



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Instrumentación y control de un probador  
mecánico de tracción biaxial plana**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniera Mecatrónica**

**P R E S E N T A**

Isis Ibis Arreola Valdez

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Francisco Manuel Sánchez Arévalo



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025**





**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y  
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL  
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado INSTRUMENTACION Y CONTROL DE UN PROBADOR MECANICO DE TRACCION BIAXIAL PLANA, que presenté para obtener el título de INGENIERO MECATRÓNICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

---

ISIS IBIS ARREOLA VALDEZ  
Número de cuenta: 312094753



# Agradecimientos Institucionales.

---

A la Universidad Nacional Autónoma de México por haberme dado acceso a una formación profesional integral, humana y de gran calidad.

A la Facultad de Ingeniería por brindarme las herramientas, conocimientos y espacios necesarios para mi desarrollo profesional

Al Instituto de Investigaciones en Materiales por brindarme los espacios y el equipo necesario para la elaboración y desarrollo de este trabajo.

A la DGAPA-UNAM por el financiamiento otorgado a través del proyecto PAPIIT IN101624 con el cual se financió la investigación realizada en la presente tesis.



## Agradecimientos personales

---

Primero que a nadie, agradezco a mis padres por todo el apoyo y amor incondicional que me han dado en toda mi vida. Por creer en mí y en mis proyectos. Por darme todo lo necesario para cumplir mis metas y saber guiarme en el camino.

Agradezco a cada uno de mis compañeros en la carrera, ya que cada uno me aportó diferentes conocimientos que me ayudaron a mejorar como persona y como ingeniera.

Doy especial reconocimiento a mis amigos Fabricio Esteven Muñoz y Eric Cortes Hernández por ser unos excelentes amigos que me apoyaron más allá de la carrera. Siempre me tuvieron en consideración y les tengo un alto aprecio por ello.

Al Instituto de Investigaciones en Materiales y al Dr. Francisco Manuel Sánchez Arévalo les doy infinitas gracias por ayudarme en la parte final de mi carrera y ayudarme en los procesos de Servicio Social y Tesis. Al Dr. también le agradezco su infinita sabiduría y paciencia al guiarme y orientarme para el desarrollo de mis proyectos.





# Dedicatoria

---

Este trabajo se lo agradezco a toda la gente pasada y presente que formó parte de mi vida y me apoyo para llegar a donde estoy ahora. Sin embargo, dedico este trabajo a todas las personas en el futuro que de alguna manera mi trabajo les sirva de inspiración. Este trabajo no solo representa mi retribución a la sociedad, que es una gota en el gran mar del conocimiento y que siempre debe de estar al servicio del bien común. También representa mi dedicación y esfuerzo en un trabajo que puede ser difícil para muchos (incluyéndome) pero que con esfuerzo y rodearse de las personas correctas, siempre podemos cumplir nuestros objetivos. Que este trabajo sirva para inspirar a otros y ayude a continuar el camino del gran saber.



# Resumen

---

El proyecto presente se enfoca en el diseño y construcción de un probador de ensayo biaxial para biomateriales. Sus principales propósitos son el poder ser montable sobre la base de un microscopio, ser compacto y fácil de armar, además de generar una interfaz gráfica amigable con el usuario. Su diseño y construcción está dividido en tres partes. La parte mecánica que conlleva la estructura y los componentes que lo conforman. La parte eléctrica, que aborda la instrumentación y control de los sensores. Por último la parte de interfaz gráfica, que explica el cómo se construyó el programa para detectar todos los componentes del probador y que el usuario pueda hacer uso de ello. El resultado final muestra un probador funcional con una prueba y su salida. En este se pueden montar materiales que tengan el tamaño y forma adecuados, además de estar dentro del rango de fuerza capaces de aplicar los motores.

---

## Introducción

A través del tiempo, se han empleado diferentes y mejores materiales para sustituir diferentes partes del cuerpo. Pasando desde materiales como metales y cerámicos hasta la actualidad, donde se usan materiales como los biopolímeros. Estos, al ser la mezcla de diferentes materiales no tienen un comportamiento tan uniforme como lo eran antes por lo que se necesitan de pruebas de ensayo capaces de adaptarse a las nuevas necesidades. Para metales es común el usar pruebas de ensayo uniaxial, sabiendo que el material tendrá un comportamiento uniforme, independientemente de la orientación. En los casos de materiales con una estructura interna más desordenada existen pruebas que analizan de diferente forma el material. Con el tiempo se han ido desarrollando probadores como los biaxiales, de estallido o cilíndricos. Estos permiten realizar pruebas de comportamiento del material de una manera más realista a lo que será sometido el material. Todo lo anterior surgió a partir del siglo pasado, sin embargo la ciencia de los biopolímeros es más reciente que los probadores, por lo que la gran mayoría están diseñados para hacer pruebas en materiales más grandes y que requieren mayor fuerza para lograr su deformación y ruptura. Es hasta hace 30 años que se empezó a trabajar en el diseño de probadores más enfocados a materiales delgados y sensibles. Debido a que requerían de gran precisión y la electrónica aún era cara y tosca, los primeros probadores eran muy grandes y costosos.

Este proyecto busca continuar esta línea de definir probadores enfocados en biopolímeros y biomateriales que sea de más fácil acceso y cómodo de probar sin dejar a un lado la precisión.

Uno de los probadores por excelencia es el probador biaxial, que podría considerarse la evolución del probador uniaxial. Capaz de generar cargas de tensión y compresión, el probador biaxial está enfocado en realizar pruebas sobre un material en dos ejes al mismo tiempo. Esto es una de tantas maneras que existen para poder probar el comportamiento de un material anisotrópico ante las cargas.

Este trabajo se enfocó en la construcción de un probador biaxial pero con ciertas características. La primera es tener una estructura tal que sea capaz de ser montada bajo un microscopio. De esta forma, la deformación que va sufriendo el material puede ser estudiada de una manera más fina. Otro propósito es enfocarlo a una construcción más compacta y no tan voluminosa, lo que permita montarlo y moverlo con mayor facilidad. Las piezas son desmontables y pueden intercambiarse dependiendo la necesidad de la prueba.



# Índice general

---

<b>Índice de figuras</b>	<b>XIII</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>XIX</b>
<b>1. Antecedentes</b>	<b>1</b>
1.1. La Ingeniería y sus aplicaciones . . . . .	1
1.1.1. La subdivisión de la Ingeniería y sus ramas . . . . .	2
1.1.1.1. Ingeniería Mecánica . . . . .	3
1.1.1.2. Ingeniería Electrónica . . . . .	3
1.1.1.3. Ingeniería en Sistemas . . . . .	4
1.1.1.4. Ingeniería Mecatrónica . . . . .	4
1.1.1.5. Ingeniería en Materiales . . . . .	6
1.2. La Ciencia e Ingeniería en Materiales . . . . .	6
1.2.1. Caracterización mecánica de materiales (tipos de ensayo) . . . . .	7
1.2.1.1. Caracterización Mecánica . . . . .	7
1.2.1.2. Clasificación de los tipos de ensayo . . . . .	8
1.2.2. Pruebas uniaxiales - Ensayos de tracción . . . . .	9
1.2.2.1. Pruebas de Tracción Uniaxial . . . . .	9
1.2.2.2. Gráfica Esfuerzo Deformación . . . . .	11
1.2.3. Pruebas de tracción biaxial . . . . .	13
1.3. Estado del arte . . . . .	15
1.3.1. Comercial . . . . .	15
1.3.1.1. Máquina de testeo cruciforme en orientación horizontal con actuadores electromecánicos para pruebas de hasta 2kN . . . . .	16
1.3.1.2. Máquina de prueba biaxial HLS series . . . . .	16
1.3.1.3. Máquina de Ensayo Personalizado - Máquina de Ensayo Biaxial . . . . .	17
1.3.2. Investigación . . . . .	17

## ÍNDICE GENERAL

---

1.3.2.1.	Sobre las pruebas biaxiales y la resistencia de los tejidos recubiertos . . . . .	19
1.3.2.2.	Máquina de prueba biaxial: desarrollo y Evaluación . . . . .	19
1.3.2.3.	Una plataforma de prueba biaxial versátil para tejidos blandos . . . . .	20
1.3.3.	Investigación en el IIM . . . . .	20
1.3.3.1.	Probador Uniaxial de Materiales Biológicos . . . . .	21
1.3.3.2.	Equipo de tracción biaxial por inflamiento de membranas . . . . .	21
1.3.4.	Normas para las Pruebas Biaxiales . . . . .	23
1.4.	Justificación . . . . .	24
1.5.	Hipótesis . . . . .	25
1.6.	Objetivo General . . . . .	25
1.6.1.	Objetivos particulares . . . . .	25
<b>2.</b>	<b>Metodología y técnicas experimentales</b> . . . . .	<b>27</b>
2.1.	Composición General . . . . .	27
2.2.	Diseño Mecánico y sus consideraciones . . . . .	27
2.2.1.	Estructura . . . . .	29
2.2.2.	Motores y Drivers . . . . .	30
2.2.3.	Mordazas y Coples . . . . .	32
2.3.	Instrumentación y Control . . . . .	33
2.3.1.	Sensores . . . . .	33
2.3.1.1.	Celdas de Carga . . . . .	34
2.3.1.2.	Encoders . . . . .	34
2.3.1.3.	Cámara y lente. . . . .	35
2.3.2.	Alimentación eléctrica . . . . .	37
2.3.2.1.	Fuente de Voltaje . . . . .	37
2.3.2.2.	Circuito Regulador de Voltaje . . . . .	38
2.3.2.3.	Circuito eléctrico de una fuente simétrica . . . . .	40
2.3.3.	Instrumentación . . . . .	41
2.3.3.1.	Unidad de Adquisición de Datos . . . . .	44
2.3.4.	Controladores . . . . .	45
2.3.4.1.	Drivers . . . . .	45
2.3.4.2.	Calibración de las celdas de carga . . . . .	45
2.4.	Desarrollo de Interfaz Gráfica . . . . .	48
2.4.1.	Cámara . . . . .	48
2.4.2.	Motores . . . . .	49
2.4.3.	Celdas de Carga . . . . .	49

<b>3. Resultados y discusión</b>	<b>53</b>
3.1. Diseño Mecánico . . . . .	53
3.1.1. Estructura . . . . .	53
3.1.2. Coples mecánicos . . . . .	59
3.1.2.1. Coples mecánicos de Tipo 1 . . . . .	59
3.1.2.2. Coples mecánicos de Tipo 2 . . . . .	59
3.1.3. Mordazas y Base en L . . . . .	63
3.2. Instrumentación y Control . . . . .	64
3.2.1. Alimentación . . . . .	65
3.2.1.1. Componentes . . . . .	65
3.2.1.2. Diagrama en EasyEDA . . . . .	67
3.2.1.3. Código G y manufactura . . . . .	67
3.2.2. Instrumentación . . . . .	100
3.2.2.1. Componentes electrónicos . . . . .	100
3.2.2.2. Diagrama en EasyEDA . . . . .	102
3.2.2.3. Código G y manufactura . . . . .	102
3.2.3. Calibración de la celda . . . . .	104
3.3. Desarrollo de Interfaz Gráfica . . . . .	108
3.3.1. Entradas . . . . .	108
3.3.1.1. Diagrama de Bloques . . . . .	108
3.3.1.2. Panel Frontal . . . . .	112
3.3.2. Parámetros de Configuración . . . . .	114
3.3.2.1. Diagrama de Bloques . . . . .	114
3.3.2.2. Panel Frontal . . . . .	123
3.3.3. Ejecución de la Prueba . . . . .	124
3.3.3.1. Diagrama de Bloques . . . . .	124
3.3.3.2. Panel Frontal . . . . .	129
3.3.4. Finalización del programa . . . . .	130
3.3.4.1. Diagrama de Bloques . . . . .	130
3.3.4.2. Panel Frontal . . . . .	131
<b>Bibliografía</b>	<b>161</b>





# Índice de figuras

---

1.1. Ingenierías que conforman a la ingeniería en mecatrónica. Como podemos observar en la imagen, la mecatrónica, según Sobieszek, está conformada por 3 áreas de la ingeniería en particular: la mecánica, la electrónica y la computacional. Estas 3 áreas aportan conocimiento que conforman lo que un ingeniero en mecatrónica debe de saber para desarrollarse en sus campos. Imagen tomada de Sobieszek 1980 <i>et al.</i> . . . . .	5
1.2. Representación gráfica de la forma integral en la que se relacionan los elementos para seleccionar y diseñar un material. Imagen tomada de Revista Ingenierías, Universidad de Medellín, Juan M. Vélez . . . . .	7
1.3. Máquina de ensayos de tracción. A la izquierda, esquema indicando las partes principales. A la derecha fotografía de una máquina actual. Imagen de la izda. de Ane Miren García Romero. Imagen de la derecha, derivada de: By Smial - Own work (Original text: eigenes Foto), CC BY-SA 2.0, <a href="https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7453188">https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7453188</a>	10
1.4. Gráfica que representa un comportamiento de un acero dúctil. Imagen obtenida de Deingenierias.com . . . . .	12
1.5. Comparación de una probeta con un material isotrópico (izquierda) y un material anisotrópico (izquierda). Imagen extraída de: <a href="https://www.instron.com/es-ar/resources/glossary/isotropic">https://www.instron.com/es-ar/resources/glossary/isotropic</a> . . . . .	13
1.6. Representación de los componentes de esfuerzos en un punto representado por un cubo. Imagen extraída de: Mecánica y Resistencia de Materiales(Cervera2014) . . . . .	14
1.7. Foto del probador biaxial de la empresa Hualong. Obtenida de su página oficial: <a href="https://www.shhualong.com/8es/490.html">https://www.shhualong.com/8es/490.html</a> . . . . .	17
1.8. Foto del probador biaxial de la empresa WPM. Obtenida de su página oficial: <a href="https://wpm-leipzig.de">https://wpm-leipzig.de</a> . . . . .	18
1.9. Foto de una probeta textil fracturada de las pruebas de Reinhardt. Imagen tomada del artículo de Reinhardt de 1976 . . . . .	19

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

1.10. Foto del probador. Imagen tomada del artículo de Antonio B. Pereira. . .	20
1.11. Foto del probador. Imagen tomada del artículo de Mingliang Jiang. . . .	21
1.12. Foto del probador uniaxial. Imagen tomada de Tesis de Vázquez Flores 2014 . . . . .	22
1.13. Foto del probador biaxial por inflamamiento. Imagen tomada de Tesis de Alejandro Padro 2016 . . . . .	23
2.1. Diagrama que representa la forma en cómo trabaja el probador mecánico para ensayos de tracción biaxial plana. . . . .	28
2.2. Foto del microscopio destino para usar con el probador biaxial. A) Foto frontal del microscopio. B) Foto del controlador del microscopio donde se puede apreciar la marca. C) Medidas de la base del microscopio. . . .	30
2.3. Parámetros del motor. . . . .	31
2.4. Lente anexado a la cámara. . . . .	36
2.5. Características del lente. . . . .	36
2.6. Fotografía de la cámara de Thorlabs con el lente. . . . .	37
2.7. Imagen obtenida de la hoja de especificaciones de la fuente HDR-60-24.	38
2.8. Imagen obtenida de la hoja descriptiva del LM350. . . . .	39
2.9. Circuito de alimentación diseñado en EasyEda. . . . .	40
2.10. Circuito eléctrico de fuente simétrica diseñado en EasyEda. . . . .	42
2.11. Circuito del acondicionamiento de la señal de la celda de carga diseñado en EasyEda. . . . .	43
2.12. Fotografía del Driver para el control de los motores. . . . .	46
2.13. Diagrama representativo de la estructura de programación para la cámara.	49
2.14. Diagrama representativo de la estructura de programación para la cámara.	50
2.15. Diagrama representativo de la estructura de programación para la cámara.	51
3.1. Captura de la representación digital del microscopio donde se va a mon- tar la estructura del probador biaxial. Existe un espacio de separación entre el brazo y la base del microscopio de 45 mm. . . . .	54
3.2. Modelo de la base. a) Medidas de la base del microscopio. b) Represen- tación 3D de la base del microscopio. . . . .	55
3.3. Representación digital del microscopio y una representación del área dis- ponible para poder integrar el probador biaxial. . . . .	55
3.4. Representación digital del microscopio con medidas reales con modelos de los motores integrados en la zona de trabajo. . . . .	56
3.5. Base del probador. a) Medidas de la base. b) Vista superior del modelo 3D de la base. c) Vista isométrica de la base. . . . .	56
3.6. Representación de la base con los motores acoplados. . . . .	57

3.7. Modelo 3D del microscopio del laboratorio con el modelo del probador biaxial montado. a) Elementos que constituyen al microscopio y al probador. b) Medidas de espacio finales con el probador montado. c) Modelo final con el probador colocado dentro del microscopio. . . . .	58
3.8. Planos y Vistas de los Coples diseñados para adaptar las celdas de carga y mordazas con las bases en L. a) Plano del cople tipo 1, donde se visualizan sus medidas en diferentes vistas. b) Vista isométrica del cople tipo 1. c) Plano del cople tipo 2, con las medidas reales del cople en diferentes vistas. d) Vista isométrica del cople tipo 2. . . . .	60
3.9. Modelo 3D hecha en Fusion de la conexión de los componentes en un eje. Desde los motores hasta las mordazas. . . . .	61
3.10. Fotografía tomada del probador biaxial donde se visualizan las mordazas conectadas con las celdas de carga y los coples. . . . .	62
3.11. a) Planos con diferentes vistas de la base en L. b) Vista isométrica de la base en L. . . . .	63
3.12. a) Planos de la parte superior de la mordaza. b) Vista isométrica de la parte superior de la mordaza. c) Planos de la parte inferior de la mordaza. d) Vista isométrica de la parte inferior de la mordaza. . . . .	64
3.13. Fotografías de los componentes eléctricos usados para el circuito de alimentación. Su numeración corresponde al número ID de la tabla 3.1 .	66
3.14. Pistas en EasyEDA. . . . .	67
3.15. Tipos de barrenos que pueden aparecer en los componentes de EasyEDA al momento de generar las pistas. Del lado superior se señalan en blanco dos tipos de barrenos, uno circular y uno ovalado. . . . .	68
3.16. Lado izquierdo: Representación de un orificio circular. Lado derecho: Representación de un orificio ovalado. . . . .	69
3.17. Lugar en EasyEDA para descargar el Gerber. . . . .	71
3.18. Última pantalla que aparece al descargar el Gerber. . . . .	72
3.19. Vista de la zona de trabajo del software de FlatCAM. . . . .	73
3.20. Menú en FlatCAM para abrir el Gerber. . . . .	74
3.21. Zona para abrir los archivos .DRL en FlatCAM. . . . .	75
3.22. Visualización del Gerber en FlatCAM. . . . .	76
3.23. Reubicar el gerber en FlatCAM. . . . .	77
3.24. Lado Izquierdo: Comandos para espejear el Gerber. Lado Derecho: Resultado después de espejear el Gerber. . . . .	78
3.25. Lado Superior: Capa TopLayer que contiene las pistas. Lado Inferior: Capas BottomSolderMaskLayer y TopSolderMaskLayer que contienen la silueta de los orificios de los componentes. . . . .	79
3.26. Comando para dejar de ver alguna de las capas del Gerber desde FlatCAM. . . . .	80

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

3.27. Pistas a utilizar del Gerber. . . . .	81
3.28. Zona en FlatCAM para generar el código de fresado para las pistas. . . . .	82
3.29. Parte de FlatCAM donde definimos el tipo de herramienta para el fresado. . . . .	83
3.30. Definir parámetros del objeto geométrico para el fresado. . . . .	85
3.31. Objeto CNC generado en FlatCAM. . . . .	86
3.32. Lado izquierdo: Código otorgado de FlatCAM. Lado derecho: Código modificado. . . . .	87
3.33. Visualización del Archivo .DRL en FlatCAM. . . . .	88
3.34. Propiedades de un archivo en Excellon. . . . .	89
3.35. Editar un archivo Excellon. . . . .	90
3.36. Visualización de los excellon creados con el editor. . . . .	91
3.37. Propiedades de la sección de Drilling Tool. . . . .	92
3.38. Objeto CNC para el taladrado con generación del código G. . . . .	93
3.39. Máquina ZMorph para la generación de circuitos en placas fenólicas. . . . .	94
3.40. A)Pegar la placa fenólica con cinta doble cara sobre una placa de madera. B)Mover la base de la máquina manualmente. C)Colocar la placa sobre la base y apretarla. D)Sacar la herramienta y colocar la fresa o taladro. E) Encontrar el Cero Pieza con una hoja de papel. F) Generar un nuevo Job. G)Inicio del job en el ZMorph. H)Captura del fresado que genera las pistas en la placa. . . . .	95
3.41. Foto de la placa terminada y despegada del multifuncional CNC. . . . .	97
3.42. Foto del Circuito Final con los componentes ya soldados. . . . .	99
3.43. Componentes utilizados para el circuito de instrumentación de las celdas de carga. . . . .	101
3.44. . . . .	102
3.45. Resultado de la generación de Objetos CNC en FlatCAM para el circuito de instrumentación. . . . .	103
3.46. Fotografía del resultado de la placa de instrumentación. Lado derecho: Vista superior donde se visualizan los componentes. Lado izquierdo: Vista inferior donde se ve la zona soldada. . . . .	104
3.47. Gráfica del comportamiento de la celda 0. . . . .	106
3.48. Gráfica del comportamiento de la celda 1. . . . .	107
3.49. Primer reloj del programa y ruta donde guarda el usuario la información. . . . .	109
3.50. Elementos que marcan el inicio del programa y que el usuario ya puede empezar a usar. . . . .	110
3.51. Bloques para reconocer los motores. . . . .	111
3.52. Elementos de configuración iniciales de las celdas de carga. Estos bloques permiten reconocer e inicializar las celdas de carga. . . . .	112

3.53. Elementos de configuración iniciales de la cámara. Estos bloques permiten reconocer e inicializar la cámara. . . . .	112
3.54. Interfaz gráfica principal. . . . .	113
3.55. Mensaje para el usuario cuando se ejecuta el programa. . . . .	113
3.56. Ventana para que el usuario defina una ruta. . . . .	114
3.57. Conexión de los botones para controlar los motores. . . . .	115
3.58. Diferentes acciones para los motores. A) Mover los motores a Home. B) Mover los motores de manera absoluta desde la referencia del inicio. C) Definir la posición absoluta al cual se moverá. D) Definir la velocidad de movimiento. E) Mover los motores de manera relativa a partir de la posición en la que se encuentran. F) Definir la posición relativa. . . . .	116
3.59. Asignación de posición inicial para los motores. . . . .	118
3.60. Configuración de bloques para visualizar la imagen de la cámara. . . . .	119
3.61. Diferentes etapas para reconocer la imagen de la cámara. A) Tiempo de exposición. B) Ganancia. C) Modo de color. . . . .	120
3.62. Reloj que empieza a ejecutar en las pruebas. . . . .	121
3.63. Bloques para generar un nombre al archivo y guardarlo. . . . .	121
3.64. Bloques para obtener información de los motores y obtenerla como salida. . . . .	122
3.65. Bloques para leer la señal de las celdas de carga. . . . .	123
3.66. Interfaz para la configuración de la posición de los motores. . . . .	124
3.67. Botón que inicializa la prueba. . . . .	125
3.68. Configuración antes de la prueba. . . . .	126
3.69. Indicadores que muestran la información de las celdas y los motores, tanto numérica como gráficamente. . . . .	127
3.70. Configuración antes de la prueba. . . . .	128
3.71. Modelos matemáticos para convertir la señal de las celdas en una medida de fuerza. . . . .	128
3.72. Bloques para guardar capturas de la cámara cada cierto tiempo. . . . .	129
3.73. Interfaz gráfica cuando se inicializa una prueba. . . . .	130
3.74. Bloques para detener a los motores. . . . .	131
3.75. Bloques para detener el programa. . . . .	131
3.76. Mensaje que se muestra cuando se detiene el programa. . . . .	132
3.77. Evidencias de la cámara generadas en la prueba. . . . .	133
3.78. Archivo con la información de los motores y celdas generadas en la prueba. . . . .	134
3.79. Gráfica hecha con la información obtenida de la prueba entre el tiempo y la fuerza de la celda de carga 0. . . . .	135
3.80. Gráfica hecha con la información obtenida de la prueba entre el tiempo y la fuerza de la celda de carga 1. . . . .	136



## Índice de tablas

---

2.1. Tipos de Rosca . . . . .	32
2.2. Características de la Celda de carga. . . . .	34
2.3. Características de la Cámara. . . . .	48
3.1. Elementos del Circuito de Alimentación . . . . .	65
3.2. Elementos del Circuito de Instrumentación . . . . .	100
3.3. Masas reales de cada recipiente . . . . .	105





# Antecedentes

---

## 1.1. La Ingeniería y sus aplicaciones

En el saber está el ejercer. Muchos estudiantes próximos a ser ingenieros fracasan en su camino para volverse profesionales en la ingeniería. Una de las razones primordiales es el no haber podido comprender lo que es su carrera y lo que se espera de ellos. Lo anterior provoca una desilusión, frustración e incluso rechazo en los primeros semestres. Considero primordial abordar este tema y tener sentada una base clara de lo que es ingeniería y del perfil que debe tener un profesionista que se desenvuelva en esta área, sea cual sea la rama que escoja. A continuación se presentará la definición de lo que es y no es ingeniería, así como algunas de sus ramas que son primordiales entender para el desarrollo de esta tesis. Tener una definición clara de los objetivos de la ingeniería desde un principio nos ayudará a encaminar esta investigación de una manera correcta sin perder el camino y llegar a un objetivo claro.

Lo obvio sería por empezar a definir lo que es la ingeniería; sin embargo, este simple acto ya de por sí presenta una complicación. Es difícil definir un concepto que puede abordar un sinnúmero de actividades y que el significado englobe todas ellas. Podría decirse que diversas actividades consideradas ingeniería tendrían algo en común, pero a veces su forma de desempeñarse es tan diferente que dar un significado que los englobe se vuelve una tarea difícil.

Tomemos las ingenierías civil y en computación como ejemplo. Mientras que uno se enfoca en la construcción y edificación de estructuras, el otro se basa en el diseño e implementación de programas para la resolución de problemas digitales. Como podemos ver, estas dos áreas parecieran muy alejadas y, sin embargo, comparten ciertas cosas en común, como lo es la resolución de un problema, el uso de teorías de la ciencia como base y llevar un proceso metodológico para la resolución de este. Con el ejemplo

## 1. ANTECEDENTES

---

anterior podemos empezar a vislumbrar un poco lo que es ingeniería. Sin embargo, también dependiendo el enfoque, puede ser su definición. Tomemos las siguientes tres definiciones como ejemplo:

1-. *“Ingeniería es el arte de dirigir los grandes recursos y fuerzas de la naturaleza, para uso y conveniencia del hombre” [1]*

2-. *“La ingeniería es el conjunto de conocimientos por los que las propiedades de la materia y de los recursos naturales de energía se hacen útiles al ser humano mediante máquinas, estructuras, etcétera. [2]*

3-. *“La ingeniería es la profesión en la que los conocimientos de matemáticas y ciencias naturales (física, química y biología), primordialmente, obtenidos a través del estudio, la experiencia y la práctica, se aplican con juicio para desarrollar diversas formas de utilizar, de manera económica, las fuerzas y materiales de la naturaleza en benéfico de la humanidad” [3]*

De las tres definiciones podemos ver que la primera es la que menos se enfoca en describir los elementos que engloba la ingeniería, dando prioridad a un enfoque del deber ser. Esta primera definición nos dice cuál es el propósito de la ingeniería, la cual es que todo desarrollo ingenieril debe tener como propósito el bienestar de la humanidad.

La segunda definición viene a rescatar un poco lo que la primera no abordó, que es el hecho de contemplar en mayor medida lo que significa ingeniería. Esta es una definición más disciplinaria, que busca responder a preguntas como: ¿A qué se dedica un ingeniero? ¿Qué áreas abarca la ingeniería? ¿Cómo logra la ingeniería cumplir sus objetivos? Existen diversas definiciones de ingeniería desde esta perspectiva y cada una describe en mayor o menor medida las preguntas planteadas anteriormente.

La definición anterior era una definición disciplinar, esto es, definía la ingeniería como un conjunto de elementos para resolver un problema. A parte, existe una tercera definición que se desenvuelve en el ámbito profesional. Aquí la definición de ingeniería se enfoca en describir las cualidades que debe tener un profesionista en la ingeniería. Esta definición es importante, ya que es aquí donde un estudiante de ingeniería encontrará las verdaderas respuestas a sus preguntas sobre lo que representa ingeniería.

Como podemos ver, definir la ingeniería es una tarea ardua, pero el conocer sus diferentes definiciones y comprender su propósito es de gran ayuda para cualquier persona que desee conocer más sobre este tema.

### 1.1.1. La subdivisión de la Ingeniería y sus ramas

A lo largo de la historia de la humanidad, la ingeniería siempre ha existido, aunque quizás no con ese nombre. Se podría considerar que las ingenierías civil y mecánica fueron las primeras en existir. Con el paso de los años, la ingeniería se ha ido ramificando, ya sea por la necesidad de especializar ciertos campos o por el surgimiento de

nuevos campos, conceptos o tecnologías que antes no existían. A continuación se dará una breve explicación de algunas ramas de la ingeniería que se consideran relevantes para esta investigación.

#### **1.1.1.1. Ingeniería Mecánica**

De las primeras ramas que existieron de la ingeniería. Junto con la ingeniería civil, representaban la mayoría de las actividades que podríamos denominar ingenieriles hechas por el hombre desde la antigüedad. La ingeniería mecánica se basa en la implementación de conceptos de la física y la matemática para la comprensión, manufactura, elaboración, construcción y prevención de sistemas mecánicos que ayuden a la humanidad en su día a día.

Asimismo, la ingeniería se entiende como un proceso que requiere la transformación de materia prima en materiales útiles, sea para su uso o para la construcción de alguna máquina. Debido a la revolución tecnológica llevada a cabo en los últimos siglos de la humanidad, la ingeniería mecánica se hace cargo de áreas como la automotriz, aeronáutica, manufactura o cualquier área donde haya una máquina o motor funcionando. Igualmente, ha empezado a requerir la intervención de otras áreas como la electrónica y sistemas.

Desde la perspectiva profesional, un ingeniero mecánico debe poder resolver problemas que tengan que ver con cualquier sistema mecánico. Debido a su formación e importancia, un ingeniero mecánico puede desempeñarse en casi cualquier área donde un ingeniero sea requerido.

#### **1.1.1.2. Ingeniería Electrónica**

La electrónica es una rama de la ingeniería eléctrica. La ingeniería eléctrica se encarga de todo lo relacionado con la electricidad y el electromagnetismo. Se enfoca en todo lo relacionado con cualquier sistema eléctrico. Aunque pudiera parecer que ambas ingenierías se enfocan en lo mismo, sus alcances son diferentes. Mientras que un ingeniero eléctrico se enfoca en la transmisión de la electricidad y se concentra en voltajes de alta potencia, el ingeniero en electrónica trabaja con voltajes más bajos y se desarrolla más en el diseño de circuitos y control.

Es posible encontrar ambas áreas mezcladas, llamándose la ingeniería como ingeniería eléctrico-electrónica. Esto debido a que en muchas áreas ambas funciones están interrelacionadas y no es posible separarlas, por lo que es necesario un ingeniero que conozca tanto la manipulación de sistemas que manejen altos voltajes así como bajos voltajes.

## 1. ANTECEDENTES

---

Un profesionalista en esta área debe saber manipular cualquier sistema eléctrico, así como resolver las complicaciones o problemas que puedan surgir. Su conocimiento abarca el uso de cualquier herramienta o equipo eléctrico, conocimiento sobre la electrónica de potencia, fuentes de energía y la transferencia de la electricidad.

### 1.1.1.3. Ingeniería en Sistemas

La ingeniería en Sistemas puede considerarse como una rama reciente de la ingeniería debido al avance tecnológico que hubo en los siglos pasados.

Esta ingeniería está íntimamente relacionada con la ingeniería informática, ya que la ingeniería en sistemas se encarga de establecer un flujo de trabajo para obtener un producto. Se encarga de definir las fases de un proyecto, donde se plantean desde las características, objetivos y conocimientos requeridos para resolver un problema. Anteriormente mencionamos que está ligada a la ingeniería informática, ya que su aplicación se concentra en el uso de tecnología para el procesamiento de información.

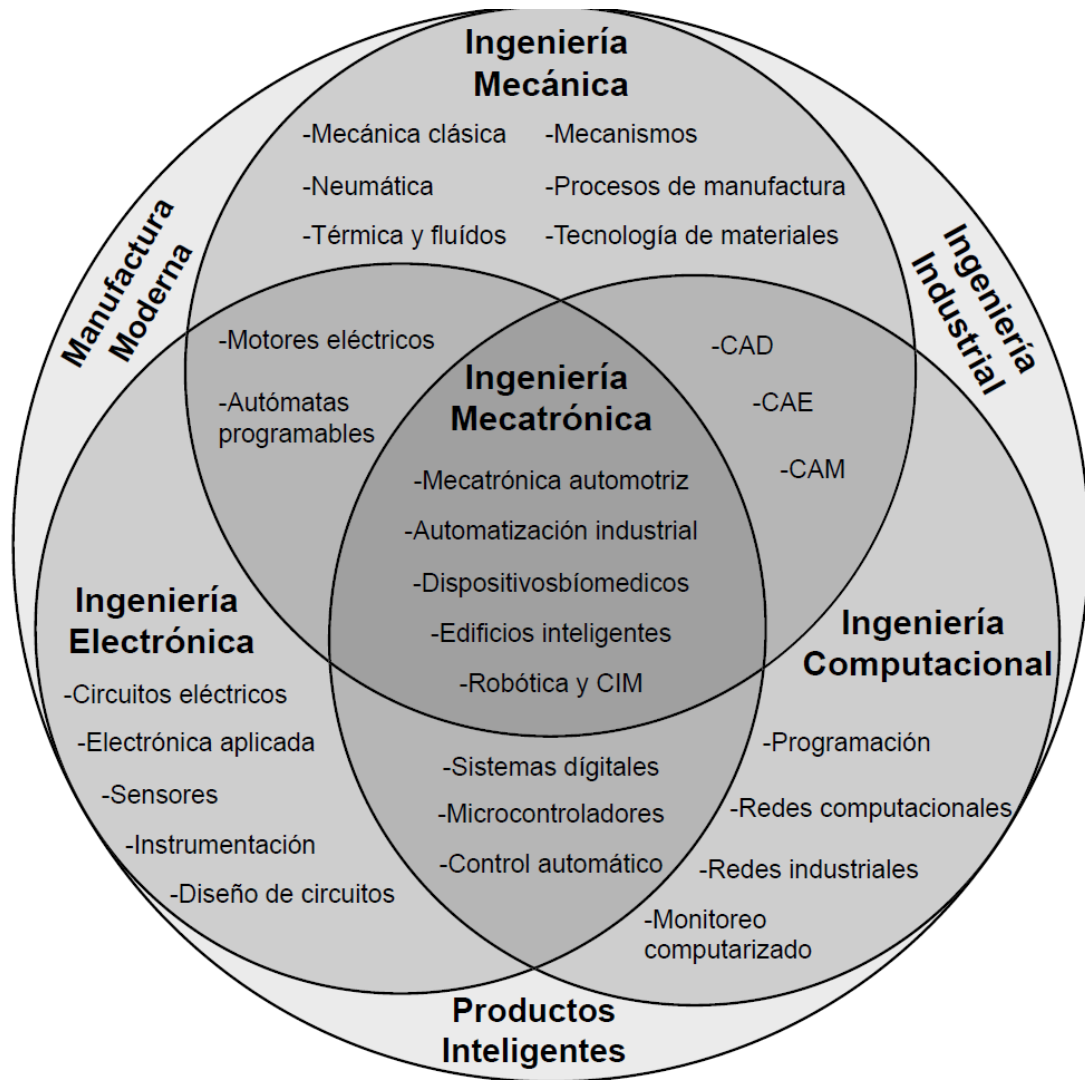
Un ingeniero en sistemas debe ser capaz de resolver situaciones de informática aplicando el proceso de ingeniería de software (Evaluación - Gestión - Planificación - Análisis - Diseño), implementar y desarrollar sistemas en las áreas de la computación e industriales, así como desarrollo de proyectos en el área de las comunicaciones.

### 1.1.1.4. Ingeniería Mecatrónica

Con el avance de la tecnología es requerido que diversas ramas de la ingeniería estén involucradas para el desarrollo de un proyecto. Un ingeniero mecánico, eléctrico y de sistemas pueden ser necesarios para realizar una nueva tecnología. Esto supone un reto, ya que muchas veces un ingeniero especializado en una área en particular no conocerá sobre el área del resto, generando problemas de acoplamiento. Es aquí donde surgen las ingenierías como la mecatrónica, que buscan formar profesionales que tengan los conocimientos de diferentes áreas para poder interrelacionarlas y desarrollar sistemas que integren de la mejor manera los sistemas mecánicos, eléctricos y de sistemas.

Si pudiéramos visualizar todas las áreas que conforman a la ingeniería mecatrónica sería algo parecido a lo mostrado en la Figura 1.1

Debido a la gran cantidad de disciplinas que un profesionalista en ingeniería en mecatrónica debe dominar, este se desempeña en áreas de automatización y control. Se desarrolla en áreas de robótica, maquinaria de precisión y sistemas de gran desarrollo tecnológico.



**Figura 1.1:** Ingenierías que conforman a la ingeniería en mecatrónica. Como podemos observar en la imagen, la mecatrónica, según Sobieszek, está conformada por 3 áreas de la ingeniería en particular: la mecánica, la electrónica y la computacional. Estas 3 áreas aportan conocimiento que conforman lo que un ingeniero en mecatrónica debe de saber para desarrollarse en sus campos. Imagen tomada de Sobieszek 1980 *et al.*

### 1.1.1.5. Ingeniería en Materiales

La ingeniería de materiales es un conjunto de disciplinas que tienen como objetivo el análisis, manufactura y construcción de diversos materiales para diferentes tecnologías. La ingeniería de materiales se puede subdividir en diferentes ramas dependiendo del material de estudio:

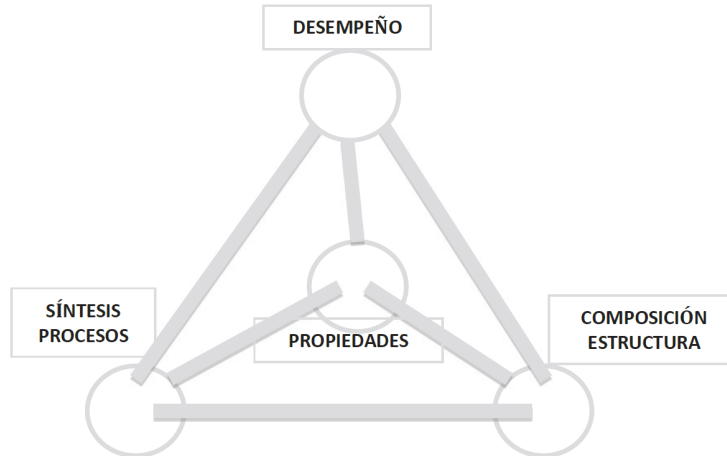
- Ingeniería metalúrgica: Se enfoca en el estudio de materiales extraídos de la tierra, así como la búsqueda de aleaciones para el mejoramiento de propiedades mecánicas.
- Ingeniería de minas: Se enfoca en los procesos de extracción de los materiales de la tierra a través de las minas.
- Ingeniería de plásticos: Son materiales que al someterse a esfuerzos de deforman de manera permanente. Se enfoca en el análisis de su comportamiento y procesos de fabricación.
- Ingeniería de cerámicas: Se encarga de los procesos necesarios para la fabricación de materiales que trabajan a altas temperaturas.

## 1.2. La Ciencia e Ingeniería en Materiales

*”La ciencia e ingeniería de materiales (CIM) es un campo interdisciplinario de la ciencia e ingeniería que estudia y manipula la composición y la estructura de los materiales a través de escalas de longitud para controlar las propiedades de los materiales través de la síntesis y el procesamiento.” [4]*

En otras palabras, los científicos e ingenieros en materiales son personas que se dedican a comprender la manera en cómo está conformada la materia y cómo esta puede ser manipulada de diferentes maneras para obtener un nuevo material con características diferentes. Como hemos mencionado anteriormente, los ingenieros siempre buscan el bien para la humanidad, por lo que podríamos decir que la generación de un nuevo material debe conllevar un costo/beneficio en su creación. Resumiendo lo anterior, podemos decir que el estudio de los materiales conlleva 4 aspectos:

1. Composición y Estructura de la Materia.
2. Síntesis y procesamiento de los materiales.
3. Propiedades.



**Figura 1.2:** Representación gráfica de la forma integral en la que se relacionan los elementos para seleccionar y diseñar un material. Imagen tomada de Revista Ingenierías, Universidad de Medellín, Juan M. Vélez

#### 4. Desempeño.

Para poder discernir cada uno de los 4 aspectos mencionados anteriormente es necesario saber el cómo se comportará el material bajo ciertos estímulos. Estos estímulos pueden ser ambientales, de uso, de desgaste e inclusive de interacción con otros materiales. Por lo que es necesario generar dispositivos para ciertas pruebas controladas que nos permitan evaluar estas cualidades de los materiales y así poderles otorgar un valor en función de su propósito.

Existen diferentes pruebas para obtener distintas variables. En el caso de las propiedades mecánicas, existen las pruebas de caracterización mecánica, que permiten conocer el comportamiento de un material bajo estímulos mecánicos.

### 1.2.1. Caracterización mecánica de materiales (tipos de ensayo)

#### 1.2.1.1. Caracterización Mecánica

Cuando utilizamos un material para un fin en específico, este podría estar sometido a esfuerzos o cargas. Dependiendo del uso que se le vaya a dar, es el tipo de material y la forma que este debe tener para poder disminuir en lo posible la concentración de esfuerzos que lleven al material a la ruptura.

Para conocer el material debemos conocer ciertas características de este, como lo es:



## 1. ANTECEDENTES

---

- Resistencia última
- Dureza
- Ductilidad
- Rigidez
- Tenacidad
- Resiliencia

Para determinar los valores de estas propiedades, existen ensayos ya preestablecidos que se encargan de reproducir lo más fiel posible las circunstancias a las que una pieza pueda ser sometida. Son 5 los factores más importantes que deben tomarse en cuenta al momento de realizar un ensayo:

- Tipo y composición química del material.
- Geometría del elemento mecánico de estudio.
- Carga: Que tipo de carga le será aplicado al material, si de tipo tensión, compresión, cortante o cizallamiento o algún otro o combinaciones de los anteriores.
- Duración: Si solo será momentáneo o la carga será aplicada constantemente o de una manera cíclica.
- Medio: A qué factores externos estará sometido el material como la temperatura, si estará sumergido en un ambiente líquido u otro.

### 1.2.1.2. Clasificación de los tipos de ensayo

Como se mencionó anteriormente, para conocer las características mecánicas de los materiales es necesario aplicar ensayos o pruebas mecánicas. Esto se logra mediante máquinas diseñadas para replicar en ambientes controlados solo las cargas deseadas, disminuyendo en lo posible los efectos de otro tipo de cargas.

Los ensayos pueden clasificarse de dos maneras, por la manera en cómo se aplica o si el material se lleva a la falla o no.

Considerando el tipo de carga que se aplica al ensayo tenemos de 3 tipos:

- Ensayos Estáticos o (Cuasi)Estáticos: Se cual se la carga aplicada, esta se aplica de manera constante y a velocidades lentas.

- **Ensayo Dinámico:** La carga se puede aplicar de manera rápida generando un impacto o durante un periodo de tiempo prolongado.
- **Ensayo Cíclico o de Fatiga:** Este tipo de ensayo se hace aplicando reiteradamente una carga de forma cíclica sobre la probeta. Estos ciclos pueden tener diferentes formas, haciéndolos diferentes a los ensayos dinámicos.

Por otro lado, estos mismos ensayos pueden ser categorizados de manera destructiva o no destructiva. Esto depende de si al material se le lleva a la falla o una deformación permanente.

En el caso de los ensayos destructivos, los más comunes son:

- **Ensayo de tracción uniaxial:** Se refiere a las pruebas que aplican una carga a un material de manera que el esfuerzo generado sobre el material sea del tipo tensión (El material se estira en direcciones opuestas). Es uniaxial ya que solo se aplica una sola carga sobre un solo eje de acción.
- **Ensayo de compresión uniaxial:** Similar al de tracción, pero la carga comprime el material un solo eje.
- **Ensayo de flexión en 3 puntos:** La carga se aplica en el centro de un material mientras sus extremos están siendo soportados.
- **Ensayo de fatiga:** Este ensayo puede ser alguno de los anteriores pero se aplica de manera cíclica hasta provocar la falla del material.
- **Ensayo de tracción biaxial:** Son ensayos mecánicos que aplican dos cargas simultáneamente para materiales que tienen una estructura interna anisotópica. Existen 3 principales pruebas biaxiales: Estallido, Cilindro o Tubular y Biaxial Plano. [5]

## **1.2.2. Pruebas uniaxiales - Ensayos de tracción**

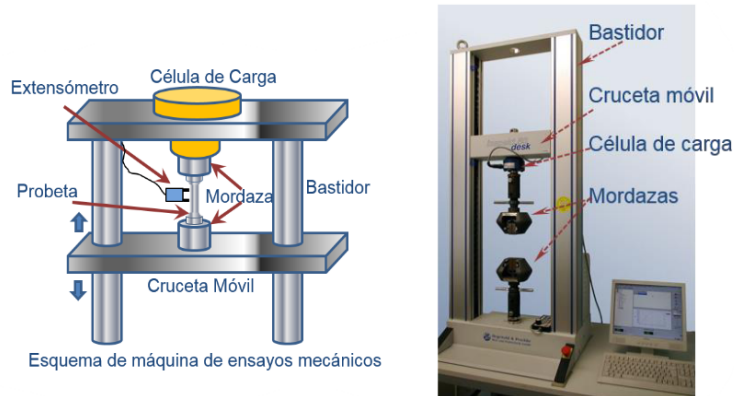
### **1.2.2.1. Pruebas de Tracción Uniaxial**

El ensayo más común para la caracterización mecánica es el ensayo de tracción. El ensayo consiste en someter a un material (denominado probeta en el ensayo) a una carga de tracción que va aumentando y es aplicada de manera uniaxial a la probeta hasta alcanzar la ruptura mientras se van registrando datos de fuerza y desplazamiento.

En la figura anterior se puede apreciar lo que se denomina una máquina de ensayo de tracción o máquinas universales de ensayos. Sus componentes principales son:

## 1. ANTECEDENTES

---



**Figura 1.3:** Máquina de ensayos de tracción. A la izquierda, esquema indicando las partes principales. A la derecha fotografía de una máquina actual. Imagen de la izda. de Ane Miren García Romero. Imagen de la derecha, derivada de: By Smial - Own work (Original text: eígenes Foto), CC BY-SA 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7453188>

- Bastidor: Son ejes verticales inamovibles que sirven de sostén para soportar las crucetas o cabezales.
- Cruceta Móvil: Como su nombre lo indica, es una base horizontal que cruza los bastidores. En esta base se implementan los elementos para sostener la probeta y es la encargada de desplazarse para aplicar una fuerza de tracción a la probeta. Su movimiento puede ser controlado por motores eléctricos o pistones hidráulicos.
- Mordazas: Son elementos que sujetan la probeta de manera que esta quede fija. Estos elementos deben estar diseñados para sujetar la probeta de tal manera que no importa la fuerza que se aplique, estos no deben de soltar la probeta.
- Célula o celda de carga: Es el sensor encargado de medir la cantidad de fuerza que se está aplicando en el experimento.
- Extensómetro mecánico: Sensor que mide el desplazamiento que va sufriendo la probeta en la zona entallada a lo largo del experimento.
- Probeta: Elemento construido con el material que se desea estudiar. Su forma esta diseñada para garantizar que la ruptura se de en una zona en particular (centro de la zona entallada de la probeta).

Cuando todos los elementos anteriores están acomodados se procede a realizar el experimento. La cruceta móvil comienza a moverse a una velocidad constante y aplicando

cada vez más fuerza. El experimento termina cuando la probeta se rompe. Toda la fuerza aplicada y el desplazamiento resultante se van registrando a lo largo del experimento y se almacenan en un archivo de datos para su posterior análisis.

