada la máquina

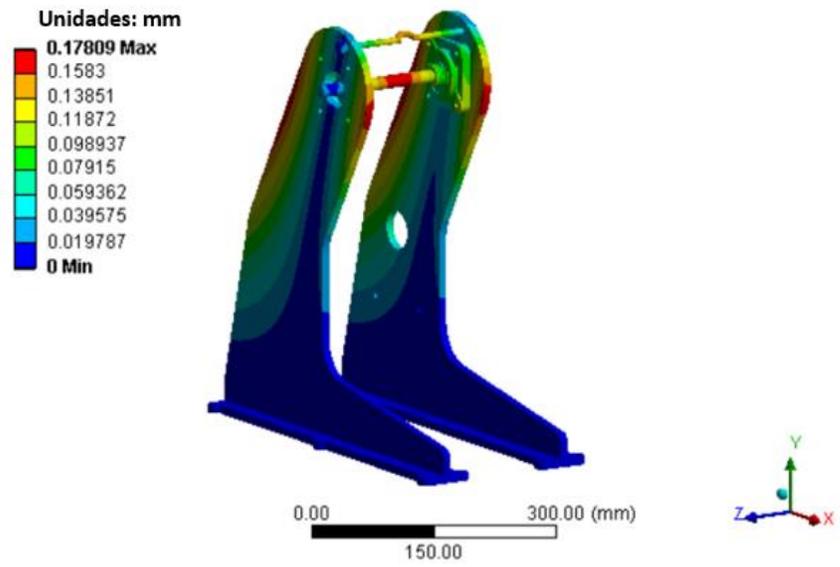


Figura 75. Deformación de las columnas.  
Fuente: Autor.

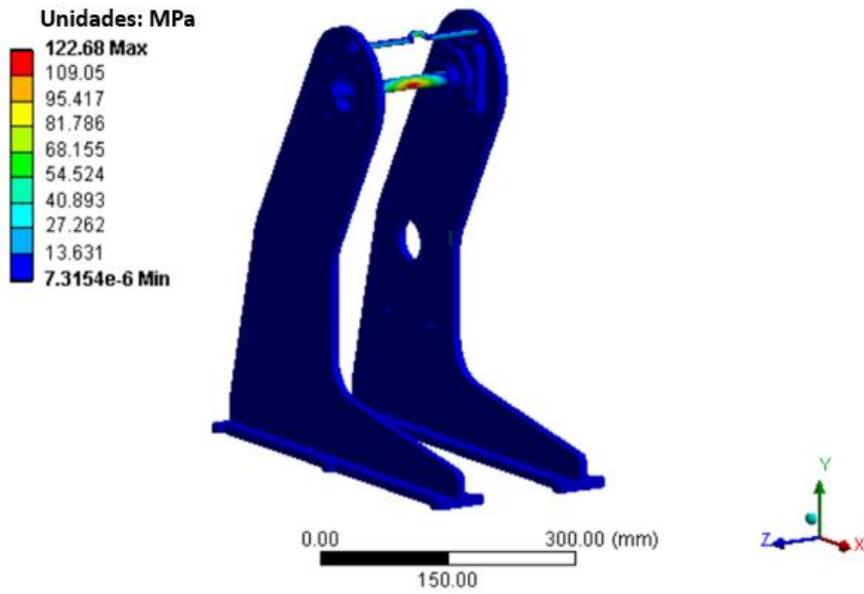
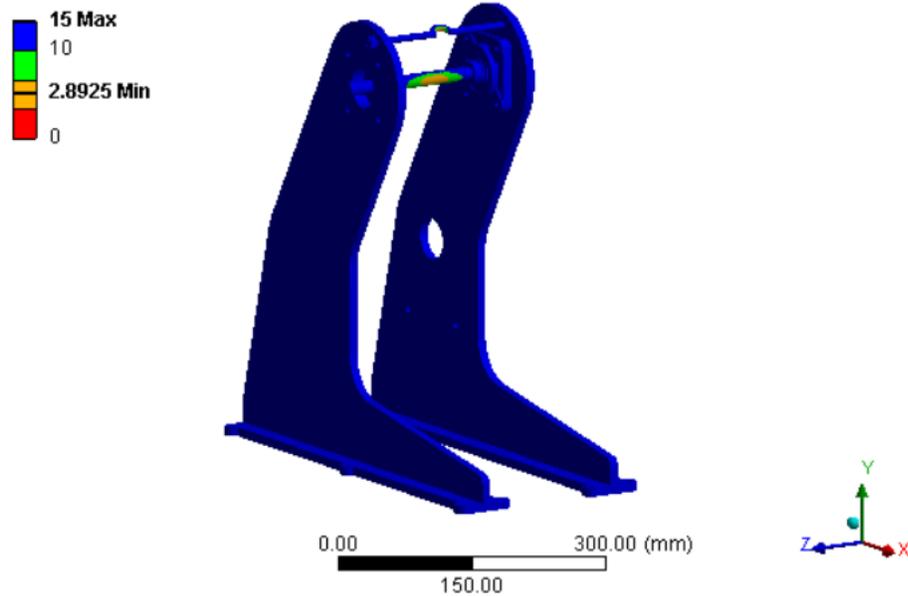


Figura 76. Esfuerzo equivalente en las columnas.  
Fuente: Autor.



**Figura 77.** Factor de seguridad de las columnas  
**Fuente:** Autor.

### 5.1.5 Yunque

Los resultados del análisis estático estructural sobre la pieza son presentados a continuación, la deformación en la Fig. 78, el esfuerzo equivalente en la Fig. 79 y el factor de seguridad en la Fig. 80, donde se puede observar que, la deformación es mínima tal y como se espera del yunque, el esfuerzo equivalente es menor al esfuerzo permisible del material y el factor de seguridad indica que el yunque no presenta falla alguna en su geometría, por lo cual es avalado para ser implementado en la máquina

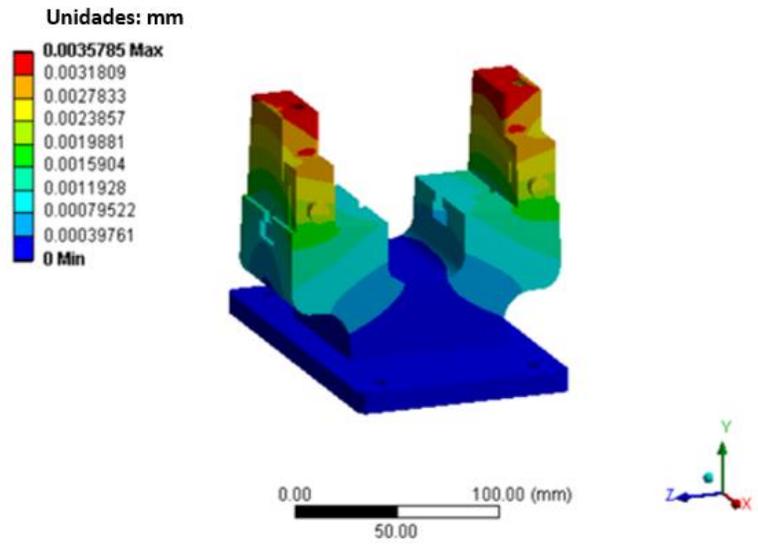


Figura 78. Deformación del yunque.  
Fuente: Autor.

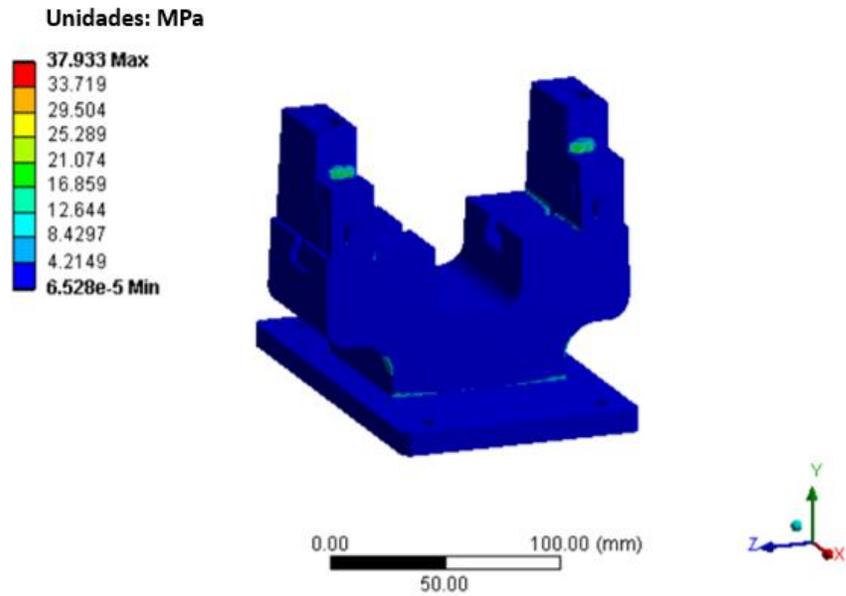
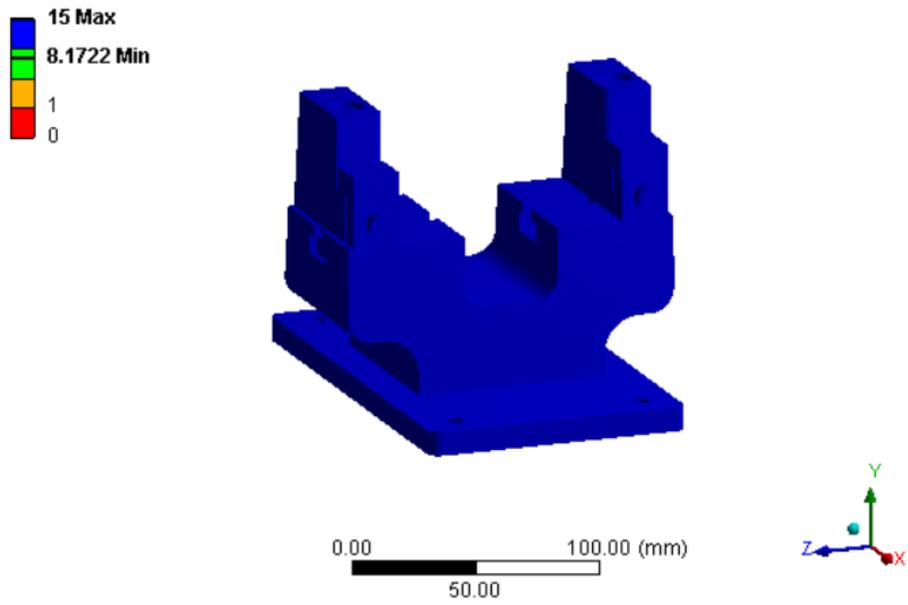


Figura 79. Esfuerzo equivalente del yunque.  
Fuente: Autor.