La manera en cómo el ensayo mide la fuerza que se va aplicando es mediante un sensor de carga. Para medir la deformación o desplazamiento que va sufriendo el material a lo largo del ensayo se usa comúnmente un extensómetro mecánico. La razón por la que se usa un extensómetro mecánico y no solo se calcula el desplazamiento de la probeta es debido a que en un ensayo, no solo la probeta sino también las mordazas y parte de la máquina pueden sufrir una ligera deformación. Entonces el desplazamiento sería la suma de las deformaciones de las probetas, mordazas y algún otro componente de la máquina. Esto es más común que ocurra en ensayos para materiales que requieren mucha fuerza para deformarse, como los metales. Sin embargo, para materiales más blandos puede usarse el desplazamiento registrado directamente de la cruceta móvil en lugar de un extensómetro mecánico.

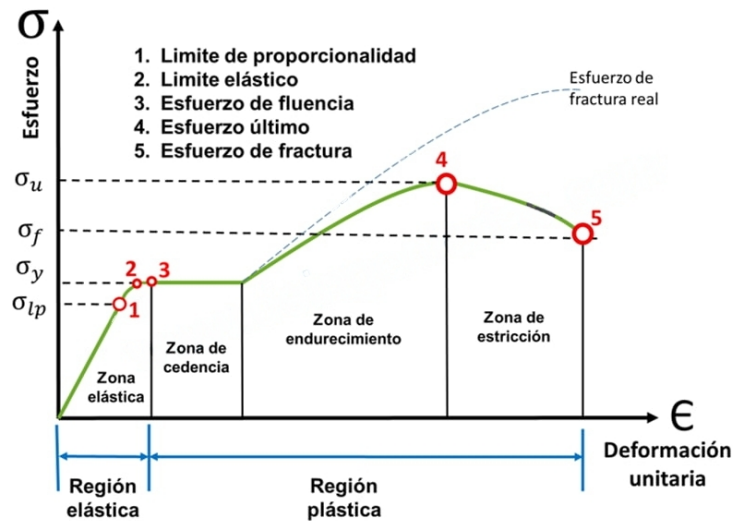
El resultado del ensayo de tracción son las cargas que se fueron aplicando a lo largo del experimento con su respectivo alargamiento. Sin embargo, estos valores por sí solos no son útiles, ya que dependiendo del tamaño de la probeta puede cambiar la fuerza necesaria para llevar la probeta a la ruptura. Debido a lo anterior, es necesario normalizar los valores.

- Tracción nominal: Es la normalización de la fuerza. Se obtiene dividiéndola el valor de la fuerza entre el área de la sección de la probeta. El resultado es un valor en Pascales y se conoce como esfuerzo normal.
- Deformación nominal: Para obtenerlo se realiza una razón entre la diferencia de la longitud en algún momento del experimento con la longitud inicial y se divide con la longitud inicial. De esta manera tenemos una deformación adimensional que puede ser representada en porcentaje.

#### 1.2.2.2. Gráfica Esfuerzo Deformación

Lo primero que hay que delimitar es que la carga que se esté aplicando no cambie a lo largo del ensayo y se aplique de manera pareja en toda la superficie de una pieza. Esta gráfica se puede obtener aplicando una de las siguientes cargas: tensión, compresión y cizalladura o torsión.

Con los valores obtenidos en el ensayo de tensión podemos comenzar a plasmar la gráfica de esfuerzo-deformación. Esta no dependerá del tiempo, sino de la relación entre una fuerza aplicada y la deformación que el material sufrirá. Un material puede sufrir diferentes deformaciones dentro de su estructura cuando se le aplica una fuerza y la gráfica permite visualizar de que forma el material se está deformando.

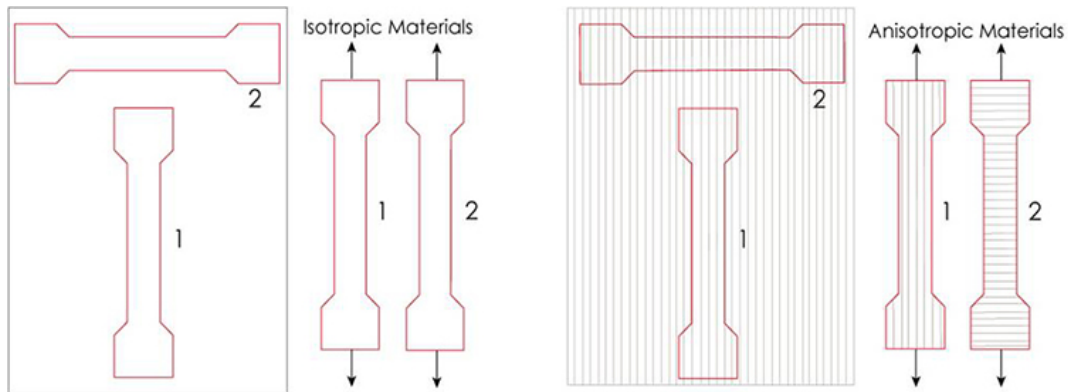


**Figura 1.4:** Gráfica que representa un comportamiento de un acero dúctil. Imagen obtenida de Deingenierias.com

Dependiendo del material y el cómo su estructura interna responda a la deformación, diferentes fenómenos pueden ser vistos en la gráfica. Pero hay algunos que son muy comunes de encontrar como los son:

**Comportamiento Elástico:** Este comportamiento se da cuando a un material que se le administró una carga y se deforma, al momento de retirar la carga este regresa a sus dimensiones originales. Debido a que solo ocurre con valores pequeños de carga, este fenómeno lo podemos ver al inicio de la gráfica. En toda esta zona de la gráfica, la deformación del material es proporcional a la carga aplicada. Esta línea recta se rige por la ley de Hooke y nos permite obtener el módulo de elasticidad o Módulo de Young del material. También se puede obtener el coeficiente de Poisson que es la relación entre la deformación transversal y la deformación longitudinal. Existen algunos materiales que en lugar de tener una zona lineal, tienen una zona no lineal y para conocer su comportamiento elástico se obtiene el módulo secante, que es la pendiente de la recta que es secante a la curva.

**Comportamiento Plástico:** Normalmente los materiales se trabajarán en condiciones donde su comportamiento sea elástico por lo que es importante saber en qué momento empieza la deformación plástica. Este es un comportamiento donde, al aplicarle una fuerza lo suficientemente grande, al retirársela, el material ya no puede recuperar sus dimensiones originales.



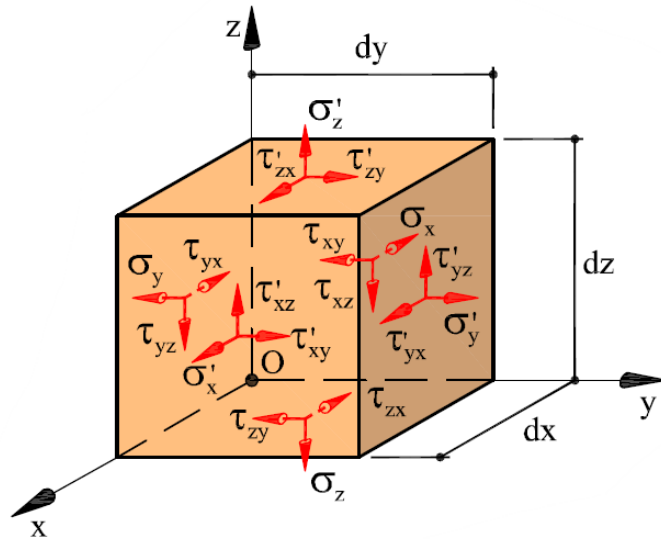
**Figura 1.5:** Comparación de una probeta con un material isotrópico (izquierda) y un material anisotrópico (derecha). Imagen extraída de: <https://www.instron.com/es-ar/resources/glossary/isotropic>

### 1.2.3. Pruebas de tracción biaxial

Materiales como los metales llegan a tener regularmente un comportamiento isotrópico. Un material isotrópico es aquel que tiene el mismo comportamiento en cualquier dirección que se mida, independientemente de la forma en la que se aplique una carga. Sin embargo, existen materiales cuyo comportamiento es anisotrópico. Al aplicar cargas de compresión o tensión en diferentes ejes, el material responderá de manera diferente. Esto se puede apreciar mejor en la siguiente figura:

Debido a las diferentes formas en las que un material anisotrópico se puede comportar, existe gran variedad de pruebas biaxiales. Estas se pueden clasificar dependiendo si se utiliza una sola o más cargas independientes al material. [6] Un ejemplo de la primera clasificación es la prueba de aplicación interna. Este genera una protuberancia de manera biaxial sobre el material solo utilizando una sola carga. Por otro lado, existen los que requieren de dos cargas independientes. Estos pueden ser una mezcla de tensión-compresión o con torsión. El más aplicado es el de tracción biaxial planar. Este ensayo aplica dos cargas independientes en ejes perpendiculares del material.

Para saber cómo analizar las propiedades mecánicas de un material debemos saber cómo podría reaccionar ante una carga y si afecta o no la dirección en la que esta es aplicada. Imaginemos un material cualquiera que será sometido a una fuerza. Lo anterior provocará cierta deformación interna en el material generando una tensión. La tensión es el resultado de aplicar una fuerza en un área. Debido a que la tensión depende de la dirección en que es aplicada, esta es una propiedad vectorial y puede ser separada en diferentes componentes dependiendo de la dirección analizada. Si imaginamos que nuestro material es un cubo con dimensiones  $dx$ ,  $dy$  y  $dz$  y le aplicamos una fuerza en



**Figura 1.6:** Representación de los componentes de esfuerzos en un punto representado por un cubo. Imagen extraída de: Mecánica y Resistencia de Materiales(Cervera2014)

cada cara del cubo, entonces tendremos una tensión vectorial por cada cara. Una tensión vectorial está constituida por 3 componentes: una tensión normal que es normal al plano o cara donde es aplicada y dos componentes tangenciales, que son los ejes paralelos a la cara o plano. Esto se puede visualizar mejor en la siguiente figura: A partir de lo anterior podemos comenzar a visualizar cómo podría comportarse un material ante una fuerza y clasificarlo. Si tenemos un cubo de acero entonces al aplicar una fuerza, no importando en qué cara sea aplicada, podemos esperar que la tensión tenga el mismo valor en cualquier lado. A esto se le llama un material isotrópico. Existen otros factores a considerar como la temperatura, pero en términos prácticos esta forma de visualizarlo es suficiente. Los materiales isotrópicos tienen un comportamiento independientemente de la dirección donde sea aplicada. Por eso pruebas uniaxiales son más que suficientes para obtener sus propiedades mecánicas. Ahora imaginemos que nuestro material es madera. La madera tiene la cualidad de tener una distribución no tan homogénea de sus elementos internamente. Esto provoca que al aplicar una fuerza en el eje Y arroje valores diferentes de tensión a si por ejemplo aplicáramos esa misma fuerza en el eje X o Z. Cuando las tensiones son dependientes de la dirección que es aplicada la fuerza, pero estas direcciones son perpendiculares entre si entonces hablamos de materiales ortotrópicos. Para este tipo de materiales es necesario hacer la misma prueba

uniaxial pero en diferentes direcciones para obtener el valor de la tensión en sus 3 ejes. Los materiales anteriores tienen una configuración casi idónea en su interior, lo que permite que su análisis no sea tan complicado. Sin embargo existen materiales que en su interior los átomos están estructurados de una manera heterogénea, lo que provoca que se obtengan valores de tensión diferente en diferentes direcciones, sean o no perpendiculares entre ellas. Estos materiales son llamados anisotrópicos y para su análisis se requieren de pruebas más elaboradas. Un ejemplo de material anisotrópico es la piel humana, por lo que para su estudio no es suficiente una prueba de tracción uniaxial. Es aquí donde entran en juego las pruebas de tracción biaxial. Basándonos en [5] las pruebas biaxiales pueden clasificarse en tres tipos:

- Prueba biaxial de estallido: Aplicado a probetas planas de forma circular donde son sujetadas por la periferia. Una presión de aire o agua es aplicada hasta que la probeta estalla. Las desventajas de este tipo de pruebas es que al no deformarse el material de manera esférica entonces los cálculos no son del todo certeros, además de que el comportamiento de la estructura interna del material no es siempre la misma.
- Pruebas biaxiales cilíndricas: Se requiere de una probeta de forma cilíndrica y hueca por dentro. Esta prueba es derivada de una prueba multiaxial que aplica una carga de torsión, una carga de tracción o compresión y una carga interna que expande la probeta por dentro. En las pruebas biaxiales solo se aplica la torsión y la carga de tracción o compresión. Una de las desventajas de este problema es que debido a la forma tubular de la probeta se generan gradientes de esfuerzos a lo largo de la pared, generando zonas más susceptibles que otras.
- Pruebas biaxiales planas: Ampliación del ensayo uniaxial. De manera perpendicular se colocan dos estructuras de un ensayo uniaxial y en medio se coloca una probeta de forma cruciforme plana. Mediante mordazas se sujeta la probeta de las 4 esquinas y se comienza a aplicar una carga de tracción o compresión. Es importante que las mordazas que sujeten a la probeta no maltraten a la probeta de tal forma que se generen concentradores de esfuerzos en esas zonas.

## 1.3. Estado del arte

### 1.3.1. Comercial

La mayoría de las máquinas que son comerciales están destinadas a hacer pruebas de ensayo en escalas macros. Existen máquinas de ensayo que son de una escala menor,



## 1. ANTECEDENTES

---

usados en ámbitos médicos. Sin embargo, estas máquinas suelen ser bastante voluminosas y costosas. A continuación se presentan algunos probadores biaxiales que existen en el mercado. Se hablará de sus cualidades y desventajas.

Zwick/Roell es una empresa alemana que fabrica máquinas de ensayos para materiales. Sus máquinas están destinadas a un gran número de pruebas, tanto estáticas como dinámicas. Entre su vasto catálogo tienen a su disposición máquinas biaxiales de dos tipos: los que pueden aplicar una carga de tensión o compresión y una carga de torsión y los que aplican dos cargas de manera perpendicular, sea tracción o compresión.

### 1.3.1.1. Máquina de testeo cruciforme en orientación horizontal con actuadores electromecánicos para pruebas de hasta 2kN

Esta es una serie de varias máquinas que pueden ir incrementando su fuerza de testeo. La menor de todas es esta de 2kN. Su configuración está acomodada en forma de cruz y en cada sección existe un actuador electromecánico que puede moverse hasta 200mm. Tiene un extensómetro *videoXtens* para medir la tensión aplicada en el experimento. También permite implementar equipo para realizar pruebas que necesiten estar dentro de un líquido y contiene sensores para llevar un control de la temperatura.

Sus desventajas, cómo podremos encontrar en casi cualquier máquina de ensayos de cualquier empresa son:

- Un alto costo para su adquisición, llegando incluso a superar los cien mil pesos.
- Su tamaño es de 2 metros cúbicos aproximadamente, lo que requiere de un gran espacio e infraestructura para poder usarlo de manera adecuada.
- Su elementos y sistema de control son únicos, por lo que no acepta de manera tan fácil cambios o manipulaciones para adecuarlo a pruebas diferentes.

### 1.3.1.2. Máquina de prueba biaxial HLS series

De la empresa Hualong, con más de 29 años de experiencia y un gran catálogo en su arsenal, existe la máquina de pruebas biaxiales HLS series.

Esta máquina utiliza tecnología hidráulica para controlar las cargas. Dependiendo el modelo puede ir desde 50KN hasta 600KN. Tiene una resolución de 0.001 y un rango de desplazamiento de 200 mm.

Igual que en el caso anterior, las dimensiones son bastante grandes, llegando a medir de 3 x 3 metros de espacio, con una altura de 60 centímetros.



**Figura 1.7:** Foto del probador biaxial de la empresa Hualong. Obtenida de su página oficial: <https://www.shhualong.com/8es/490.html>

### 1.3.1.3. Máquina de Ensayo Personalizado - Máquina de Ensayo Biaxial

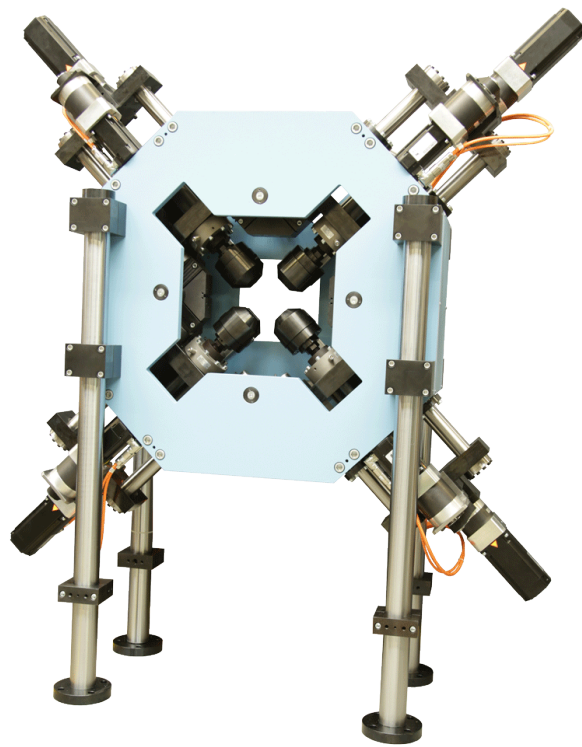
De otra empresa alemana, WPM Leipzig, igualmente especializado en la construcción de máquinas de ensayos, tiene máquinas para pruebas más especializadas, en las que existe el probador biaxial.

Esta máquina es capaz de aplicar 100kN de tracción y 10kN de compresión. Tiene un desplazamiento en cada eje de 300mm (150mm por cada sector).

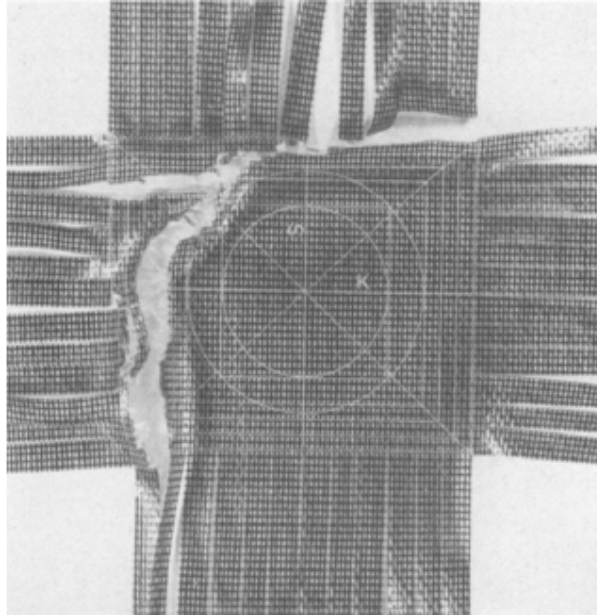
Esta máquina está diseñada específicamente para probar metales, lo que hace que su precisión sea específica para estos materiales.

### 1.3.2. Investigación

Desde la década de los 50's se pueden encontrar registros de la investigación de los probadores biaxiales. Debido a la utilidad de usar materiales con comportamiento anisotrópicos era necesario tener ensayos capaces de obtener las propiedades de una manera más fiel. A continuación se listan algunos trabajos sobre los probadores biaxiales y sus aportaciones.



**Figura 1.8:** Foto del probador biaxial de la empresa WPM. Obtenida de su página oficial: <https://wpm-leipzig.de>



**Figura 1.9:** Foto de una probeta textil fracturada de las pruebas de Reinhardt. Imagen tomada del artículo de Reinhardt de 1976

#### **1.3.2.1. Sobre las pruebas biaxiales y la resistencia de los tejidos recubiertos**

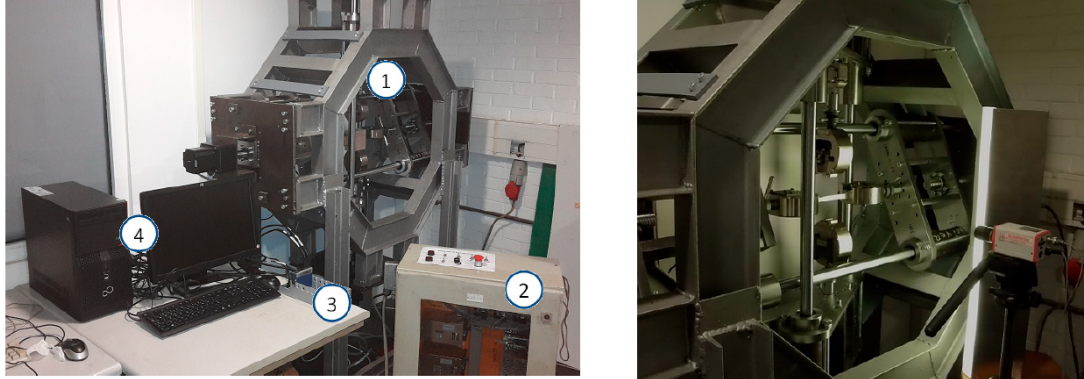
El artículo fue escrito por Hans W. Reinhardt en 1976. Su enfoque, al igual que sus predecesores era en el área textil. Su objetivo era comparar la eficiencia entre las pruebas biaxiales planas y uniaxiales, la cual resultó ser igual. En un escrito también menciona una clasificación de los probadores biaxiales que aún a día de hoy se utiliza. A pesar de ser un artículo con bastantes años, sigue siendo un referente clave en la investigación de los probadores biaxiales.

#### **1.3.2.2. Máquina de prueba biaxial: desarrollo y Evaluación**

En la universidad de Aveiro en el año de 2020 se desarrolló un probador biaxial plano para pruebas de laboratorio. Entre sus peculiaridades se pueden resaltar la capacidad de ejercer cargas de hasta 10kN. Su disposición está basada en la máquina Biaxial de la investigación de Boehler hecha en 1994 pero con algunas modificaciones. Para permitir una mejor visualización del espécimen se hicieron modificaciones en la colocación de las platinas de manera diagonal para evitar interferencia. La máquina es controlada

## 1. ANTECEDENTES

---



**Figura 1.10:** Foto del probador. Imagen tomada del artículo de Antonio B. Pereira.

mediante Arduino y usa motor a pasos para generar cargas de tracción y compresión. De los resultados de sus experimentos, las pruebas entre los ensayos biaxiales y uniaxiales salieron similares, reafirmando la exactitud del probador biaxial. [7]

### 1.3.2.3. Una plataforma de prueba biaxial versátil para tejidos blandos

La investigación se enfoca en el desarrollo de un probador biaxial con ciertas características que superan a algunos probadores comerciales. Entre sus cualidades tiene la capacidad de realizar pruebas uniaxiales, biaxiales y cortantes. Tiene una velocidad de desplazamiento de hasta 500mm/s y una carrera de 100mm. Pueden caber probetas de entre 12.7 hasta 100mm, siendo muy versátil en el tamaño de la probetas. Por lo anterior, el probador también es capaz de cambiar las celdas de carga, usando normalmente unas celdas que aguantan hasta 44.48N. Como método de deformación, utiliza la técnica de Correlación por Imagen Digital. [8]

### 1.3.3. Investigación en el IIM

Esta investigación es producto del trabajo de una línea de investigación sobre la caracterización mecánica de materiales con comportamientos anisotrópicos. A continuación se mencionarán las investigaciones que se realizaron previamente sobre los probadores biaxiales.

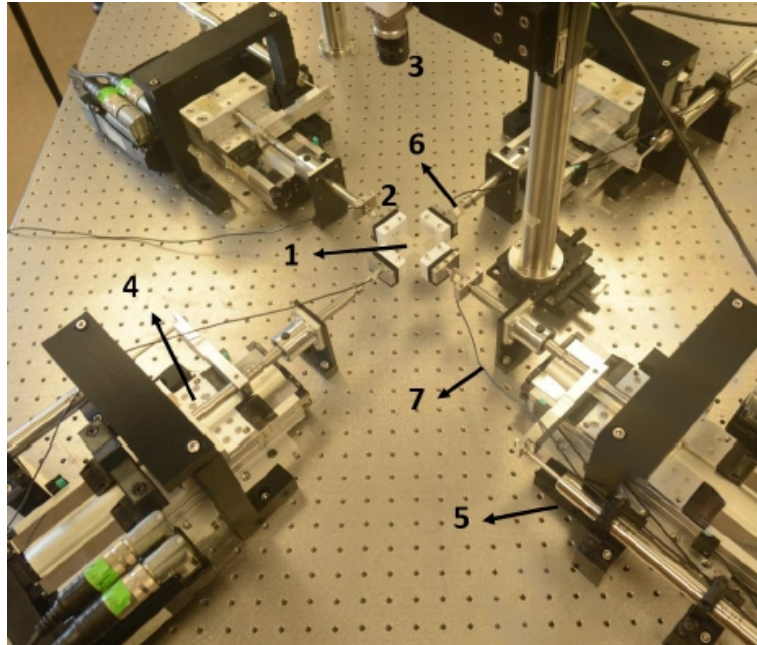


Figura 1.11: Foto del probador. Imagen tomada del artículo de Mingliang Jiang.

### 1.3.3.1. Probador Uniaxial de Materiales Biológicos

Este probador fue diseñado con el propósito de poder ensayar materiales biológicos que tienden a ser suaves. Además tiene la facilidad de poder montarse en diferentes ambientes y configurar su estructura dependiendo las necesidades que surjan. Su material no es tan elevado como los comerciales y su software permite modificaciones a la manera de realizar ensayos, lo que permite una libertad de realizar diferentes experimentos y diferentes pruebas.

La fuerza que se aplica es menor a un probador convencional (máximo 25KN) ya que el material no requiere de tanta fuerza. Además los sensores son más sensibles a la carga y la carrera es de 30cm. Como podemos ver, es para pruebas con probetas pequeñas pero que requieren de mucha precisión. [9]

### 1.3.3.2. Equipo de tracción biaxial por inflamiento de membranas

Los materiales pueden existir en diferentes presentaciones dependiendo su utilidad. En el área médica lo más común es que los materiales en presentaciones delgadas que simulen las membranas del cuerpo. Cuando un material tiene esta forma existen otro tipo de ensayos para conocer sus propiedades. En el área de máquinas biaxiales existen



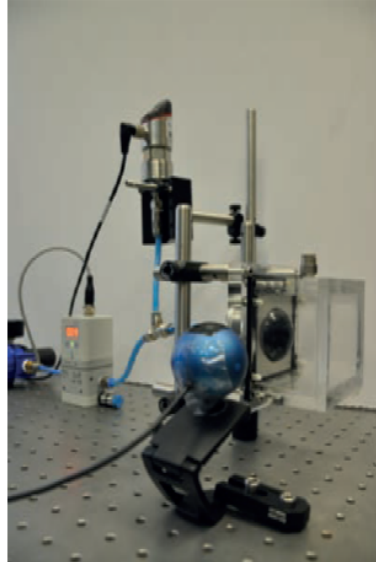
**Figura 1.12:** Foto del probador uniaxial. Imagen tomada de Tesis de Vázquez Flores 2014

las llamadas por aplicación interna. Este es someter a la membrana a una presión al bombear un fluido, lo que provoca su deformación. La prueba por inflamiento permite aplicar ensayos cíclicos sin llevar a la probeta hasta la ruptura. Se puede obtener la curva de esfuerzo-deformación. Entre sus ventajas esta la fácil manipulación de la muestra y poder implementar diferentes condiciones de carga.

El probador desarrollado en la investigación de Prado tiene las características de estar acoplado a un sistema de visión estereoscópico para poder obtener las deformaciones de la membrana a través de correlación de imágenes digitales. También a partir de las variables obtenidas sobre la carga y deformación se pueden obtener modelos matemáticos para modelar su comportamiento. [10]

Las características del probador son:

- Deforma de manera controlada probetas en forma de membrana.
- Registra variables como tiempo, presión, temperatura y humedad.
- Captura imágenes a través de 3 cámaras.
- El montaje es fácilmente manipulable, lo que permite una adecuación a diferentes ensayos.
- Su manufactura es sencilla y puede ser reproducible con facilidad.



**Figura 1.13:** Foto del probador biaxial por inflamamiento. Imagen tomada de Tesis de Alejandro Padro 2016

#### 1.3.4. Normas para las Pruebas Biaxiales

En diferentes partes del mundo se están construyendo infinidad de máquinas para diferentes propósitos. Para garantizar que los resultados sean los mismos independientemente de la máquina que se use todos deben de basarse en ciertas normas preestablecidas internacionalmente. Existen diferentes normas de calidad y dependiendo de la zona geográfica donde querriamos validar nuestros resultados son las normas que debemos buscar cumplir. A continuación se muestra un listado de normas que deben de considerarse en la máquina biaxial de esta investigación para validar los resultados obtenidos.

**ASTM STP 1387 - Fatiga y Deformación Multiaxial: Pruebas y Predicciones.** El presente es un compendio de trabajos realizados en máquinas biaxiales y sus resultados. Entre los trabajos se encuentran análisis sobres cargas, deformaciones y predicciones de fatiga bajo cargas genéricas y específicas. Es importante recalcar que los materiales usados son inorgánicos, como aceros, aluminios, aleaciones y algunos otros.

**ISO 16842 - Método de ensayo de tracción biaxial utilizando una probeta cruciforme** Esta norma explica características generales de cómo llevar a cabo una prueba de tensión biaxial. Desde la propiedades que debe tener la probeta, métodos de como medir la carga y la deformación hasta la manera de reportar los resultados.

Existe algo que es importante a resaltar, y es que las normas hechas para los pro-



badores biaxiales se han hecho basadas en materiales inorgánicos como metales o telas. Esto es importante destacar ya que si el propósito es poder usar la máquinas biaxial para probar materiales con propiedades biológicas entonces es necesario contemplar otras normas.

**ASTM F 2027-00 - Guía Estándar para la Caracterización y Ensayo de Materiales de sustrato para Productos médicos de ingeniería tisular** En esta norma se listan todas las normas para los diferentes materiales usados en ambientes médicos. Dependiendo el material que fuese a ensayar son las normas que deben aplicarse.

### 1.4. Justificación

Contexto En el área de la medicina existe una rama llamada medicina regenerativa que surge de la necesidad de tener alternativas para reemplazar o restaurar partes del cuerpo humano a falta de donadores o tener un sustituto adecuado. Uno de los requerimientos para que un sustituto de órgano o tejido sea candidato a un trasplante es que sea capaz de soportar las cargas mecánicas a las que es sometida en el cuerpo. Para ello es necesario realizar una caracterización mecánica, sin embargo, debido a que los tejidos están comúnmente sometidos a cargas biaxiales una prueba más idónea sería a través de un ensayo biaxial. Hasta hace algunos años, la mayoría de las pruebas que se hacían a tejidos con prospecto de piel eran ensayos uniaxiales.[11] Esto debido a la facilidad de acceder a uno, además de ser el probador por excelencia. Un probador biaxial plano demuestra ser más caro y los diseños disponibles son de gran tamaño, haciendo difícil la adaptación de otros instrumentos o entornos.

En cuanto a la definición del problema, se plantea la necesidad de desarrollar un probador para tracción biaxial plana que permita ensayar materiales con un comportamiento cercano a los tejidos biológicos como la piel. Este probador debe resultar versátil y no ser tan voluminoso para poderse mover en diferentes ambientes e incluso instalarse en microscopios ópticos.

La importancia respecto a la relevancia social de contar con un probador para tracción biaxial plana recae en la capacidad de realizar pruebas biaxiales a materiales sintéticos, naturales o híbridos que puedan sustituir a tejidos biológicos humanos que necesiten ser reemplazados; por ejemplo la piel expuesta a una lesión térmica o química grave. Este permitirá saber si el material sustituto se comportará mecánicamente de una manera adecuada o no. Al poder caracterizar de mejor manera estos materiales se dará un paso importante en encontrar mejores materiales para implantes o para tratamientos y garantizar una mejor funcionalidad una vez utilizados en pacientes. Los resultados derivados de estos ensayos podrían ayudar enormemente a la comunidad

científica y médica.

En cuanto a la relevancia Académica, el desarrollo de probadores para tracción biaxial plana permitirá ampliar el conocimiento en el área de la ciencia e ingeniería de materiales y poder caracterizar de mejor manera materiales con comportamiento anisotrópico con este tipo de ensayo. De igual manera, será un método para probar de manera tangible el comportamiento de un material a diferentes cargas perpendiculares y a diferentes escalas a través la cámara CCD incorporada al probador; de tal manera que se podrán implementar modelos macro y micromecánicos que amplíen el entendimiento de la respuesta mecánica de los biopolímeros y tejidos biológicos. El tener un probador biaxial que sea capaz de manipularse y adaptarse a las condiciones requeridas abre una ventana de posibilidades y un gran rango de materiales que pueden ser probados. Actualmente las empresas que manejan estos probadores tienden a ser muy rígidos y nos son capaces de adaptarse tan fácilmente a las necesidades del material. Una vez establecido lo anterior, se presentará la hipótesis, y objetivos de este trabajo.

## 1.5. Hipótesis

Al seleccionar adecuadamente componentes eléctricos, electrónicos y mecánicos será posible desarrollar un probador mecánico para ensayos de tracción biaxial plana de carácter modular que sea capaz de obtener simultáneamente, a través de una interfaz gráfica/software, datos de tiempo, fuerza, desplazamiento e imágenes durante un ensayo de tracción biaxial plana.

## 1.6. Objetivo General

Diseñar y construir un probador mecánico para tracción biaxial plana que sea capaz de generar cargas para deformar de manera controlada un material suave como los biopolímeros o tejido biológico.

### 1.6.1. Objetivos particulares

- Definir un límite de las cargas aplicadas que podrán ser utilizadas en el probador y poder ser ejecutadas sin que existan riesgo de comprometer la integridad del probador y/o alguno de los elementos que lo conforman.
- Obtener un probador modular, de tal forma que la organización del probador permita una manipulación fácil y poder integrar elementos para tener un control

## 1. ANTECEDENTES

---

del ambiente al que tenga que estar sometido el material.

- Desarrollar una interfaz gráfica que permita el uso del probador mecánico para tracción biaxial plana.
- Realizar prueba mecánica a un material suave, para demostrar el desempeño del probar mecánico.

# Metodología y técnicas experimentales

---

## 2.1. Composición General

El proyecto está constituido de 3 sistemas:

- **Sistema mecánico:** Esta parte consta de todos los elementos físicos que conforman el probador biaxial, como lo son motores, drivers, sensores, cámara y estructuras.
- **Sistema eléctrico:** Se aborda la parte de instrumentación y control, así como la alimentación de energía de todo el sistema.
- **Interfaz Gráfica:** El diseño y construcción de un programa para poder controlar todo el sistema.

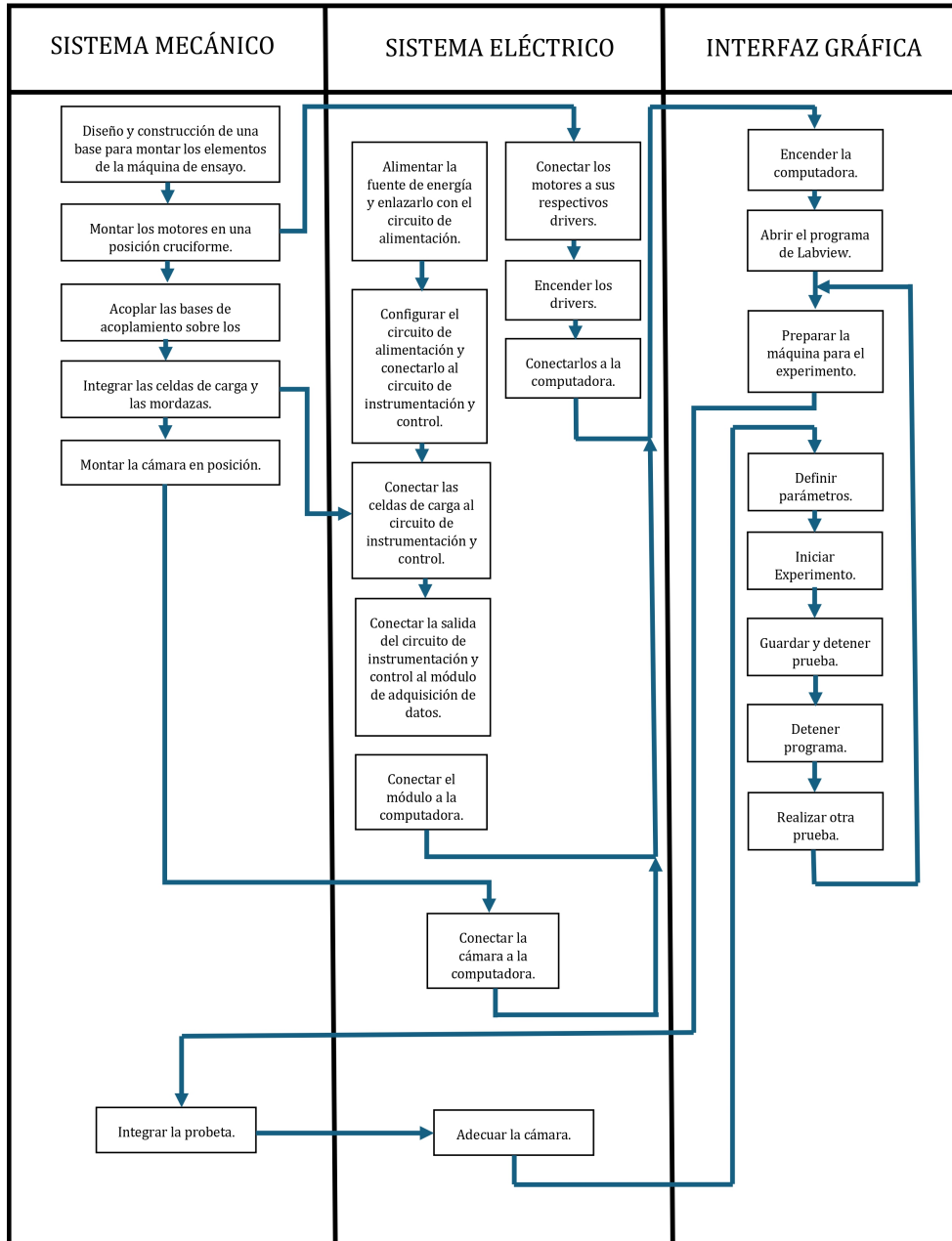
En la figura 2.1 podemos ver cómo estos tres sistemas se van ejecutando y entrelazando entre ellos para poder llevar a cabo un ensayo mecánico de tracción uniaxial.

En las siguientes secciones y subsecciones se presentarán los detalles específicos que se contemplaron en el desarrollo de dicho probador mecánico y todas aquellas consideraciones requeridas para lograr su construcción.

## 2.2. Diseño Mecánico y sus consideraciones

En este apartado se definirán las características que debe cumplir el probador y cómo afectarán la manera en que estará construido. Para este probador, las características a considerar son las siguientes:

## 2. METODOLOGÍA Y TÉCNICAS EXPERIMENTALES



**Figura 2.1:** Diagrama que representa la forma en cómo trabaja el probador mecánico para ensayos de tracción biaxial plana.

- Fuerza de carga.
- Longitud de desplazamiento.
- Facilidad de adaptación al entorno.
- Facilidad de adaptar celdas de carga.

El probador está destinado a la experimentación con biomateriales, los cuales no necesitan valores muy altos de fuerza para ser deformados. Esto permite el uso de motores eléctricos en lugar de motores hidráulicos, como los que se usan para metales. La fuerza considerada para este probador es de: 10kg-fuerza. Esto debido a que la fuerza requerida para deformar un biopolímero (que es el material al que va enfocado este proyecto) ronda entre 0.1 y 10 N.

A diferencia de los metales, los biopolímeros tienen un comportamiento que exhibe una mayor elongación dependiendo de sus propiedades físico-químicas. Por ende, es necesario tener una longitud de movimiento suficiente para que los motores acoplados a platinas de desplazamiento sean capaces de garantizar que se pueda llevar a la ruptura a las probetas ensayadas.

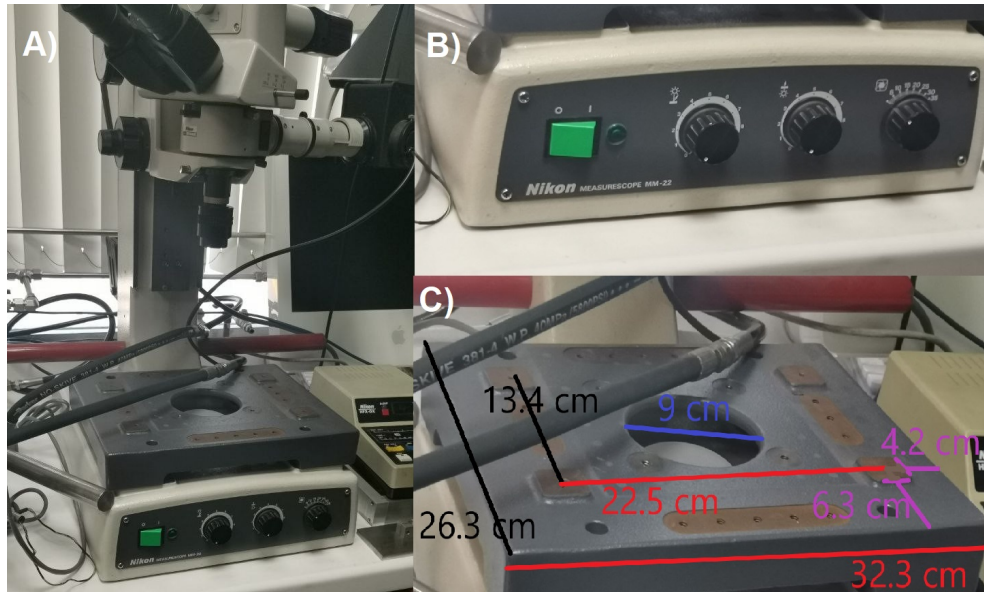
Dependiendo del experimento deseado, las características del entorno podrán variar. Por lo tanto, es necesario que los elementos del probador puedan ser manipulables/configurables y no estén fijos en una única posición. Debe existir la posibilidad de montar y desmontar los motores, cámara, celdas de carga y mordazas para poder cambiar su disposición.

Debido a que los biopolímeros pueden presentar propiedades mecánicas diferentes, es posible que en algún momento se requiera integrar otro tipo de celdas de carga. Por lo tanto, la parte de instrumentación y control debe estar adecuada para soportar un cambio de celda de carga con características diferentes.

### 2.2.1. Estructura

Una de las primeras consideraciones que tienen que tomarse en cuenta es el espacio de trabajo destinado del probador biaxial. Debido a que se utilizará para probar materiales como biopolímeros o tejidos biológicos, se contempla la posibilidad de poder montar toda la estructura debajo de un microscopio óptico. El microscopio es Nikon modelo Measurescope MM-22, como se muestra en las fotografías de la figura 2.2.

Es importante comentar que ya se cuenta con el microscopio; por lo tanto, es posible tomar las medidas directamente de la base del microscopio y transferir dicho patrón de barrenos al diseño del probador. De esta manera se logrará el acoplamiento entre el sistema mecánico y el microscopio Nikon. En la figura 2.2 se muestran las medidas principales del patrón de barrenos mencionado anteriormente.



**Figura 2.2:** Foto del microscopio destino para usar con el probador biaxial. A) Foto frontal del microscopio. B) Foto del controlador del microscopio donde se puede apreciar la marca. C) Medidas de la base del microscopio.

Una vez definido el espacio de trabajo, el siguiente punto importante es seleccionar los motores y sus controladores; esto estará en función del espacio de trabajo y las capacidades de carga y desplazamiento requeridas en los ensayos de tracción biaxial plana.

### 2.2.2. Motores y Drivers

La selección del motor, drivers y platina desplazamiento es un asunto complicado debido el poco espacio disponible en el que deben ser instalados 4 motores y sus respectivas platinas de desplazamiento. En este caso particular se seleccionaron platinas motorizadas de la marca Thorlabs.

Thorlabs es una empresa internacional con sede en Estados Unidos cuyo campo objetivo es la fotónica. Entre su amplia gama de instrumentos para este campo, tienen a su disposición una serie de motores acoplados a platinas de desplazamiento de alta precisión.

La platina motorizada utilizada para este proyecto es de la serie MTS, que se caracteriza por tener dos rieles y bolas de recirculación en un carro móvil. Con estas cualidades podemos garantizar un movimiento suave, con poca fricción y tener una

Parameter	Value	
	MTS25(/M)	MTS50(/M)
Stage	25 mm (1")	50 mm (2")
Travel Range	25 mm (1")	50 mm (2")
Bidirectional Repeatability	±0.8 μm	
Backlash	<6 μm	
Maximum Acceleration	4.5 mm/s <sup>2</sup>	
Maximum Velocity	2.4 mm/s	
Max Vertical On-Axis Load Capacity	4.5 kg (10 lbs)	
Max Horizontal On-Axis Load Capacity	12 kg (25 lbs)	
Min Theoretical Incremental Movement <sup>a</sup>	0.03 μm	
Min Repeatable Incremental Movement	0.8 μm	
Absolute On-axis Accuracy	145 μm	290 μm
Maximum Percentage Accuracy	0.3%	0.7%
Home Location Accuracy	± 4.0 μm	
Pitch	±0.02°	±0.025°
Yaw	±0.025°	±0.03°
Weight	0.31 kg	0.34 kg
Software Compatibility	APT: Server CDM621 V2.9.0 or later. Kinesis: V1.14.28 or later.	

**Figura 2.3:** Parámetros del motor.

carga de mayor capacidad. El tipo de motor que utiliza es un servomotor de DC con escobillas.

Para poder controlar estos motores la misma compañía otorga los drivers necesarios, con el número de serie KDC101 K-Cube.

También existe una interfaz gráfica que puede incorporarse en LabVIEW otorgada por Thorlabs. Dicha interfaz reconoce de manera automática los drivers para poder controlar los motores desde una computadora. Esta interfaz gráfica tiene su código para poder ser modificado a necesidad del usuario y crear la aplicación que satisfaga las necesidades del experimento.

Las características del motor se pueden consultar en la figura 2.3. Además, las características con mayor detalle de la platina motorizada se pueden consultar en el apéndice: 3.3.4.2.

Una vez que se seleccionó el actuador mecánico y la platina de desplazamiento, el



siguiente paso es pensar en el sistema de sujeción de las muestras a través de elementos mecánicos que permitan el acoplamiento entre la platina motorizada y los elementos de sujeción de las probetas, como las mordazas.

### 2.2.3. Mordazas y Coples

En un probador mecánico existen unos componentes que permiten sujetar las muestras del material de manera firme durante las pruebas, conocidos como mordazas. Las mordazas son necesarias ya que permiten que el material no se mueva/desplace durante la prueba y esto genere lecturas erróneas en los sensores de fuerza y desplazamiento del equipo.

Lo más crucial de una mordaza es que permita que, al aplicar una fuerza, la distribución se haga de manera uniforme sobre la probeta, evitando zonas donde se concentren las tensiones en la zona de sujeción de la probeta; evitando así que la probeta sujeta rompa justo en la zona de sujeción del borde de la mordaza. Otra cualidad de las mordazas es que deben deformarse lo menos posible. Cuando se realiza un ensayo, las fuerzas no sólo se aplican a la probeta, sino a las mordazas también. Al medir la deformación, hasta cierto punto también se está considerando la deformación de las mordazas. Si estas se deforman de manera considerable, los datos no serán del todo exactos.

Por otro lado, tenemos a los elementos mecánicos de acoplamiento, comúnmente llamados coples. Las celdas de carga, los motores y las mordazas van conectadas entre sí de manera consecutiva. Debido a la diferencia entre las características mecánicas de los diferentes elementos mencionados, es difícil garantizar que todos los elementos puedan embonar unos con otros. Por ello, es necesario generar coples que permitan conectar cada uno de los elementos entre sí.

Debido a la diferencia de medidas fue necesario diseñar ciertos coples para permitir la conexión entre estos. Así como las mordazas, los coples tuvieron que ser diseñados de un material que casi no se deformara ante las cargas aplicadas. Los enroscados de los componentes eran del tipo M5 y M6, cuyas propiedades se muestran en la tabla 2.1

**Tabla 2.1:** Tipos de Rosca

Tipo de Rosca	Diámetro	Paso de Rosca
M5	4,7 a 4,95 mm	0,80 mm
M6	5,7 a 5,95 mm	1,00 mm

Una vez resuelta la parte de acoplamiento entre el sistema de desplazamiento, mor-

dazas y celdas de carga, se está en posición de contemplar la instrumentación y control del probador mecánico.