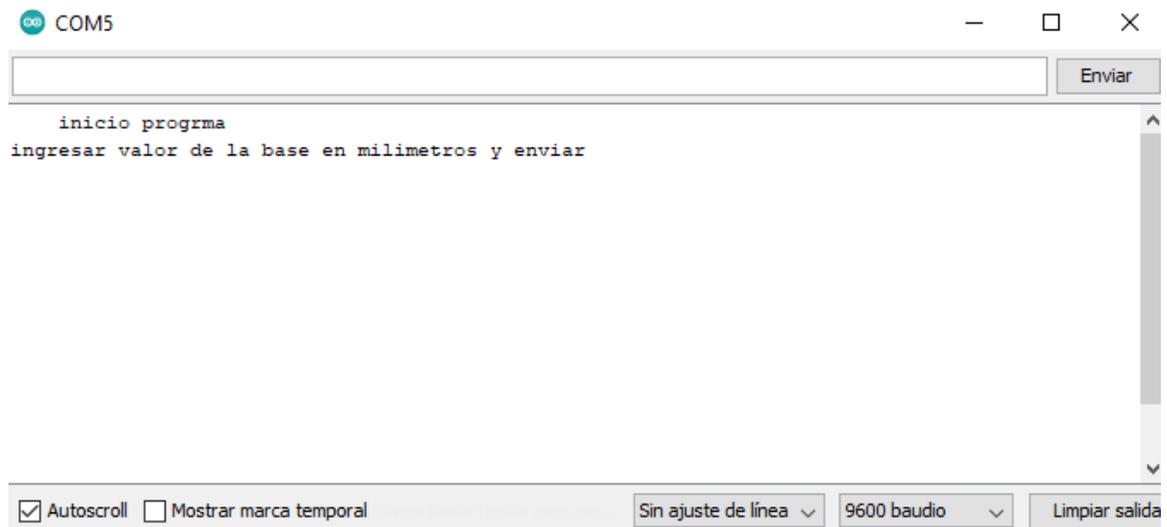
**Figura 80.** Factor de seguridad del yunque  
**Fuente:** Autor.

## 5.2 AUTOMATIZACIÓN

### 5.2.1 Funcionamiento del programa

En esta sección se describe el funcionamiento del sistema programable en el interfaz de Arduino IDE, los datos arrojados en esta prueba son irrelevantes ya que solo se simula el funcionamiento de la máquina con el fin de observar y garantizar el comportamiento del programa, el código realizado se encuentra en el Anexo 12.

En la Fig. 81 se puede apreciar la interfaz a utilizar, cuenta con una ventana de ingreso de datos y una ventana de salida de los mismos, al iniciar el programa pide al usuario ingresar las dimensiones de la probeta en milímetros

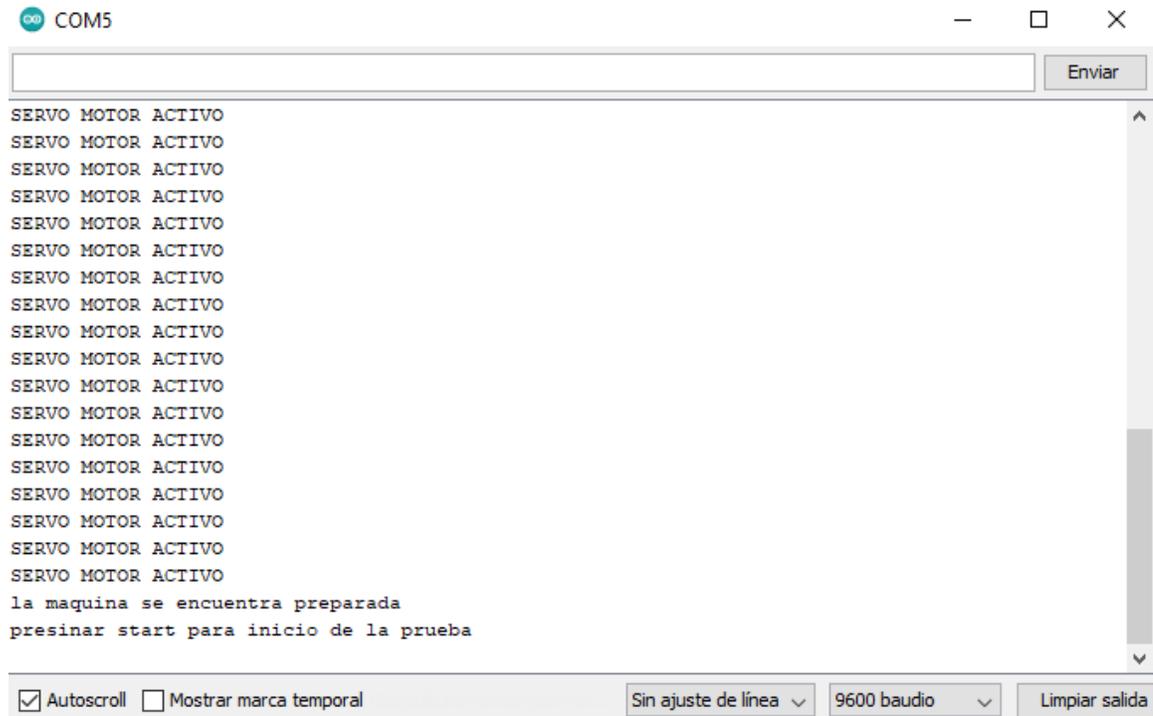


**Figura 81.** Inicio del programa  
**Fuente:** Autor.

Luego de presionar *Enviar* el programa calcula el área de impacto de la probeta y guarda el resultado, también indica al usuario que la siguiente acción que debe realizar es presionar el botón de *Preparar* que se encuentra en el panel de control de la máquina

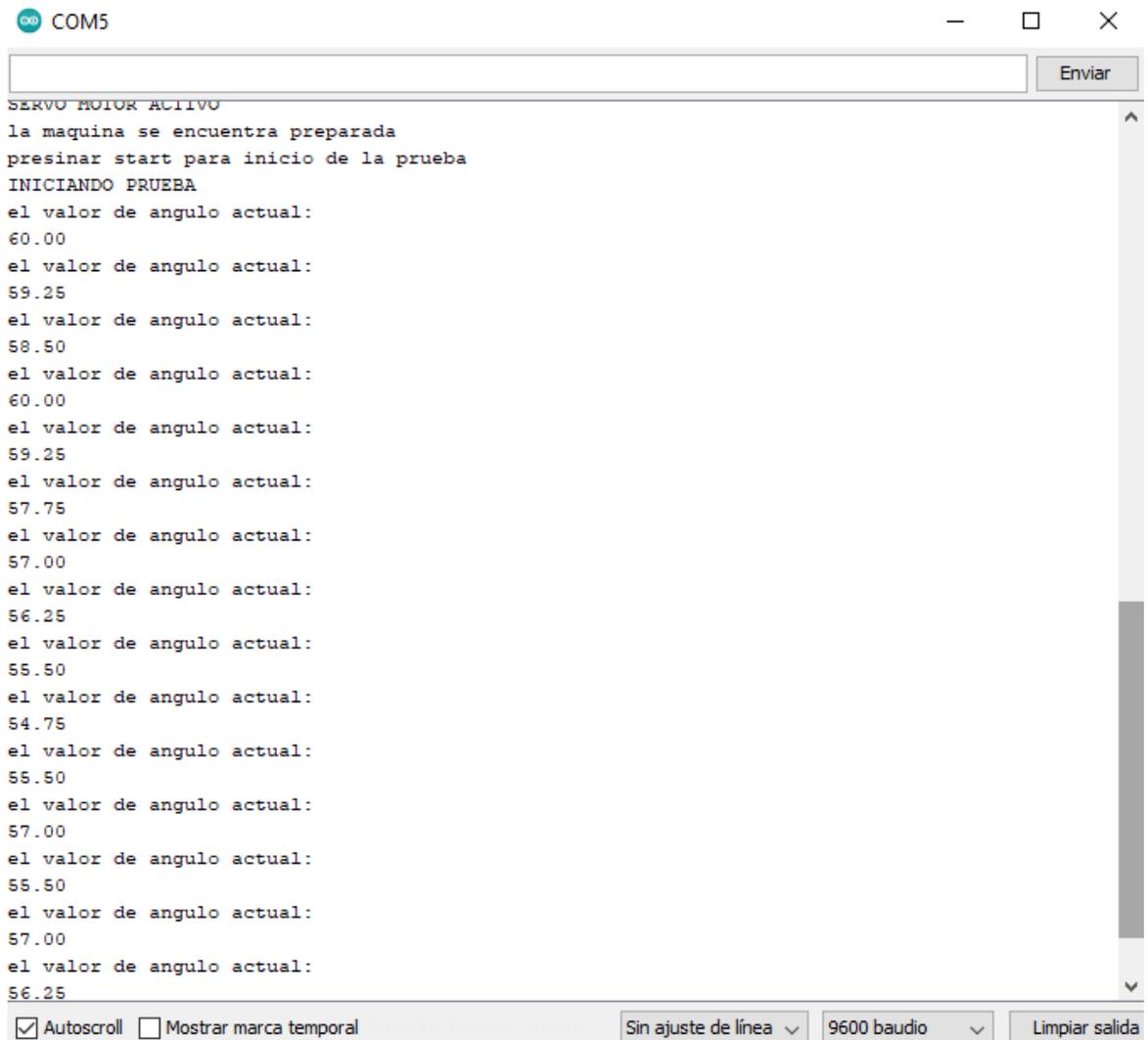


El motor se detiene al recibir la señal del final de carrera indicando que el péndulo se encuentra en posición, en este momento el operario debe ubicar la probeta en el yunque, el embrague sigue fijado al eje de la masa móvil por ende conserva su posición hasta el momento en que se presione *Start*