## 2.3. Instrumentación y Control

Una de las etapas fundamentales para obtener resultados de un sistema es la etapa de medición. Para medir se emplean diferentes sensores capaces de reaccionar a diferentes cambios en el ambiente. Debido a la infinidad de técnicas que existen actualmente para recoger señales eléctricas, los sensores más utilizados son los que tienen a su salida señales eléctricas. Debido a lo anterior, es obligatorio tener una etapa posterior de instrumentación y control para estos sensores. Esto garantiza la precisión y fiabilidad de los datos recopilados. Dentro de esta etapa se busca que las señales eléctricas pasen por un proceso de acondicionamiento, que incluye amplificar, filtrar e inclusive convertir la señal de analógica a digital. También existe una etapa previa de calibración. Esto con el propósito de conocer la precisión del sensor y tener un modelo de comportamiento que servirá para tener su equivalente entre las señales eléctricas y el fenómeno físico a la que es sensible el sensor. Por último, una etapa de control sirve para utilizar las señales obtenidas para realizar acciones de manera automática o manual. Esto ayuda a que los procesos puedan llevarse a cabo de manera más estable y eficiente. A continuación se menciona cómo se hizo esta etapa tan importante en el diseño del probador mecánico para ensayos de tracción biaxial plana.

### 2.3.1. Sensores

Como se mencionó anteriormente, en las máquinas de ensayo mecánicas el propósito es conocer el comportamiento de un material ante un esfuerzo. Para conocer este comportamiento es necesario medir con sensores de fuerza y desplazamiento la respuesta mecánica del material. Las dos medidas más comunes en los probadores son el desplazamiento y la fuerza. Para medir el desplazamiento y posteriormente calcular la deformación, pueden usarse diferentes técnicas, una de ellas haciendo uso de un encoder en los motores para medir la distancia que se desplaza de manera lineal. La fuerza, por otro lado, hace uso de las celdas de carga, los cuales al deformarse bajo cierta fuerza mandan diferentes señales eléctricas. Haciendo uso de estos dos sensores, es posible obtener las medidas necesarias para obtener una gráfica de esfuerzo-deformación que modela el comportamiento del material puesto a prueba.

## 2. METODOLOGÍA Y TÉCNICAS EXPERIMENTALES

---

**Tabla 2.2:** Características de la Celda de carga.

Carga	10 kg
Precisión	0.05 0.1 F.S
Sensibilidad	1.0-1.5mv/V
Voltaje de Excitación	10 12VDC
Cableado	Potencia:rojo(+),negro(-) Salida:verde(+),blanco(-)

### 2.3.1.1. Celdas de Carga

Como bien se mencionó previamente, las celdas de carga son sensores diseñados para reaccionar ante una fuerza. Como entrada, es necesaria una fuerza o peso que haga reaccionar al sensor, y como salida se obtiene una señal eléctrica analógica. Internamente, una celda de carga tiene una construcción de galgas extensiométricas, cuya cualidad es la de cambiar su resistencia eléctrica cuando estas son deformadas. Al verse sometida la celda de carga a una fuerza, las galgas extensiométricas se deforman internamente, generando una señal eléctrica que es proporcional a la fuerza aplicada. Como sensor, las celdas de carga tienen diferentes cualidades que deben considerarse al momento de seleccionarlas.

Es importante conocer la capacidad de carga, ya que nos permite saber la fuerza máxima que es capaz de soportar antes de empezar a fallar o tener un comportamiento no predecible. La sensibilidad permite saber qué tan sensible es a los cambios en la fuerza. No es lo mismo una celda de carga que varía por cada Newton de fuerza al que varía por cada gramo. Algo importante es conocer la linealidad con la que la celda de carga se comporta, ya que esto nos permite saber que, dependiendo la señal eléctrica recibida, corresponde a una fuerza en específico. Para conocer esta propiedad se puede pedir al fabricante un modelo matemático que relacione la fuerza con la señal eléctrica. Otro método es la ya mencionada calibración.

Para el caso de este probador biaxial se hizo uso de una celda de carga con las siguientes características:

Es importante mencionar que para poder mapear los valores de salida de la celda en volts a newtons, se tiene que realizar una calibración y así correlacionar la variable eléctrica con la mecánica a través de un modelo matemático obtenido mediante un ajuste de mínimos cuadrados lineales.

### 2.3.1.2. Encoders

También conocidos como codificadores de posición, los encoders son sensores para medir movimientos rotacionales. Aunque también pueden ser usados para medir

distancias lineales, su uso es más rotacional.

Existen 3 tipos de encoders: los mecánicos donde sus componentes son elementos mecánicos, los ópticos que usan receptores ópticos y los magnéticos que usan el efecto hall y un imán para su funcionamiento.

Estos sensores tienen que usar a su vez otro sensor que trabaja bajo el principio del efecto Hall. El efecto Hall es un comportamiento electromagnético que surge al pasar una corriente eléctrica por un conductor y este está bajo el efecto de un campo magnético. Cuando esto ocurre, las cargas eléctricas se acumulan en un lado del conductor, obteniendo el llamado voltaje hall. Este voltaje depende del campo magnético, la corriente y la constante Hall del material.

El motor de Thorlabs, entre todas sus cualidades, tiene integrado en su interior un encoder con efecto hall que provee 12,288 conteos por revolución, lo que significa que cada conteo son 29 nm. El movimiento incremental mínimo repetible real del escenario en sí es de 0.8 micrómetros.

#### **2.3.1.3. Cámara y lente.**

Para la parte de reconocimiento de visión se optó por utilizar una cámara de la empresa Thorlab cuyo código es DCC1240C-HO. Sus características son las siguientes:

- Diseñado para uso de microscopia.
- 1.3 Megapíxeles
- Distribución de 1280 x 1024 Píxeles.
- Compatible con diversidad de softwares. Desde C hasta Labview y Matlab.
- Sensor Monocromático
- Alimentación mediante entrada USB 2.0
- Tiene un sensor que permite el cambio entre rolling y global shutter mode.
- Montura tipo C para agregar un lente.

Esta cámara permite ser trabajado en el software de Labview y se le puede agregar un lente para mejorar aún más la calidad de la imagen.

El lente utilizado es el mostrado en la imagen

[2.4.](#)



**Figura 2.4:** Lente anexoado a la cámara.

Las propiedades del lente son los mostrados en la imagen [2.5](#)

- Up to 2/3", C-Mount Lens
- Up to 7.5 MegaPixels, 2.8 $\mu$ m Pixel Size Sensors
- Compact (C) SWIR Lens for 900-1700nm Wavelength Range
- 6mm to 50mm Focal Length

### Common Specifications

Iris Option:	Variable	Wavelength Range (nm):	900 - 1700
Mount:	C-Mount	Coating:	900 - 1700nm BBAR
Coating Specification:	900 - 1700nm BBAR	Imaging Lens Type:	Compact Lens
Storage Temperature (°C):	-20 to +60 For questions regarding operating temperature please contact our support team		

**Figura 2.5:** Características del lente.

La unión final de la cámara con el lente se muestran en la foto [2.6](#)



**Figura 2.6:** Fotografía de la cámara de Thorlabs con el lente.

Se puede encontrar más información sobre la cámara en el anexo: [3.3.4.2](#)

## 2.3.2. Alimentación eléctrica

### 2.3.2.1. Fuente de Voltaje

En México la corriente que llega de los tomacorrientes es de tipo alterna con un valor de 127 Volts y a una frecuencia de 60Hz. Para alimentar las celdas de carga se requiere de una fuente estable de tipo directa. Es por ello que se requiere de una fuente de voltaje que haga esta primera etapa de adaptación del voltaje para trabajar de manera más segura.

El probador mecánico está diseñado para poder cambiar las celdas de carga con distintas capacidades. Por convención las celdas de carga pueden tener dos valores de alimentación, de 10 V y de 5 V. Por otro lado, para aumentar la señal de una celda de carga se requiere usar un amplificador operacional. Estos requieren de una alimentación positiva y negativa del mismo valor. En otras palabras, se requiere de un voltaje inicial de 20 V. para después poder dividirlo en +10 y -10 V. Es por ello por lo que se utiliza una fuente de voltaje de 24V.

La fuente de voltaje es de la marca MEAN WELL y el modelo es el HDR-60-24. Las características principales de esta fuente de voltaje son las siguientes:

- Tiene una potencia nominal (Consumo máximo de energía) de 60 Watts.
- Tiene un voltaje DC de salida de 24V que pueden ser ajustado. El rango de ajuste va desde los 21.6V hasta los 29V.
- Otorga una corriente de 2.5A.



**Figura 2.7:** Imagen obtenida de la hoja de especificaciones de la fuente HDR-60-24.

- Soporta una frecuencia de entrada entre 47 y 63 Hz. La frecuencia en México es de 60Hz.
- El VAC de entrada puede ser entre 85 y 264 VAC. En México es de 127VAC.
- Su tamaño es de 58.4x90x52.5 mm. Es bastante pequeño, no rebasando el decímetro cúbico.
- Tiene 4 salidas, dos positivas y dos negativas, pudiendo alimentar diferentes circuitos al mismo tiempo.

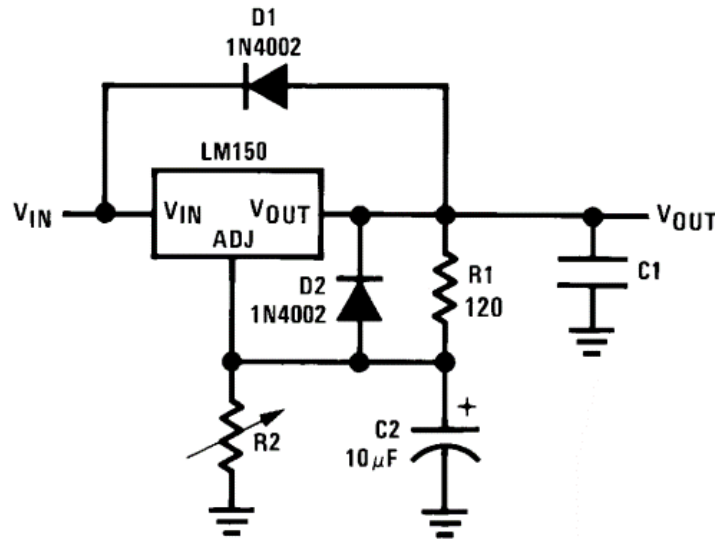
Con todas las características mencionadas anteriormente, esta fuente de voltaje es idónea para las celdas de carga y su instrumentación.

Para mayor información se puede consultar el anexo [3.3.4.2](#).

Otra de las ventajas de esta fuente de voltaje es su fácil adquisición y su precio no tan elevado. En tiendas en línea como Amazon puede encontrarse esta fuente a un costo inferior a los 400 pesos mexicanos.

### 2.3.2.2. Circuito Regulador de Voltaje

Debido a que los materiales presentan diferentes valores de resistencia a la deformación, la fuerza aplicada puede ser mayor o menor. Para un material con una resistencia muy alta a la deformación será necesario aplicar una fuerza muy grande. Si la celda de carga no está diseñada para soportar tales niveles de carga, esta terminará por dañarse. Por ende, es necesario utilizar una celda de carga acorde al material a probar. Entre mayor carga deba de soportar una celda de carga, mayor voltaje puede requerir y viceversa. Si se necesita cambiar a una celda con un voltaje de alimentación menor entonces sería idóneo poder cambiar eso.

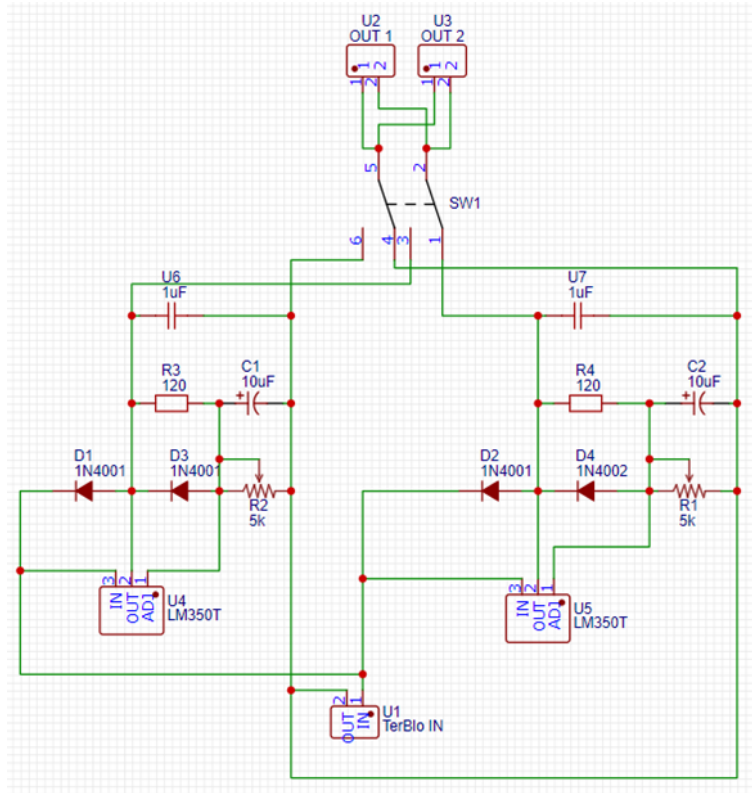


**Figura 2.8:** Imagen obtenida de la hoja descriptiva del LM350.

Para obtener una salida de voltaje estable a partir de los 24 V. de entrada se utilizó el regulador de voltaje LM350. Este regulador de voltaje permite obtener un voltaje de salida entre el rango de 1.2 V hasta 33 V. También puede trabajar con una demanda de hasta 3A. Es importante entender que para obtener una salida dentro del rango descrito el voltaje de entrada tiene que ser mayor. Si por ejemplo se requiere una salida de 30 V, mi entrada debe de ser por lo menos 2V mayor, aunque puede ser más grande. Su rango de voltaje de entrada es entre 3V y 35V. Para controlar el valor del voltaje de salida se coloca una serie de resistencias de la siguiente manera:

Esta configuración muestra una propuesta sugerida por los fabricantes del LM350 (Texas Instrument). En ella se colocan capacitores para evitar el llamado ripple rejection (rechazo de rizado), derivado de fluctuaciones en la entrada. Sin embargo, los capacitores al descargarse pueden generar una corriente de regreso que puede dañar el LM350. Se colocan diodos para garantizar el flujo en un solo sentido. Las resistencias R1 y R2 son las encargadas de determinar el valor de voltaje a la salida. Si definimos a R1 con un valor, como el sugerido de 120 ohms, solo es necesario mover a la resistencia R2 su valor para obtener el voltaje de salida. Si colocamos un trimpot en la resistencia R2 seremos capaces de ser muy precisos al momento de obtener el voltaje a la salida. Si queremos tener dos diferentes voltajes a la salida, dependiendo la celda de carga que se use, entonces será necesario usar este circuito dos veces y controlar su salida con un





**Figura 2.9:** Circuito de alimentación diseñado en EasyEda.

interruptor de dos posiciones de 6 pines. Esto para que las 2 salidas de cada circuito estén siempre conectadas (un total de 4 entradas en el interruptor) y dependiendo de la posición será la salida de un circuito o del otro.

Para obtener las salida de 10 V en uno y 5 V en el otro, es necesario ir ajustando el trimpot hasta obtener la salida deseada. Con lo anterior ya tendríamos la primera parte de la alimentación de las celdas de carga.

### 2.3.2.3. Circuito eléctrico de una fuente simétrica

Una celda de carga tiene a su salida un voltaje muy pequeño y que a su vez puede ser afectado por factores externos como vibraciones y ruido. Para garantizar la calidad de la señal y poderla medir de manera eficiente es necesaria una etapa de instrumentación. Normalmente esta etapa requiere el uso de amplificadores operacionales. La calidad de estos es que para operar requieren ser alimentados de voltajes simétricos. En otras

palabras, requerimos de 3 entradas, un voltaje positivo, un voltaje negativo del mismo valor y una tierra. Para lograr lo anterior es necesario diseñar un circuito que sea capaz de otorgar este tipo de voltaje simétrico. El propósito de un circuito de este tipo es poder generar un voltaje dividido, con mismo valor y generar una tierra virtual que servirá de referencia para obtener los voltajes divididos. En este caso, si se requiere de una salida con +10V y -10V, entonces la entrada debe de poder dividirse de esta manera y generar un punto de referencia para poder medirlo. El primer paso es obtener un voltaje fijo de 20V. Considerando que estamos obteniendo este voltaje de la fuente de voltaje de 24V será necesario utilizar el circuito del LM350 para bajar el voltaje a 20V. Cuando ya hayamos obtenido nuestros 20V entonces podemos generar nuestro circuito para una fuente simétrica. A continuación se describe el proceso para generarlo.

Paso 1: Divisor de Voltaje. Un divisor de voltaje se construye con dos resistencias del mismo valor. En el punto donde ambas se conectan se genera una referencia para obtener la mitad del voltaje con el que se alimenta. Este punto es el que será la referencia para obtener la mitad del voltaje.

Paso 2: Amplificador Operacional Colocamos un amplificador operacional donde la referencia anterior va a su entrada no inversora y la salida iría retroalimentada a la entrada inversora. Esto ya de por sí genera una tierra virtual, sin embargo, solo puede funcionar a corrientes de baja demanda (aproximadamente 20mA). Para mejorar esta parte y a la vez mejorar la estabilidad, se puede agregar una conexión con transistores.

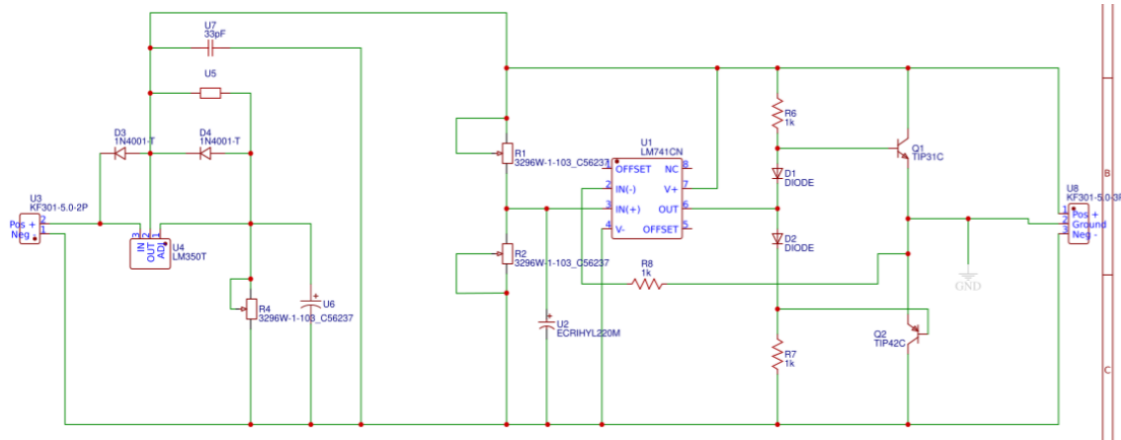
Paso 3: Transistores Para obtener la tierra virtual hay que conectar los transistores de modo seguidor de emisor. Esto permite tener un punto medio compartido. Previamente hay que conectar dos resistencias iguales en serie con diodos para garantizar el flujo en un solo sentido. La salida del opam iría entre los dos diodos (que sería como volver a conectar en el punto medio de las resistencias) y la entrada inversora iría conectada al punto medio de los transistores. Con los pasos anteriores tenemos un circuito más estable y que soporta más demanda de corriente.

En la figura 2.10 podemos encontrar del lado izquierdo el circuito para regular el voltaje y mantenerlo en un valor de 20 V. Del lado derecho se encuentra el circuito para dividir el voltaje en partes iguales y generar una tierra virtual. Las 3 salidas obtenidas, positivo, negativo y neutro serán las que se utilizarán para alimentar a los amplificadores operacionales en la parte de instrumentación.

### 2.3.3. Instrumentación

Como se ha comentado anteriormente, una celda de carga genera a su salida una señal de voltaje con valores muy bajos. Esto es un problema de dos maneras. La primera es que si la señal es muy baja las tarjetas de adquisición de datos no serán capaces de reconocer los cambios de voltaje. El otro problema será que la señal puede ser más

## 2. METODOLOGÍA Y TÉCNICAS EXPERIMENTALES



**Figura 2.10:** Circuito eléctrico de fuente simétrica diseñado en EasyEda.

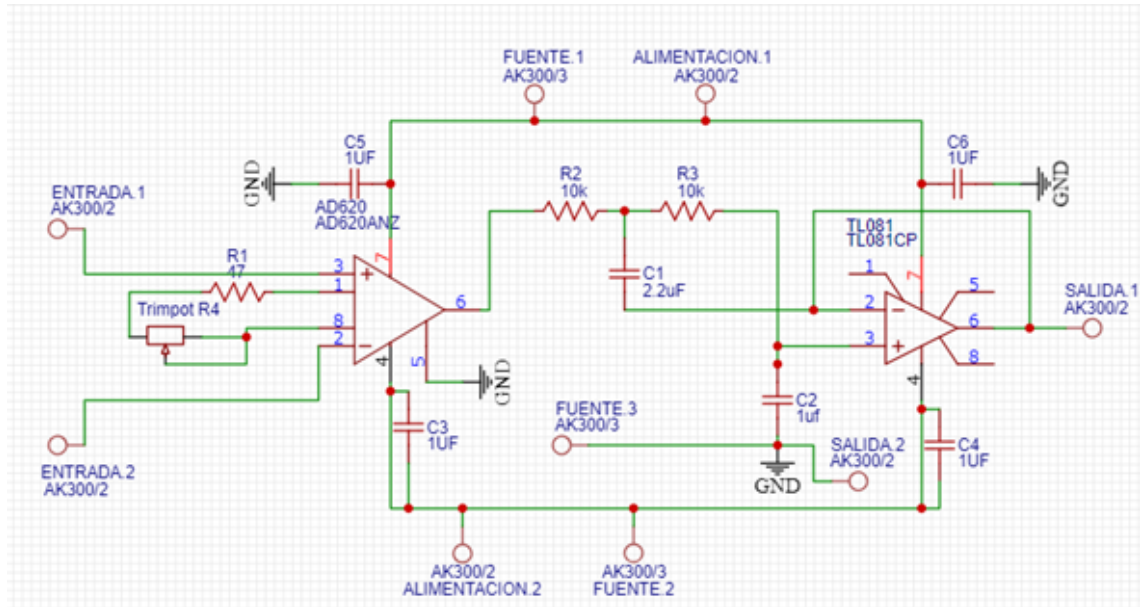
fácilmente alterada por factores externos como ruido o interferencias.

Es por lo anterior que se debe generar un circuito capaz de garantizar la integridad de la señal de la celda de carga. A esta etapa se le conoce como acondicionamiento de la señal. A continuación, en la figura 2.11, se presenta el circuito utilizado para lograr este objetivo:

El circuito anterior se puede dividir en dos partes. Del lado izquierdo tenemos un circuito con un Amplificador Operacional AD620. Este amplificador es un amplificador de instrumentación diseñado específicamente para tratar con señales pequeñas (del orden de los micro y milivolts). Tiene las siguientes propiedades que lo hacen idóneo para el tratamiento de la señal de la celda de carga:

- Rechazo de Modo Común: Debido a que la señal de una celda de carga es muy pequeña, esta puede ser superada por el ruido en ambas entradas del OPAM. Al tener un rechazo alto en este ámbito garantizamos que la señal no se verá alterada antes de amplificarla.
- Ganancia ajustable: En sus terminales 1 y 8 van conectadas resistencias que permiten regular la ganancia con la que se amplifica la señal. Al conectar una resistencia fija y en serie un trimpot podemos garantizar mayor control y seguridad en la ganancia.
- Alta impedancia en la entrada: Debido a que las celdas de carga son sensibles a la carga generada es importante tener una alta impedancia en la entrada.

Después de esta parte del circuito, la salida del AD620 pasa por un filtro pasa bajas de Tipo Sallen-Key. Las razones por las que se utiliza un filtro de este tipo son las



**Figura 2.11:** Circuito del acondicionamiento de la señal de la celda de carga diseñado en EasyEda.

siguientes:

- Disminuye los efectos de alta frecuencia: Factores externos como motores, equipos de comunicación u otros circuitos pueden provocar ruido en altas frecuencias que pueden alterar la salida de la celda de carga. Por ende un filtro pasa bajas garantiza que estos ruidos no alteren la señal.
- Estabilidad de la señal: Una celda de carga puede llegar a tener afectaciones que generen variaciones rápidas o picos de señal. El filtro mantiene la lectura estable y precisa.
- Antialiasing: El aliasing es cuando frecuencias de baja y alta frecuencia se combinan, siendo las de alta frecuencia ajenas a la señal requerida. El filtro ayuda a evitar este fenómeno.

El filtro pasa bajas esta diseñado a un límite de 67.42 Hz, lo cual significa que toda señal arriba de este valor será filtrado. Es importante añadir que este filtro no es suficiente para evitar interferencias como la de la red eléctrica de 60 Hz. Es necesario agregar otras medidas para evitar interferencias por ruido. A continuación se lista métodos aplicados para evitar la afectación por ruido:

## 2. METODOLOGÍA Y TÉCNICAS EXPERIMENTALES

---

- Filtros EMI: Al momento de conectarse a la red eléctrica, existen conectores con filtros EMI (Electromagnetic Interference) para evitar justamente la llegada del ruido de la red eléctrica. Este filtro se integra a todo el circuito justo al momento de conectarse a la toma de corriente.
- En todo el circuito se integran capacitores conectados a tierra para evitar el ruido de picos de alta frecuencia.
- Se utiliza un regulador de voltaje para obtener un voltaje que alimente adecuadamente a los circuitos. Este logra mantener estables las fluctuaciones.
- Disminución de cableado al mínimo.

Con lo anterior podemos disminuir en gran medida la posibilidad de interferencia por ruido.

### 2.3.3.1. Unidad de Adquisición de Datos

Como último paso en la parte de la adquisición de la señal de la celda de carga es necesario un intermediario que permita reconocer la señal ya acondicionada e interpretarla en la computadora para poder utilizarla. Hasta ahora la señal se ha mantenido de manera analógica, dependiendo de la deformación que se le dé a la celda de carga y solo aplicando filtros y amplificación de la señal. Para poder ser reconocida en la computadora es necesario digitalizarla. Es aquí donde se requiere de la mayor precisión ya que si al momento de transformar la señal de analógica a digital no se tiene la suficiente resolución, la precisión se verá afectada. National Instrument maneja una serie de módulos de adquisición de datos. Entre ellos está el NI 9201 cuyas características principales son las siguientes:

- Niveles de Señal:  $\pm 10V$ . Esto es una ventaja ya que permite trabajar con celdas de carga grandes que requieren una alimentación de 10V y celdas más pequeñas de 5V. Hay que recordar que las celdas de carga generan una salida positiva cuando están en tensión y una salida negativa cuando están en compresión.
- Canales: 8. Es posible conectar hasta 8 celdas u otros dispositivos con señal analógica al mismo tiempo. Esto permite trabajar con diferentes elementos de manera aislada con el mismo módulo.
- Muestreo: 500 kS/s. Esto significa que el módulo tiene la propiedad de registrar una cantidad de 500,000 muestras por segundo. Esto es altamente deseable ya que al ser una señal analógica que cambia con el tiempo es necesario poder registrar la mayor cantidad de cambios.

- Resolución: 12 bits. Esto quiere decir que la entrada será representada por un total de 4096 valores discretos. Si tenemos un rango de 20V (entre -10 y +10) entonces el módulo registrará un cambio cada 4.88 mV.

### 2.3.4. Controladores

#### 2.3.4.1. Drivers

Normalmente, para controlar un motor se requiere de un sensor como los encoders para conocer la posición del motor y poder definir una posición deseada o saber cuánto se ha movido. Los motores utilizados para esta máquina ya contienen en su interior estos sensores y para adquirir su señal también tienen un driver. El driver es el KDC101 de la empresa Thorlabs. Es un controlador de servos DC. Aunque está diseñado para los motores de la misma empresa del tipo Z8 DC, es bastante flexible y pueden usarse otros motores externos. Entre sus características, permite el control de la velocidad con la que se mueve, maneja una instrucción para mandar los motores a un estado de inicio, es posible mover manualmente el motor a diferentes pasos y definir posiciones de inicio. Todo lo anterior solo a través de su driver físico. Además, en sus instrucciones se puede encontrar un programa hecho en LabVIEW para poder manipular todos los parámetros a través de la computadora. Se usa un driver por motor, por lo que serán necesarios el uso de 4 drivers para controlar los 4 motores. Esto es una ventaja ya que permite cierta independencia entre los motores, lo que deja a libertad del programador generar un sistema donde los motores pueden moverse al mismo tiempo con mismas características o moverse de diferente manera.

#### 2.3.4.2. Calibración de las celdas de carga

Las celdas de carga son sensores que reaccionan ante una deformación en sus resistencias internas debido a una carga. Lo anterior genera que el voltaje con el cual sean alimentados se vea modificado a la salida. Por lo tanto, hay una relación entre la carga aplicada y el voltaje de salida. Para conocer esta relación es necesario realizar una calibración de la celda. Esto nos ayudará para determinar dos cosas: tener una referencia del comportamiento esperado de la celda y generar un modelo matemático que represente la equivalencia entre la carga y el voltaje.

Una de las primeras cosas que debemos de conocer es el límite que soporta la celda y el voltaje de alimentación. Para este diseño de probador biaxial se utiliza una celda que aguanta una carga de 10 kg y se alimenta con 10V. Jamás hay que llevar la celda al límite, ya que podríamos deformarla o tener un comportamiento diferente a cargas



**Figura 2.12:** Fotografía del Driver para el control de los motores.

menores. Sabiendo estos valores de la celda, el procedimiento para obtener su modelo sería el siguiente:

- Paso 1 - Tener pesos exactos. Para garantizar que la carga aplicada es la correcta es necesario tener objetos con pesos conocidos para generar un modelo lo más veraz posible. Se recomienda usar una báscula con alta precisión para registrar el peso. En este caso se utilizarán vasos rellenos de microesferas de metal de 1kg cada uno.
- Paso 2 - Adaptador y jaula. La celda usada tiene un enroscado de M5. Hay que generar una base que se acople al enroscado y pueda contener todas los objetos de 1 kg.
- Paso 3 - Instrumento de medición. Para este paso ya se debe de contar con la parte de instrumentación para amplificar y limpiar la señal. La salida debe de poderse medir, sea con un multímetro o con una tarjeta de adquisición de datos para verlo en la computadora.
- Paso 4 - Tener registrados en una tabla el peso de la base y de cada vaso, ya que, aunque cada uno debería pesar exactamente 1 kg, siempre hay variaciones.
- Paso 5 - Empezar a medir primero sin carga y registrar el voltaje que pudiese tener la celda de carga. Este voltaje sería un offset y tendría que considerarse para restarse cuando se genere el modelo.
- Paso 6 - Integrar la base. La base por sí misma tendrá un peso y tiene que considerarse como parte del modelo. Esta debe ser la primera medida con su respectivo voltaje.
- Paso 7 - Ir integrando de uno en uno los pesos hasta llegar a los 9 kg de carga. Por cada peso integrado hay que registrar el voltaje de salida.
- Paso 8 - Para garantizar un comportamiento constante es recomendable volver a registrar los voltajes, pero ahora quitando de uno en uno los pesos hasta quedar sin base.
- Paso 9 - Registrados todos los voltajes con sus respectivos pesos, solo hay que meterlo a un software matemático para generar una función matemática que sirva como modelo de comportamiento de la celda.

El modelo obtenido servirá para saber si la celda se descalibra en algún momento y sea necesario hacer alguna modificación y para obtener su equivalente en fuerza. De esta manera, al integrarlo en la parte de la programación, podemos obtener la



información sobre el esfuerzo, que es una de las variables para obtener el modelo de esfuerzo-deformación de la probeta.

### 2.4. Desarrollo de Interfaz Gráfica

Para poder controlar y visualizar toda la información requerida es necesario generar un programa que permita recibir la información y manipularla. Todo lo anterior debe poder hacerse a través de una interfaz gráfica que muestre en tiempo real todos los sensores y elementos que recopilan información. El software para hacer la interfaz gráfica será LabVIEW, ya que es un software de alto rendimiento que es amigable con entradas de diferentes fuentes y puede generar una interfaz gráfica al mismo tiempo que se conectan todos los componentes necesarios. LabVIEW maneja dos ventanas para su configuración, una para la interfaz gráfica y otra para la conexión de las partes. No requiere del conocimiento de algún lenguaje de programación, solo una lógica básica sobre cómo funciona un algoritmo. Para esta parte su desarrollo se ha dividido en 3 partes: la parte de la cámara, la parte de los motores y la parte de las celdas de carga.

#### 2.4.1. Cámara

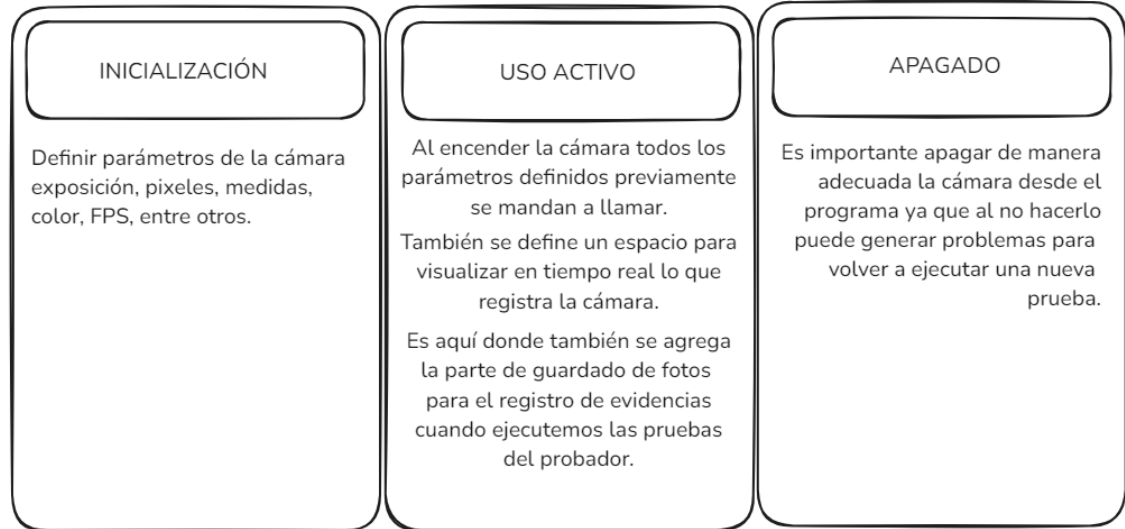
La cámara que se utiliza es de la empresa Thorlab, siendo el modelo el DCC1240C-HO. Este es un modelo cuenta con información y sus respectivos programas y manuales en su página. Se caracteriza por ser una cámara de alta sensibilidad. Entre sus características están las que se presentan en la tabla 2.3.

**Tabla 2.3:** Características de la Cámara.

Resolución	1280x1024 pixel
Montura	C
Color	Persive colores
Puertos	USB 2.0 y USB 3.0
Obturador	Global

Una de las ventajas que otorga esta empresa es que en su página ya otorga programas prehechos para la utilización de sus componentes con la ayuda de LabVIEW.

Para el caso de la cámara hay 3 etapas para usarla:



**Figura 2.13:** Diagrama representativo de la estructura de programación para la cámara.

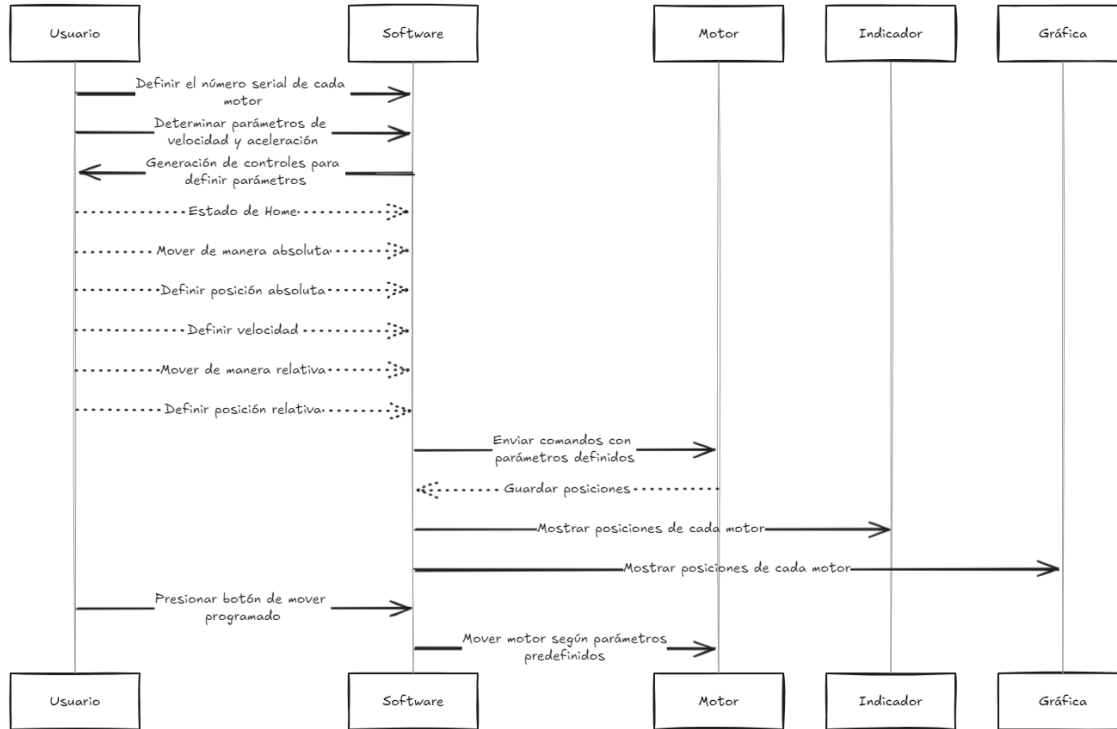
### 2.4.2. Motores

Para la programación de los motores se requiere que el usuario pueda definir las propiedades de posición, velocidad y aceleración como le sea más adecuado. Por un lado, debemos poder siempre mandar los 4 motores a su posición en cero, que es conocida como home. Por cada eje, solo uno de los dos motores tiene un cople para la celda de carga. Esto hará que haya una distancia diferente entre un motor y otro. Las posiciones de inicio deben poder adecuarse a estas diferencias entre los motores. Antes de iniciar las pruebas, cuando se coloque la probeta, debe predefinirse la posición de cada motor y, a partir de ahí, el motor debe moverse. Por lo tanto, debe haber movimientos absolutos y relativos. Thorlabs ya otorga una librería para obtener información sobre los motores y el encoder. Podemos obtener posición, velocidad y aceleración así como definirla, por lo que no es necesario una parte de conversión.

### 2.4.3. Celdas de Carga

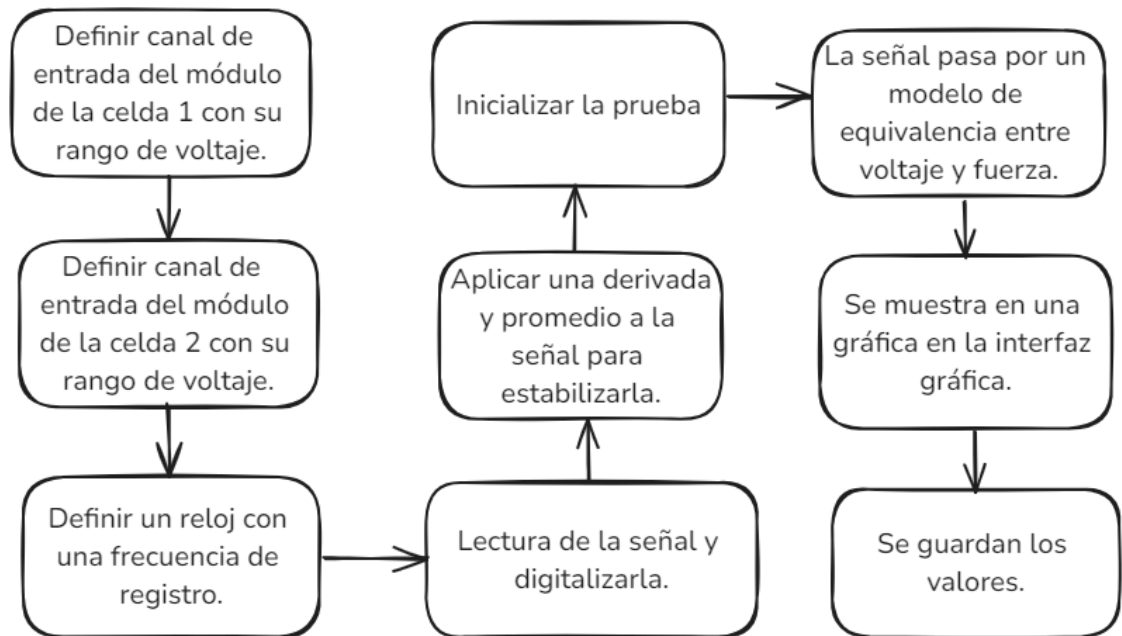
La información obtenida de la celda de carga proviene del módulo de adquisición de datos de National Instrument. LabVIEW tiene librerías para reconocer el módulo. Es necesario predefinir algunas características de la celda, como lo es el voltaje de alimentación y la frecuencia de muestreo. También es necesario una pequeña parte donde la señal sea derivada y promediada para mantenerla lo más estable posible.

## 2. METODOLOGÍA Y TÉCNICAS EXPERIMENTALES



**Figura 2.14:** Diagrama representativo de la estructura de programación para la cámara.

Cuando se inicialice la prueba, la señal pasará por el modelo matemático obtenido de la calibración y así obtener como salida el equivalente en carga. Toda la información, tanto de la posición de los motores como de la celda de carga, se guardará cuando la prueba comience y hasta que el usuario detenga la prueba.



**Figura 2.15:** Diagrama representativo de la estructura de programación para la cámara.



## Resultados y discusión

---

En este tercer capítulo se muestran los resultados del proceso llevado a cabo para construir el sistema del probador biaxial plano. Se aborda la parte de estructura y diseño mecánico del probador, la parte del diseño y la fabricación de los circuitos para la instrumentación y control del dispositivo. Por último, se presenta la implementación de la interfaz gráfica para controlar y obtener resultados del probador, así como el proceso de la interfaz/usuario para su uso.

### 3.1. Diseño Mecánico

En esta parte se muestra la estructura final donde los motores y la cámara son montados. Esta base permite tener todo acoplado de manera que puede ser transportado sin desmontar nada, además de embonar en la base de un microscopio Nikon-MM2.

#### 3.1.1. Estructura

Retomando uno de los objetivos del proyecto, se debe poder colocar el probador mecánico de tracción biaxial por debajo de la zona de observación del microscopio mostrada en el capítulo 2. El patrón de anclaje mecánico entre la base del probador y el microscopio fue dibujado en un ambiente CAD y, a través de su modelado mecánico, se logró trabajar sobre este y construir una base con el patrón de ensamble adecuado, como se aprecia en la Figura 3.1. Para tener un modelo en ambiente CAD se obtuvieron planos de manufactura y se replicó el patrón de barrenos de la base del microscopio basado en las medidas obtenidas en el capítulo 2. 3.2.

A partir de este modelo se delimitó una zona de trabajo ideal para poder construir la base, mostrada en la Figura 3.3. Un siguiente paso fue obtener los modelos CAD

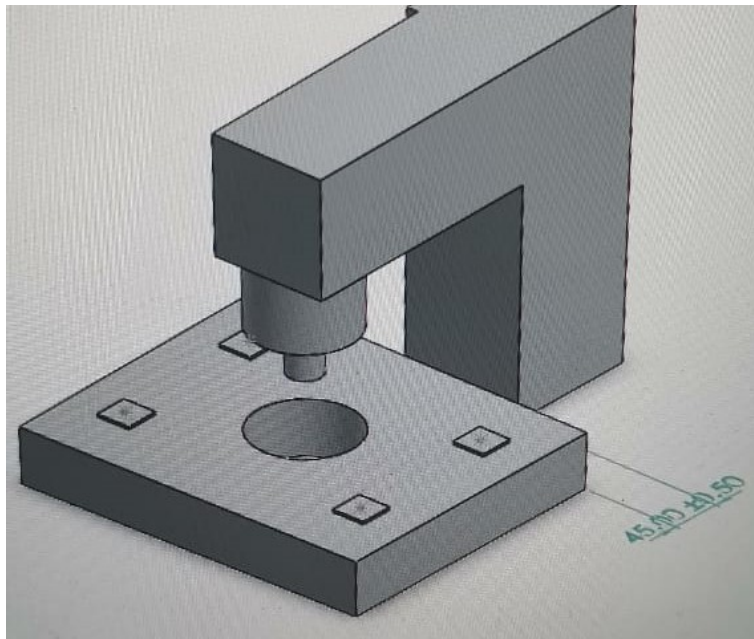
### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

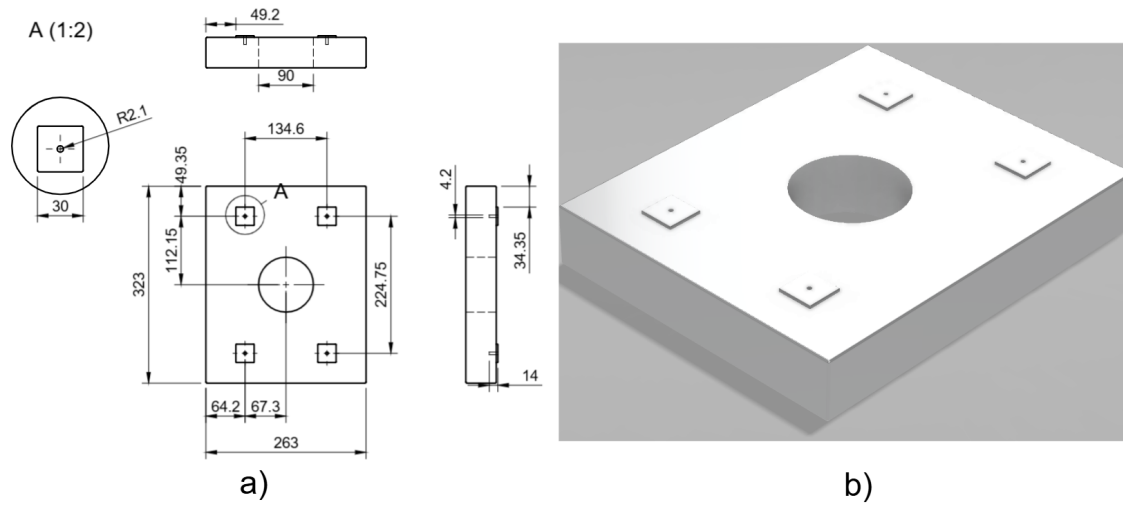
de los motores en la página de Thorlabs y montarlos sobre este modelo. Esto nos ayudó a dimensionar el espacio que debe existir para poder montar la muestra en el centro. Esto se puede ver reflejado en la Figura 3.4. Esta parte es importante ya que los motores deben estar distribuidos de tal manera que queden perpendiculares entre ellos, no colisionen con el brazo del microscopio y permitan colocar en su centro la probeta. Hay que considerar también las distancias con las mordazas y los coples mecánicos, ya que esto agrega más espacio hacia el centro.

Colocando los motores en posiciones estratégicas para poder usar la mayor longitud disponible se diseña una base donde los motores puedan estar montados (ver Figura 3.6). Este diseño considera las mordazas y coples mecánicos a utilizar para garantizar que la probeta quede correctamente centrada.

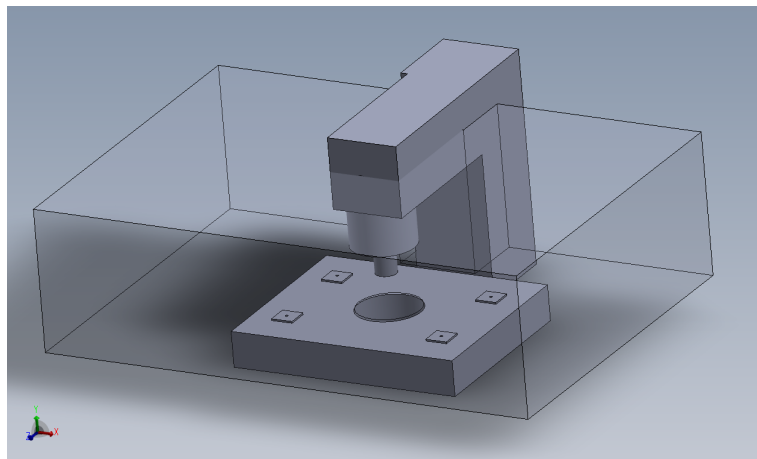
La base de acoplamiento para ensamblar probador y microscopio se muestra en la Figura 3.5, aquí se pueden apreciar las dimensiones de la pieza. Por último, en la Figura 3.7 podemos apreciar la manera final en como quedaría montado el probador acoplado en el microscopio. Las medidas finales del espacio de trabajo quedan plasmadas en esta representación. El probador es fácilmente desmontable para poder utilizarlo en otras condiciones y/o configuraciones.



**Figura 3.1:** Captura de la representación digital del microscopio donde se va a montar la estructura del probador biaxial. Existe un espacio de separación entre el brazo y la base del microscopio de 45 mm.



**Figura 3.2:** Modelo de la base. a) Medidas de la base del microscopio. b) Representación 3D de la base del microscopio.

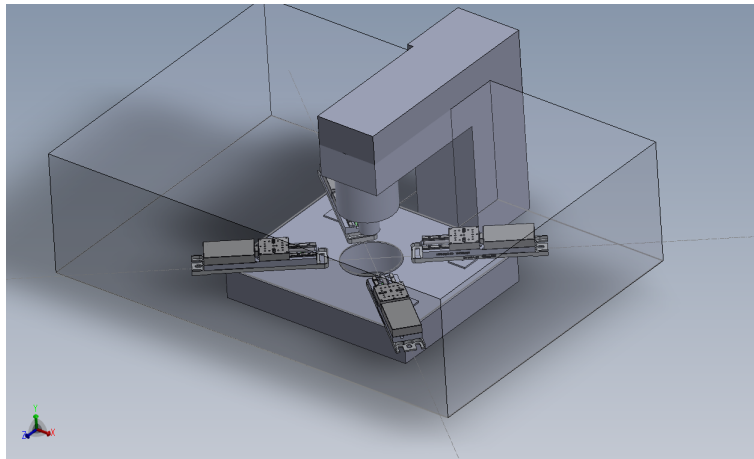


**Figura 3.3:** Representación digital del microscopio y una representación del área disponible para poder integrar el probador biaxial.

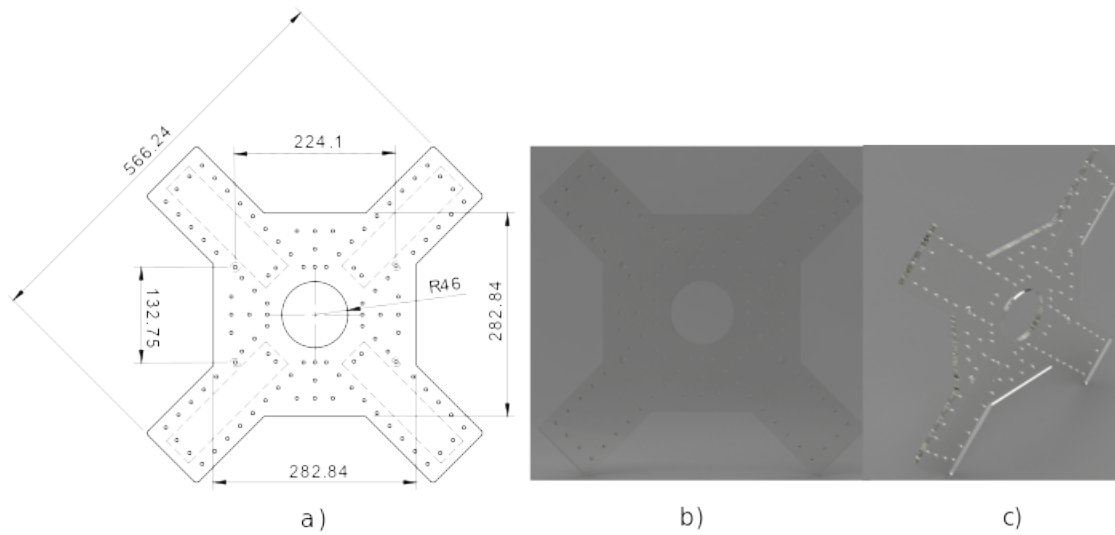


### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

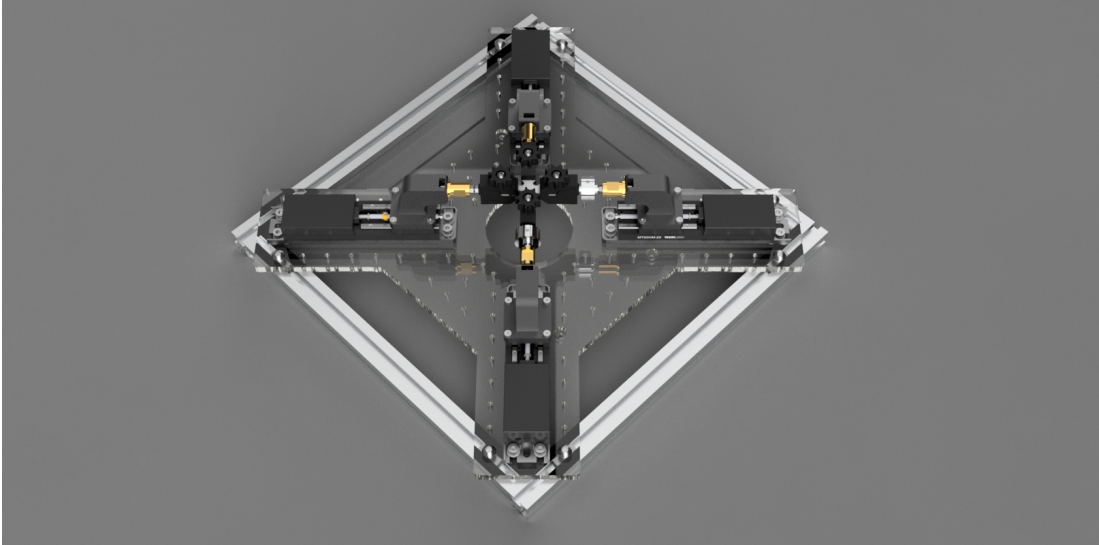
---



**Figura 3.4:** Representación digital del microscopio con medidas reales con modelos de los motores integrados en la zona de trabajo.

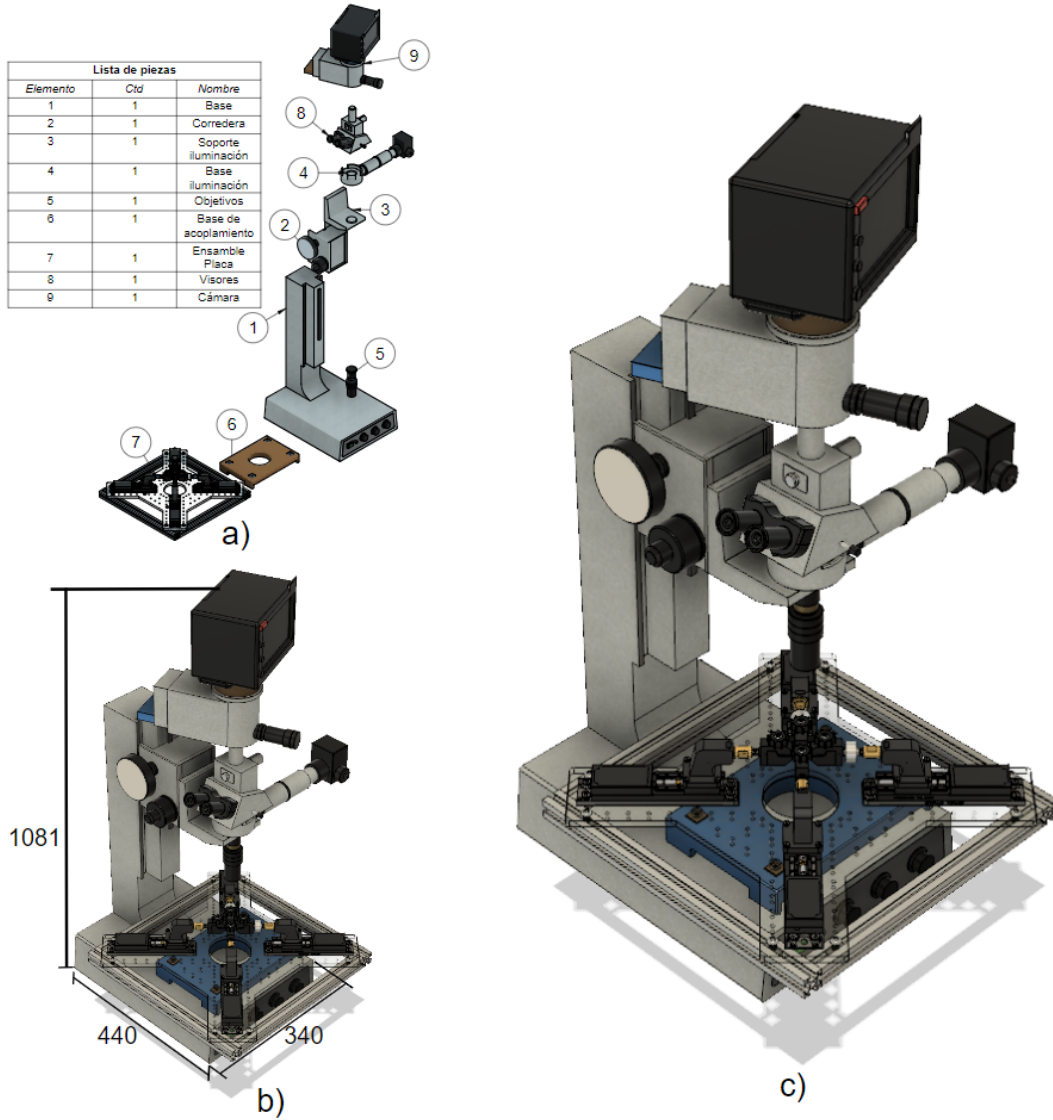


**Figura 3.5:** Base del probador. a) Medidas de la base. b) Vista superior del modelo 3D de la base. c) Vista isométrica de la base.



**Figura 3.6:** Representación de la base con los motores acoplados.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



**Figura 3.7:** Modelo 3D del microscopio del laboratorio con el modelo del probador biaxial montado. a) Elementos que constituyen al microscopio y al probador. b) Medidas de espacio finales con el probador montado. c) Modelo final con el probador colocado dentro del microscopio.

### 3.1.2. Coples mecánicos

Los coples son elementos que nos ayudarán a adaptar diferentes tipos de entrada. Puede ser el caso que exista un tipo de enroscado macho diferente a una hembra o hay dos machos o dos hembras. Con la ayuda del cople mecánico se podrán interconectar las piezas sin la necesidad de alterarlas.

#### 3.1.2.1. Coples mecánicos de Tipo 1

Por eje, solo se requiere una celda de carga, así que mientras un lado del eje tendrá el cople entre la celda de carga y la base en L, el otro lado solo se conectará la base en L y la mordaza. En este caso, la entrada de la base en L es macho, por lo que requiere una entrada hembra. Del lado de la mordaza tiene una salida hembra, por lo que requiere una entrada macho.

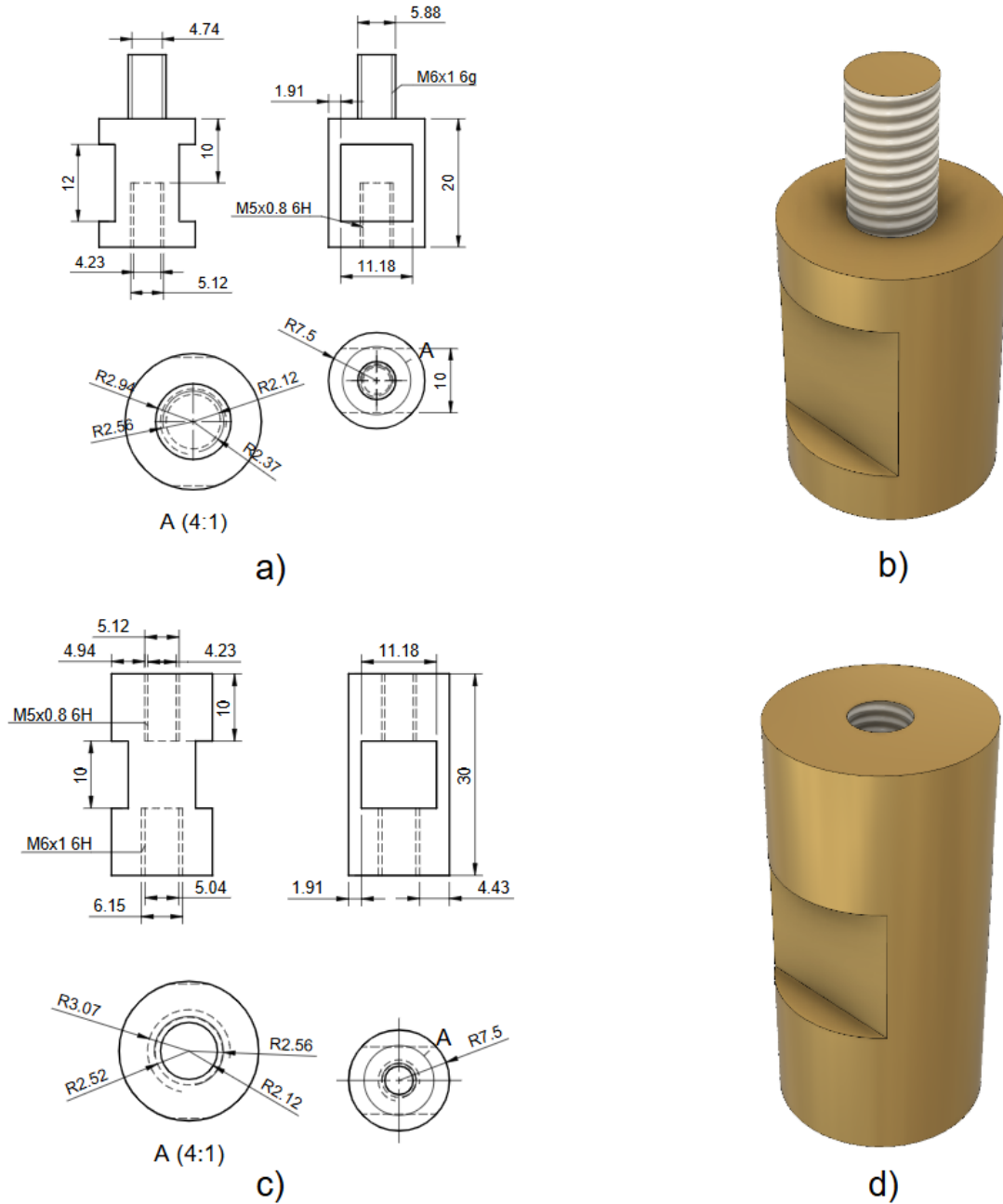
Los planos de este cople se muestran en la figura 3.8. En la sección b, la parte superior iría conectada con la mordaza y la parte inferior iría del lado de la base en L.

#### 3.1.2.2. Coples mecánicos de Tipo 2

Las celdas de carga adquiridas para este probador tienen la característica de venir con enroscados macho del tipo M5X0.8. Debido a que la medida estándar que se utiliza en los diseños del grupo de investigación es el M6X1 y las bases en L se diseñaron antes de conocer el modelo de las celdas de carga con esta medida, fue necesario crear un cople entre estos dos elementos.

Para permitir la conexión se hizo un cople hembra-hembra, siendo M5X0.8 de un lado y M6X1 del otro. De esta forma, permite la conexión entre el enroscado M5X0.8 de la celda de carga y el enroscado M6X1 de la base en L. Las medidas se pueden visualizar en el plano 3.8

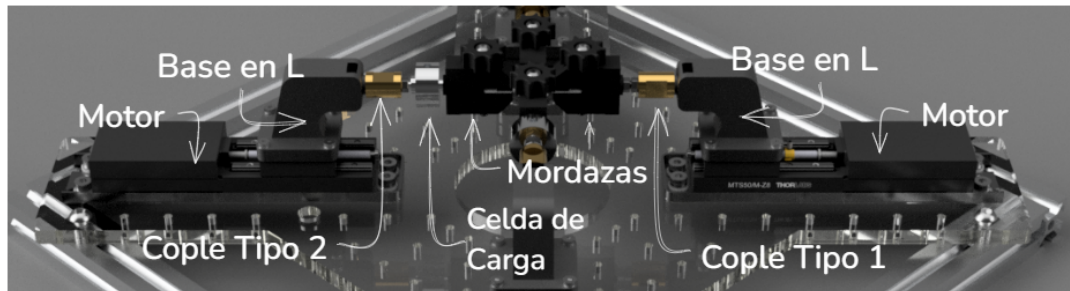
### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



**Figura 3.8:** Planos y Vistas de los Coples diseñados para adaptar las celdas de carga y mordazas con las bases en L. a) Plano del cople tipo 1, donde se visualizan sus medidas en diferentes vistas. b) Vista isométrica del cople tipo 1. c) Plano del cople tipo 2, con las medidas reales del cople en diferentes vistas. d) Vista isométrica del cople tipo 2.

Con ayuda del plano creado en el software Fusion de Autodesk se hizo uso de los servicios del IIM para ayudar a maquinar las piezas. Se requirió la construcción de dos coples mecánicos de cada tipo.

La conexión final de todas las piezas queda de la siguiente forma, como se aprecia en la Figura 3.9.

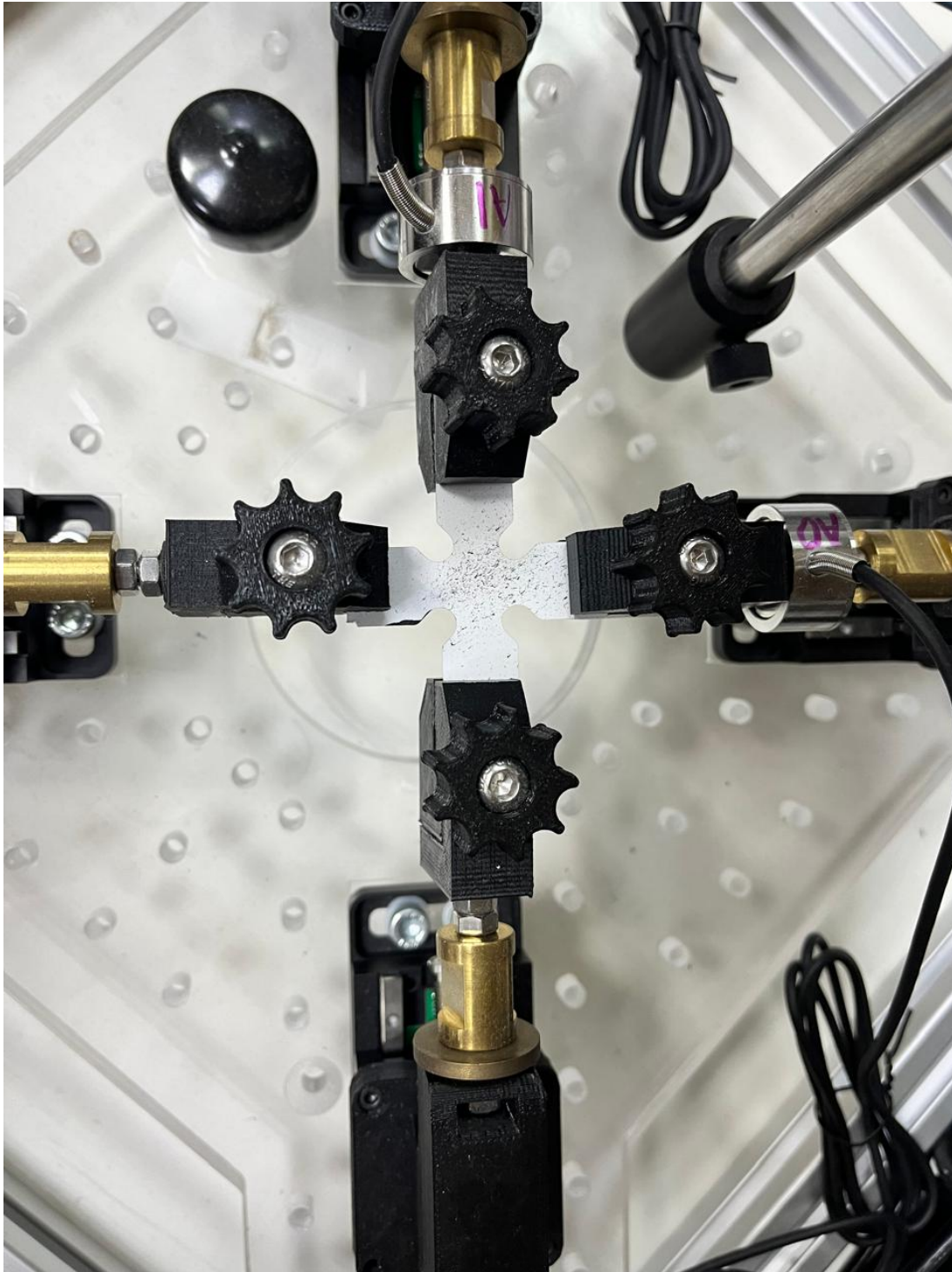


**Figura 3.9:** Modelo 3D hecha en Fusion de la conexión de los componentes en un eje. Desde los motores hasta las mordazas.

La conexión real quedó como se muestra en la Figura 3.10. El lado superior y derecho son los que llevan el cople tipo 2 con las celdas de carga. Mientras, del lado inferior e izquierdo, las mordazas y las bases en L se conectan mediante el cople tipo 1.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---



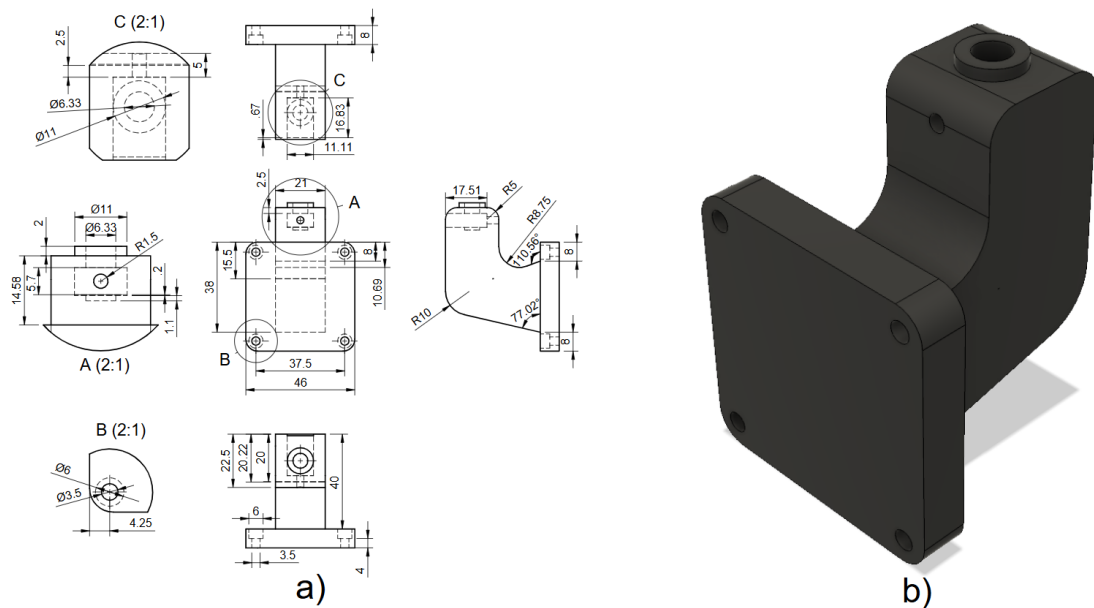
**Figura 3.10:** Fotografía tomada del probador biaxial donde se visualizan las mordazas conectadas con las celdas de carga y los coples.

### 3.1.3. Mordazas y Base en L

Los elementos como las mordazas y las bases en L no fueron diseñados en este proyecto, sino desarrollados por compañeros en el laboratorio como proyectos separados, sin embargo, se remarca la importancia de sus aportaciones en este proyecto y se anexa la información otorgada por ellos en esta sección.

Las bases en L fueron construidas a partir de las platinas de los motores para enbonar de la manera más adecuada. Sus medidas son las presentadas en la Figura 3.11.

Previamente, cuando se hizo mención de los coples tipo 1, se mencionó que la entrada de la base en L era macho. En la Figura 3.11 se puede ver que tiene un orificio por el cual se coloca un tornillo para enroscarlo con el cople.



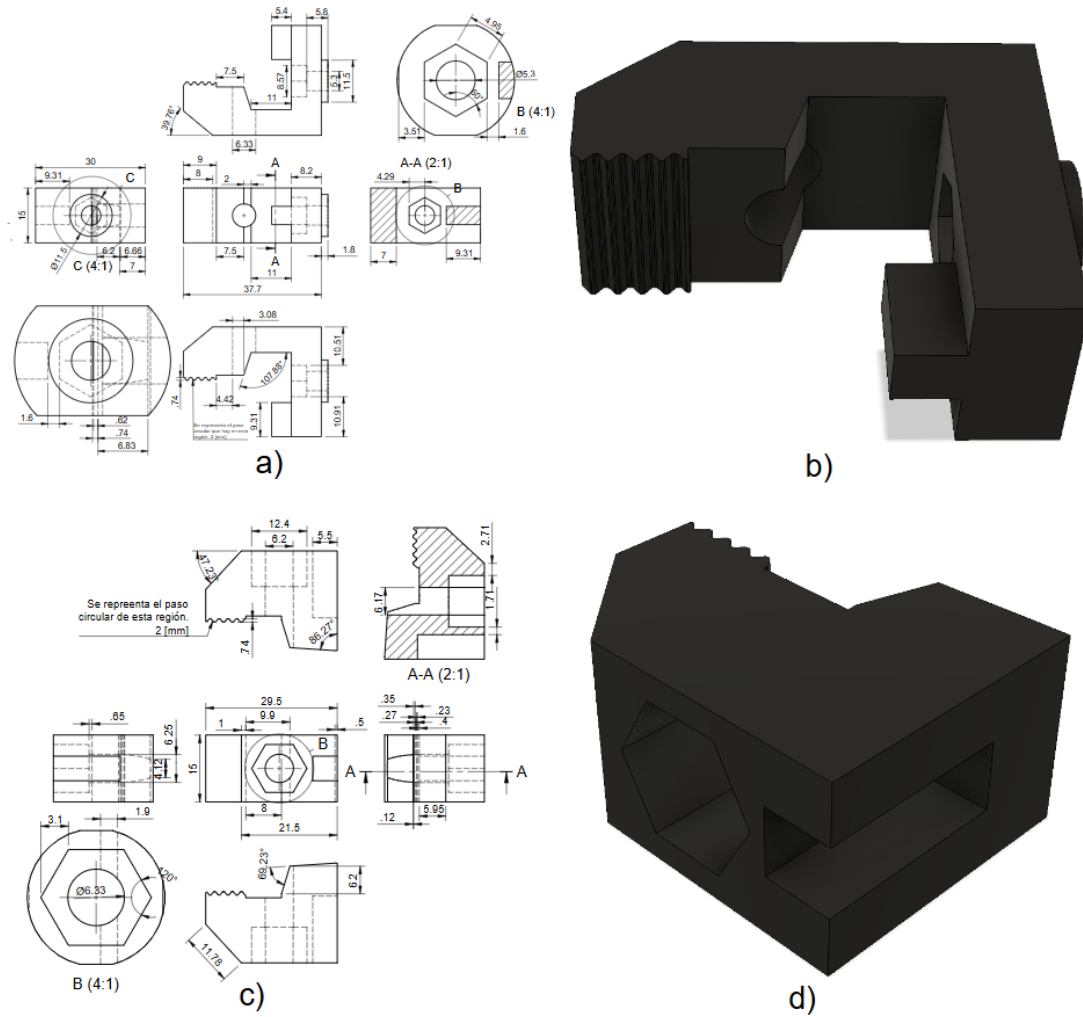
**Figura 3.11:** a) Planos con diferentes vistas de la base en L. b) Vista isométrica de la base en L.

Con lo que respecta a las mordazas, estas fueron diseñadas para sostener la probeta desde 4 puntos. Está construida a partir de dos piezas, como se muestra en la Figura 3.12.



### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---



**Figura 3.12:** a) Planos de la parte superior de la mordaza. b) Vista isométrica de la parte superior de la mordaza. c) Planos de la parte inferior de la mordaza. d) Vista isométrica de la parte inferior de la mordaza.

### 3.2. Instrumentación y Control

En esta sección se estará describiendo todo el proceso de construcción de los circuitos planteados en el capítulo anterior. Hasta ese momento, solo se plantearon los diagramas de conexión de los circuitos diseñados en EasyEDA.

### 3.2.1. Alimentación

#### 3.2.1.1. Componentes

EasyEDA no sólo permite la construcción de un circuito en diagrama con representaciones simbólicas. Definiendo previamente los componentes, también podemos crear diagramas de PCB para poder exportarlo y construirlo. Por lo tanto, el primer paso es definir los componentes reales que se utilizan para el circuito. En el caso del circuito destinado a alimentar todo el flujo electrónico, los componentes son: [3.1](#)

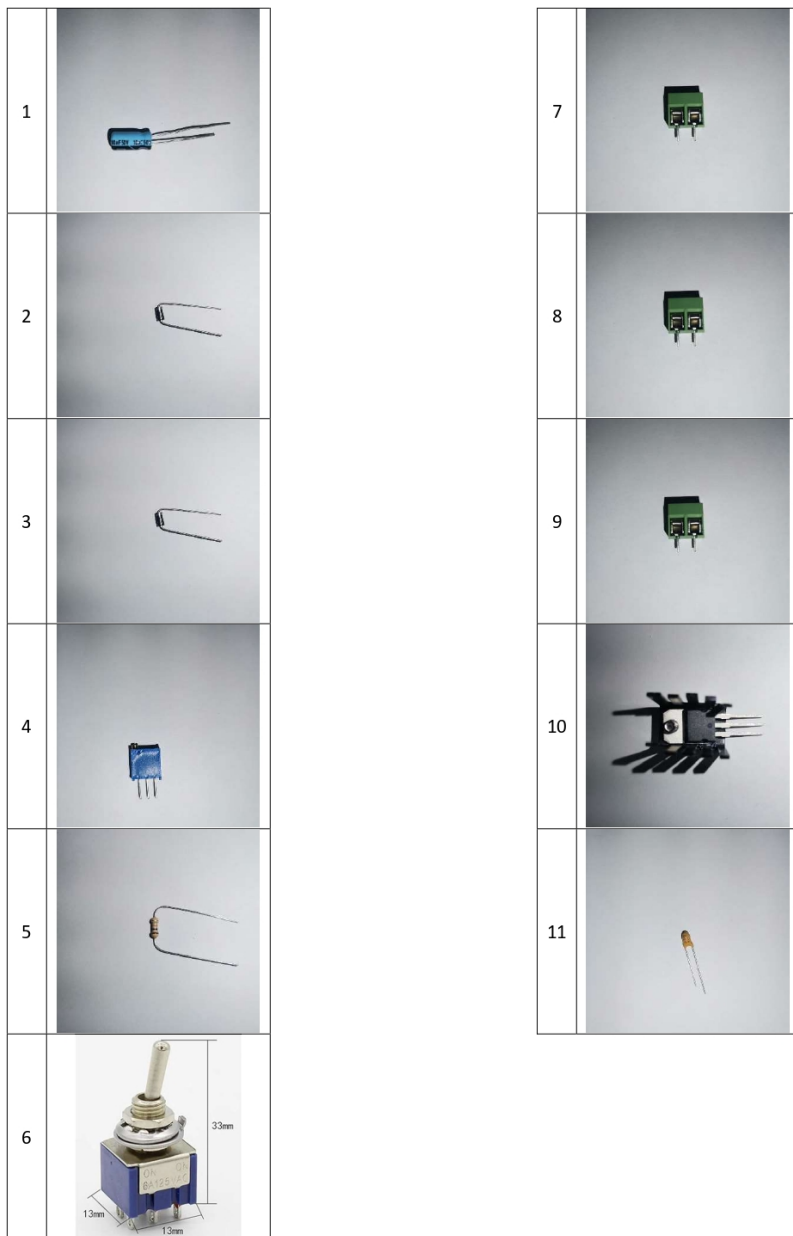
**Tabla 3.1:** Elementos del Circuito de Alimentación

ID	Nombre	Indicador	Huella	Cantidad
1	10uF	C1,C2	CAP-TH_BD5.0-P2.00-D0.8-FD	2
2	1N4001	D1,D2,D3	DO-41_BD2.4-L4.7-P8.70D0.9-RD	3
3	1N4002	D4	DO-41_BD2.4-L4.7-P8.70-D0.9-RD	1
4	5k	R1,R2	TRIMPOT_PTH_S3_LOCK	2
5	120	R3,R4	RES-TH_BD2.4-L6.3-P10.30-D0.6	2
6	SW_MTS-202_DPDT	SW1	SW_DPDT_MTS-202	1
7	TerBlo IN	U1	CONN-TH_P5.00_KF301-5.0-2P	1
8	OUT 1	U2	CONN-TH_P5.00_KF301-5.0-2P	1
9	OUT 2	U3	CONN-TH_P5.00_KF301-5.0-2P	1
10	LM350T	U4,U5	TO-220-3.L10.0-W4.5-P2.54-L	2
11	1uF	U6,U7	CAP-TH.L5.0-W3.5-P3.00-D0.7	2

Los componentes utilizados son los mostrados en la Figura [3.13](#). Para el componente 1, se utilizó un capacitor electrolítico. Para los componentes 2 y 3 fueron diodos normales. En el caso del componente 4 se utiliza un trimpot para ajustar la resistencia, mientras que en el componente 5, no se requiere tanta precisión y sólo se utiliza una resistencia normal. Debido a que es un circuito para cambiar una alimentación entre 5 y 10 V se agrega un Switch de 4 entradas y dos salidas. Los componentes 6,7 y 8 son borneras para introducir con libertad conexiones y poder apretarlas con un tornillo para garantizar su estabilidad. El LM350T debe ir ya montado con su disipador de calor, ya que este ocupa espacio y podría interferir con otros elementos al momento de diseñar el circuito. Por último, el elemento 11 es un capacitor de tantalio para disminución de ruido.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---



**Figura 3.13:** Fotografías de los componentes eléctricos usados para el circuito de alimentación. Su numeración corresponde al número ID de la tabla 3.1

### 3.2.1.2. Diagrama en EasyEDA

Para construir un diagrama de pistas en EasyEDA primero se deben definir los componentes reales a utilizar. Esto para que las distancias sean reales y al momento de montar todo no haya problemas de que los componentes no embonan. Una de las características que se buscó al momento de diseñar el diagrama es que las pistas fueran lo suficientemente grandes. Esto debido a que la técnica para manufacturar las pistas requiere de esta propiedad. En este caso se le dio un grosor de 1.7 mm. También se acomodaron todos los elementos para que las pistas pudieran acomodarse de un solo lado de la placa. De esta forma es más fácil manufacturarlo. El resultado de las pistas está en la figura 3.14. En esta Figura se pueden ver de color rojo las pistas y de color amarillos las siluetas de los componentes reales. Al lado de cada silueta se encuentra un indicador, que es el que corresponde a la tabla 3.1.

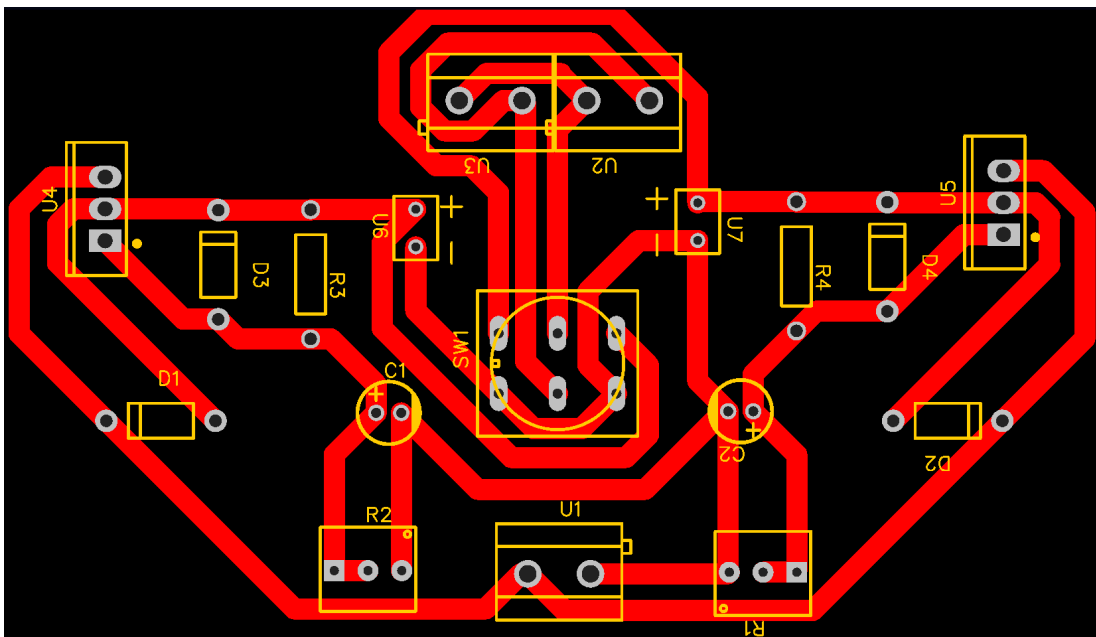


Figura 3.14: Pistas en EasyEDA.

### 3.2.1.3. Código G y manufactura

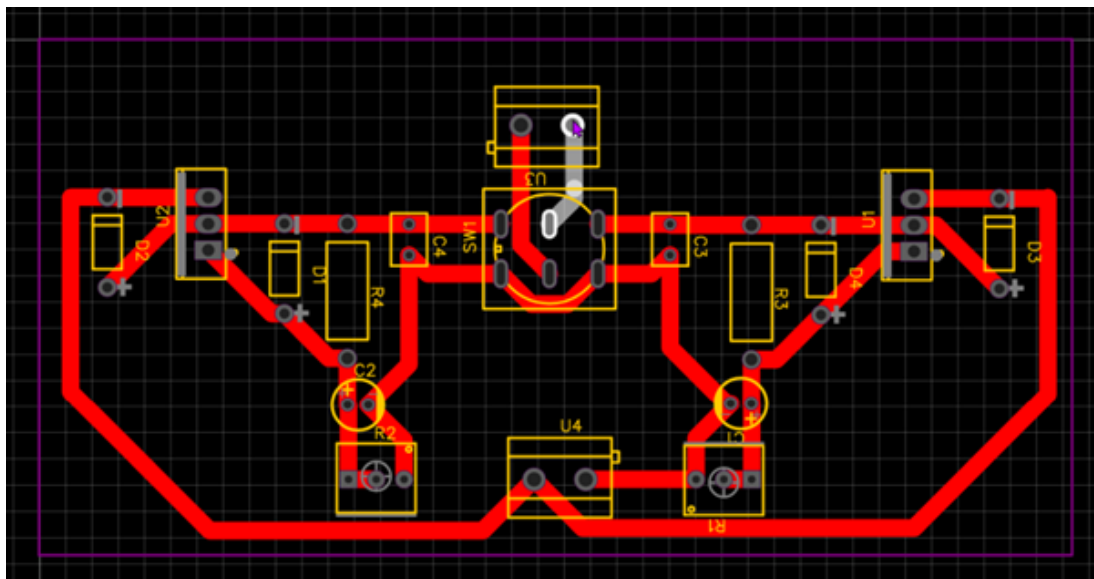
Hasta ahora se ha llegado a la parte para crear el código CNC para la manufactura del circuito. Este código nos permitirá generar las instrucciones que requiere la máquina CNC para generar las pistas y barrenos para los componentes electrónicos. Se requieren

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

dos tipos de programas. El programa de fresado para las pistas y el programa de taladrado/barrenado para los barrenos. En el caso de las pistas, la única consideración es su ancho, que depende del diámetro del cortador y de las instrucciones del programador. Es en el taladrado donde algunas complicaciones empiezan a surgir, esto debido a que no todos los componentes electrónicos tienen el mismo tamaño y forma. Además, en el programa de EasyEDA se les asigna un nombre determinado por el componente, pero no siempre es beneficioso. A continuación, veremos un ejemplo de lo que puede suceder y cómo arreglarlo.

En la Figura 3.15 podemos ver como termina el circuito en la parte de las pistas. Los círculos grises y negros representan los barrenos que requieren los componentes. Tomemos, por ejemplo, los barrenos que están iluminados por el cursor en la parte superior de en medio.



**Figura 3.15:** Tipos de barrenos que pueden aparecer en los componentes de EasyEDA al momento de generar las pistas. Del lado superior se señalan en blanco dos tipos de barrenos, uno circular y uno ovalado.

El barreno que está directamente señalado por el cursor marca que mide 1.4 mm 3.16. Esto quiere decir que para que el componente entre en el hoyo debe de medir 1.4 mm. Sin embargo, podemos ver las propiedades del otro orificio, que está señalado en blanco debajo del mencionado anteriormente 3.16. Sus propiedades son diferentes al hoyo anterior. En primera, su forma es ovalada, lo que significa que tiene dos dimensiones, 0.8 y 2.2 mm. La otra y más importante es que en la propiedad de Hole Shape está

marcado como Slot. Si está marcado como Slot el programa de CNC NO lo reconocerá.

Propiedades de Pads (Circular)	
Capas	Multi-Laver
Numero	1
Forma	Round
Red	U3_1
Anchura	2.200mm
Altura	2.200mm
Rotación	180
Hole Shape	Round
Orificio(D)	1.400mm
Plated	Sí
Centrar en X	51.649mm
Centrar en Y	-8.382mm
Solder Mask ...	0.051mm
ID	gge1419
Mouse-X	51.562mm
Mouse-Y	-7.493mm
Mouse-DX	38.996mm
Mouse-DY	13.383mm

Propiedades de Pads (Oval)	
Capas	Multi-Laver
Numero	2
Forma	Oval
Red	U3_1
Anchura	2.800mm
Altura	1.400mm
Rotación	90
Hole Shape	Slot
Orificio(D)	0.800mm
Hole(Length)	2.200mm
Plated	Sí
Centrar en X	49.403mm
Centrar en Y	-17.920mm
Solder Mask ...	0.051mm
ID	gge1074
Mouse-X	69.215mm
Mouse-Y	-3.048mm
Mouse-DX	19.756mm
Mouse-DY	14.582mm

**Figura 3.16:** Lado izquierdo: Representación de un orificio circular. Lado derecho: Representación de un orificio ovalado.

Habiendo explicado lo anterior es necesario hacer dos cosas antes de cambiar las

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

dimensiones de los barrenos. El primero y más importante es, si tenemos los componentes ya listos, medir verdaderamente el tamaño de las patas de los componentes ya que a veces las dimensiones propuestas por el catálogo de EasyEDA no son exactas a los componentes que tenemos. Teniendo unas medidas aproximadas la segunda cuestión es saber el tamaño de brocas que tenemos disponibles para la máquina CNC. Dependiendo de la disponibilidad de brocas es las disponibilidades de tamaños que podemos considerar al momento de cambiar el tamaño de los barrenos. Por ejemplo, aunque haya barrenos que tengan tamaños de 1.2 o 1.4 mm, si la única broca es de 0.8mm entonces conviene poner todos los barrenos en 0.8mm de medida. Si tenemos dos brocas, una de 0.8mm y otra de 1.4mm, entonces podemos usar la broca de 0.8mm para todos los barrenos y la de 1.4mm solo para los barrenos que miden 1.4 o más. Es importante realizar todos los barrenos con las más pequeñas primero y luego pasar la broca más grande a los barrenos que lo necesiten, así ayudamos al proceso para que no se junte mucha viruta y no haga más sobre esfuerzo.

Cuando se hayan terminado de hacer estas modificaciones entonces procedemos a descargarlo. Para descargarlo nos vamos a la parte superior donde dice ARCHIVO y le damos click donde dice Generate PCB Fabrication File(Gerber). [3.17](#)

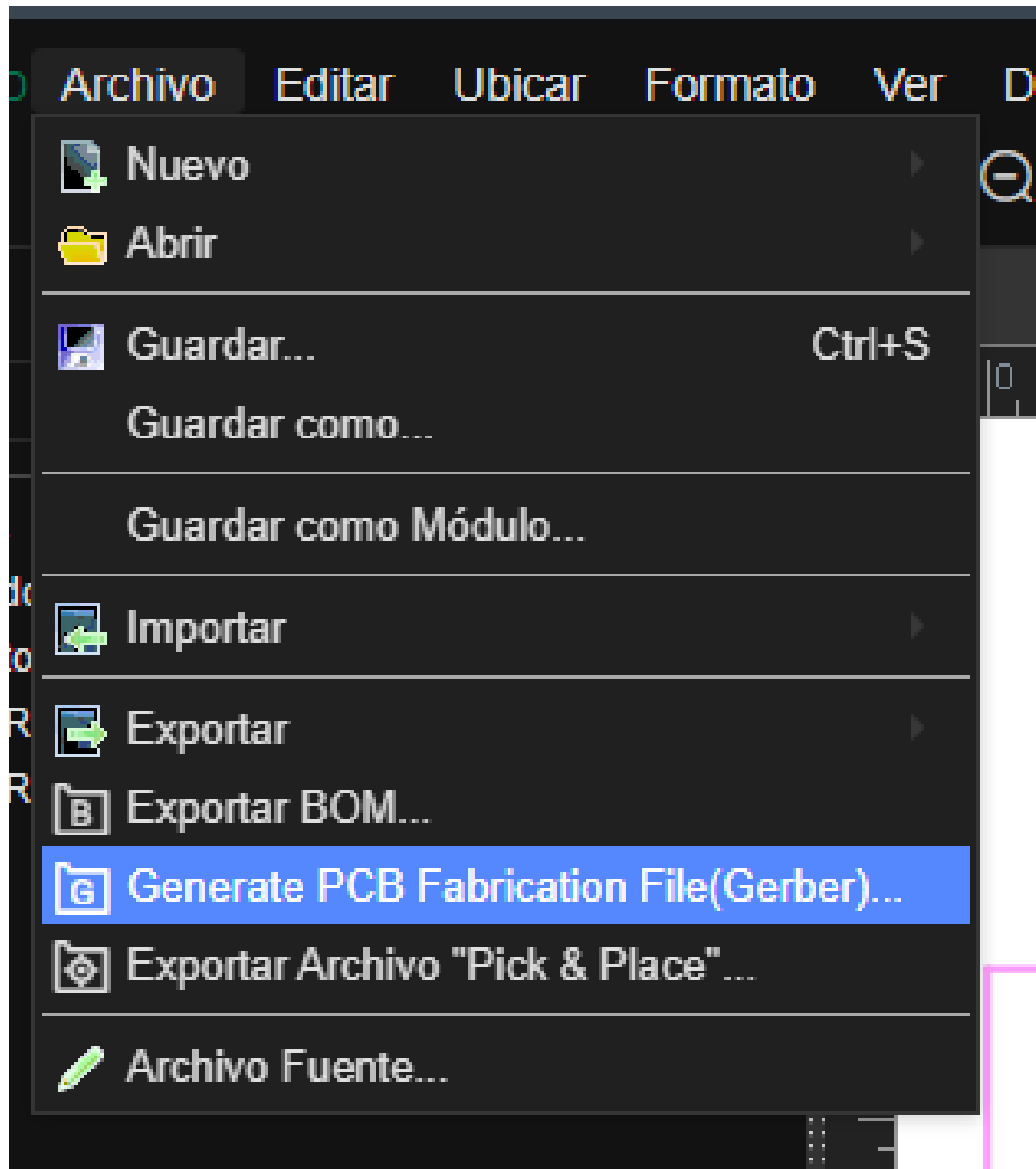


Figura 3.17: Lugar en EasyEDA para descargar el Gerber.