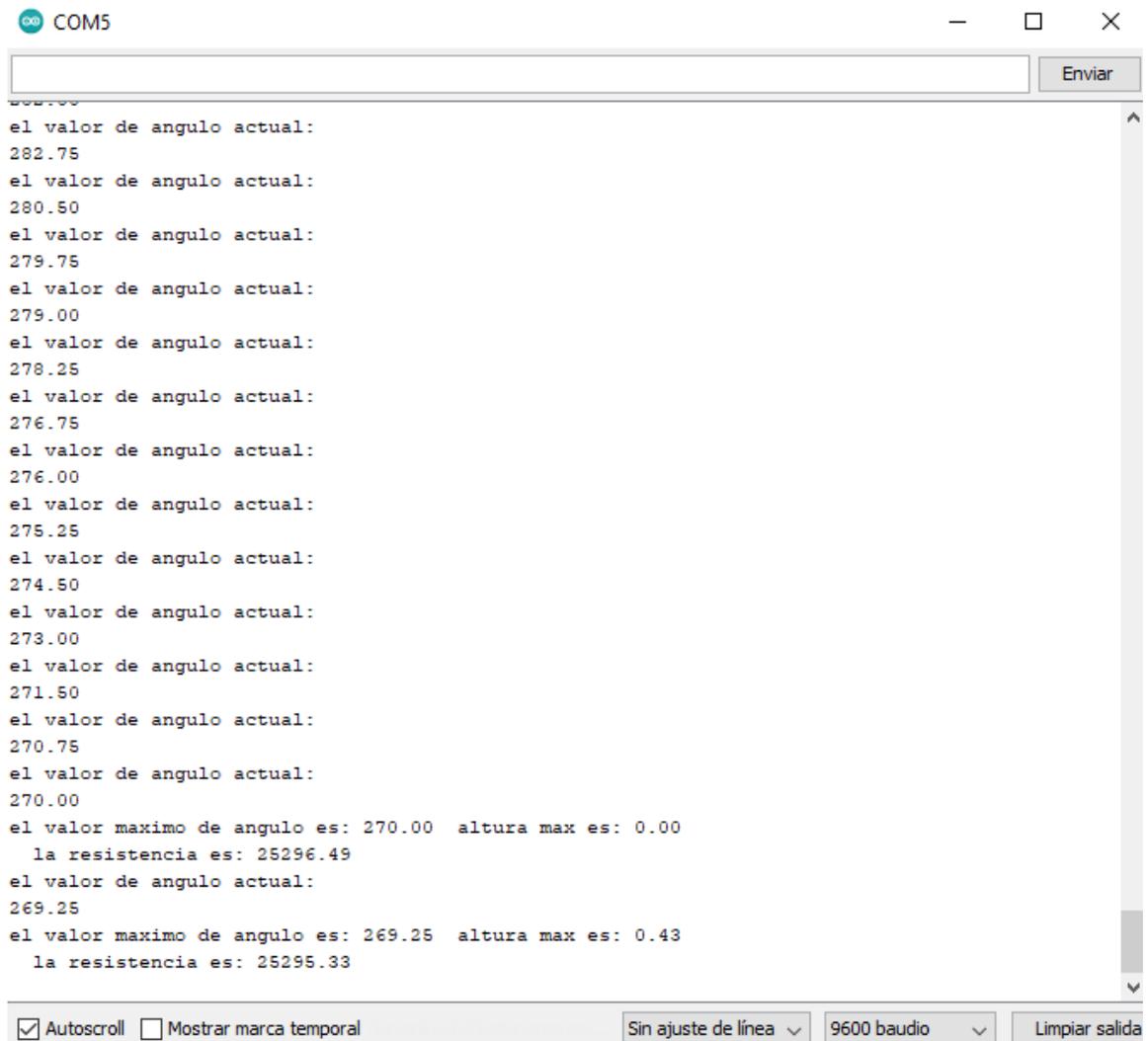
**Figura 84.** Péndulo en posición de inicio  
**Fuente:** Autor.

Una vez es presionado *Start* en el panel de control de la máquina el embrague libera el eje y con el la masa móvil, inmediatamente el Encóder empieza a recolectar los datos de posición angular del péndulo



**Figura 85.** Inicio de la prueba  
**Fuente:** Autor.

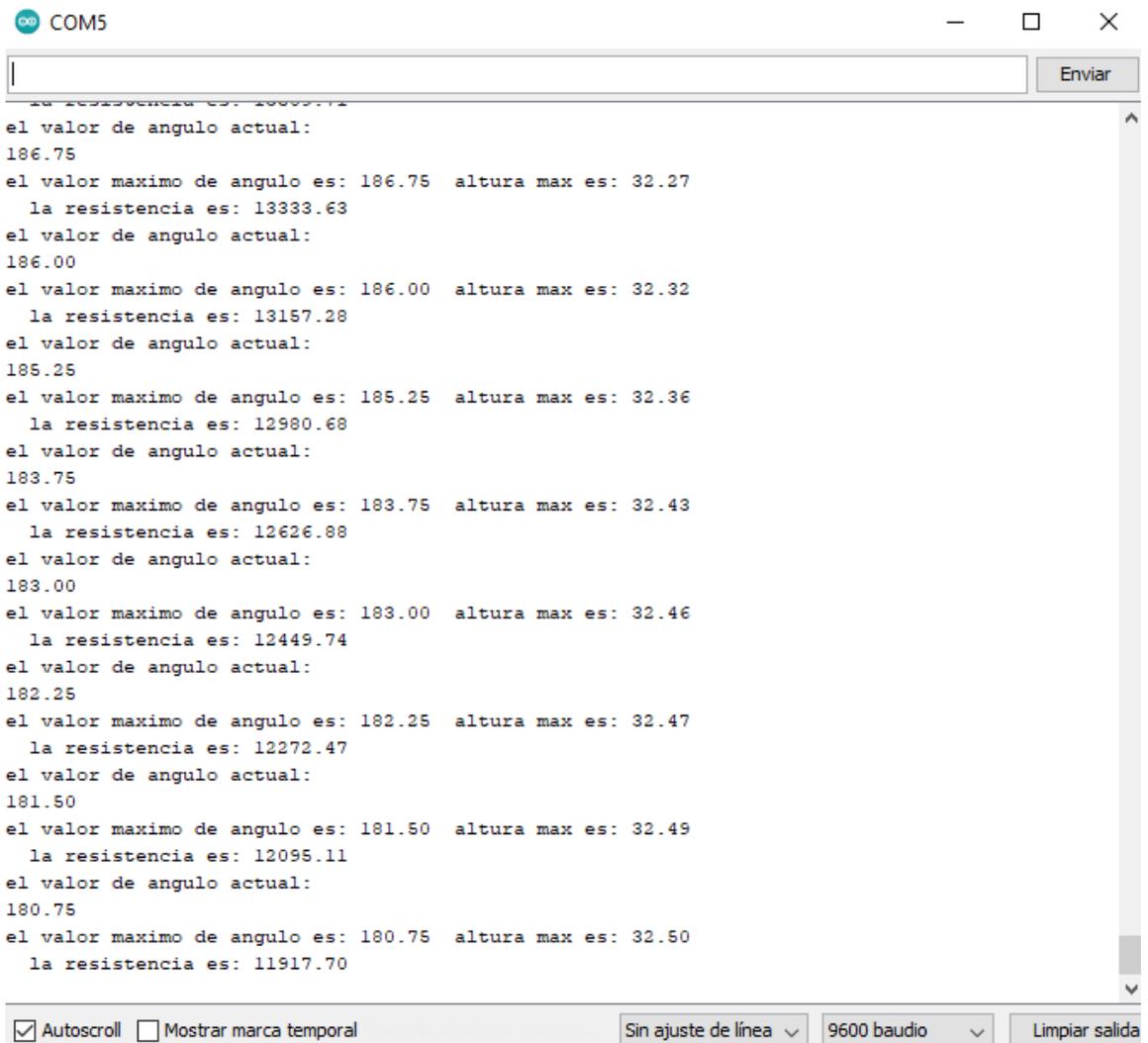
El impacto del péndulo de la máquina con la probeta se da cuando el Encóder registra 270°, a partir de ahí el microcontrolador empieza a realizar cálculos de altura máxima en tiempo real