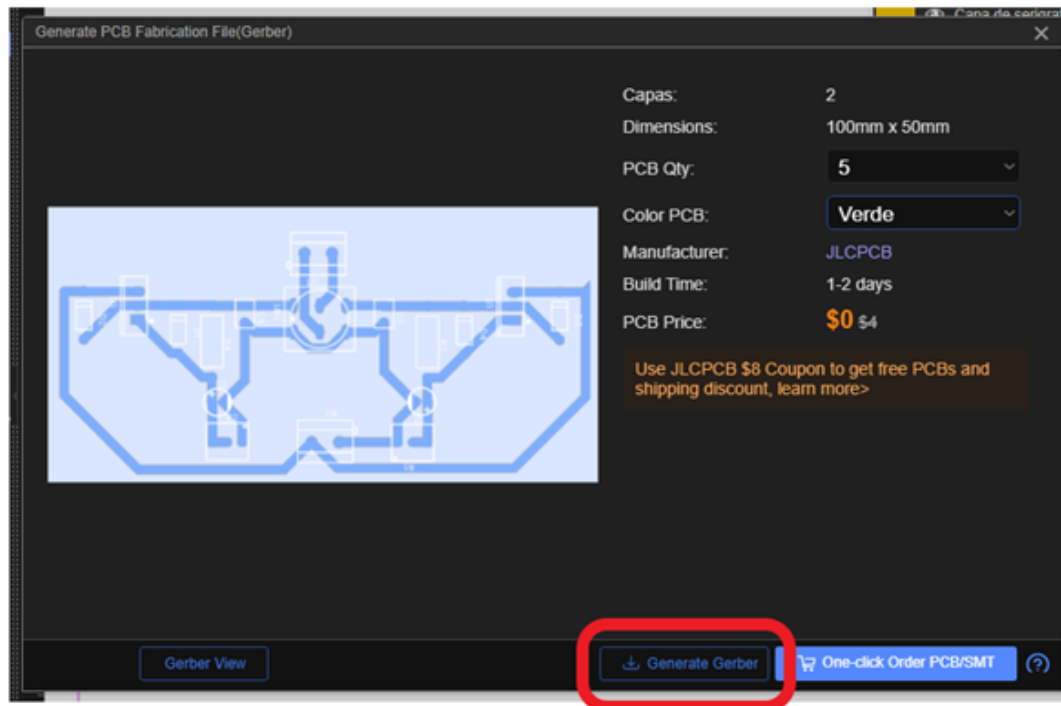
Por último nos abrirá una ventana que nos dice las características de la placa. Nos maneja otra información como costo de manufactura y tiempo de construcción, pero esto es si queremos mandarlo a hacer a la manufacturera de JLCPCB que está en China.



### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

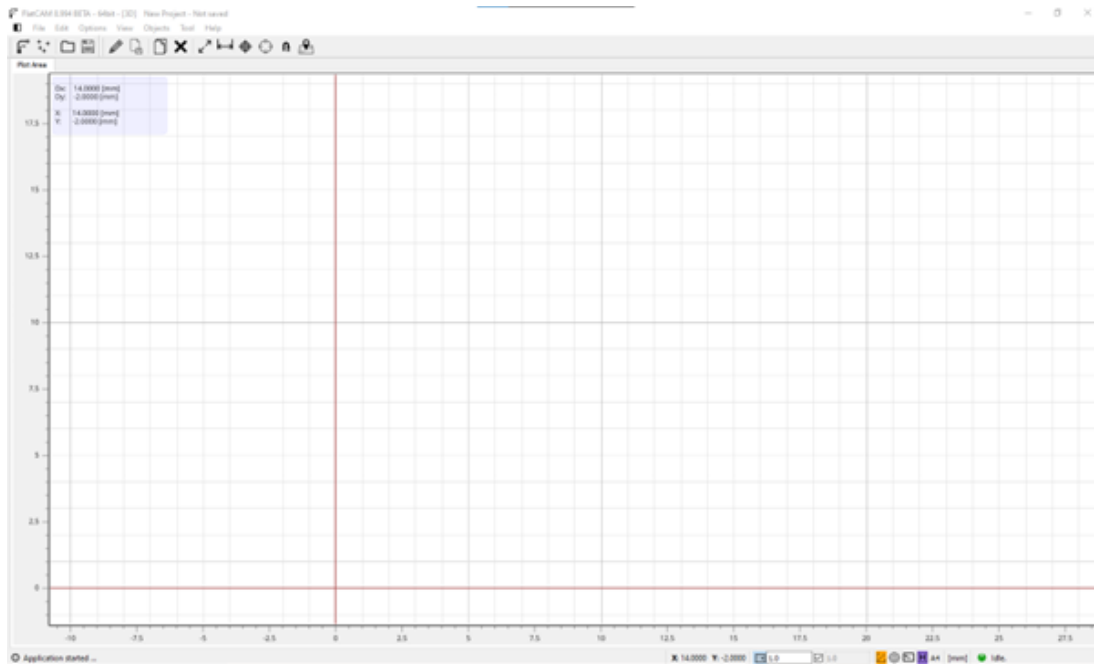
En nuestro caso solo deseamos los Gerber por lo que le damos en la parte inferior donde dice Generate Gerber, como se aprecia en la Figura 3.18.



**Figura 3.18:** Última pantalla que aparece al descargar el Gerber.

Para poder trabajar sobre ellos vamos a usar un programa llamado FlatCAM. Para ellos nos vamos a la página de FlatCAM. [Página de FlatCAM](#)

Por default viene en inglés el programa, puede cambiarse a español pero no es recomendable ya que no está traducido del todo correcto además de que acarrea ciertos problemas. Por lo tanto, la guía se hará con las opciones en inglés. 3.19



**Figura 3.19:** Vista de la zona de trabajo del software de FlatCAM.

Con las modificaciones anteriores procedemos a abrir el gerber descargado anteriormente de EasyEDA. Para ellos nos vamos a File/Open/Open Gerber... Después seleccionamos todos los archivos que estaban dentro del comprimido. [3.20](#)

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

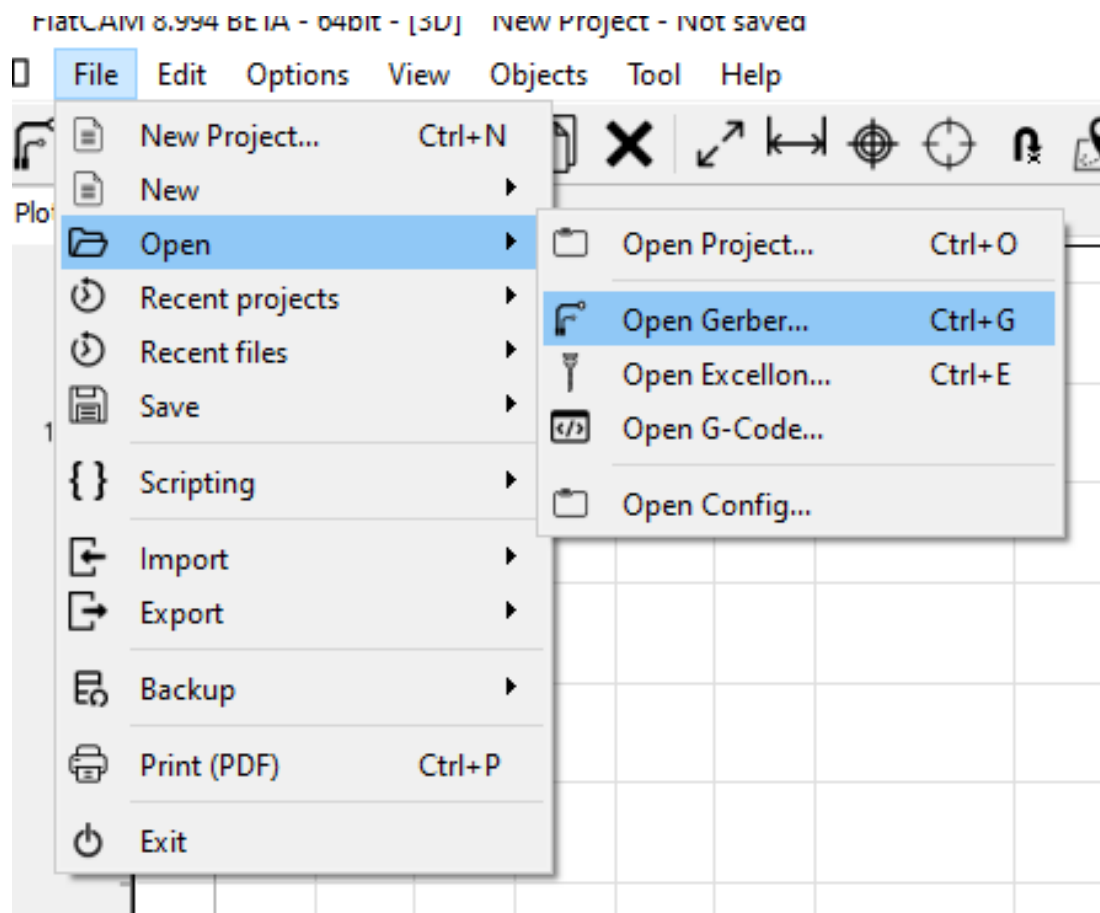
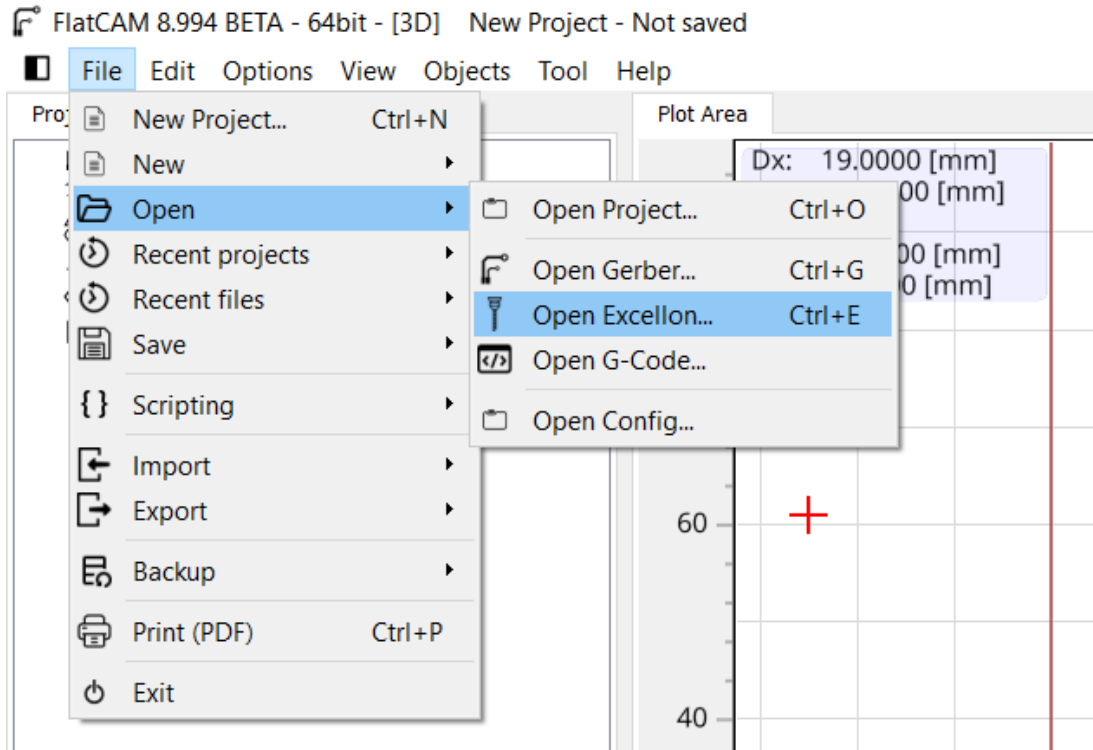


Figura 3.20: Menú en FlatCAM para abrir el Gerber.

A parte, es necesario cargar otro tipo de archivos que se generaron al descargar el Gerber de Easy Eda. Estos tienen extensión **.DRL** y son archivos para detectar los perforados necesarios para los componentes. Estos se abren dándole click en la parte de Open Excellon como se muestra en la Figura 3.21

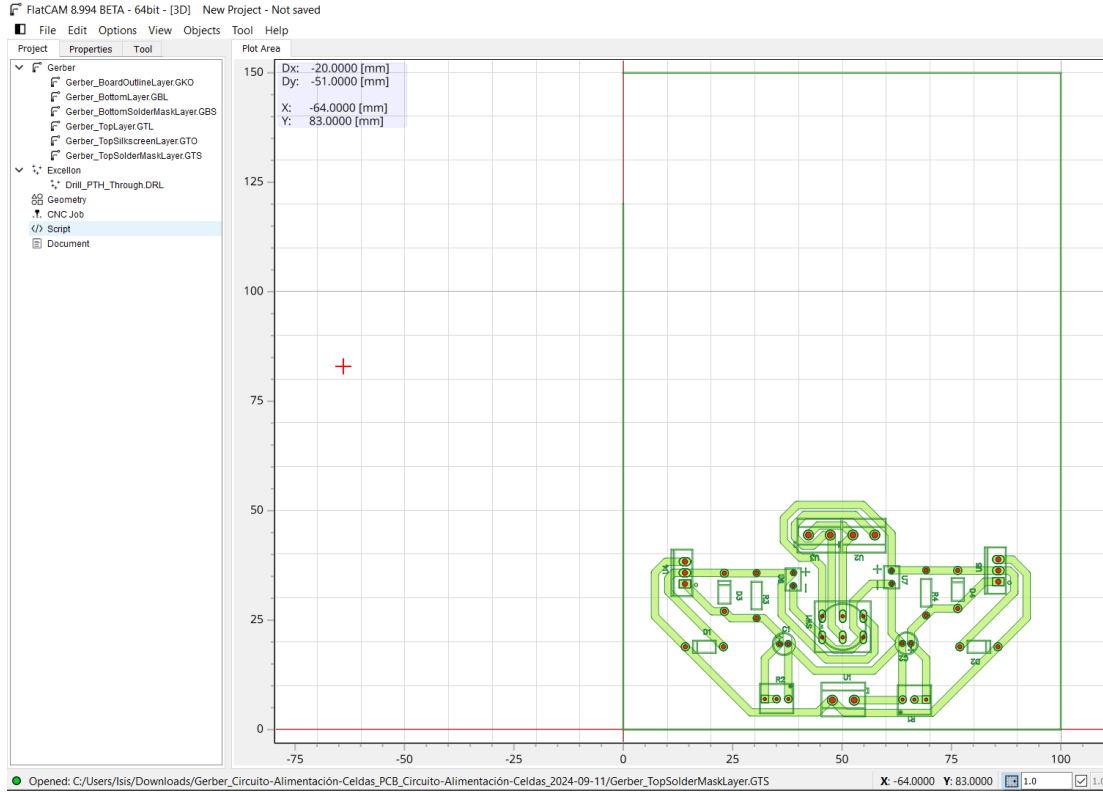


**Figura 3.21:** Zona para abrir los archivos .DRL en FlatCAM.

Es necesario cargar ambos archivos al mismo tiempo ya que se manipularán en posición y debemos de garantizar que al mover uno, se muevan todos en su conjunto.

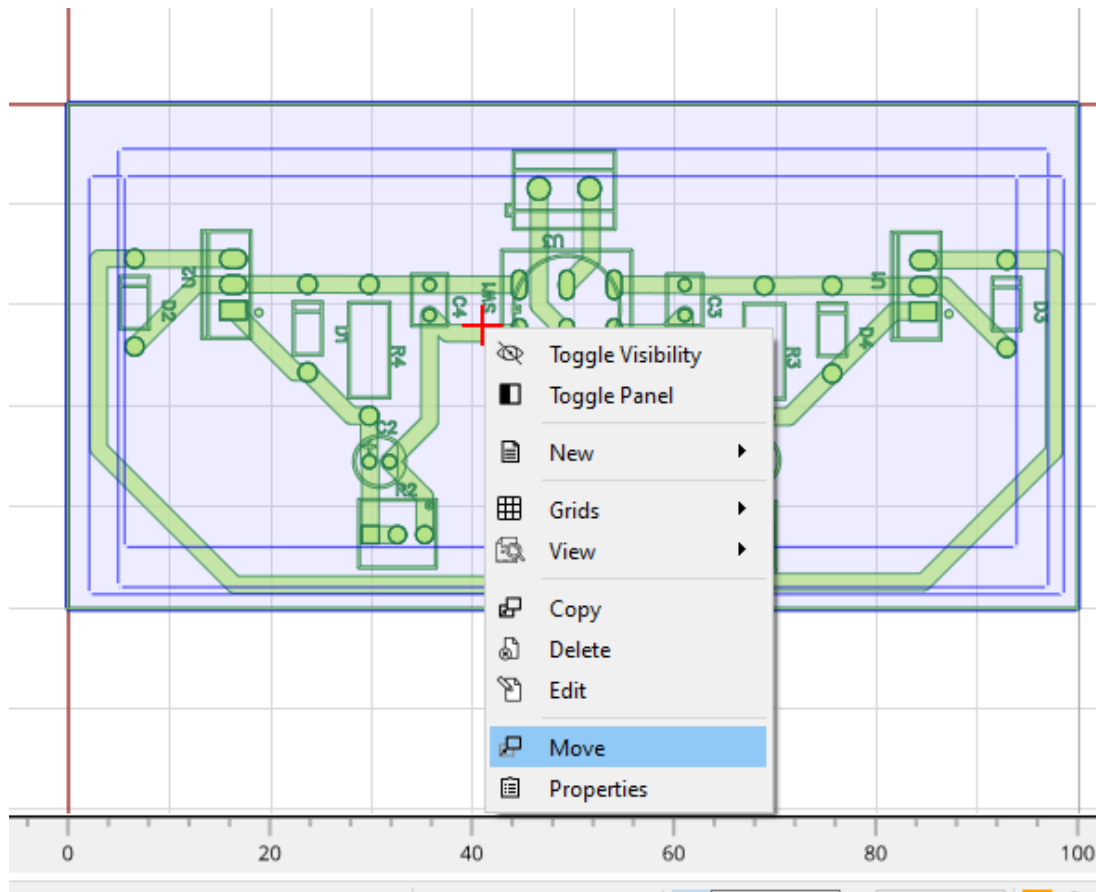
Con lo anterior hecho podemos ver en la opción de trabajo el esquema del circuito, así como del lado izquierdo los archivos que abrimos. [3.22](#)

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



**Figura 3.22:** Visualización del Gerber en FlatCAM.

También podemos ver unas líneas rojas. Estas determinan los límites de la zona de trabajo del CNC, dependiendo de donde quieras trabajar es la zona que corresponde. Por default la coloca donde el origen está en la parte superior izquierda, esto quiere decir que la herramienta empezará a trabajar en esa zona. En nuestro caso queremos que empiece a trabajar en la parte inferior izquierda. Para ello debemos de mover el esquema que se logra seleccionando todo lo de color verde. Después le damos con el botón derecho y click en Move.[3.23](#)



**Figura 3.23:** Reubicar el gerber en FlatCAM.

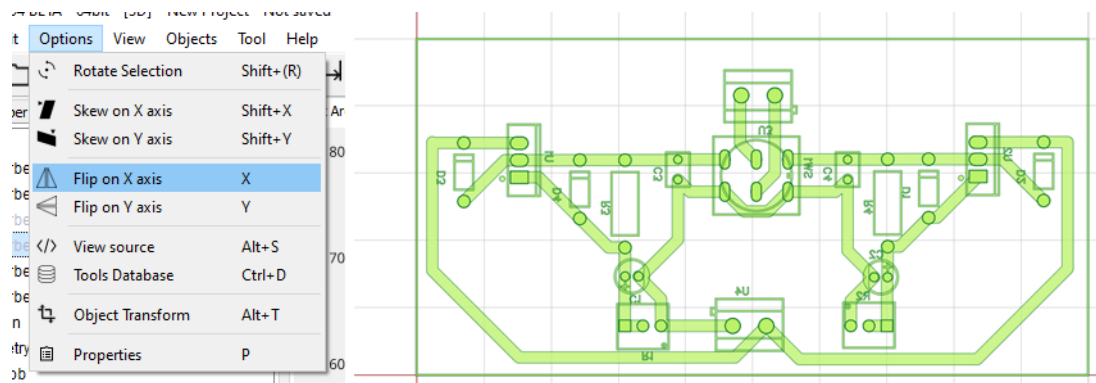
Después de esto le damos click en cualquier zona dentro del esquema. Nos aparecerá en el cursor un rectángulo del tamaño del circuito. Lo ubicamos donde deseamos moverlo.

Algo importante a tomar en cuenta es la orientación del circuito. En EasyEDA el circuito está planeado para hacerlo de la manera convencional, es decir, sobre la placa. En nuestro caso las pistas irán debajo de la placa y los componentes arriba. Esto hace que sea necesario espejear el circuito.

Ya colocado el circuito procedemos a espejear el circuito. Para ello lo volvemos a seleccionar todo y después nos vamos a la parte superior dice Options y luego le damos en Flip on X axis. Esto nos espejeará el circuito. [3.24](#) Todo lo anterior debe de hacerse seleccionando todos los archivos, tanto gerber como excellon, para garantizar la misma posición.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

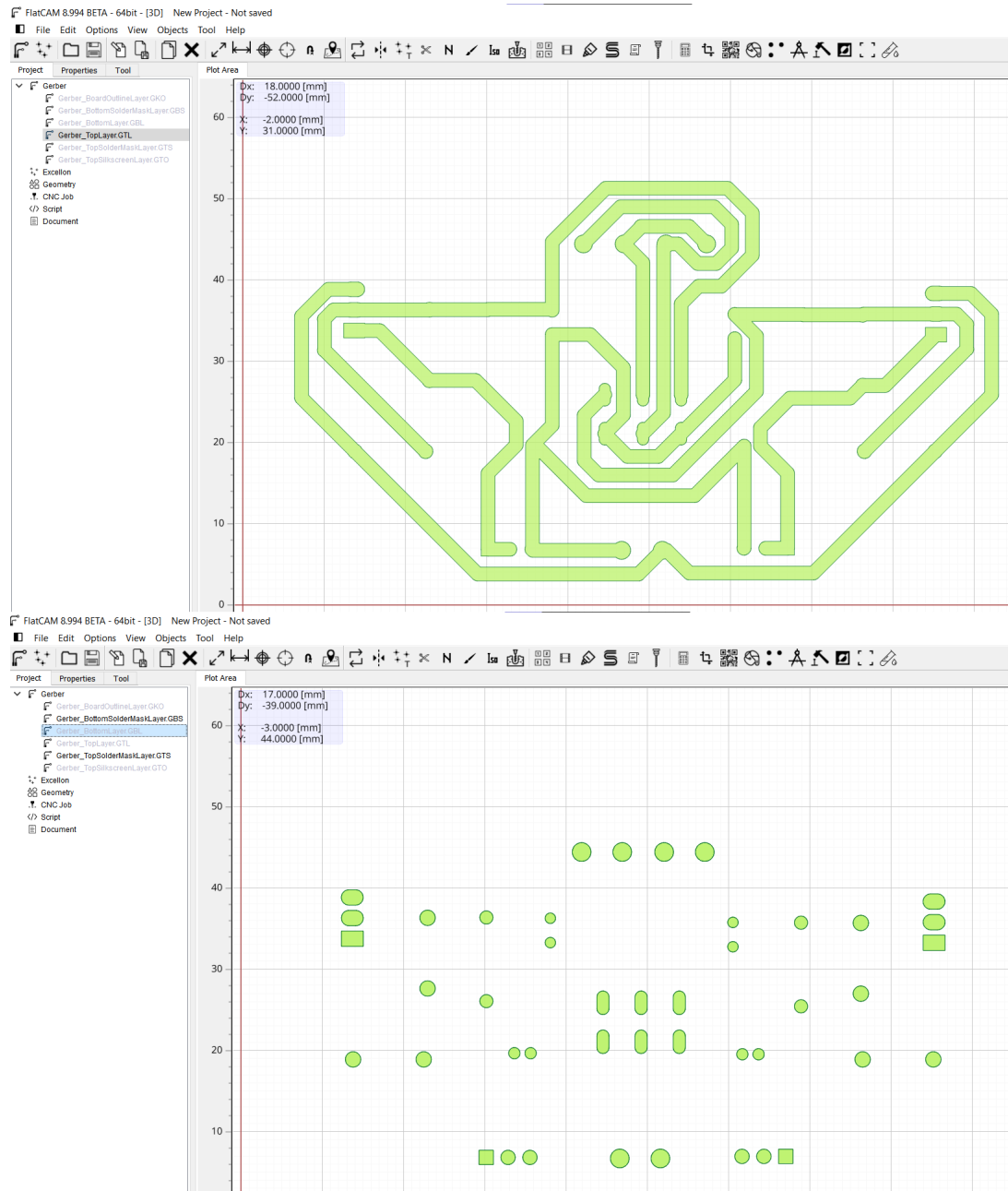
---



**Figura 3.24:** Lado Izquierdo:Comandos para espejear el Gerber. Lado Derecho: Resultado después de espejear el Gerber.

Ahora procedemos a analizar los archivos del gerber, ya que no todos tienen información relevante. Por ejemplo, el archivo que se llama TopLayer contiene las pistas. Otros archivos como BottomSolderMaskLayer y TopSolderMaskLayer tienen información repetida o no relevante. [3.25](#)

### 3.2 Instrumentación y Control



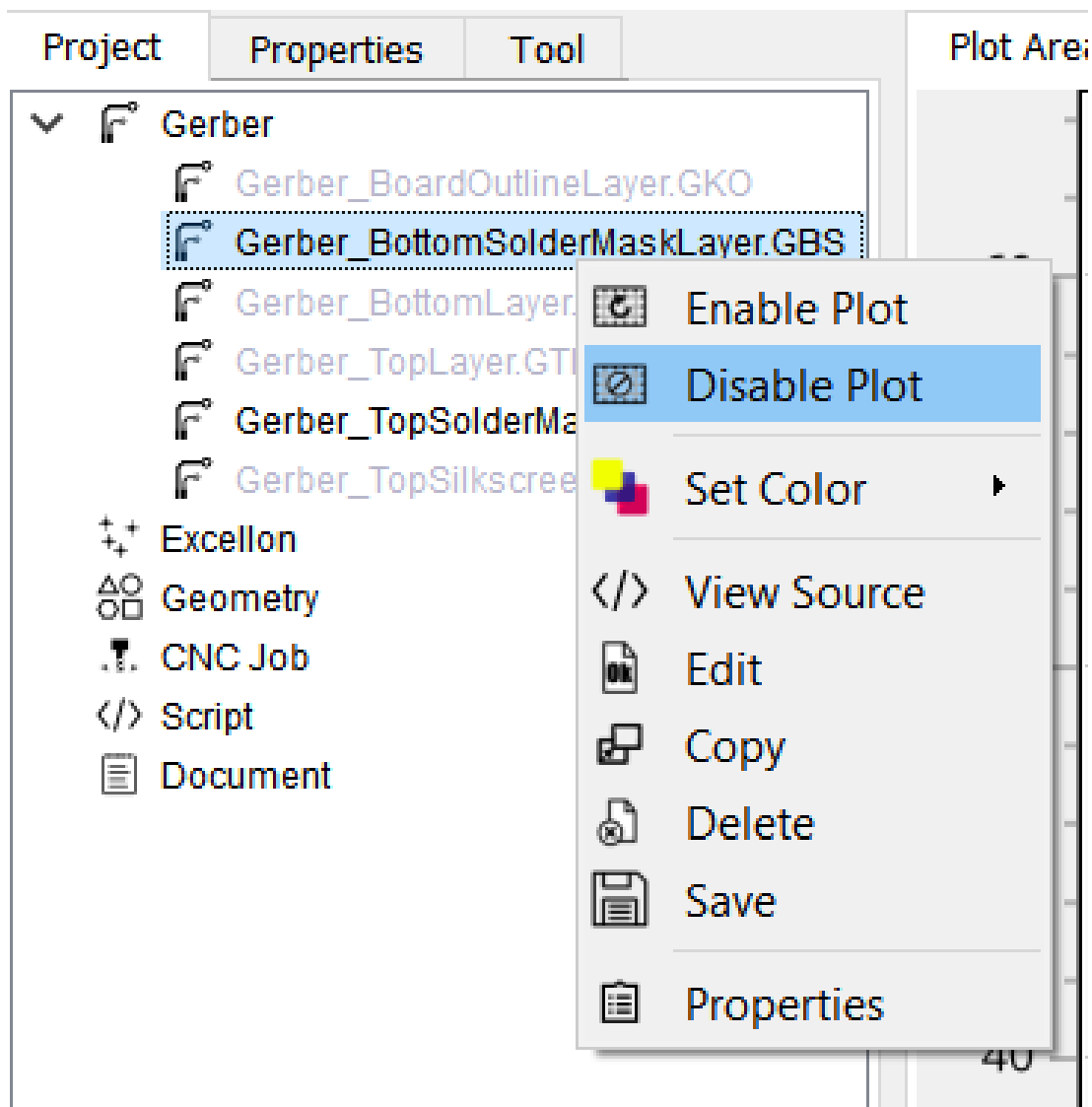
**Figura 3.25:** Lado Superior: Capa TopLayer que contiene las pistas. Lado Inferior: Capas BottomSolderMaskLayer y TopSolderMaskLayer que contienen la silueta de los orificios de los componentes.



### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

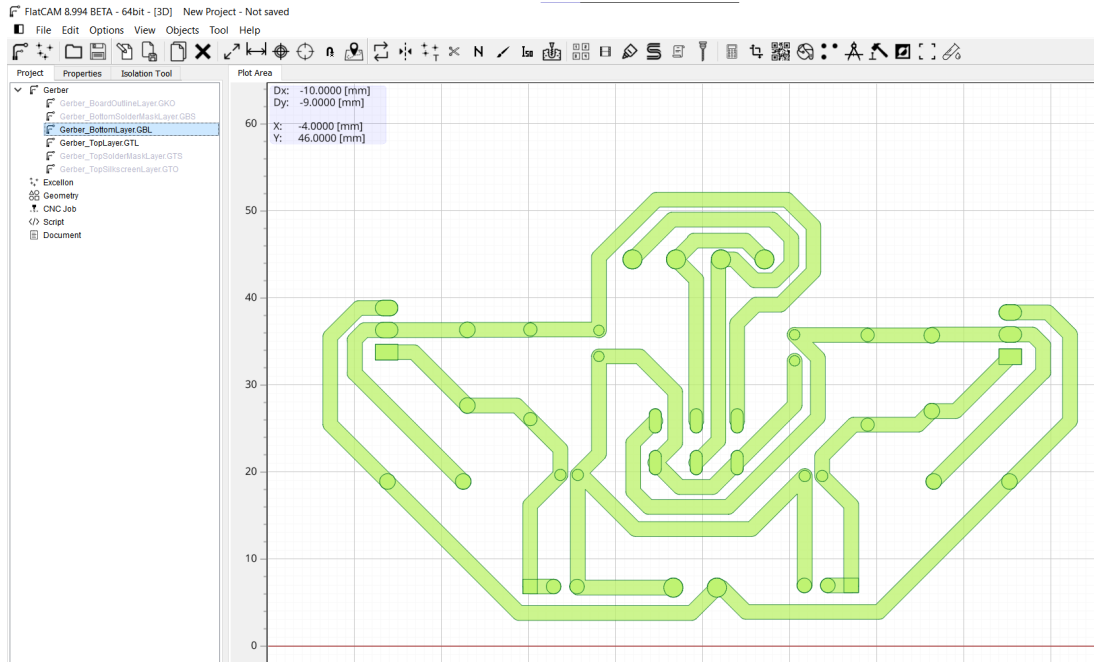
---

Para descartar una capa solo hay que darle click derecho y seleccionar la parte de Disable Pot. Para volverla a ver solo hay que darle en Enable Pot. [3.26](#)



**Figura 3.26:** Comando para dejar de ver alguna de las capas del Gerber desde FlatCAM.

En este caso, la capa del Gerber a utilizar será **TopLayer**, que contiene las pistas.



**Figura 3.27:** Pistas a utilizar del Gerber.

Cuando ya tengamos ubicadas las capas que nos serán de utilidad procedemos a la siguiente parte. FlatCAM permite generar código para fresado, que es el que usaremos para las pistas y taladrado, que será para las pistas.

Comenzando con el código para las pistas, solo dejaremos a la vista la capa que contiene las pistas, ocultando la de los agujeros. De las pestañas que presenta FlatCAM del lado izquierdo nos dirigiremos a la que dice Properties y le daremos click donde dice **Isolation Routing** como se muestra en la Figura 3.28.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

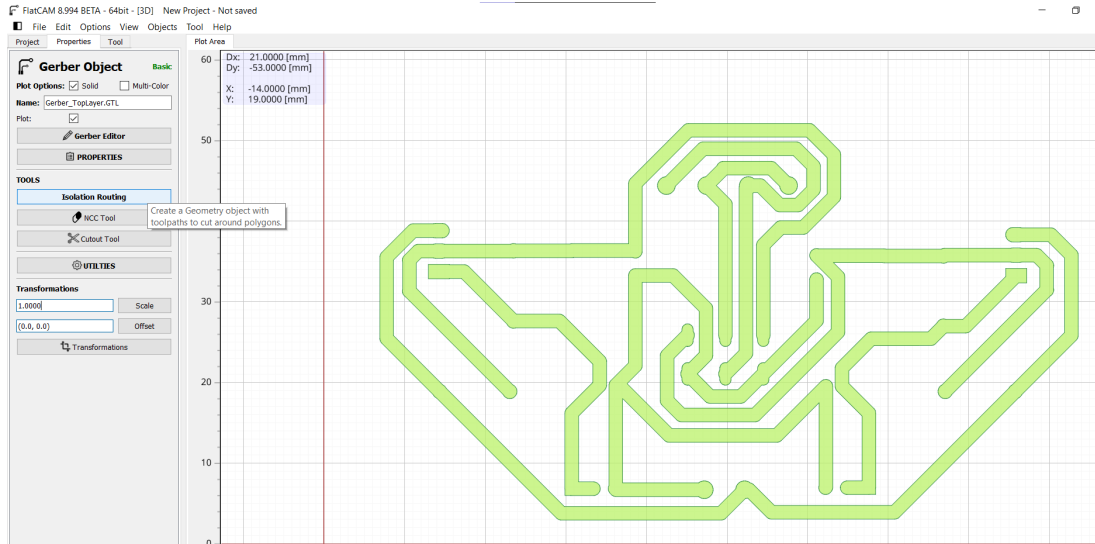


Figura 3.28: Zona en FlatCAM para generar el código de fresado para las pistas.

Al darle click nos abrirá una nueva pestaña llamada **Isolation Tool** como se muestra en la Figura 3.29. Lo importante a destacar aquí es la parte de **Tools Table**. Nos permitirá definir la herramienta a utilizar y el diámetro que tiene. Es importante conocer y tener en físico la fresa a usar antes de este parte, para que el código generado trabaje adecuadamente.

En nuestro caso, en la parte de diámetro lo dejamos en 0.1 y en tipo lo dejamos en B a pesar de que la herramienta real será de tipo V. Esto es con el propósito de poder editar un parámetro de manera manual que con la herramienta V no lo permite. En el tipo existen 3 tipos: C#, que es circular con # número de dientes, B que es tipo bola y V con forma de V. Ya definido eso le podemos dar click en **Generate Geometry**.

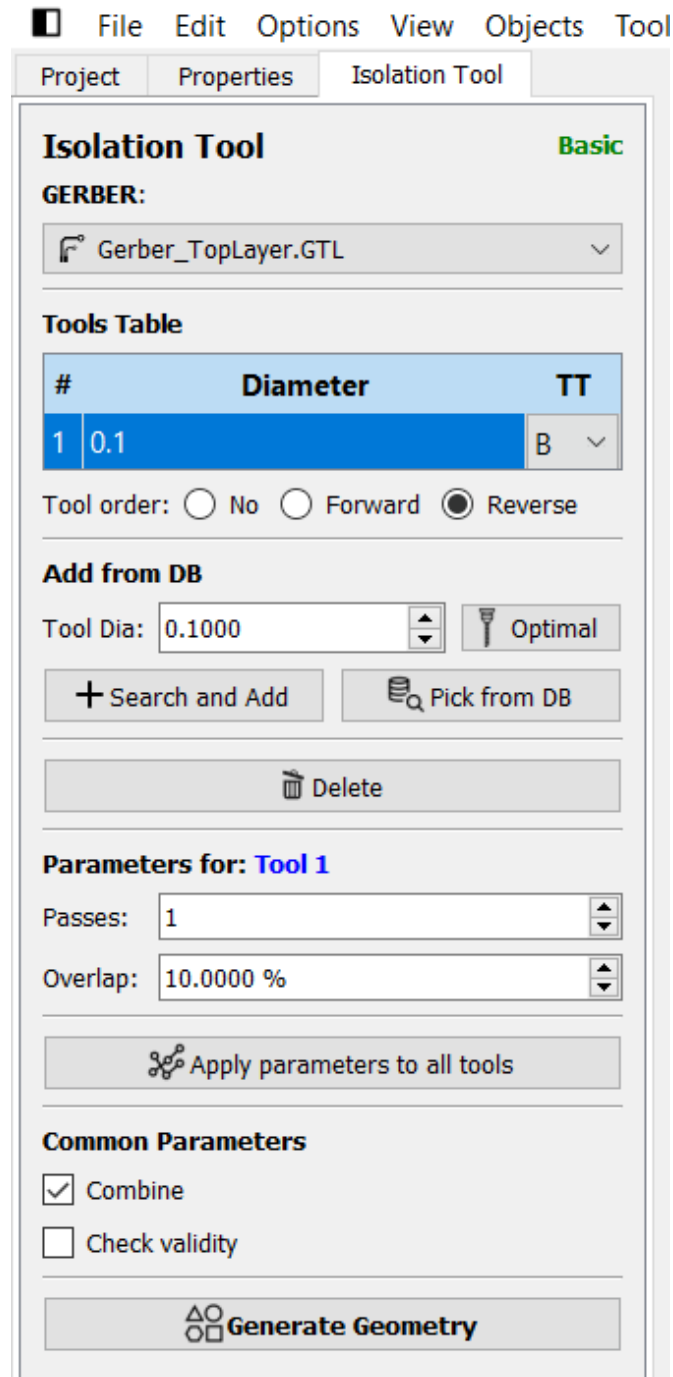


Figura 3.29: Parte de FlatCAM donde definimos el tipo de herramienta para el fresado.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

Al hacer esto nos habrá generado un objeto geométrico con el cuál podremos definir los últimos parámetros necesarios para obtener el código. Una de las primeras cosas que notamos es que las pistas ahora están marcadas con una ligera línea roja. Además, en la pestaña de **Properties** habrán aparecido más parámetros a definir, como se muestra en la Figura 3.30.

La información a rellenar es la siguiente:

- **Cut z:** Determina la profundidad con la que atravesará la placa. En este caso se colocará un valor de **-0.35** cm.
- **Travel Z:** Cuando la herramienta se traslado de un lado a otro sin desbastar la pista, debe hacerlo a cierta altura. Aquí lo hará a una altura de **3** cm.
- **Feedrate X-Y:** Es la velocidad con la que se mueve en el plano X-Y. En otras palabras, la velocidad con la que desvasta. Se colocará un valor de **50** unidades por minuto.
- **Feedrate Z:** Velocidad cuando se mueve hacia arriba y hacia abajo en e eje Z. También se colocará un valor de **50** unidades por minuto.
- **Spindle Speed:** Es la velocidad de rotación con la que gira la herramienta. En este caso se define ya que el programa lo requiere, pero no será usada. Solo por poner un valor, se coloca **500**.

Habiendo definido estos valores, podemos darle al botón de **Generate CNCJob object**.

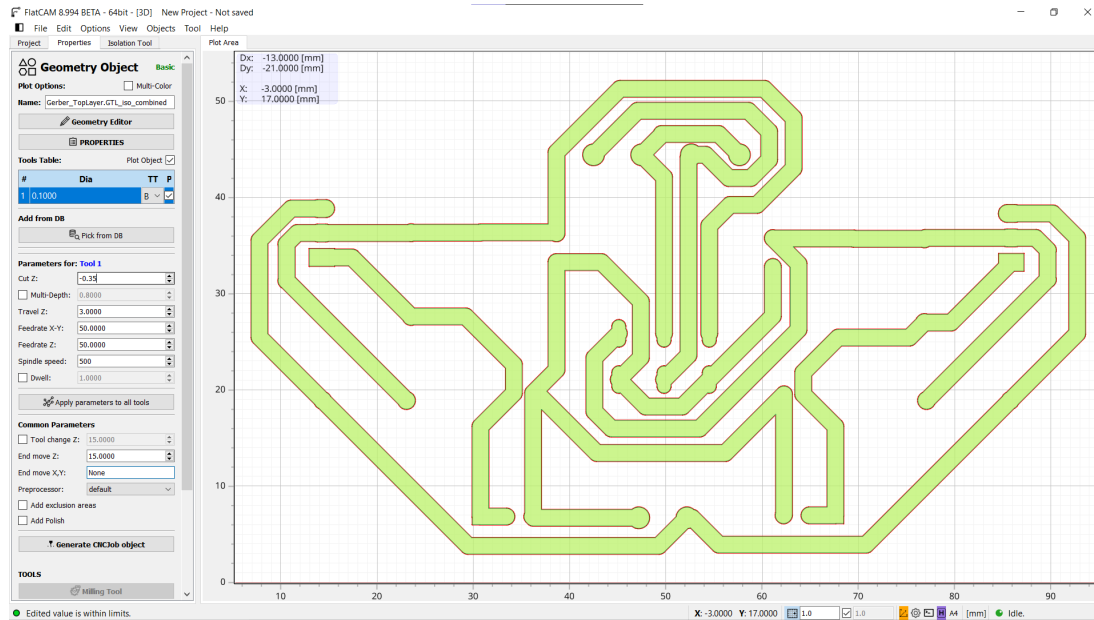


Figura 3.30: Definir parámetros del objeto geométrico para el fresado.

FlatCAM ya habrá creado el programa CNC para el fresado y solo es cuestión de descargarlo dándole click en el botón de **Save CNC Code**, como se muestra en la Figura 3.31. Es importante destacar que cuando se descargué, hay que hacerlo en formato **.gcode**.

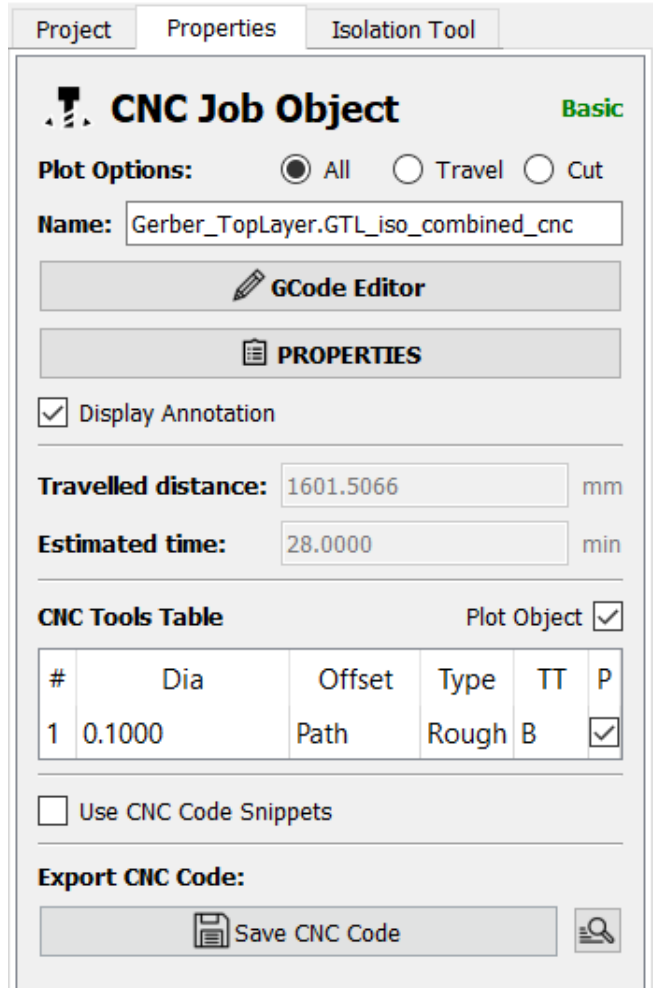


Figura 3.31: Objeto CNC generado en FlatCAM.

Cuando se genera el código G, este traerá información de una máquina CNC genérica, la cual tiene propiedades como la selección de diferentes herramientas en un carrusel o comandos para iniciar la máquina. Debido a que la máquina a usar en este caso no es de este tipo, se le hicieron algunos cambios al código. El cambio del código que nos entrega FlatCAM y el que requerimos puede apreciarse en la Figura 3.32.

## 3.2 Instrumentación y Control

```
1 (G-CODE GENERATED BY FLATCAM v8.994 - www.flatcam.org - Version Date: 2020/11/7)
2
3 (Name: Gerber_TopLayer_GTL_iso_combined_cnc)
4 (Type: G-code from Geometry)
5 (Units: MM)
6
7 (Created on Monday, 23 September 2024 at 07:12)
8
9 (This preprocessor is the default preprocessor used by FlatCAM.)
10 (It is made to work with M303 compatible motion controllers.)
11
12 (TOOL DIAMETER: 0.1 mm)
13 (Feedrate_XY: 50.0 mm/min)
14 (Feedrate_Z: 50.0 mm/min)
15 (Feedrate rapids 1500.0 mm/min)
16
17 (Z_Cut: -0.35 mm)
18 (Z_Move: 3.0 mm)
19 (Z_Start: None mm)
20 (Z_End: 15.0 mm)
21 (X,Y End: None mm)
22 (Steps per circle: 64)
23 (Preprocessor Geometry: default)
24
25 (X range: 6.8974 ... 93.6612 mm)
26 (Y range: 2.9096 ... 52.2084 mm)
27
28 (Spindle Speed: 500.0 RPM)
29 G21
30 G90
31 G94
32
33 G01 F50.00
34
35 M5
36 G00 Z15.0000
37 G00 X0.0000 Y0.0000
38 T11
39 M6
40 (MSG, Change to Tool Dia = 0.1000)
41 M0
42 G00 Z15.0000
43
44 M03 S500.0
45 G01 F50.00
46 G00 X15.6296 Y34.6824
47 G01 F50.00

1 G21
2 G90
3 G94
4
5 G01 F50.00
6
7 G00 Z15.0000
8 G00 X0.0000 Y0.0000
9
10 M03 S500.0
11 G01 F50.00
12 G00 X23.1559 Y11.9093
13 G01 F50.00
14 G01 Z-0.3500
15 G01 F50.00
16 G01 X23.1468 Y11.9084
17 G01 X23.1374 Y11.9055
18 G01 X23.1288 Y11.9009
19 G01 X23.1212 Y11.8947
20 G01 X23.1150 Y11.8871
21 G01 X23.1108 Y11.8796
22 G01 X23.1078 Y11.8703
23 G01 X23.1066 Y11.8606
24 G01 X23.1066 Y9.2593
25 G01 X23.1071 Y9.2520
26 G01 X23.1087 Y9.2448
27 G01 X23.1114 Y9.2380
28 G01 X23.1150 Y9.2316
29 G01 X23.1187 Y9.2267
30 G01 X23.1230 Y9.2223
31 G01 X23.1278 Y9.2185
32 G01 X23.1330 Y9.2152
33 G01 X23.1386 Y9.2127
34 G01 X23.1444 Y9.2108
35 G01 X23.1504 Y9.2097
36 G01 X23.1566 Y9.2093
37 G01 X24.9565 Y9.2093
38 G01 X24.9639 Y9.2099
39 G01 X24.9711 Y9.2115
40 G01 X24.9779 Y9.2141
41 G01 X24.9843 Y9.2176
42 G01 X24.9892 Y9.2215
43 G01 X24.9936 Y9.2258
44 G01 X24.9974 Y9.2305
45 G01 X25.0006 Y9.2358
46 G01 X25.0032 Y9.2413
47 G01 X25.0051 Y9.2472
```

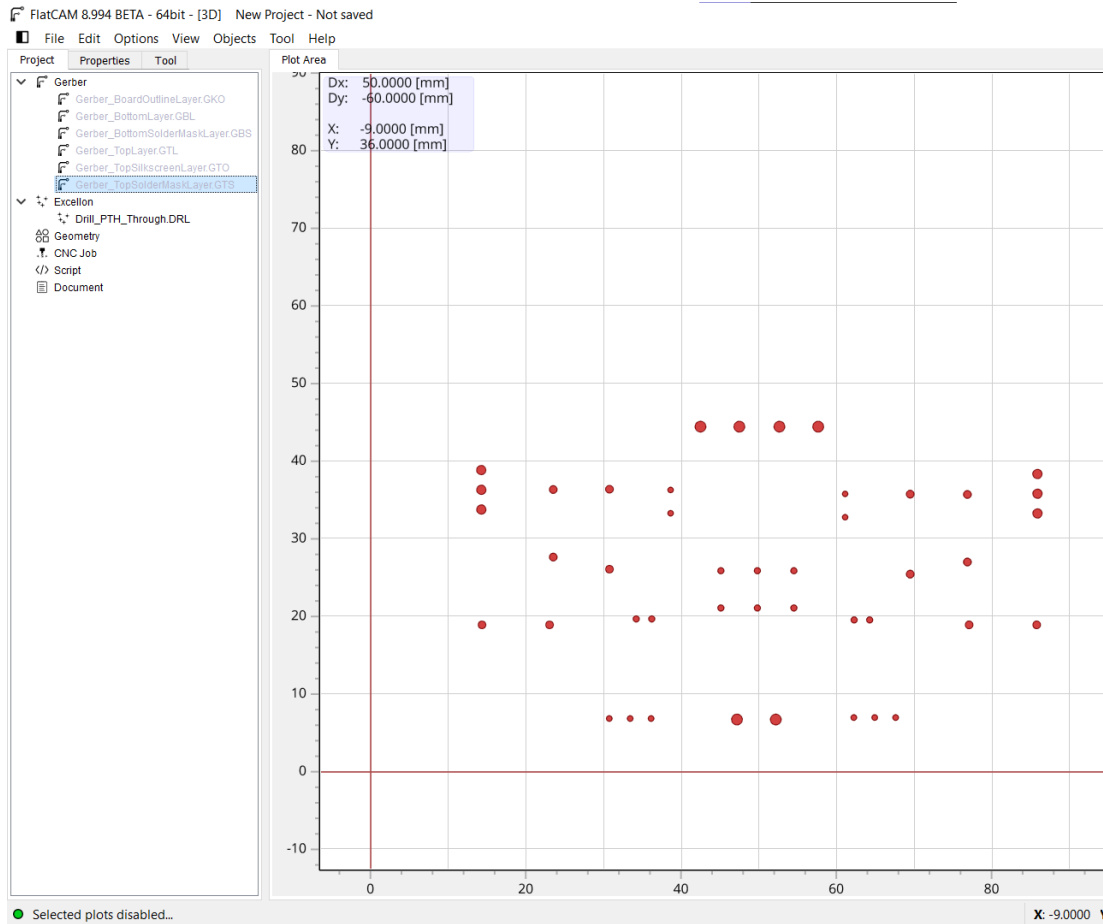
**Figura 3.32:** Lado izquierdo: Código otorgado de FlatCAM. Lado derecho: Código modificado.

Este archivo es compatible con la máquina del laboratorio para seguir la instrucciones de código G.

Ahora que ya se tiene el código para generar las pistas vamos a utilizar los archivos .DRL en la parte de excellon para generar los códigos para el perforado. Ponemos en disable todas las capas gerber y solo dejamos el archivo .DRL como se muestra en la Figura 3.33



### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



**Figura 3.33:** Visualización del Archivo .DRL en FlatCAM.

Si seleccionamos el archivo de excellon y luego nos vamos a la pestaña de propiedades podremos ver propiedades diferentes a las vistas anteriormente como se muestra en la Figura 3.34. Una de las más importantes a destacar es la lista de los orificios, clasificados en tamaño. Idóneamente debería de tenerse un taladro con cada tamaño que se requiere, pero en este caso se hará una clasificación manual. En este caso, al tener 3 tipos de taladros en el laboratorio: 0.8 mm, 1.0 mm y 1.4 mm, los orificios se reclasificarán de la siguiente forma:

- Se hará un primer código con todos los orificios para el taladro de 0.8 mm. Esto porque debemos de perforar primero todos los barrenos con el taladro más pequeño.
- Se hará un segundo código con el taladro de 1.0 mm para los orificios con medida

mayor o igual a 1.0 mm.

- Por último se hará un código para usar el taladro de 1.4 mm para los orificios de 1.4 mm o mayor.

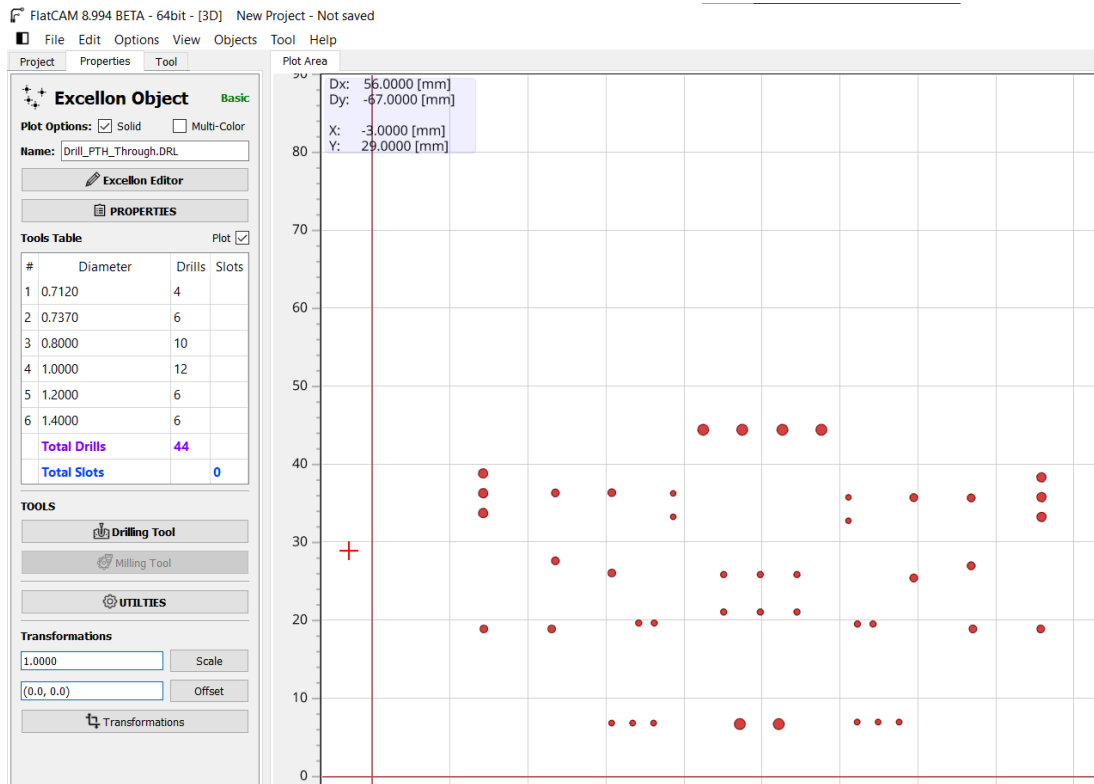


Figura 3.34: Propiedades de un archivo en Excellon.

Para lograr el código de las dos últimas planteadas previamente se puede hacer del Excellon Editor. Si le damos click en la parte de properties nos abrirá el editor, como se muestra en la Figura 3.35. Aquí podremos generar un nuevo archivo excellon con los orificios de nuestro interés. Seleccionamos los barrenos que NO nos interesan y en la parte superior hay un botón con un tachecito que sirve para borrar barrenos. Uno por uno seleccionamos desde la parte de la columna # y damos en el botón de borrar drill. Sabremos que se eliminaron de manera correcta si en la columna D aparece en ceros.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

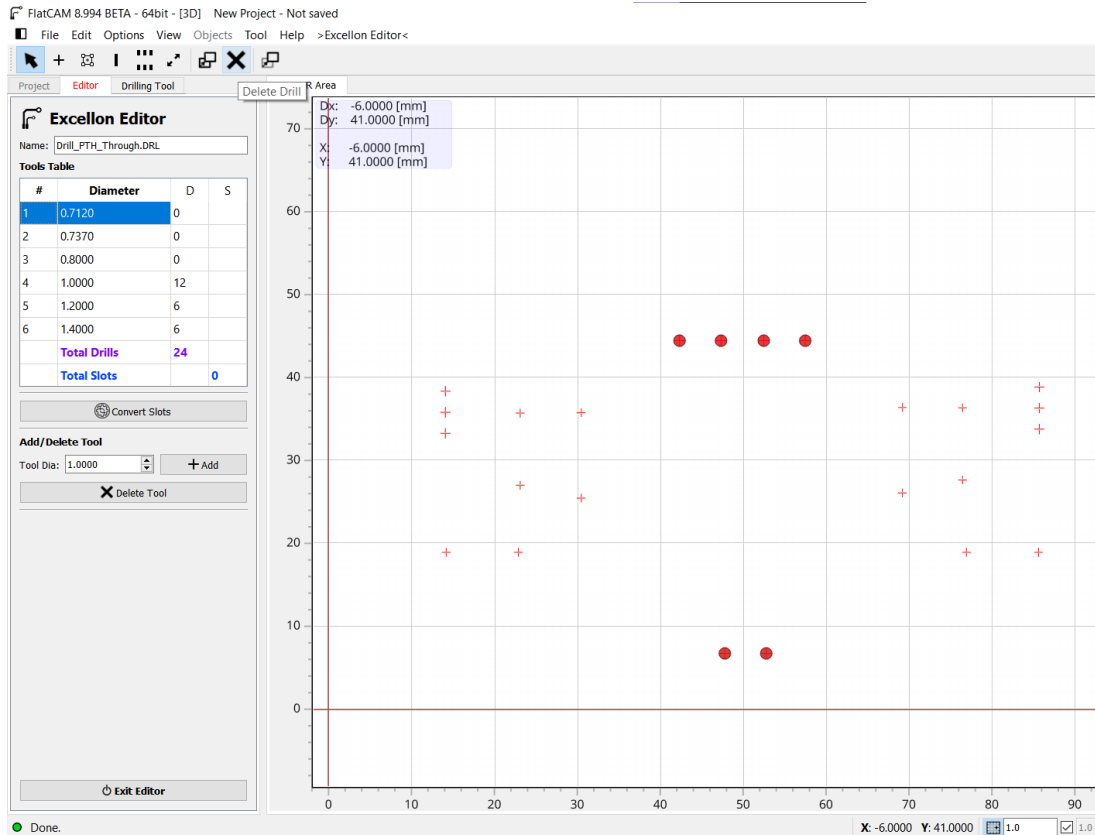


Figura 3.35: Editar un archivo Excellon.

Al darle click en Exit Editor nos preguntará si deseamos guardar. Al aceptar nos regresará a la parte de properties y si nos vamos a la pestaña de Project podremos ver nuestro nuevo excellon creado con los orificios que nos interesan como se muestra en la Figura 3.36.

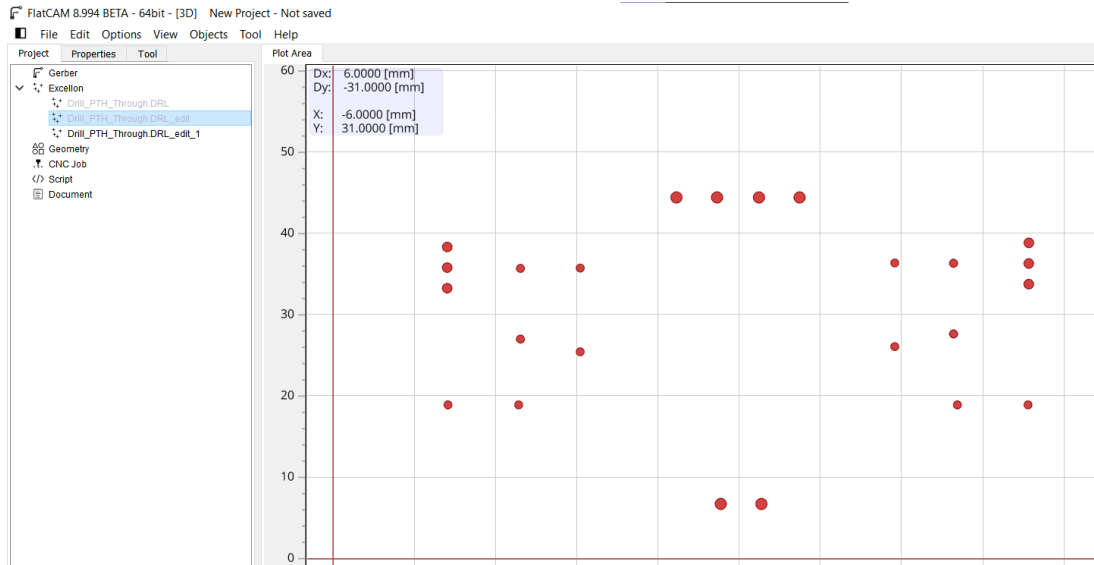


Figura 3.36: Visualización de los excellon creados con el editor.

Como son tres códigos por operación de taladrado, necesitamos generar dos excellon extra además del original. Uno para los barrenos igual o mayor a 1.0 mm y otro para los barrenos de 1.4 mm o mayor.

Para crear el circuito seleccionamos el circuito y nos vamos a properties como le hicimos previamente, solo que en lugar de irnos al editor le daremos click en **Drilling Tool**. La nueva pestaña, llamada con el mismo nombre, nos permitirá ingresar la información necesaria para hacer el taladrado. La información a introducir es:

- Cut Z: Es la profundidad de taladrado. Debe ser negativo ya que va por debajo de la placa. Dependiendo del grosor de la placa es la medida de este parámetro más un poco más para garantizar la perforación. En este caso usamos la medida de -1.6
- Multi-Depth: Para evitar la sobre carga del taladro podemos hacer que perfore un hoyo pasando varias veces en este. Primero atraviesa una parte y cada vez llega más lejos hasta cumplir el Cut Z. En este caso se le pone un valor de 0.5
- Travel Z: Cuando se traslade el taladro de un punto a otro, lo hará a una altura de 3.0 sobre la placa para evitar colisión.
- Feedrate Z: Velocidad con la que se traslada el taladro de un hoyo a otro. Tiene un valor de 90.
- Spindle Speed: Velocidad del Husillo. Tiene un valor de 500.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Lo anterior se puede apreciar en la Figura 3.37.

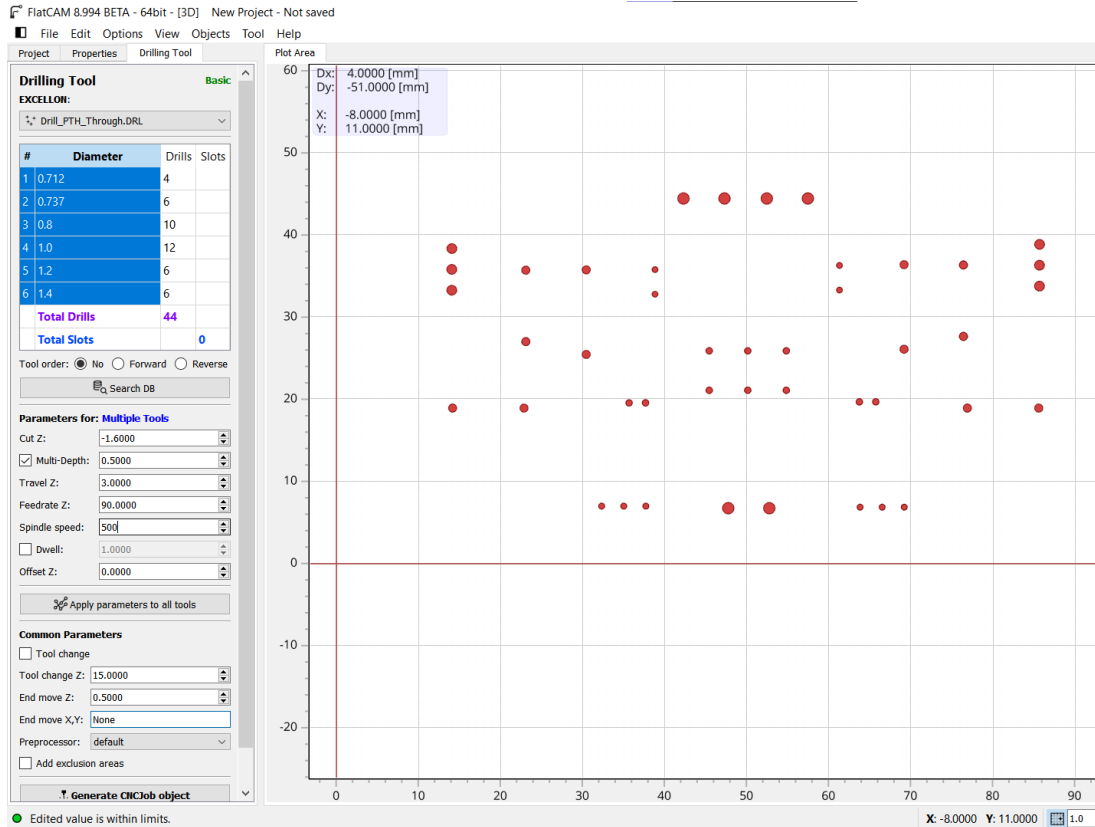


Figura 3.37: Propiedades de la sección de Drilling Tool.

Con esta información le damos click donde dice **Generate CNC Job Object**. Esto nos habrá generado nuestro objeto con el código CNC. Por último le damos click en **Save CNC Code** y guardamos el archivo con formato **.gcode**.

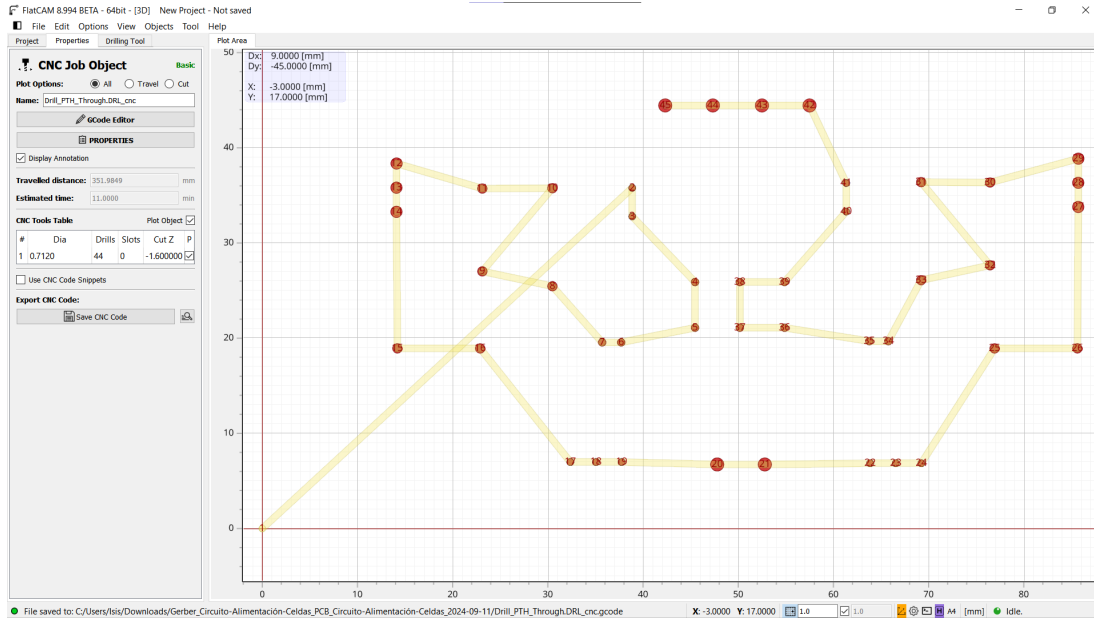


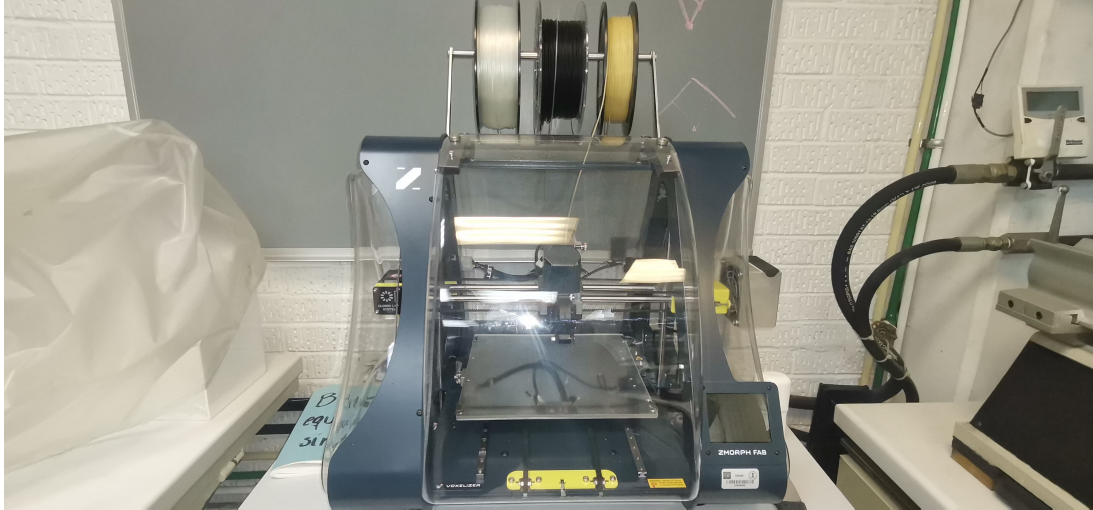
Figura 3.38: Objeto CNC para el taladrado con generación del código G.

Repetimos el mismo procedimiento para los otros excellon que generamos. Al momento de descargar los archivos podemos ponerles un nombre diferenciador para identificarlos.

Con los 4 códigos G ya obtenidos, los guardamos en una memoria y procedemos a ponerla en la máquina que cortará y perforará la placa fenólica. La máquina que nos ayudará en esta labor es una Zmorph (mostrada en la Figura 3.39) que permite el corte láser, impresión 3D y la generación de circuitos a través de la adaptación de herramientas como fresas y taladros.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---



**Figura 3.39:** Máquina ZMorph para la generación de circuitos en placas fenólicas.

El proceso para generar las placas es el siguiente:

- Paso 1: Fijar la placa fenólica en una superficie gruesa que pueda ser dañada en el proceso de taladrado, como una tabla. Se uso cinta doble cara para fijarla.
- Paso 2: Encendemos la máquina y movemos la placa en el plano XY para acercarla a nosotros.
- Paso 3: Fijamos la placa sobre la base haciendo uso de los adaptadores que tiene y apretándolos con una llave Allen.
- Paso 4: Retiramos el rotor e introducimos la fresa o taladro, apretándolo para evitar que se salga.
- Paso 5: Definir el cero pieza. Esto se logra moviendo la placa de manera manual y colocando una hoja de papel entre el taladro o fresa y la placa. Se baja la herramienta en el eje Z hasta que rose la hoja de tal forma que ya no se pueda mover. Marcamos esta parte como el cero en Z. Para el cero en X y Y hay que colocarnos en la esquina inferior izquierda y guardarlo manualmente.
- Paso 6: Habiendo introducido en una memoria los códigos generados y poniéndolo dentro de la máquina, generamos un **New Job** y seleccionamos el archivo que queremos que ejecute.
- Paso 7: Antes de darle iniciar hay que bajar la protección y luego iniciar. Iniciado el proceso siempre se puede parar y cambiar la velocidad con la que lo hace.

- Paso 8: Siempre el primer código que debe correrse es el de las pistas. Después se corren los códigos de las perforaciones repitiendo desde el paso 4.
- Paso 9: Cuando se termine de correr todos los códigos se detiene todo, se levanta la tapa, se quita la herramienta y se desbloquea la placa con todo y la base.



**Figura 3.40:** A) Pegar la placa fenólica con cinta doble cara sobre una placa de madera. B) Mover la base de la máquina manualmente. C) Colocar la placa sobre la base y apretarla. D) Sacar la herramienta y colocar la fresa o taladro. E) Encontrar el Cero Pieza con una hoja de papel. F) Generar un nuevo Job. G) Inicio del job en el ZMorph. H) Captura del fresado que genera las pistas en la placa.

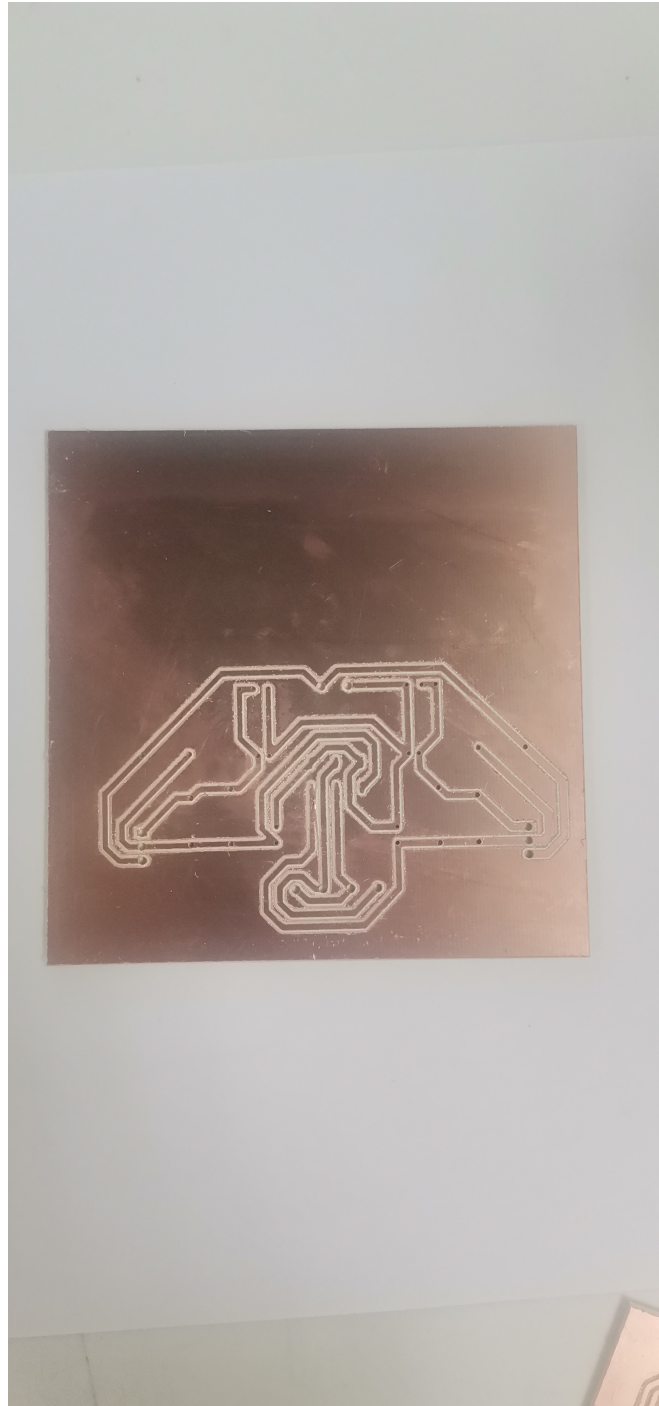
Ya habiendo cortado el circuito sobre la placa fenólica solo hay que despegarla de la base de madera usando un poco de tiner y limpiando el exceso de pegamento. El



### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

producto final se muestra en la Figura [3.41](#)



**Figura 3.41:** Foto de la placa terminada y despegada del multifuncional CNC.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

Con la placa y los componentes previamente comprados, lo único que falta es soldarlos. Esto se puede hacer de manera manual con un cautín. El producto final se muestra en la Figura [3.42](#)

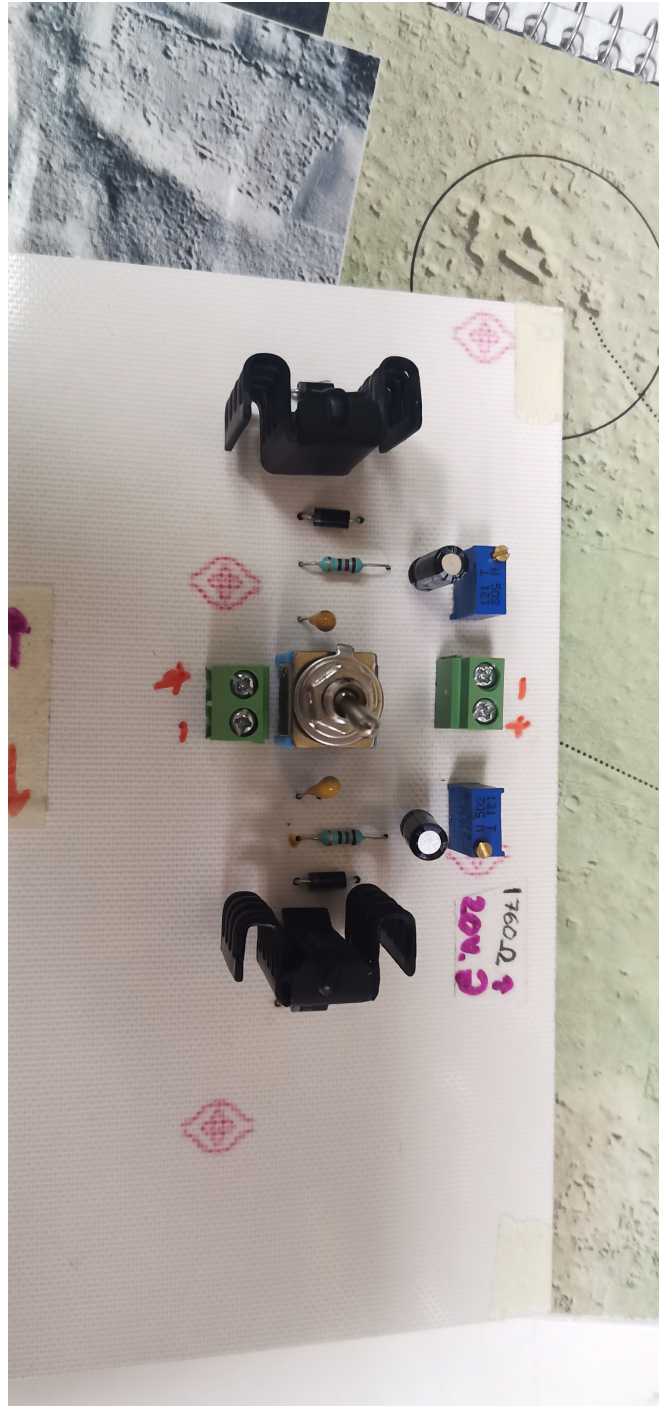


Figura 3.42: Foto del Circuito Final con los componentes ya soldados.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

#### 3.2.2. Instrumentación

El circuito de instrumentación consta de 3 partes. Una parte que permite dividir el voltaje en positivo, negativo y tierra y dos circuitos para cada celda de carga que se encargará de amplificar y filtrar la señal.

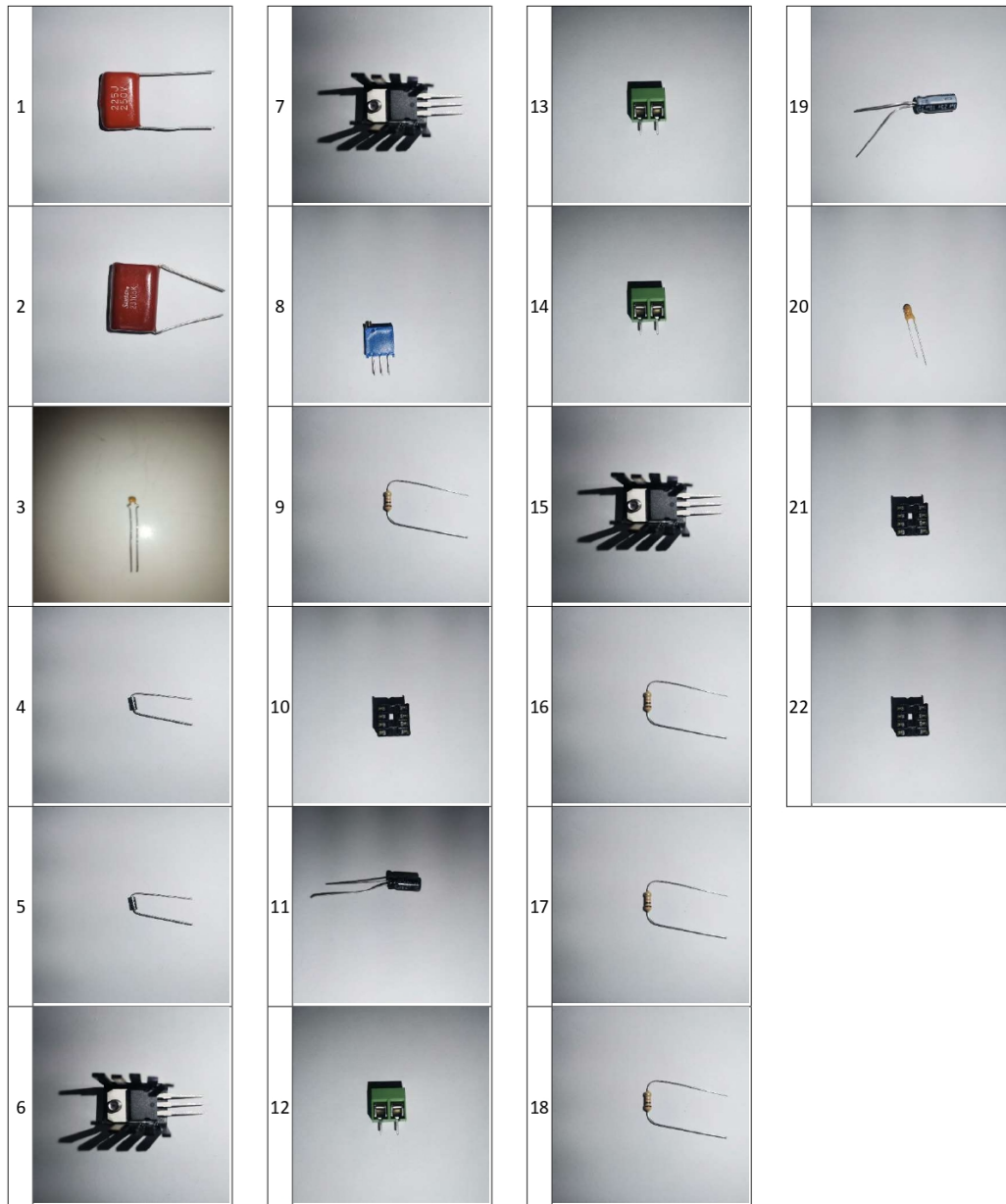
##### 3.2.2.1. Componentes electrónicos

Como se mencionó en el subcapítulo 3.2.1.1, hay que definir previamente los componentes a usar. Para este circuito los componentes son los mostrados en la 3.2

**Tabla 3.2:** Elementos del Circuito de Instrumentación

ID	Nombre	Indicador	Huella	Cantidad
1	2.2uF	C1,C12	CAP-TH.L23.0-W10.5-P20.00-D0.8	2
2	1uf Grande	C2,C11	CAP-TH.L17.0-W8.5-P15.00-D1.2-FD	2
3	0.1UF	C3,C4,C5,C6,C7,C8,C9,C10	CAP-TH.L10.0-W4.5-P7.50-D0.6	8
4	DIODE	D1,D2	DO-1N4148	2
5	1N4001-T	D3,D4	DO-41.BD2.4-L4.7-P8.70-D0.9-RD	2
6	TIP31C	Q1	TO-220-3.L10.0-W4.5-P2.54-T	1
7	TIP42C	Q2	TO-220-3.L10.0-W4.5-P2.54-T	1
8	3296W-1-103_C56237	R1,R2,R3,R4,R5	RES-ADJ-TH_3296W	5
9	1k	R6,R7,R8	AXIAL-0.5	3
10	LM741CN	U1	DIP-8.L9.8-W6.6-P2.54-LS7.6-BL	1
11	ECRIHYL220M	U2	CAP-TH.BD5.0-P2.00-D0.5-FD	1
12	KF301-5.0-2P	U3	CONN-TH.P5.00.KF301-5.0-2P	1
13	LM350T	U4	TO-220-3.L10.0-W4.5-P2.54-L	1
14	PNP200JR-52-0R1	U5	RES-TH.BD3.5-L9.0-P13.00-D0.5	1
15	4.7UF 100V 5X11	U6	CAP-TH.BD5.0-P2.00-D0.5-FD-1	1
16	33pF	U7	CAP-TH.L5.0-W3.5-P3.00-D0.7	1
17	AD620ANZ	U9,U22	DIP-8.L9.3-W6.4-P2.54-LS7.6-BL	2
18	47 ohms	U10,U21	RES-TH.BD3.5-L9.0-P13.00-D0.5	2
19	10 kohms	U11,U12,U19,U20	RES-TH.BD3.5-L9.0-P13.00-D0.5	4
20	TL081CP	U13,U14	PDIP-8.L9.3-W6.4-P2.54-LS7.6-BL	2
21	Entrada Celdas	U15,U18	CONN-TH.P5.00.KF301-5.0-2P	2
22	Multimetro	U16,U17	CONN-TH.P5.00.KF301-5.0-2P	2

Los componentes electrónicos reales utilizados son los mostrados en la Figura: 3.43.



**Figura 3.43:** Componentes utilizados para el circuito de instrumentación de las celdas de carga.

#### 3.2.2.2. Diagrama en EasyEDA

Las mismas indicaciones expresadas en el subcapítulo 3.2.1.2 se siguieron para generar las pistas en EasyEDA. El resultado final se puede ver en la Figura 3.44. Del lado izquierdo tenemos el circuito encargado de dividir el voltaje en positivo, negativo y neutro. Los circuitos que están en la parte central y derecha son para el acondicionamiento de la señal de cada celda de carga.

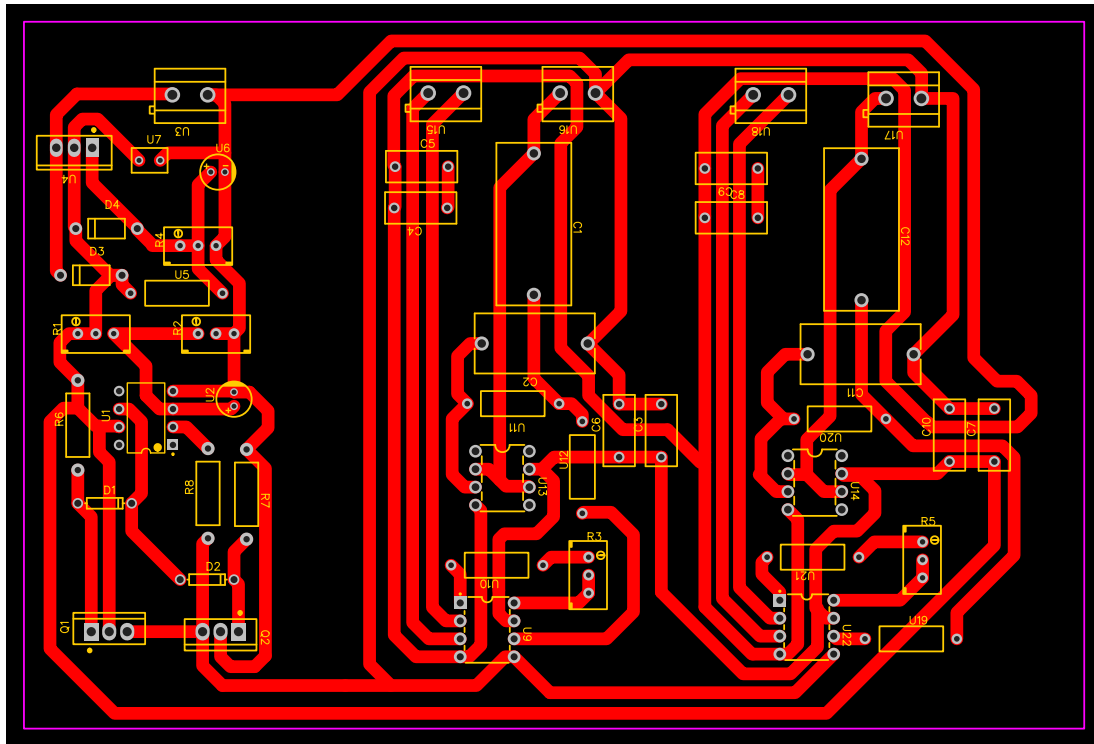
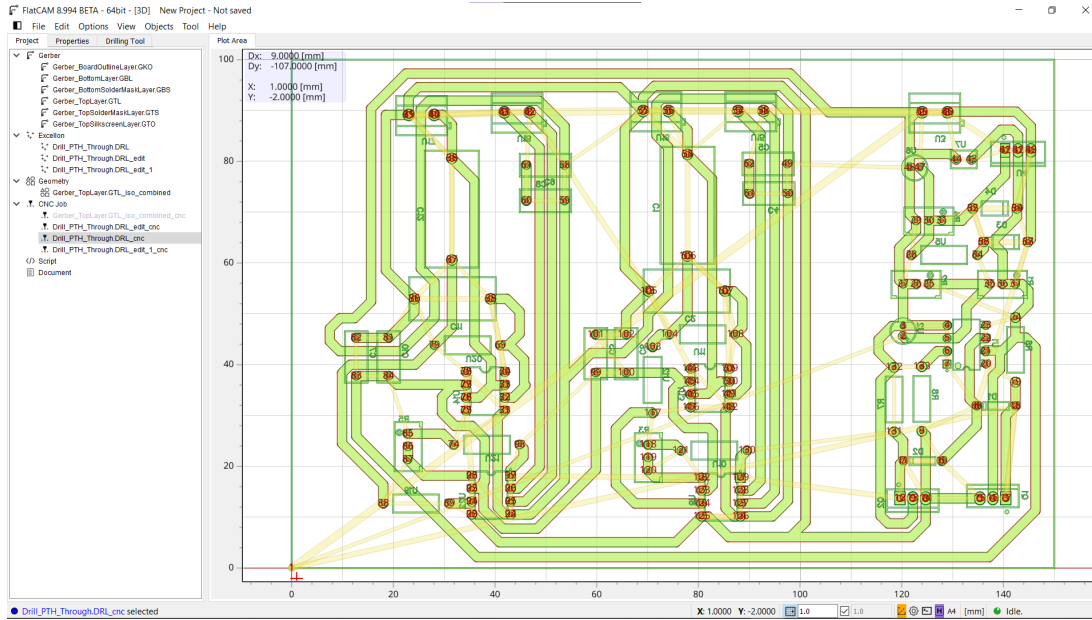


Figura 3.44

#### 3.2.2.3. Código G y manufactura

El proceso para construir el circuito es el mismo planteado en el subcapítulo 3.2.1.3. El resultado de cargar los archivos Gerber generados en EasyEDA en FlatCAM y generar los Objetos CNC para fresado y taladrado son los mostrados en la Figura 3.45



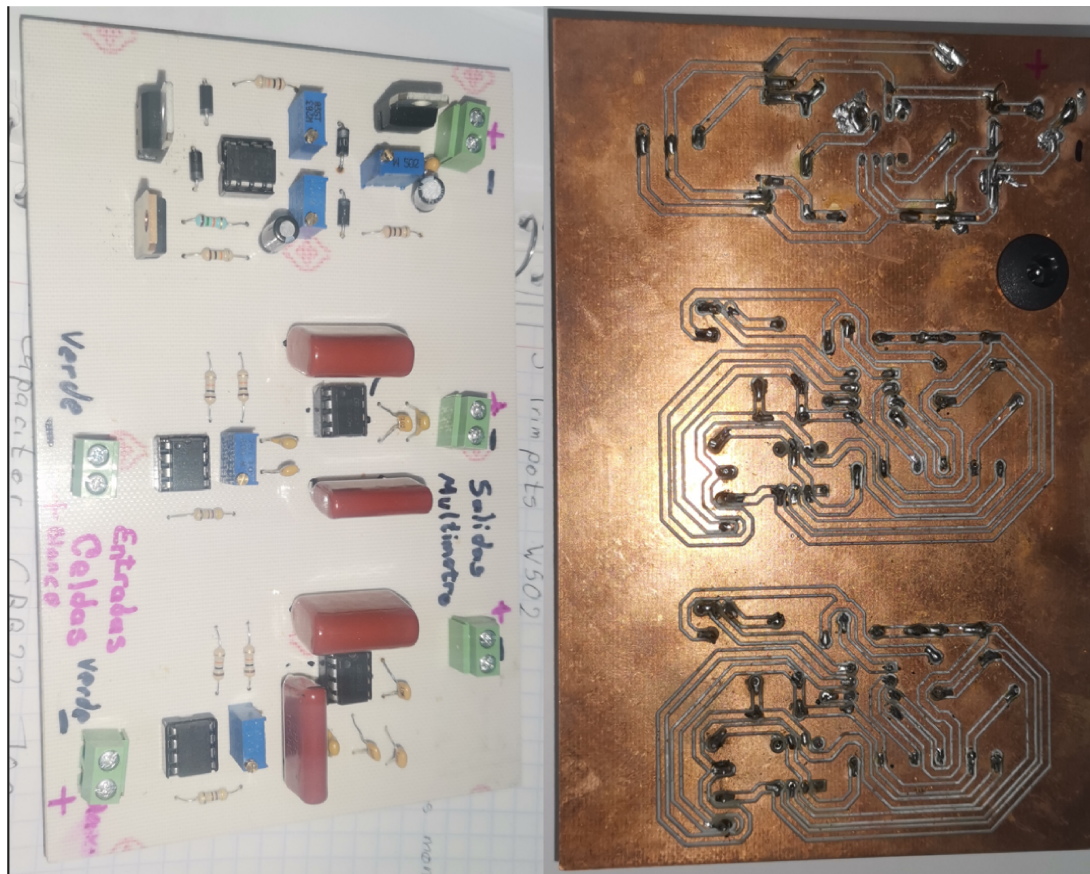
**Figura 3.45:** Resultado de la generación de Objetos CNC en FlatCAM para el circuito de instrumentación.

Se le hacen las mismas modificaciones al código como se explicó anteriormente y se procede a repetir los mismos pasos para la máquina de ZMorph. Cuando ya se tiene la placa solo se soldan los componentes electrónicos. El resultado final es el mostrado en la Figura 3.46



### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---



**Figura 3.46:** Fotografía del resultado de la placa de instrumentación. Lado derecho: Vista superior donde se visualizan los componentes. Lado izquierdo: Vista inferior donde se ve la zona soldada.

#### 3.2.3. Calibración de la celda

Para la parte de la calibración se probaron ambas celdas de carga con recipientes llenos de esperas metálicas, donde cada recipiente pesaba aproximadamente 1 kg. Para tener un control más acertado sobre el peso de cada recipiente, se pesaron en una báscula previo a la calibración. También se utilizó una canastilla que se acopla a la celda de carga que también pesa aproximadamente 1 kg. Los pesos resultantes son los mostrados en la tabla [3.3](#)

**Tabla 3.3:** Masas reales de cada recipiente

Elemento	Número	Masa en miligramos
Canastilla	1	1037.35
Pesa2	2	1001.71
Pesa3	3	1002.27
Pesa4	4	1004.54
Pesa5	5	1001.8
Pesa6	6	1001.26
Pesa7	7	1000.94
Pesa8	8	1001.73
Pesa9	9	1002.44
Pesa10	10	1001.97

De esta forma se acopló la canastilla a las celdas de carga y una por una se fueron agregando las masas. Las celdas estaban conectadas al circuito de instrumentación, que a su vez estaba conectada al módulo de adquisición de datos de NI. Con un software en Labview diseñado para la calibración se pudieron obtener los valores equivalentes en fuerza. De cada celda se obtuvo un archivo de este programa con sus fuerzas por cada pesa colocada. Con los valores de la tabla y los valores equivalentes de fuerza en cada celda se procedió a hacer uso del software de Mathematica para poder sacar el modelo matemático que representa en comportamiento de cada celda. Este modelo es de vital importancia ya que se ingresará al programa final del probador biaxial y permitirá ver la carga que se está aplicando en cada eje.

Las gráficas obtenidas del comportamiento son las mostradas en las Figuras 3.47 y 3.47.