**Figura 86.** Recolección de datos

**Fuente:** Autor.

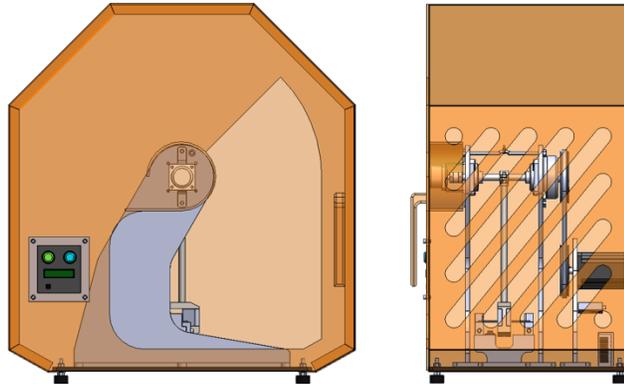
Finalmente, el programa guarda la altura máxima alcanzada por el péndulo y calcula la resistencia de la probeta en términos de energía absorbida tal y como se muestra en la Fig. 87



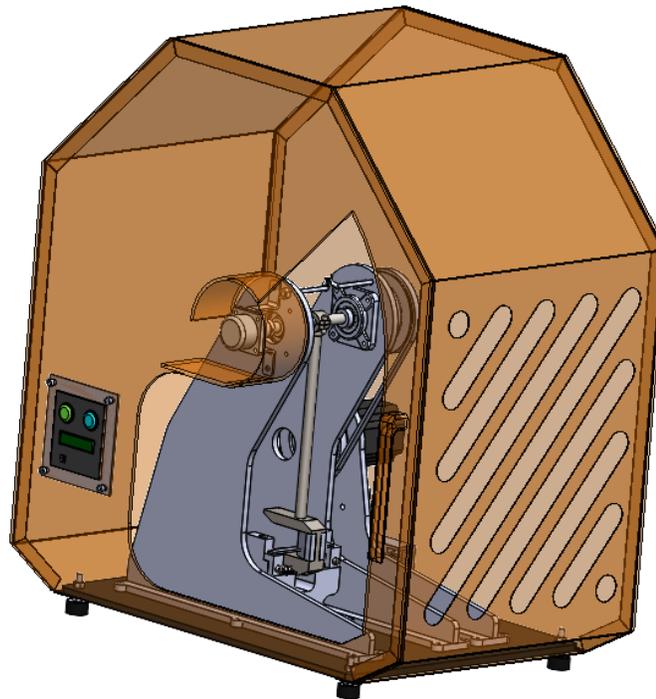
**Figura 87.** Fin de la prueba  
**Fuente:** Autor.

### 5.3 MODELO 3D

En la Fig. 88 se puede apreciar las vistas frontal y lateral del equipo, este cuenta con un chasis de seguridad, con una puerta frontal y una ventana adicional que permite apreciar el momento en que se realiza la prueba sin correr el riesgo de un golpe al fracturarse la probeta, se pueden apreciar las partes que componen la máquina previamente diseñadas y explicadas. En la Fig. 89 se presenta una vista dimétrica del equipo.