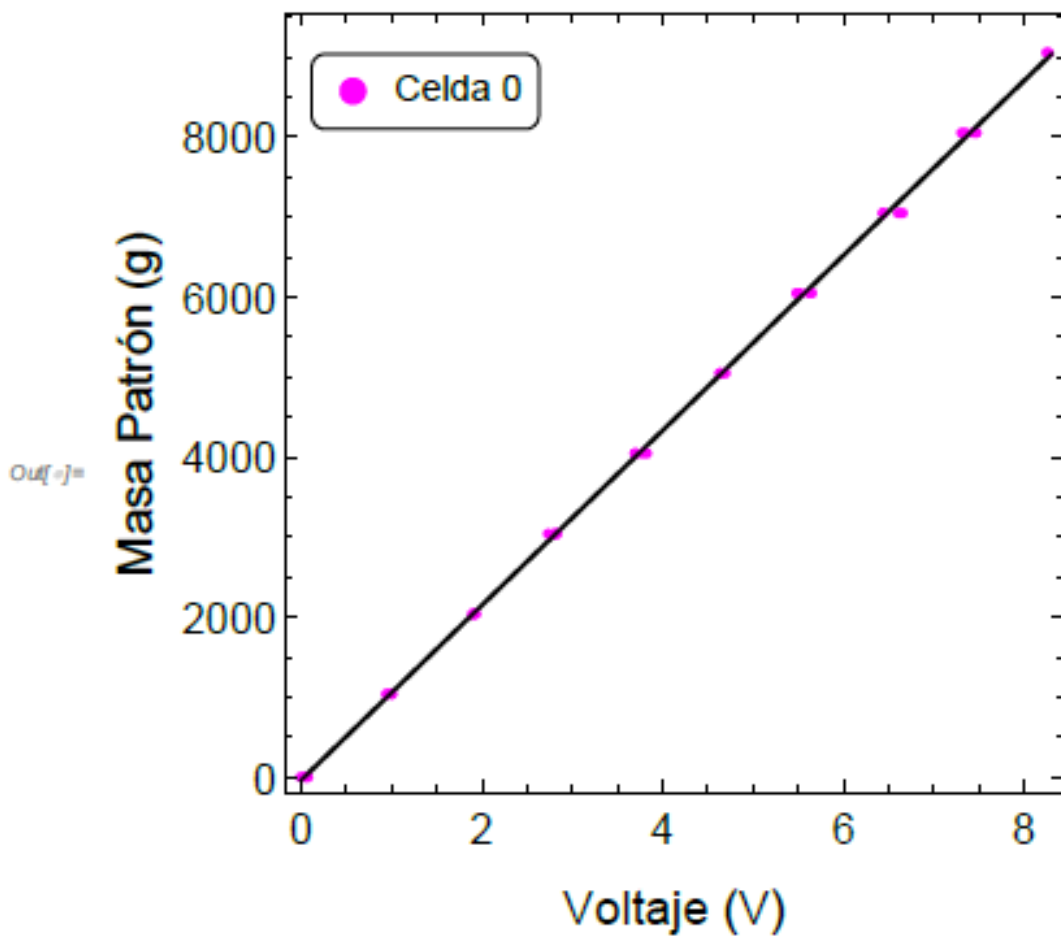
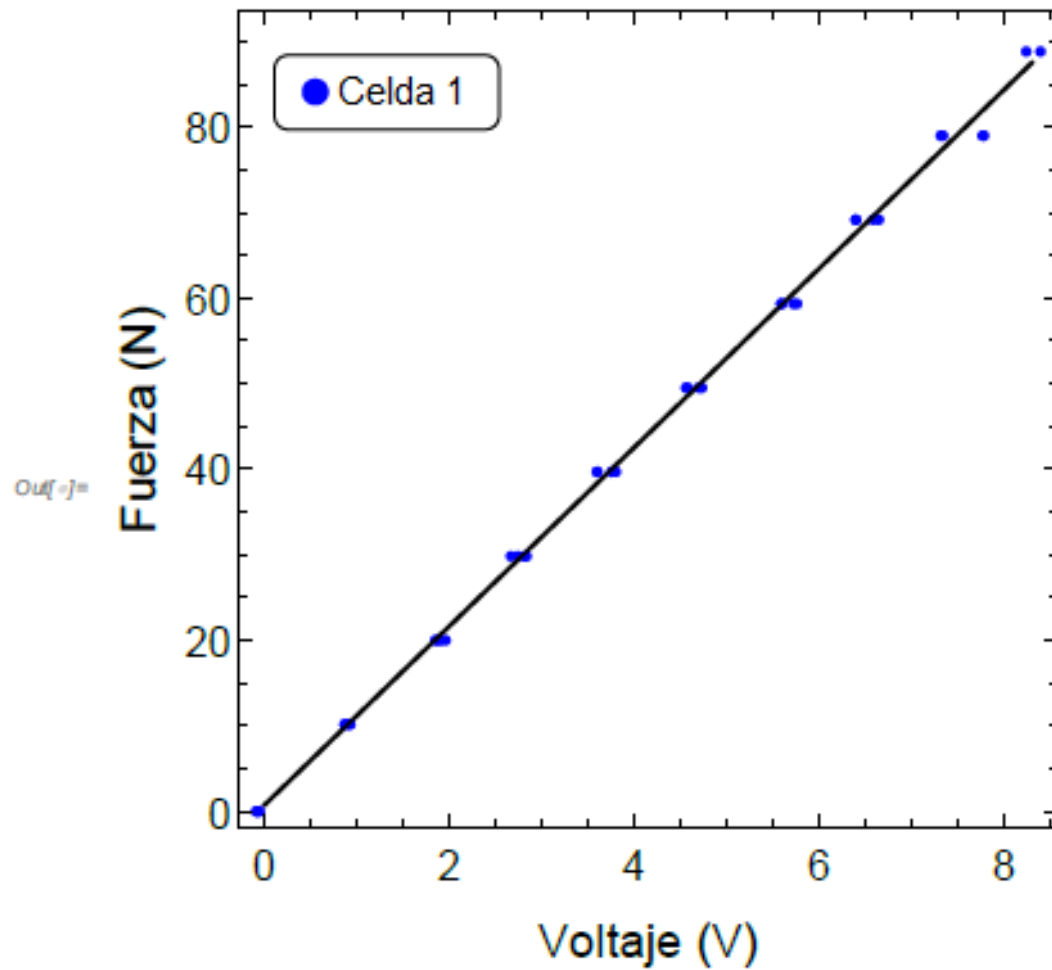


Figura 3.47: Gráfica del comportamiento de la celda 0.



**Figura 3.48:** Gráfica del comportamiento de la celda 1.

Los modelos de cada celda son:

- Celda 0:  $-0.37179 + 10.7223x$
- Celda 1:  $0.778796 + 10.4475x$

Para mayor información sobre el procedimiento para obtener el modelo remitirse al anexo [3.3.4.2](#).

### 3.3. Desarrollo de Interfaz Gráfica

Como bien se mencionó previamente, el desarrollo de la interfaz gráfica, donde el usuario podrá interactuar con todos los elementos que conforman al probador biaxial, se desarrolló en el software de Labview. Lo anterior debido a que gran parte del código, o se tomó de investigaciones previas solo para adecuarlo a las necesidades, o porque el fabricante de algunos componentes ya integra un pequeño software para manipularlo. Labview, aunque es un software de pago, tiene la cualidad de poder generar un programa a través de bloques y lógica y no por un lenguaje de programación. Esto lo hace más intuitivo y fácil de manejar. Otra característica es que tiene la capacidad de detectar diversos elementos externos, solo descargando la librería adecuada.

Para el caso de la cámara y los motores, el software ya lo otorgaba el fabricante. Solo fue necesario descargarlo y agarrar lo que fuera necesario. Para las celdas de carga, este se recuperó de un software hecho previamente por generaciones pasadas y solo se adecuó a las necesidades del probador.

A continuación se hará una descripción por etapas de la prueba. Empezando con las entradas, es aquí donde se inicializan todos los componentes para que el programa lo reconozca. En la parte de configuración definimos los parámetros de cada elemento para que trabajen como nosotros lo requerimos. En la ejecución de la prueba es las acciones que se llevan a cabo al momento de iniciar el experimento. Por último, las salidas son los resultados de cada sensor y la manera en cómo se visualiza. Recordemos que Labview tiene dos vistas, la parte de diagrama de bloques, donde se configura todo el programa y el panel frontal, que es el cómo va quedando la interfaz gráfica.

#### 3.3.1. Entradas

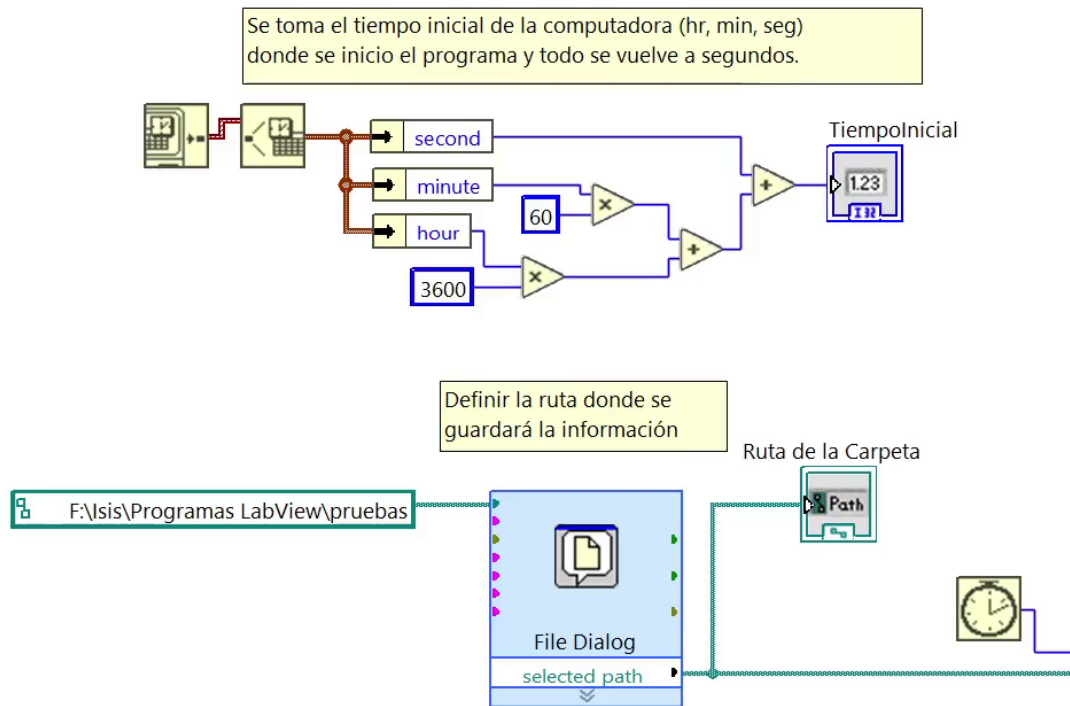
##### 3.3.1.1. Diagrama de Bloques

Cuando se corre el programa por primera vez existen dos elementos que deben definirse por el usuario antes de que el programa esté listo para usarse. En la Figura 3.49 y 3.50 podemos verlos.

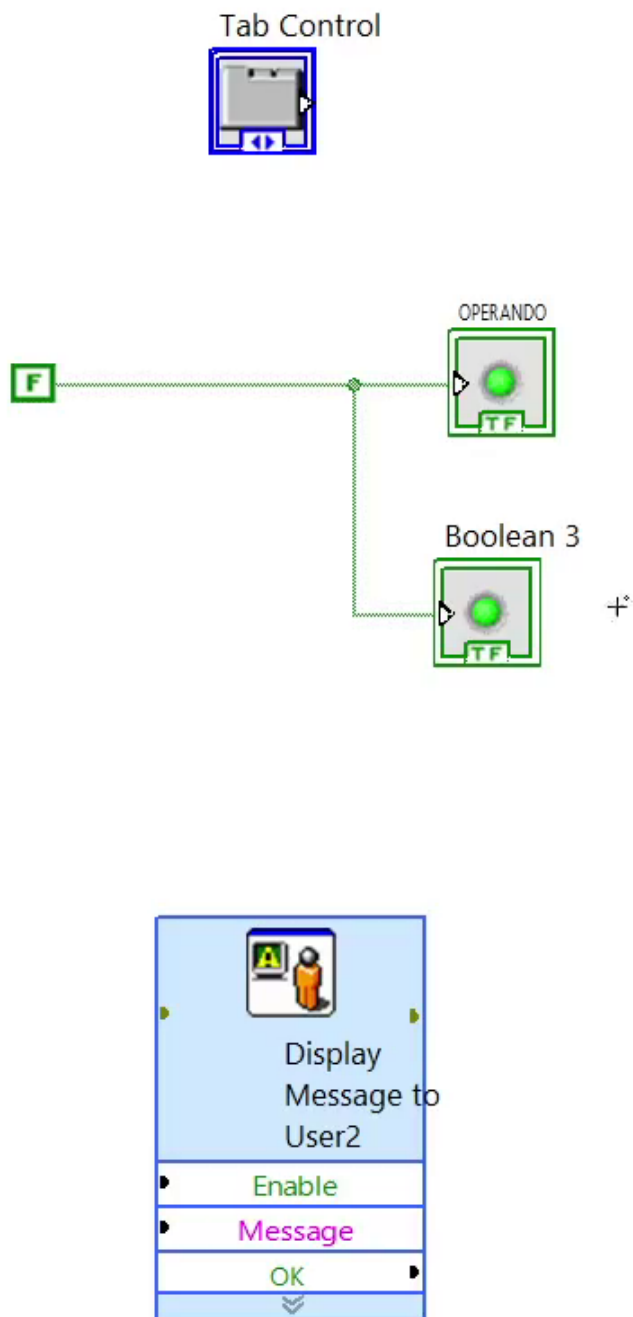
En la Figura 3.49 en la parte superior se define un reloj que empieza a correr en el momento que se inicializa el programa. Aquí el usuario no interviene y no se visualiza el tiempo, ya que solo sirve de referencia para calcular el tiempo cuando inicia el experimento. En la parte inferior se encuentran los bloques para pedirle al usuario que defina una ruta donde guardar la información generada. También está predeterminada una ruta que puede cambiarse.

En la Figura 3.50, hasta abajo existe un bloque que arroja un mensaje al usuario. El mensaje es para que se cerciore que todo está bien conectado antes de continuar.

El usuario debe aceptar este mensaje para continuar. En la parte de en medio hay dos señalamientos que en la interfaz final se encenderán, indicando al usuario que ya puede interactuar con el resto de los elementos.



**Figura 3.49:** Primer reloj del programa y ruta donde guarda el usuario la información.



**Figura 3.50:** Elementos que marcan el inicio del programa y que el usuario ya puede empezar a usar.

Cuando se inicia el programa, existen diferentes elementos que sirven para reconocer los elementos externos. En la Figura 3.51 se muestran los bloques para reconocer los motores del probador. Por cada motor podemos destacar los bloques del lado izquierdo para reconocer por número serial el motor e inicializarlos. Del lado derecho se les asignan parámetros de velocidad predeterminados, que pueden cambiarse después de iniciado el programa por el usuario.

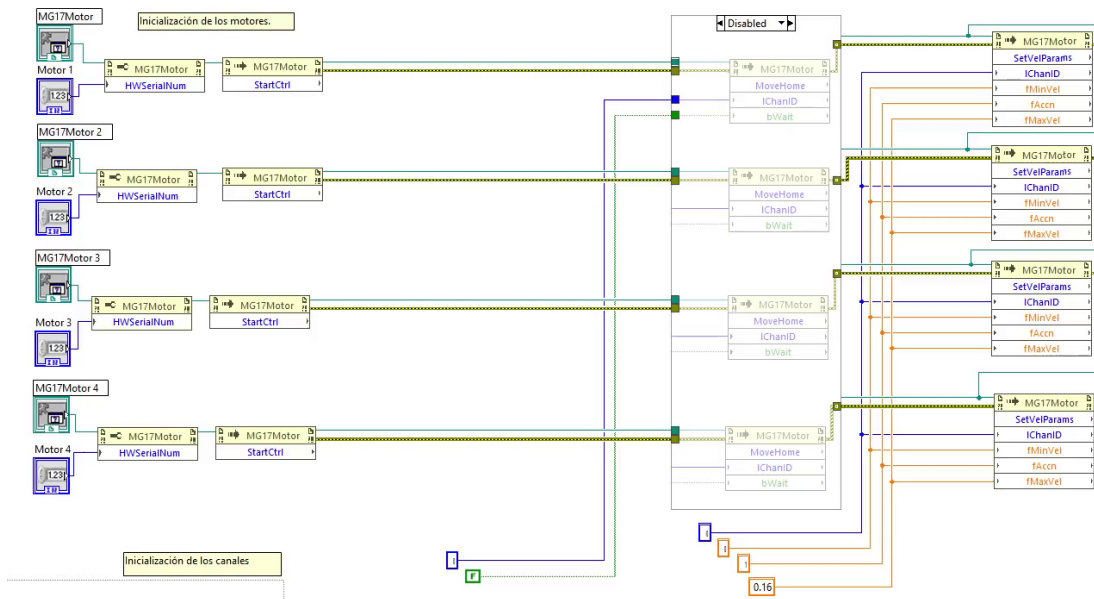
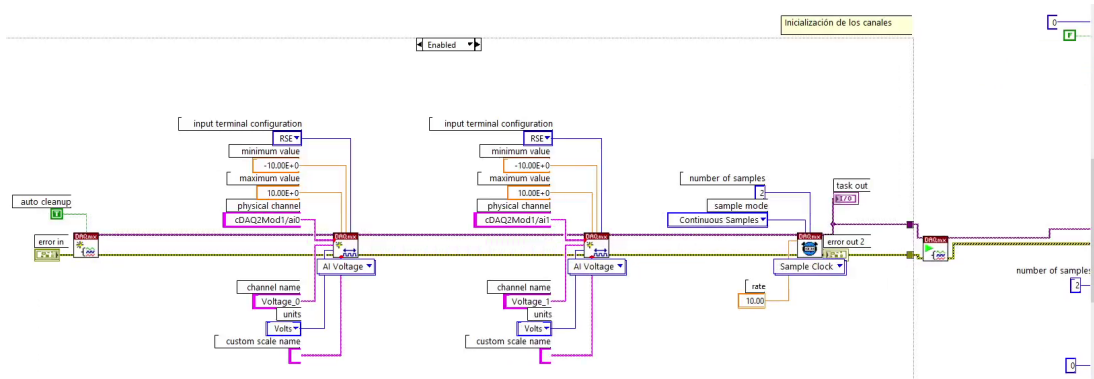


Figura 3.51: Bloques para reconocer los motores.

Las celdas de carga requieren de la definición de parámetros como el rango de voltaje, el nombre de la entrada del módulo de adquisición de datos de NI y un reloj para muestrear la información. En la Figura 3.52 podemos ver un primer bloque para inicializar esta parte seguido de un par de bloques para definir los parámetros de cada celda y continuando con un bloque para definir un reloj para el muestreo.

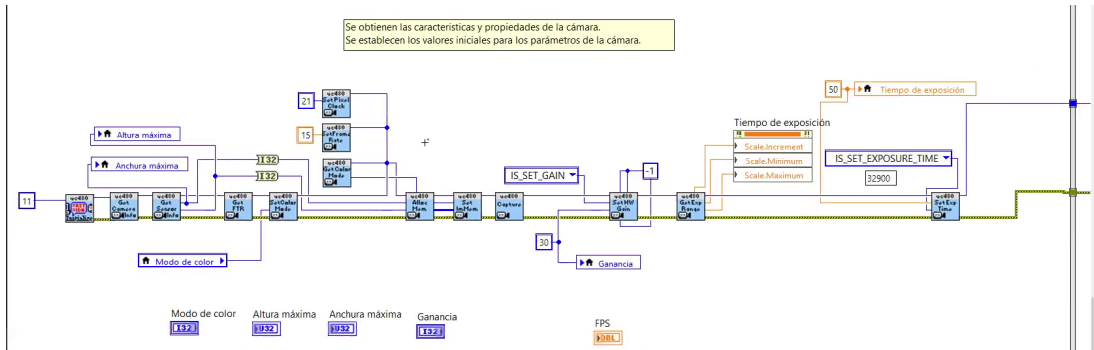


### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



**Figura 3.52:** Elementos de configuración inicial de las celdas de carga. Estos bloques permiten reconocer e inicializar las celdas de carga.

Para inicializar la cámara es necesario definir ciertos parámetros, entre los más importantes son el modo de color, altura máxima, anchura máxima y la ganancia. Todos estos el programa los obtiene de la cámara y con ellos los utiliza para mostrar la Figura obtenida en la interfaz gráfica.



**Figura 3.53:** Elementos de configuración inicial de la cámara. Estos bloques permiten reconocer e inicializar la cámara.

#### 3.3.1.2. Panel Frontal

En la Figura 3.54 se muestra la primera pantalla que verá el usuario cuando el programa haya terminado de cargar. Antes de cargar aparecerán dos ventanas. Una para definir la ruta, como se muestra en la Figura 3.56 y otra recordar al usuario que todo debe de estar conectado de manera correcta, como se muestra en la Figura 3.55.



Figura 3.54: Interfaz gráfica principal.

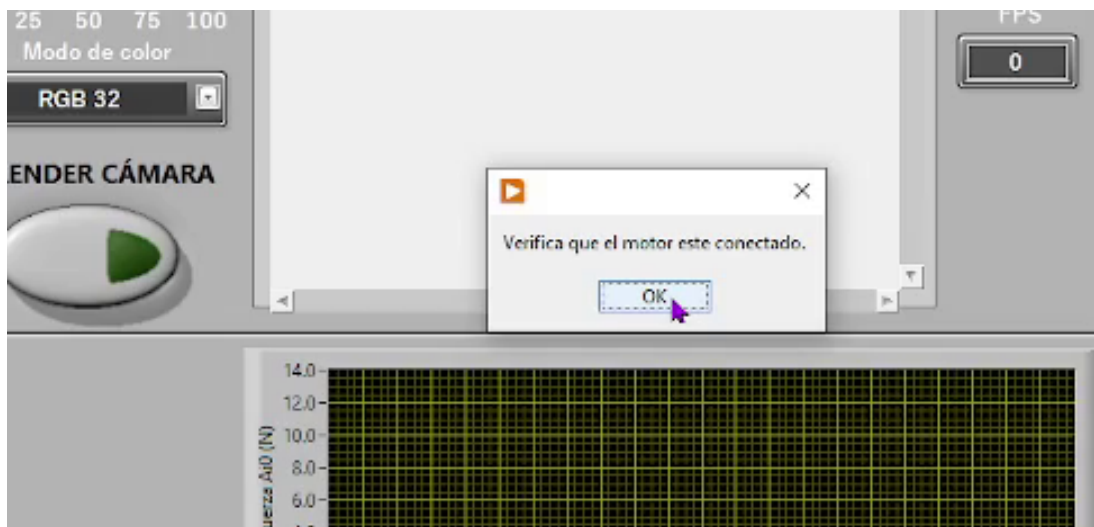


Figura 3.55: Mensaje para el usuario cuando se ejecuta el programa.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

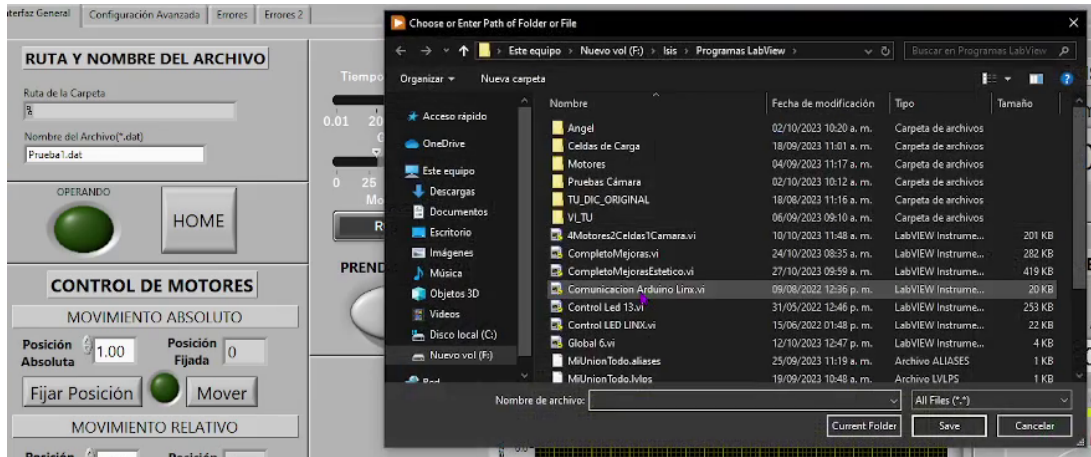
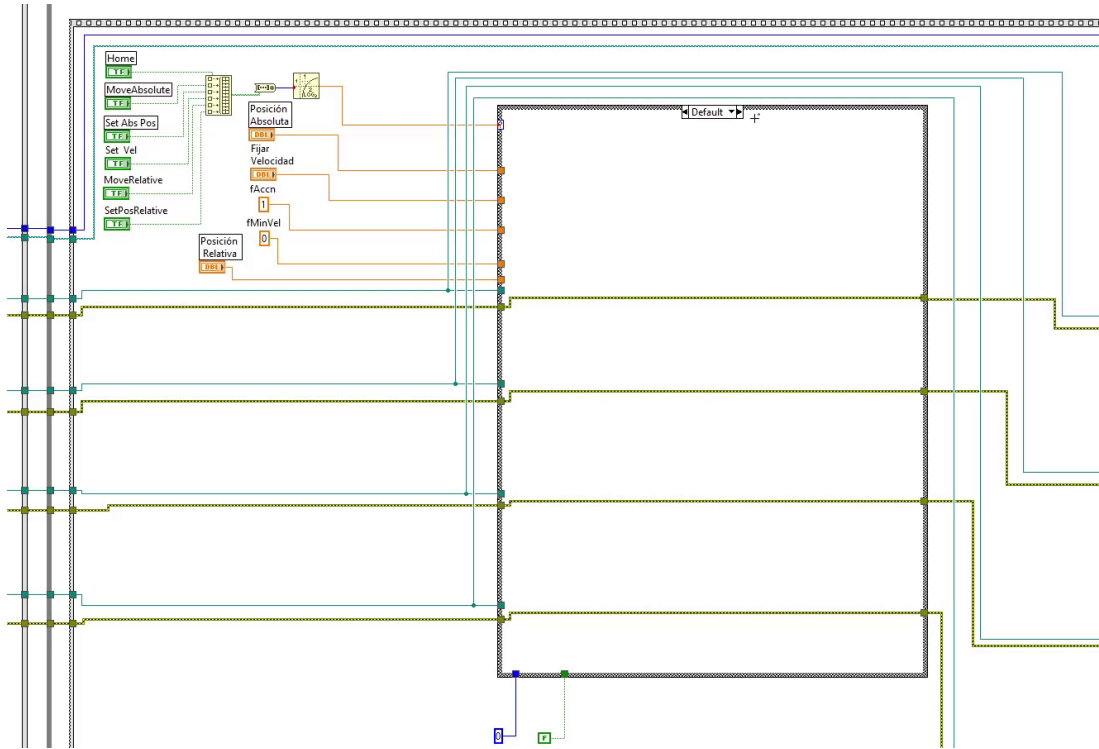


Figura 3.56: Ventana para que el usuario defina una ruta.

### 3.3.2. Parámetros de Configuración

#### 3.3.2.1. Diagrama de Bloques

Existe una primera parte en la interfaz principal dedicada exclusivamente al movimiento de los motores. Todos los motores se moverán de manera simultánea dependiendo de los valores marcados. En la Figura 3.57 se muestra la conexión de los botones para mover los botones. Estos se conectan a un bloque que los detecta y les asigna un valor binario por posición. Por ejemplo, el primer botón tiene el valor de 1, el segundo de 10, el tercero de 100 y así sucesivamente. Si convertimos estos números binarios a números decimales obtendríamos 1,2,4,8,16 y así sucesivamente. Para obtener números consecutivos 1,2,3,... se colocó un bloque que saca el logaritmo de base 2. De esta manera para cada acción se le asigna un valor consecutivo del menú, sin brincarse números.

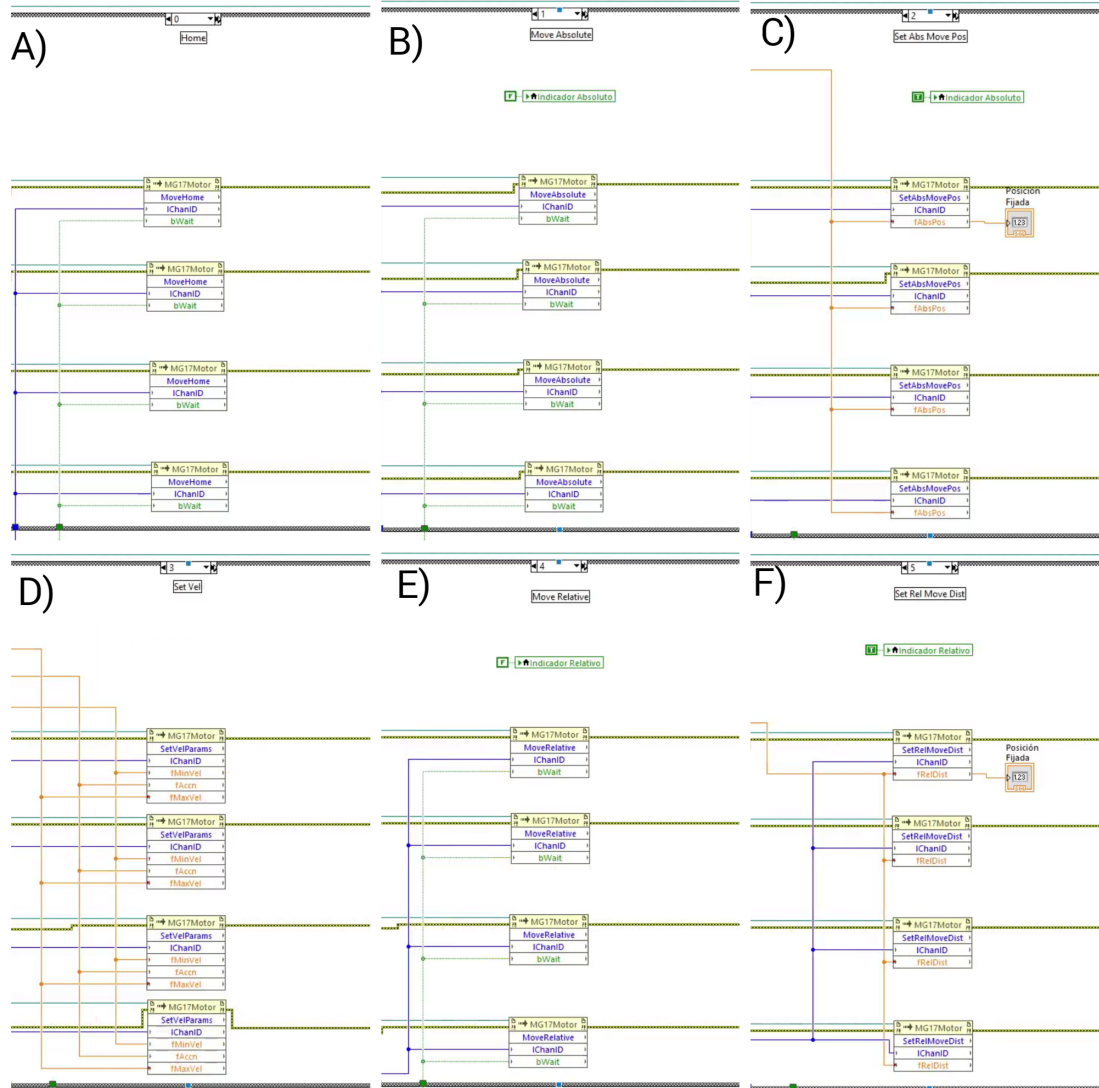


**Figura 3.57:** Conexión de los botones para controlar los motores.

Las diferentes acciones que se pueden hacer con los motores están definidas en la Figura 3.58. En resumen, existen 3 acciones:

- Mover los motores a Home: Mueve los motores a una posición de inicio ya pre-programada en los motores. Siempre que se inicie el programa esta es una de las primeras acciones que deben de hacerse antes de moverlos a otra posición.
- Mover los motores de manera absoluta: A partir de una posición origen (que sería la posición de home), los motores se mueven para estar en el lugar marcado. Antes de moverlos primero se debe de definir cuanto debe de moverse con el Set Absolute.
- Mover los motores de manera relativa: A partir de la posición en la que se encuentren actualmente los motores, pueden moverse cierta cantidad hacia adelante o hacia atrás. Igual que en el caso del absoluto, primero debe de definirse cuanto se moverá antes de moverlos.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



**Figura 3.58:** Diferentes acciones para los motores. A) Mover los motores a Home. B) Mover los motores de manera absoluta desde la referencia del inicio. C) Definir la posición absoluta al cual se moverá. D) Definir la velocidad de movimiento. E) Mover los motores de manera relativa a partir de la posición en la que se encuentran. F) Definir la posición relativa.

Existe otra etapa en la configuración de los motores asignada para una parte avanzada. Aquí el usuario puede mover los motores y asignar esa posición como posición inicial. Esto sirve ya que para el experimento necesitamos medir la posición que va

tomando el motor desde que esta la probeta puesta hasta que se rompe. Así que la posición de los motores con la probeta es la posición inicial. Esto se puede apreciar en la Figura 3.59 para definir la posición para cada motor controlado por un botón.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

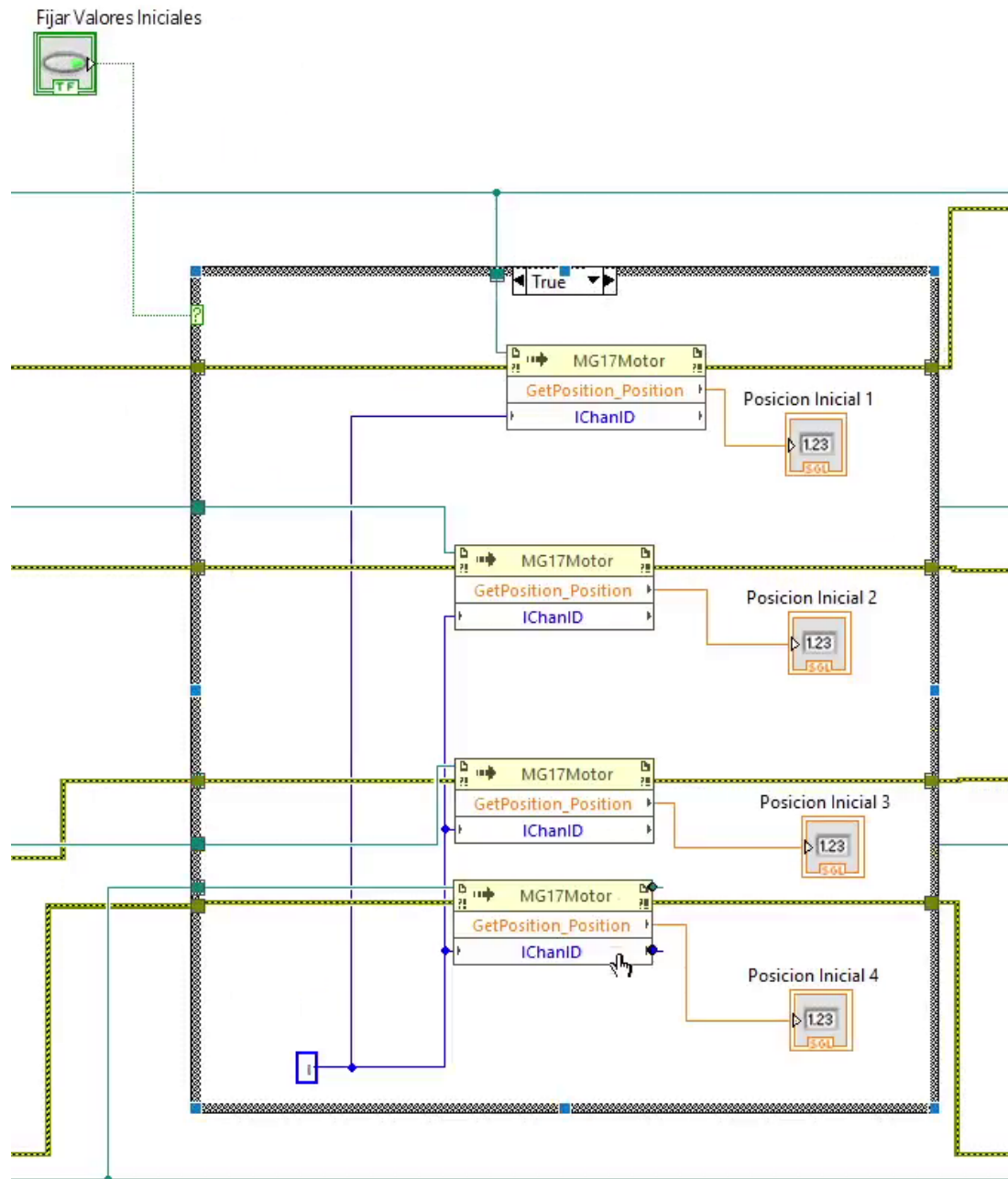
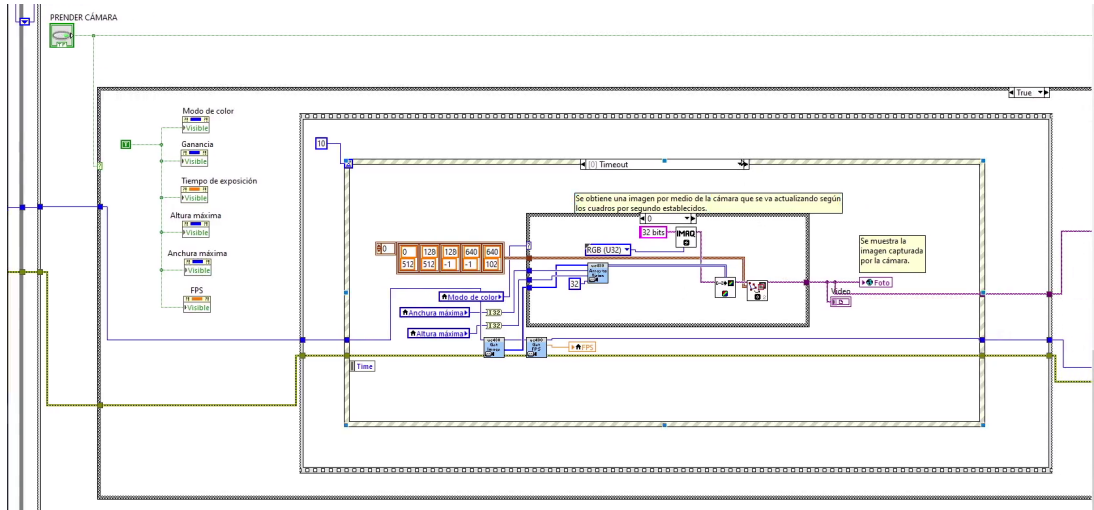


Figura 3.59: Asignación de posición inicial para los motores.

Cuando iniciamos el programa, este reconocerá la cámara pero para visualizar lo que detecta es necesario encenderlo con un botón, el cuál entrará en una serie de bloques que permiten definir parámetros necesarios para visualizarlo. En la Figura 3.60 podemos ver los bloques necesarios para visualizar la imagen.

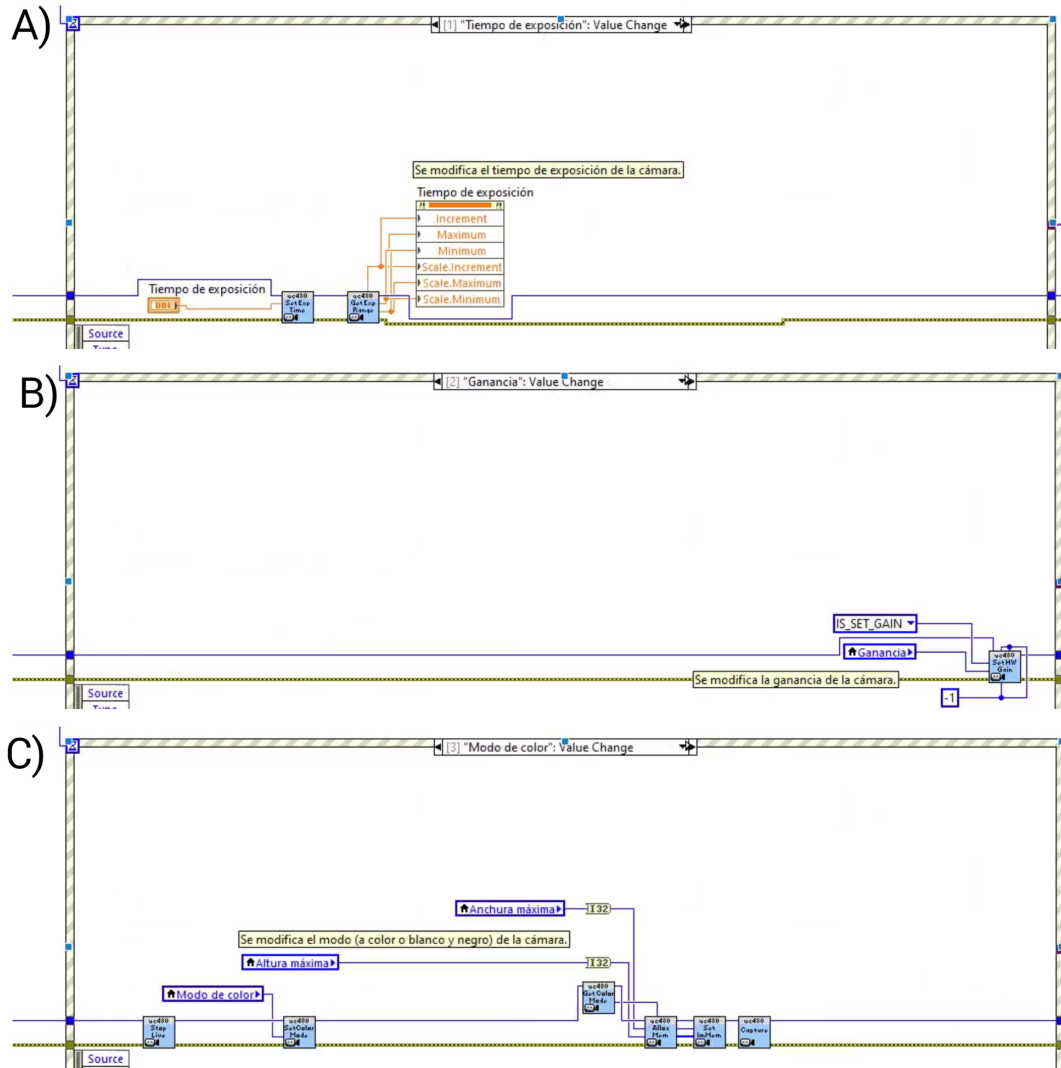


**Figura 3.60:** Configuración de bloques para visualizar la imagen de la cámara.

Todas las propiedades necesarias para visualizar una Figura como salida de la cámara están acomodadas en un bloque en serie. Esto para ordenar por diferentes propiedades la ruta que necesita definirse. En la Figura 3.61 podemos ver todas las configuraciones para la Figura.



### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



**Figura 3.61:** Diferentes etapas para reconocer la imagen de la cámara. A) Tiempo de exposición. B) Ganancia. C) Modo de color.

Existe un segundo reloj dentro de esta etapa previa a la ejecución de la prueba. Aquí se resta el primer reloj para comenzar con un tiempo justo, evitando desfases al momento de que el programa se carga, como se muestra en la Figura 3.62

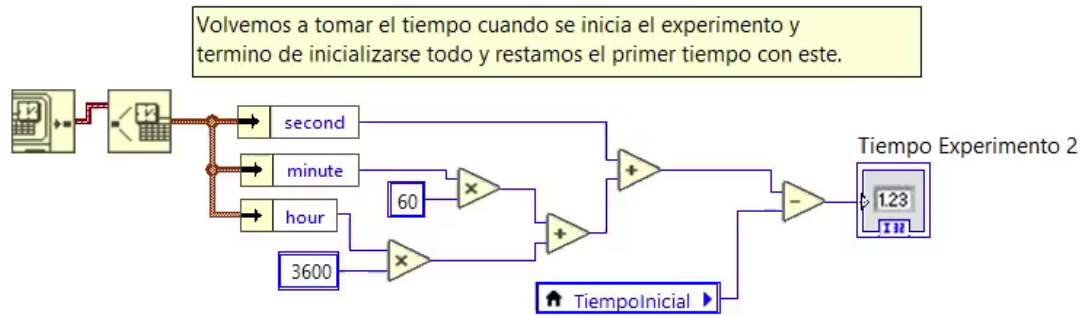


Figura 3.62: Reloj que empieza a ejecutar en las pruebas.

Tenemos otra parte donde el usuario marca el nombre del archivo donde se guardará la información obtenida de la prueba, mostrada en la Figura 3.63

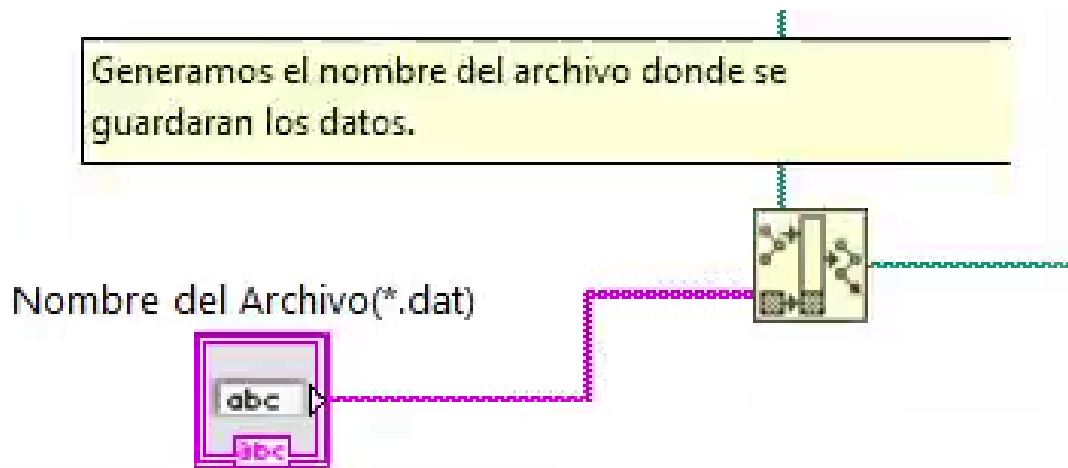


Figura 3.63: Bloques para generar un nombre al archivo y guardarlo.