**Figura 88.** Vista frontal y lateral del equipo  
**Fuente:** Autor.



**Figura 89.** Máquina de impacto tipo Charpy  
**Fuente:** Autor.

## CONCLUSIONES

- Se realizó el diseño mecánico y la automatización de una máquina de ensayo de impacto tipo Charpy de energía variable, 5 J y 10 J, para la caracterización de una amplia gama de materiales entre ellos los materiales compuestos con matriz polimérica, basándose en el principio de conservación de la energía y la norma ASTM D6110.
- A través de la metodología de diseño y desarrollo de producto de Ulrich y Eppinger se logró organizar el diseño y automatización de la máquina en etapas lógicas, permitiendo avanzar armónicamente en el desarrollo del proyecto.
- El uso de la simulación CAE fue un factor relevante al momento de dimensionar y predecir el comportamiento mecánico de todas las piezas de la máquina de impacto Charpy. Como consecuencia, se logró obtener un diseño óptimo de los componentes en un tiempo de desarrollo relativamente corto y con un nivel más alto de precisión en comparación con los métodos convencionales de diseño. Además, se logró llegar a una etapa del desarrollo de este producto, en donde solo hace falta validar experimentalmente los resultados de simulación, para posteriormente fabricar y poner a punto el equipo.
- Se obtuvo el dimensionamiento completo de la máquina y sus componentes, con el objetivo de que sea replicable o fabricable en el futuro.
- El equipo fue diseñado con una estructura modular con el fin de facilitar tanto el mantenimiento como el ensamblaje de sus partes, contando al mismo tiempo con un diseño moderno y estético.
- Los percutores de los respectivos péndulos son intercambiables y de fácil instalación, en caso de desgastes o defectos en los mismos, pueden ser intercambiados sin necesidad de reemplazar la masa móvil en su totalidad.

- El yunque de la máquina se diseñó de tal forma que se puede ajustar tanto la distancia entre los apoyos de la probeta como su altura, esto permite al operario personalizar totalmente la prueba que desea realizar.
- El diseño en general del equipo tiene en cuenta tanto la seguridad y comodidad del operario al momento de realizar la prueba como al momento de ensamblar sus partes o realizar el mantenimiento de las mismas.
- Los materiales seleccionados para la máquina cuentan con excelentes propiedades, son fáciles de encontrar en el mercado y su maquinabilidad permite concretar la geometría de las piezas por medio de métodos de manufactura convencionales.
- El equipo cuenta con un sistema electrónico programable el cual permite que la toma y presentación de los datos de la prueba sea digital y se puedan controlar las acciones de la máquina por medio de un panel de control y un computador.

## RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

- Se recomienda la construcción de un modelo funcional, ya sea por medio de un proyecto de grado interdisciplinar con asesoría o participación directa de un ingeniero mecánico y mecatrónico, o por medio de un proyecto de semillero de investigación.
- Una vez que se concrete la construcción de un modelo funcional, se debe desarrollar una guía de laboratorio con el fin de organizar las pruebas, y un manual de mantenimiento de la máquina.
- La máquina diseñada solo realiza ensayos de impacto tipo Charpy. Se recomienda realizar el yunque y martillo para implementar adicionalmente el ensayo tipo Izod para polímeros. De ser el caso se debe tomar en cuenta el posicionamiento del martillo y la energía máxima a entregar por cada péndulo.
- Se recomienda realizar un estudio de sensibilidad del modelo para verificar el tipo y tamaño de elemento con el que se predicen los resultados más exigentes de cada una de las simulaciones. Además, es necesario corroborar los resultados de simulación por medio del método experimental una vez construido el modelo.

## REFERENCIAS

- [1] B.-J. Eduardo, R.-O. Miguel Pedro, M.-U. Bogart Camille, and G.-B. Claudia Marcela, "Desarrollo de un material compuesto ultraligero para construir la plataforma de una mesa vibradora," *Ing. Investig. y Tecnol.*, vol. 14, no. 4, pp. 595–611, 2013, doi: 10.1016/s1405-7743(13)72269-8.
- [2] D. William and J. Callister, "Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales," *Reverté*,. 1995.
- [3] R. Norton, "Diseño De Maquinaria," *J. Chem. Inf. Model.*, p. 754, 2009, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [4] M. P. Groover, *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*. 1997.
- [5] C. González S, "Caracterización De Material Compuesto (Poliuretano De Baja Densidad) Reforzado Con Fibras Cortas Naturales (Guadua) Obtenido Por El Método De Inyección," 2017.
- [6] F. Estupenengo, "Materiales y materias primas," *Inst. Nac. Educ. Tecnológica*, p. 791, 2011.
- [7] S. Huang, Q. Fu, L. Yan, and B. Kasal, "Characterization of interfacial properties between fibre and polymer matrix in composite materials – A critical review," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 13, pp. 1441–1484, 2021, doi: 10.1016/j.jmrt.2021.05.076.
- [8] D. Lukkassen and A. Meidell, "Advanced materials and structures and their fabrication processes," *B. manuscript, Narvik Univ. Coll. HiN*, vol. 2, pp. 1–14, 2007.
- [9] L. Ye, Y. Lu, Z. Su, and G. Meng, "Functionalized composite structures for new generation airframes: A review," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 65, no. 9 SPEC. ISS., pp. 1436–1446, 2005, doi: 10.1016/j.compscitech.2004.12.015.
- [10] J. G. Escuela Colombiana De Ingeniería, "Protocolo para la máquina de impacto del curso de materiales de ingeniería," 2, p. 17, 2011.
- [11] E. Bash, "Introducción a Las Técnicas De Caracterización De Materiales," *PhD Propos.*, vol. 1, pp. 1–20, 2015.
- [12] J. O. Cross, R. L. Opila, I. W. Boyd, and E. N. Kaufmann, "Materials characterization and the evolution of materials," *MRS Bull.*, vol. 40, no. 12, pp. 1019–1033, 2015, doi: 10.1557/mrs.2015.271.
- [13] M. Salas Martín, "Diseño de un péndulo de impacto tipo Charpy," *Esc. Politécnica Super. Linares*, no. 20, pp. 1–83, 2016.
- [14] M. Salas Martín, "Diseño de una máquina de impacto por caída libre," *Esc. Politécnica Super. Linares*, no. 20, pp. 1–83, 2016.
- [15] Y. Ortega, "Prueba de impacto: Ensayo Charpy," *Rev. Mex. Fis.*, vol. 52, no. 1 SUPPL., pp. 51–57, 2006.
- [16] Astm-D6110-10, "Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics," *Astm*, p. 17, 2010, doi: 10.1520/D6110-10.1.
- [17] R. Flores, A. Martinez, and J. Samá, "Análisis por elementos finitos de cargas de impacto. Estudio de caso de viga de tren de rodaje de remolque

- agrícola,” *Rev. Ciencias Técnicas Agropecu.*, vol. 18, pp. 21–27, 2009.
- [18] N. J. Aguila, “Diseño y Análisis Estructural de Prototipo de Vela Rígida para Embarcación Monocasco,” 2013.
- [19] M. A. G. Ramírez and W. A. H. Cruz, “Rediseño del chasis de la máquina dosificadora de concreto iconcret D-50,” *Univ. Dist. Fr. Jose Caldas*, p. 92, 2014.
- [20] J. M. Cabo Pérez, “Aplicación del análisis por elementos finitos en la Ingeniería Naval,” *Univ. Cádiz*, p. 124, 2010.
- [21] D. Szwedowicz, P. E. R., and J. B. H., “Banco experimental para pruebas de impacto de un amortiguador tipo elastómero,” no. September, pp. 349–354, 2005.
- [22] R. A. Serway and L. D. Kirkpatrick, *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*, vol. 26, no. 4. 1988.
- [23] P. A. Stiopin, *Resistencia de Materiales*, Segunda ed. Moscu, 1976.
- [24] H. Young and R. Freedman, “Física universitaria volumen 1,” vol. 12, p. 760, 2013, doi: 10.1057/9781137311955\_5.
- [25] C. a. Chagoyén-Méndez, L. F. M. Barros, J. L. Moya-Rodríguez, ángel s. Machado-rodríguez, and Y. s. Campos-Pérez, “Design of Impact Test Machine Type Charpy of 50 J,” *ITEGAM- J. Eng. Technol. Ind. Appl.*, vol. 2, no. 8, 2016, doi: 10.5935/2447-0228.20160046.
- [26] B. Andrade, M. J. Cifuentes, and A. Germán, “Diseño, Construcción E Implementación De Un Péndulo Charpy Para Analizar La Resistencia Al Impacto En Polímeros De Acuerdo a La Norma Astm D6110 – 02.,” *ESPE Univ. las fuerzas armadas*, p. 198, 2017.
- [27] V. S. Candido, A. C. R. da Silva, N. T. Simonassi, F. S. da Luz, and S. N. Monteiro, “Toughness of polyester matrix composites reinforced with sugarcane bagasse fibers evaluated by Charpy impact tests,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 6, no. 4, pp. 334–338, 2017, doi: 10.1016/j.jmrt.2017.06.001.
- [28] A. Fazal and K. S. Fancey, “Viscoelastically prestressed polymeric matrix composites - Effects of test span and fibre volume fraction on Charpy impact characteristics,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 44, no. 1, pp. 472–479, 2013, doi: 10.1016/j.compositesb.2012.04.004.
- [29] D. Prada and J. F. Rojas, “Análisis comparativo entre el modelo teórico y una aproximación de elementos finitos utilizando ANSYS, de la deformación de una viga de perfil W12x40,” *Bucaramanga Univ. Ind. Santander*, no. June, 2017.
- [30] Karl T. Ulrich and S. D. Eppinger, *Diseño y desarrollo de productos*, 5ta Edició. México D.F., 2012.
- [31] Budynas–Nisbett, “Shigley’s Mechanical Engineering Design, Edition Eighth,” *Mech. Eng.*, 2007, doi: 10.4324/9780080496498.
- [32] Azom, “AISI 1045 Medium Carbon Steel,” pp. 1–3, 2012, [Online]. Available: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6130>.
- [33] Azom, “AISI 4340 Alloy Steel (UNS G43400),” *Azo Mater.*, pp. 1–4, 2013, [Online]. Available: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=3352>.
- [34] AZoM, “AISI 1020 Carbon Steel (UNS G10200),” *AZO Mater.*, pp. 1–5, 2013,

- [Online]. Available: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9145>.
- [35] A. M. Guerrero Castillo, L. V. Campo Arcos, and C. A. Rincón López, "Diseño E Implementacion De Una Interface De Usuario Para La Instrumentacion Del Péndulo De Impacto Zwick 5102 Para La Caracterización Mecánica De Materiales Poliméricos," *Sci. Tech.*, vol. 20, no. 2, p. 182, 2015, doi: 10.22517/23447214.7911.
- [36] R. Enríquez Herrador, "Guía de Usuario de Arduino," p. 49, 2009.

## **ANEXOS**

Anexo 1. Catalogo OPAC de Tornillos Allen

Anexo 2. Catalogo FAG de Rodamientos Insertables

Anexo 3. Ficha técnica de motor NEMA34-7.0Nm

Anexo 4. Driver DM860H Manual

Anexo 5. Ficha técnica del Encóder Fnc 63D series Incremental

Anexo 6. Catalogo WE de selección embragues

Anexo 7. Evaluación Eléctrica WE de Embragues Electromagnéticos

Anexo 8. Catalogo APIRO de Ejes Normalizados

Anexo 9. Catalogo DISAI de Acoplamientos

Anexo 10. Catalogo WINCO de Pies de nivelación GN 439

Anexo 11. Planos

Anexo 12. Código del microcontrolador

Anexo 13. Código del sensor de temperatura