Para cada motor se colocan tres bloques para obtener la aceleración, velocidad y posición y junto con otros bloques para dar formato a la información, se acomodan para mandarlos como salida cuando se inicia el experimento. Esto se muestra en la Figura 3.64

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

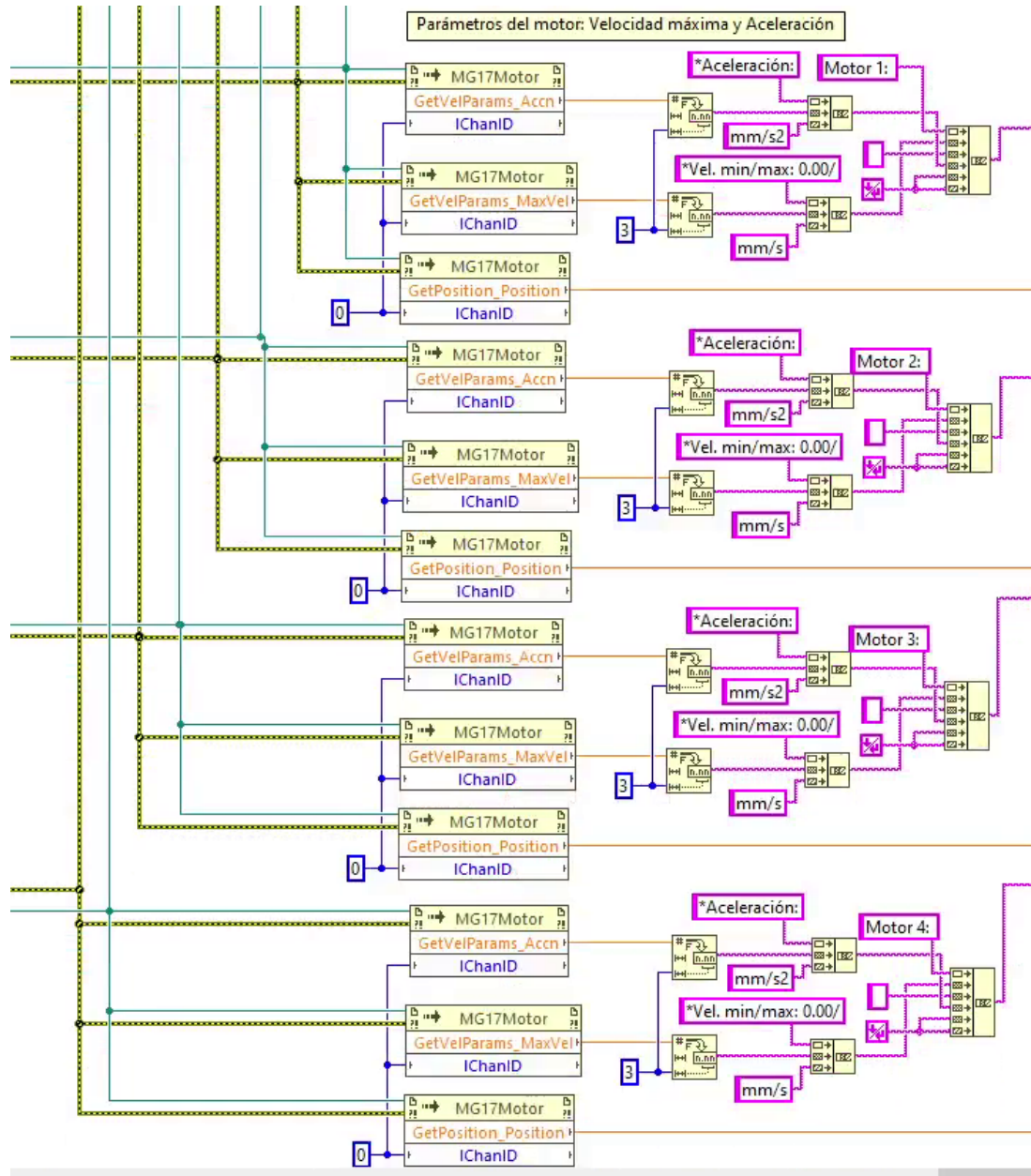


Figura 3.64: Bloques para obtener información de los motores y obtenerla como salida.

Para las celdas de carga marcamos un bloque para dar lectura de manera analógica y otros bloques para obtener la derivada y luego el promedio. Esto para obtener una

señal lo más estable posible. En la Figura 3.65 se puede apreciar lo descrito.

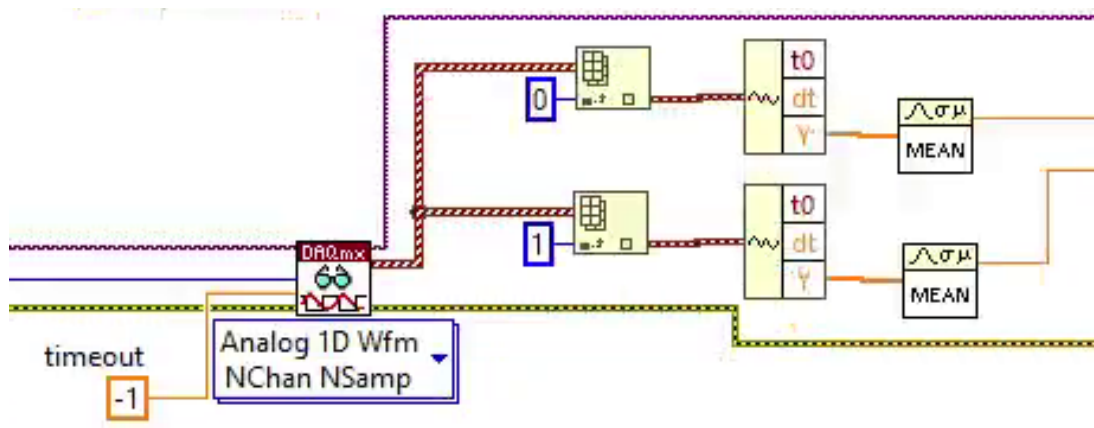


Figura 3.65: Bloques para leer la señal de las celdas de carga.

### 3.3.2.2. Panel Frontal

Esta interfaz se encuentra en la pestaña de avanzada. Aquí el usuario define la posición de los motores para considerarla como inicial. Los valores mostrados están calculados para las probetas cruciformes hechas en el laboratorio. El propósito es ir mover los motores a esas posiciones para anclar la probeta a las mordazas y darle clic al botón de Fijar Valores Iniciales para que empiece a contar el movimiento desde esas posiciones.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



Figura 3.66: Interfaz para la configuración de la posición de los motores.

### 3.3.3. Ejecución de la Prueba

#### 3.3.3.1. Diagrama de Bloques

Para iniciar una prueba existe un botón, que al presionarlo permitirá la ejecución de diversas acciones para cada elemento del probador. Es importante resaltar que antes de presionar este botón hay que marcar una posición relativa, presionar este botón y luego darle en mover de forma relativa. La posición marcada debe ser suficiente para que la probeta llegue al fallo. El botón se visualiza en la Figura 3.67

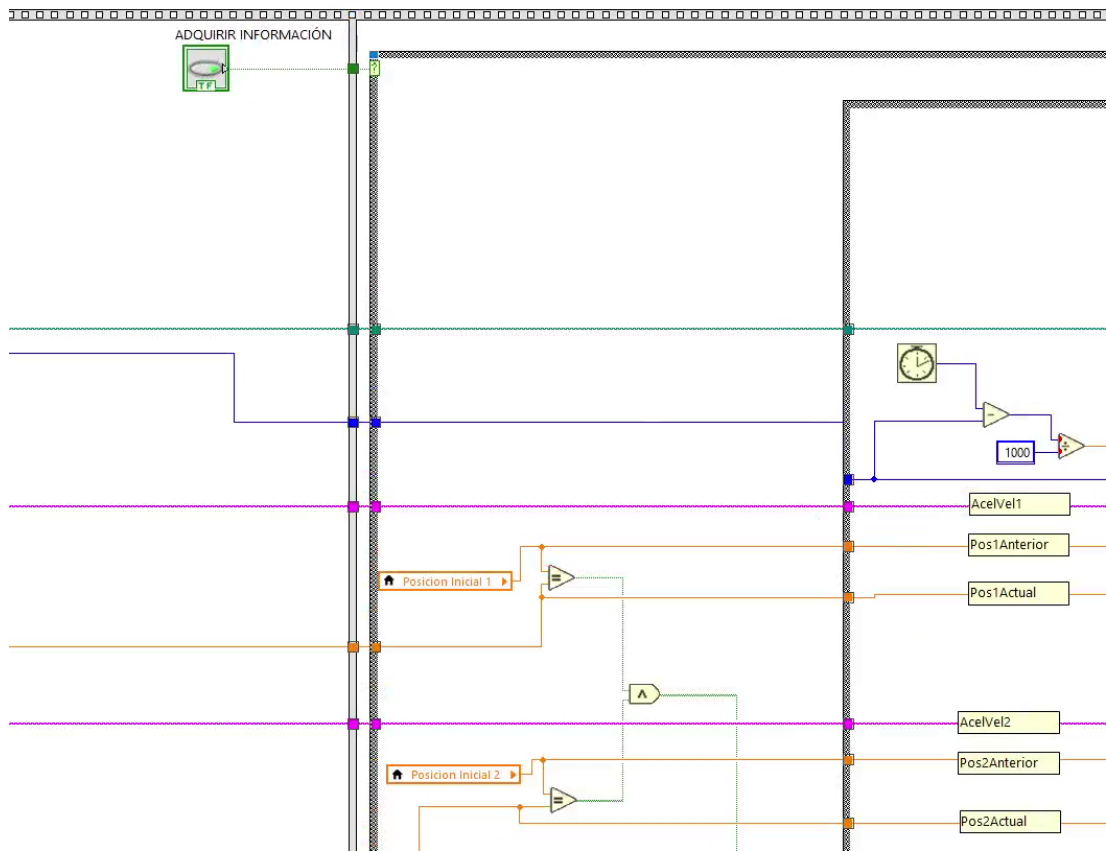
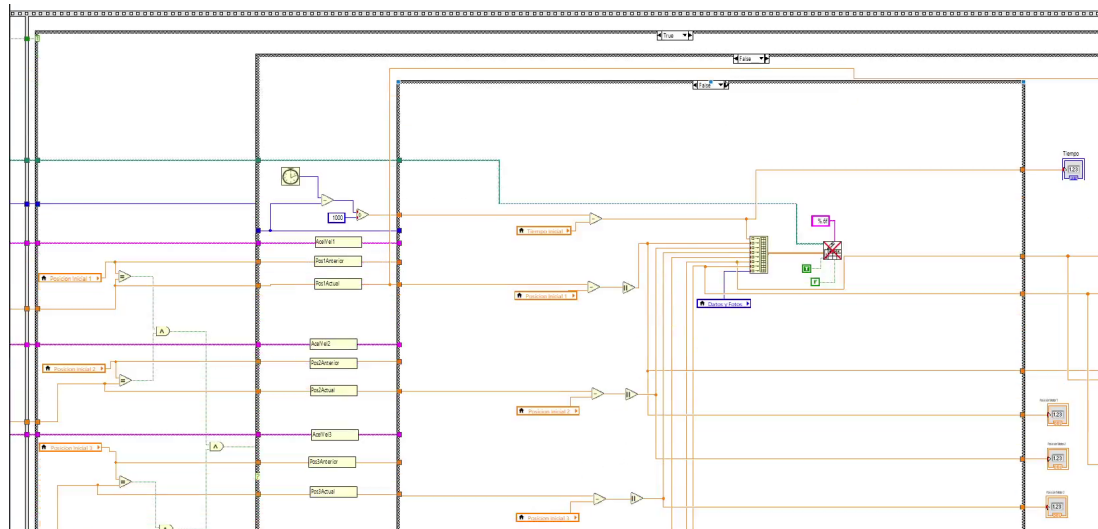


Figura 3.67: Botón que inicializa la prueba.

Mientras la prueba no inicialice, la información solo se arrojará como salida en indicadores de la interfaz. Esto se puede ver en la Figura 3.70.

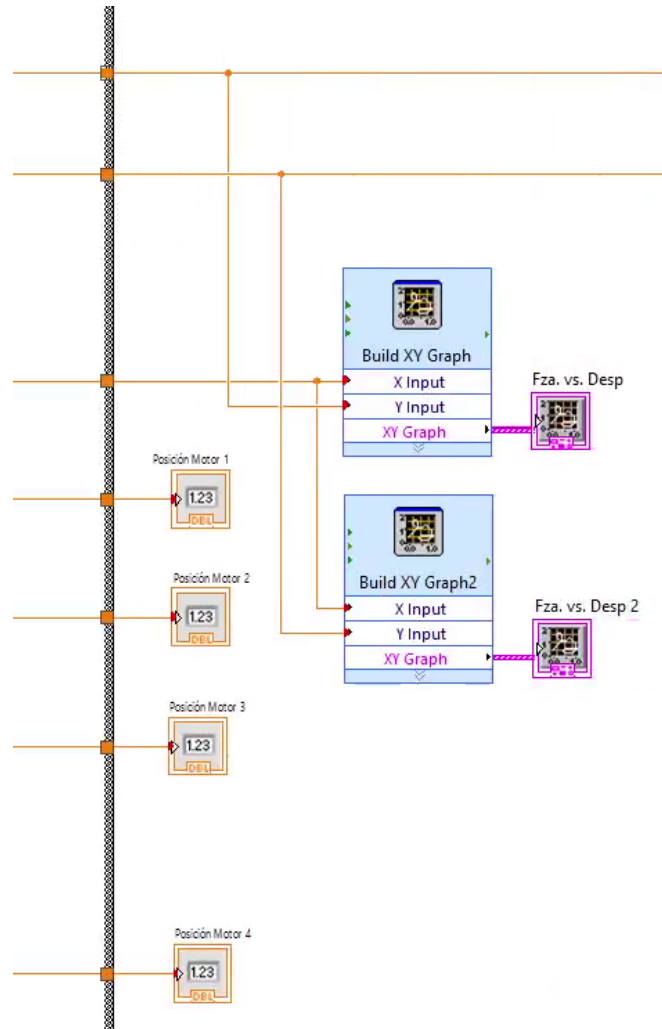
### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---



**Figura 3.68:** Configuración antes de la prueba.

Para visualizar la información de la posición de los motores y de la fuerza (que es obtenida de las celdas de carga) se utilizan indicadores numéricos y gráficos, mostrados en la Figura 3.69

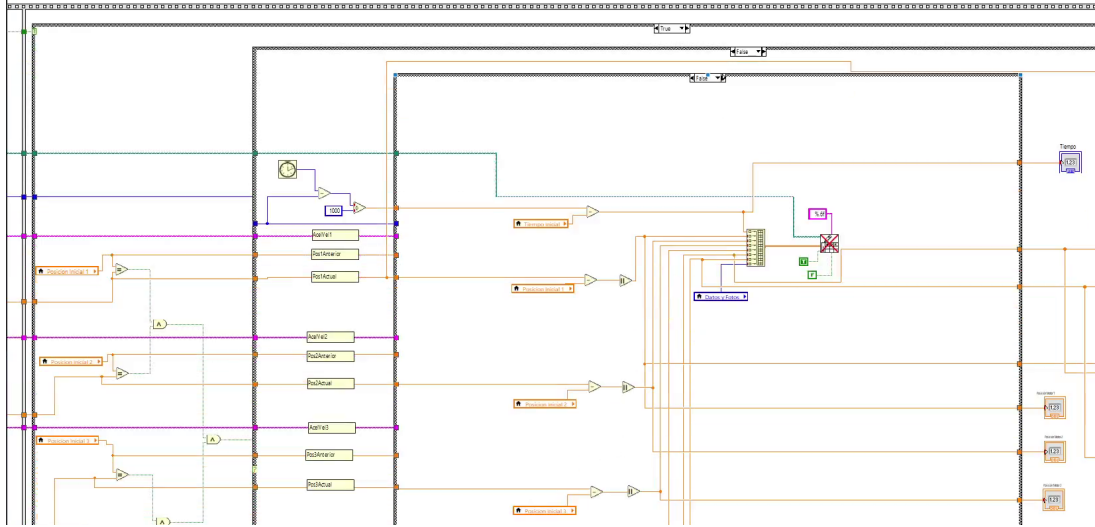


**Figura 3.69:** Indicadores que muestran la información de las celdas y los motores, tanto numérica como gráficamente.

Cuando se inicializa la prueba, cambia la configuración para poder guardar toda la información. Desde un reloj extra para marcar el inicio del experimento que aumenta aproximadamente cada 0.3 segundos, hasta la posición de los motores, la fuerza que las celdas de carga registran y un número asociado a una fotografía guardada. Todo lo anterior se muestra en la Figura 3.70

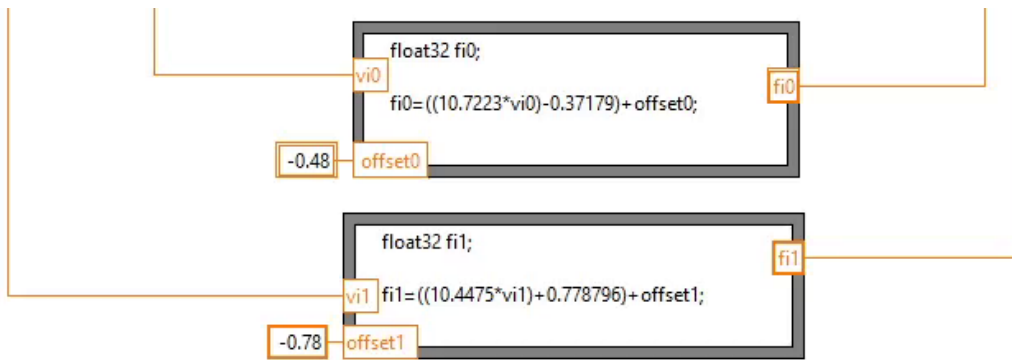


### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



**Figura 3.70:** Configuración antes de la prueba.

En capítulos previos se explico la manera en como obtener la fuerza a partir de la medición de la celda de carga. Con los modelos de comportamiento obtenidos, se agregan en bloques al programa como se muestra en la Figura 3.71



**Figura 3.71:** Modelos matemáticos para convertir la señal de las celdas en una medida de fuerza.

Una última configuración cuando se inicializa el experimento es el de guardar capturas cada cierto tiempo de la cámara con nombres consecutivos. En el nombre tienen un número que corresponde con los registros de posición y fuerza guardados en el archivo generado al iniciar el experimento. La configuración se muestra en la Figura 3.72.

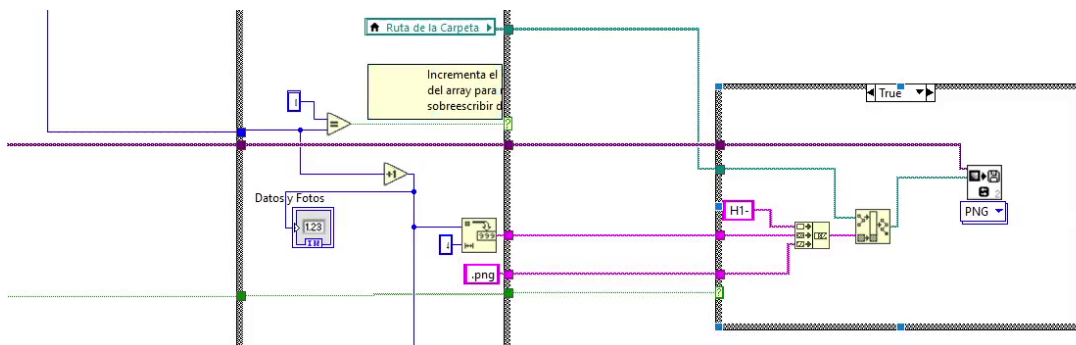


Figura 3.72: Bloques para guardar capturas de la cámara cada cierto tiempo.

### 3.3.3.2. Panel Frontal

Cuando se ha inicializado una prueba la interfaz gráfica tendrá el aspecto mostrado en la Figura 3.73; esta será la interfaz con la que el usuario trabajará y la llamaremos panel frontal como se acostumbra en el ambiente de programación de instrumentos virtuales en LabVIEW.

Empezando del lado izquierdo, tenemos la ruta donde se guardará la información, tanto imágenes como archivo con la información registrada. También tenemos el nombre del archivo designado. En la parte inferior izquierda tenemos marcado que se comenzó la prueba ya que el indicador de guardando está en verde. En la parte de en medio tenemos la cámara encendida y viendo en tiempo real la probeta. En la parte de abajo tenemos una gráfica por celda de carga. Los ejes marcan fuerza contra desplazamiento. Del lado derecho tenemos el tiempo transcurrido desde que inicio el experimento y la cantidad de datos registrados. Más abajo tenemos la fuerza que están registrando las celdas de carga. Tenemos unas barras que marcan en que zona se encuentran estos valores, ya que las celdas solo soportan cierto valor máximo y no debemos de rebasarlo. Por último, en la parte inferior derecha tenemos la posición relativa de cada motor. Esto es, la cantidad de movimiento que se han movido los motores desde que se inicio la prueba.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



Figura 3.73: Interfaz gráfica cuando se inicializa una prueba.

#### 3.3.4. Finalización del programa

##### 3.3.4.1. Diagrama de Bloques

Cuando la prueba a terminado solo se le da clic sobre el botón de adquirir información. Esto solo detendrá que se siga guardando información. Si se desea iniciar un nuevo experimento es necesario detener el programa dándole clic en el botón de alto. Para detener a los motores es necesario marcarlo con sus respectivos bloques de configuración. Esto evitará que exista un problema de reconocimiento por si se quiere iniciar una nueva prueba. Los bloques están mostrados en la Figura 3.74.

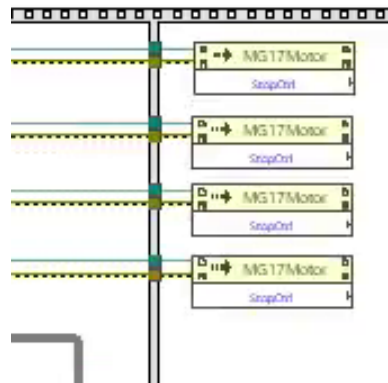


Figura 3.74: Bloques para detener a los motores.

Cuando se le da clic al botón de alto también terminan de enlazar bloques para cerrar la conexión con las celdas y apagar la cámara. Además arroja un mensaje de que la prueba ha terminado. Todo lo mencionado está mostrado en la Figura 3.75

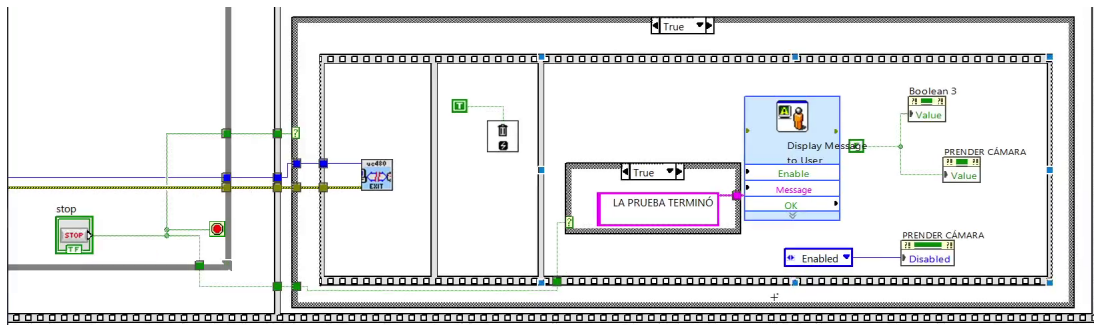


Figura 3.75: Bloques para detener el programa.

### 3.3.4.2. Panel Frontal

En la Figura 3.76 se muestra el mensaje cuando se detiene la prueba. Esto detiene toda la interfaz gráfica y el usuario ya no puede interactuar más con esta hasta que la vuelva a correr. Para una nueva prueba es necesario repetir todo el proceso.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

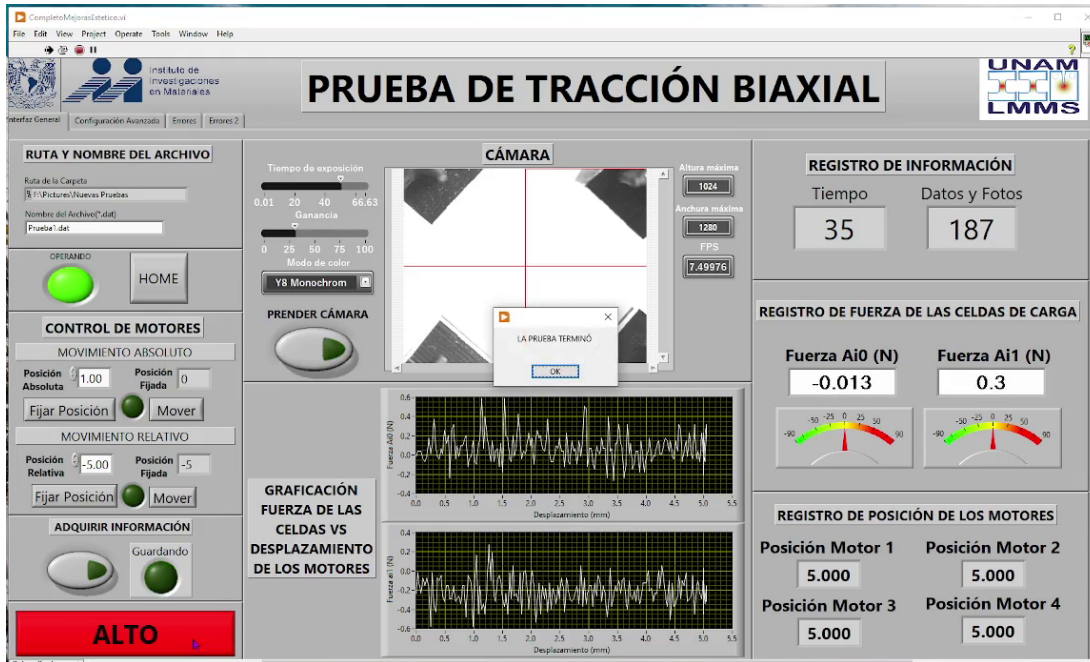


Figura 3.76: Mensaje que se muestra cuando se detiene el programa.

Para ver las evidencias generadas en la prueba nos podemos ir a la ruta marcada al inicio y lo primero que veremos son las imágenes que capturó la cámara de la probeta, como se muestra en la Figura 3.77.



**Figura 3.77:** Evidencias de la cámara generadas en la prueba.

También se podrá ver un archivo con el nombre que se marcó previamente, donde encontraremos toda la información de la prueba. Esto servirá para poder leerlo en otros programas y poder generar nuestras propias gráficas y modelos. El formato queda como se muestra en la Figura 3.78.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

\*Prueba1.dat: Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

Motor 1: \*Vel. min/max: 0.00/0.160mm/s\*Aceleración:1.000mm/s2

Motor 2: \*Vel. min/max: 0.00/0.160mm/s\*Aceleración:1.000mm/s2

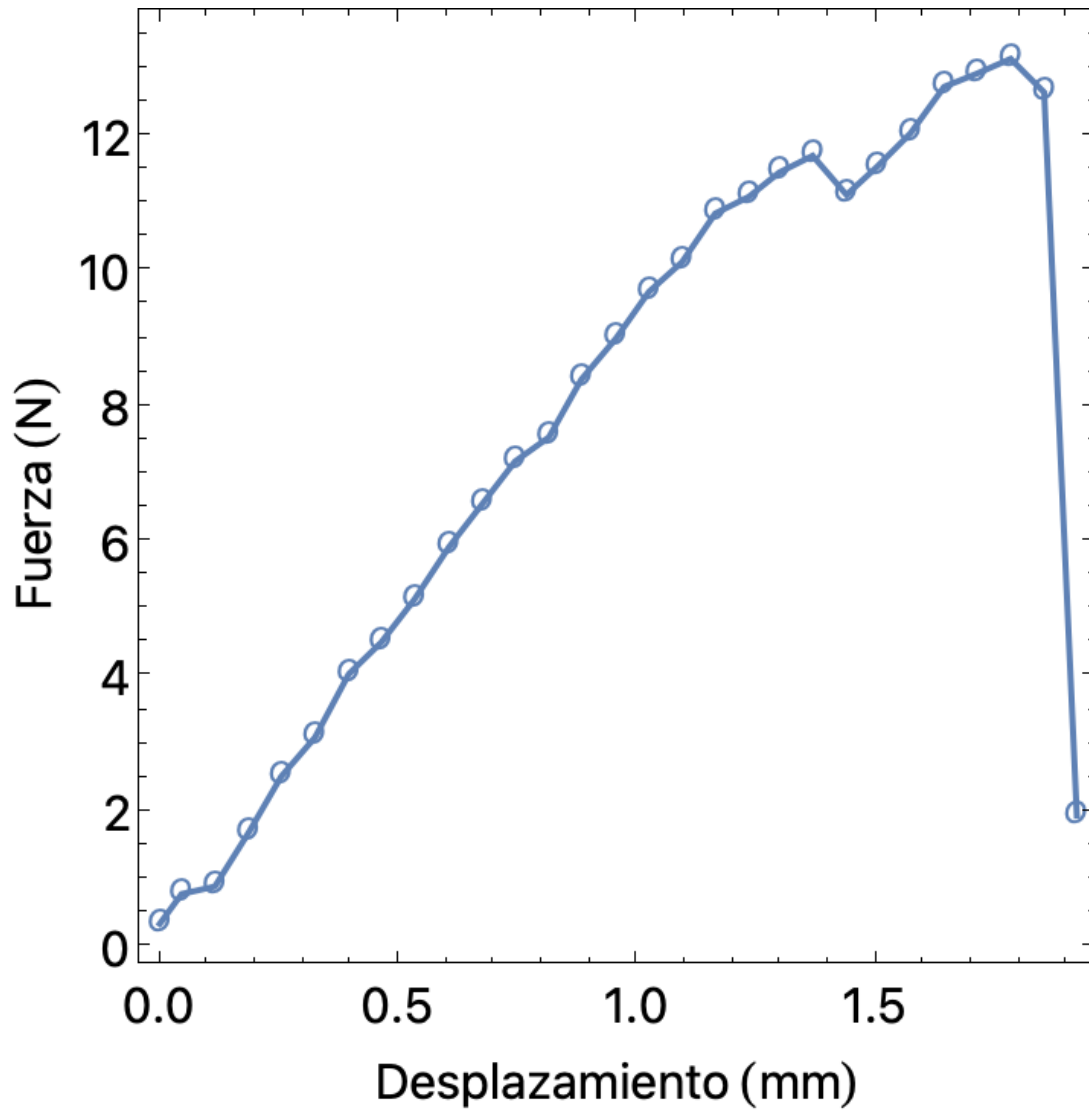
Motor 3: \*Vel. min/max: 0.00/0.160mm/s\*Aceleración:1.000mm/s2

Motor 4: \*Vel. min/max: 0.00/0.160mm/s\*Aceleración:1.000mm/s2

Tiempo	PosMot1	PosMot2	PosMot3	PosMot4	Celda0	Celda1	Número
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.676372	-0.072048	1.000000
0.297000	0.034456	0.036877	0.038363	0.039646	1.972628	-0.045174	2.000000
0.595000	0.081972	0.082848	0.084333	0.085558	2.634546	0.223569	3.000000
0.892000	0.129578	0.133949	0.131413	0.135815	4.206602	0.519186	4.000000
1.189000	0.176918	0.177383	0.179134	0.180241	5.971716	0.895427	5.000000
1.486000	0.224230	0.225948	0.227554	0.228865	7.074913	1.432913	6.000000
1.781000	0.271864	0.272095	0.273729	0.274866	8.040210	2.239142	7.000000
2.078000	0.319700	0.319176	0.320749	0.323547	9.088246	3.475360	8.000000
2.375000	0.366575	0.369167	0.370918	0.372114	10.522402	4.792201	9.000000
2.672000	0.414034	0.415314	0.416744	0.418056	11.984138	6.431533	10.000000
2.968000	0.461317	0.463821	0.465485	0.466621	13.335553	7.184013	11.000000
3.267000	0.509066	0.509678	0.511427	0.512564	14.493910	8.877094	12.000000
3.563000	0.556437	0.560867	0.558331	0.562908	15.790166	9.333958	13.000000
3.861000	0.603894	0.604271	0.606140	0.607276	15.376468	10.274558	14.000000
4.158000	0.651265	0.652840	0.654705	0.655784	14.107791	10.812044	15.000000
4.453000	0.700676	0.698460	0.701551	0.704378	6.468154	10.812044	16.000000
4.750000	0.746123	0.747639	0.749212	0.750320	1.696829	11.430154	17.000000
5.048000	0.795184	0.793465	0.798624	0.796117	1.283130	12.236382	18.000000
5.344000	0.843720	0.840893	0.844799	0.847452	1.007331	11.887016	19.000000
5.640000	0.888176	0.890625	0.892519	0.893190	0.510893	5.141567	20.000000
5.938000	0.935781	0.936623	0.938404	0.939541	0.317833	-0.206420	21.000000
6.235000	0.983326	0.985191	0.986969	0.988048	0.317833	-0.098922	22.000000
6.532000	1.030667	1.031307	1.033028	1.034136	0.317833	-0.260168	23.000000
6.828000	1.078213	1.079872	1.081594	1.082702	0.207514	0.035449	24.000000
7.127000	1.125845	1.128410	1.130188	1.131355	0.207514	-0.018300	25.000000
7.421000	1.173536	1.174438	1.176073	1.177238	0.317833	0.116072	26.000000
7.718000	1.221548	1.223822	1.224669	1.225892	0.290253	0.062323	27.000000
8.017000	1.268132	1.268860	1.270668	1.271776	0.400573	-0.098922	28.000000
8.313000	1.315211	1.317484	1.319204	1.320458	0.207514	-0.287043	29.000000
8.610000	1.365555	1.362755	1.366022	1.368907	0.372993	-0.098922	30.000000
8.908000	1.410244	1.412079	1.414034	1.416190	0.152354	-0.287043	31.000000
9.202000	1.459975	1.457409	1.460878	1.463999	0.317833	0.008575	32.000000
9.502000	1.505131	1.506762	1.509329	1.508629	0.097194	0.223569	33.000000
9.798000	1.552356	1.552588	1.554483	1.555532	0.759112	-0.125797	34.000000
10.094000	1.599930	1.601240	1.603020	1.604156	0.069614	-0.313917	35.000000

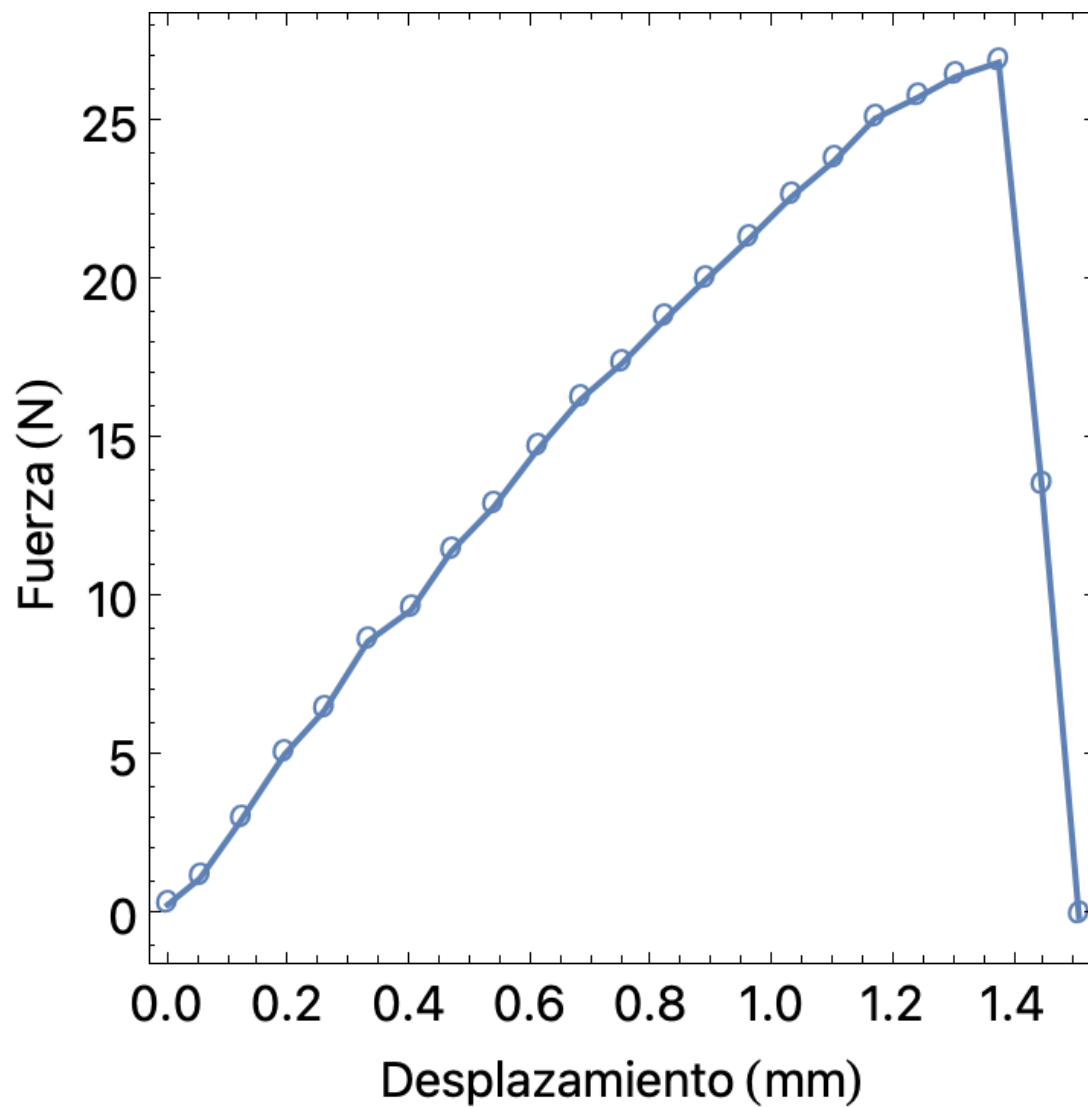
Figura 3.78: Archivo con la información de los motores y celdas generadas en la prueba.

Estos datos pueden ser usados para generar una gráfica y visualizar el comportamiento de la fuerza medida por las celdas como se muestra en la imágenes 3.79 y 3.80.



**Figura 3.79:** Gráfica hecha con la información obtenida de la prueba entre el tiempo y la fuerza de la celda de carga 0.





**Figura 3.80:** Gráfica hecha con la información obtenida de la prueba entre el tiempo y la fuerza de la celda de carga 1.

## Conclusiones

---

En esta tesis se ha demostrado que es posible desarrollar un probador mecánico para tracción biaxial plana; incluyendo todas aquellas consideraciones requeridas para ensayar mecánicamente materiales suaves como los biopolímeros y los tejidos biológicos. Este desarrollo integral considera desde el diseño mecánico, la manufactura, instrumentación, control y el desarrollo de una interfaz gráfica (software) para el uso del dispositivo.

En este proyecto se logró obtener un probador de tamaño reducido, de carácter modular (reconfigurable), fácil de transportar y capaz de colocarse debajo de un microscopio óptico Nikon MM-22 y realizar pruebas en materiales de biopolímeros.

Los límites de carga del probador en fuerza-desplazamiento son de 98N y 100mm de desplazamiento máximo por eje. Estas características permiten el estudio de materiales suaves como los biopolímeros y los tejidos biológicos. A través de este probador es posible obtener datos de fuerza y desplazamiento para su posterior procesamiento y la obtención de curvas esfuerzo contra deformación.

Otra de las bondades del probador es que la interfaz fue desarrollada en LabVIEW. La interfaz gráfica es amigable con el usuario y puede ser modificada dependiendo de las necesidades de los experimentos requeridos. Cualquier persona que desee trabajar con este no tendrá una curva de aprendizaje tan grande como si tuviera que programarlo desde cero; solo se requerirá de una pequeña capacitación para su uso.

Debido a que es un probador biaxial plano, es también posible utilizarlo para pruebas de tracción uniaxial y al poder moverse tanto hacia enfrente como hacia atrás, es posible hacer pruebas de tracción y compresión. Eso sí, teniendo en cuenta la fuerza necesaria para deformar el material. En la interfaz gráfica pueden cambiarse los puntos de referencia, por lo que pueden colocarse probetas de diferentes tamaños, bajo estándares previamente validados.

El desarrollo de este probador abre la puerta a nuevas posibilidades de ensayos mecánicos para biopolímeros y tejidos biológicos; sin embargo, aún quedan pendientes algunas consideraciones más, como la integración de la variable de temperatura y

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

realizar los ensayos mecánicos embebidos en un fluido a temperatura controlada. Esto debido a que normalmente las pruebas en biomateriales se destinan para implantes y sustituciones en el cuerpo; por lo tanto, se debe de realizar los ensayos mecánicos con la condiciones más cercanas al entorno real donde se aplicará el biopolímero/tejido biológico.

De los objetivos planteados en este trabajo, se aborda la necesidad de obtener información del material, como lo es la fuerza y la deformación que sufre el material. El límite del probador es el impuesto por las celdas de carga. En este caso es de 10 kg-f, pero si se obtienen otras celdas con mayor valor, que puedan acoplarse a la montura y que puedan ser alimentadas con 10V o 5V, es posible aumentar el límite. Todos los elementos están montados de tal forma que pueden ser montados y desmontados de una manera cómoda. Tanto la cámara como los motores pueden moverse de posición y la base tiene diferentes zonas para colocar soportes y agregar más elementos, como otras cámaras, iluminación, estructuras/soportes. Como se comentó antes, lo que hace falta es una estructura donde se puedan hacer pruebas en diferentes ambientes que sean favorables para replicar las condiciones *ad hoc* para el material.

# Apéndices

---

## Apéndice A

En este apéndice se agrega la liga del manual para el motor MTS25-Z8 y MTS50-Z8, donde se pueden encontrar las propiedades mecánicas de los motores, así como las medidas, adaptadores y software para probarlo.

Liga: <https://www.manualslib.com/manual/2764609/Thorlabs-Mts25-Z8.html>

## Apéndice B

A continuación se presenta la liga de la ficha descriptiva de la fuente de voltaje utilizada para alimentar a las celdas de carga.

Liga: <https://www.meanwell.com/scripts/resource/pdfJS/web/viewer.html?f=HDR-60&pdf=HDR-60-spec.pdf>

## Apéndice C

Se anexa la hoja descriptiva de la celda de carga usada.

# DYMH-103 膜盒传感器

Capsule sensor



## 产品综述 Product Reviews

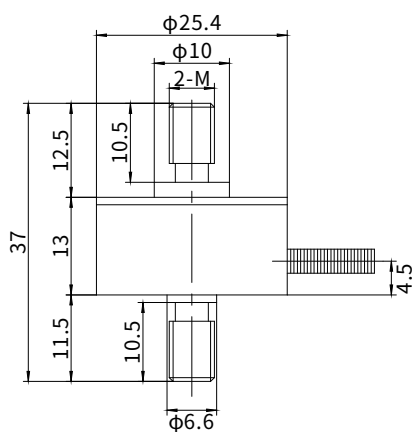
**特性:**  
结构紧凑，综合精度高，长期稳定性好，动态响应频率高，优质不锈钢材料。

**应用领域:**  
汽车压装、自动化组装、3C产品测试、新能源产品组装、医疗检测、机器人领域，模具组装及其他工业测试、自动化设备领域和测试领域。

**Characteristic:**  
It has the advantages of bi-directional tension and compression, compact structure, high comprehensive precision, good long-term stability and nickel plating on the surface of high-quality alloy steel.

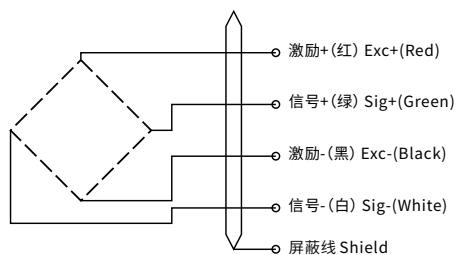
**Application fields:**  
Automobile press Ptting, automatic assembly, 3C product testing, new energy product assembly, medical testing, robotics, mold assembly and other industrial testing, automation equipment and testing pelds.

外形尺寸 External Dimension

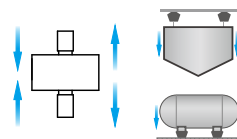


量程 (kg)	M
1-50	M5
60-100	M6
200-500	M8

传感器接线示意图 Sensor wiring diagram



传感器受力图 Force diagram of sensor



## 参数表 Parameters Table

量程 Capacity	0-500kg	材质 Material	不锈钢
输出灵敏度 Rated Output	1.0-1.5±10% $mV/V$	阻抗 Impedance	350 $\Omega$
零点输出 Zero Balance	±2%F.S.	绝缘电阻 Insulation	≥5000M $\Omega/100VDC$
非线性 Non-Linearity	0.3%F.S.	使用电压 Operating Temp Range	0-10v
滞后 Hysteresis	0.1%F.S.	工作温度范围 Operating Temp Range	-20-80 $^{\circ}C$
重复性 Repeatability	0.1%F.S.	安全过载 Safe Overload	150%
蠕变(30分钟) Creep(30min)	0.2%F.S.	极限过载 Maximum Overload	200%
温度灵敏度漂移 Temp Effect on Output	0.1%F.S./10 $^{\circ}C$	电缆线规格 Cable Specifications	$\phi 3 \times 2m$
零点温度漂移 Temp Effect on Zero	0.1%F.S./10 $^{\circ}C$	线缆极限拉力 Cable ultimate pull	10kg
响应频率 Response frequency	10kHz	TEDS可选	

## Apéndice D

Aquí se anexa la liga para ingresar a la hoja descriptiva del regulador de voltaje LM350 de la empresa Texas Instrument.

Liga: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm350-n.pdf>

## Apéndice E

Se agrega la liga para la hoja descriptiva del amplificador operacional LM741 utilizado para el circuito de fuente simétrica.

Liga: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm741.pdf>

## Apéndice F

Se anexa la liga para la hoja técnica de los transistores ocupados en el circuito de fuente simétrica.

Liga: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/tip120.pdf>

## Apéndice G

Liga para la hoja técnica del amplificador operacional de instrumentación AD620.

## Apéndice H

Se agrega la hoja descriptiva del amplificador operacional TL081 utilizado para el circuito acondicionamiento de la señal de la celda de carga.

Liga: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl081.pdf>

## Apéndice I

Se agrega la liga para la hoja descriptiva del módulo de adquisición de datos de National Instruments para registrar la señal ya acondicionada de las celdas de carga.

Liga: <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/ni-9201-specs/page/specs.html>

## Apéndice J

Resumen del procedimiento en Mathematica para obtener el modelo matemático de comportamiento de las celdas de carga.

```
In[ ]:= datosMasas = {{Jaula, 1, 1037.35}, {Pesa2, 2, 1001.71}, {Pesa3, 3, 1002.27},  
                    {Pesa4, 4, 1004.54}, {Pesa5, 5, 1001.80}, {Pesa6, 6, 1001.26}, {Pesa7, 7, 1000.94},  
                    {Pesa8, 8, 1001.73}, {Pesa9, 9, 1002.44}, {Pesa10, 10, 1001.97}}
```

```
Out[ ]:= {{Jaula, 1, 1037.35}, {Pesa2, 2, 1001.71}, {Pesa3, 3, 1002.27},  
          {Pesa4, 4, 1004.54}, {Pesa5, 5, 1001.8}, {Pesa6, 6, 1001.26}, {Pesa7, 7, 1000.94},  
          {Pesa8, 8, 1001.73}, {Pesa9, 9, 1002.44}, {Pesa10, 10, 1001.97}}
```

```
In[ ]:= TableForm[datosMasas]  
      |forma de tabla
```

```
Out[ ]//TableForm=
```

Jaula	1	1037.35
Pesa2	2	1001.71
Pesa3	3	1002.27
Pesa4	4	1004.54
Pesa5	5	1001.8
Pesa6	6	1001.26
Pesa7	7	1000.94
Pesa8	8	1001.73
Pesa9	9	1002.44
Pesa10	10	1001.97

```
In[ ]:= Map[Plus, Apply[#3 &, datosMasas, 1]]  
      |apl·· |suma |aplica
```

```
Out[ ]:= {1037.35, 1001.71, 1002.27, 1004.54, 1001.8, 1001.26, 1000.94, 1001.73, 1002.44, 1001.97}
```

```
In[ ]:= Export["F:\\Isis\\Programas LabView\\Celdas de Carga\\datosMasas.xlsx", datosMasas]  
      |exporta
```

```
Out[ ]:= F:\\Isis\\Programas LabView\\Celdas de Carga\\datosMasas.xlsx
```

```
In[ ]:= datosAi0 = Import [  
      |importa  
      "F:\\Isis\\Programas LabView\\Celdas de Carga\\DatosCalibracion\\DatosCeldaCero.dat"]
```

... **Import:** File F:\\Isis\\Programas LabView\\Celdas de Carga\\DatosCalibracion\\DatosCeldaCero.dat not found during Import.

```
Out[ ]:= $Failed
```

```
In[ ]:= ListPlot[datosAi0]  
      |representación de lista
```

... **ListPlot:** \$Failed is not a list of numbers or pairs of numbers.

```
Out[ ]:= ListPlot[$Failed]
```

```
In[ ]:= ajsuteCeldaAi0 = LinearModelFit[datosAi0, x, x]  
      |ajusta a modelo lineal
```

... **LinearModelFit:** The first argument is not a vector, matrix, or a list containing a design matrix and response vector.

```
Out[ ]:= LinearModelFit[$Failed, x, x]
```

```
In[ ]:= ajsuteCeldaAi0[0.74]
```

```
Out[ ]:= LinearModelFit[$Failed, x, x] [0.74]
```



```
In[ ]:= datosAi0bis = Apply[{{#2, #1} &, datosAi0, 1]
      |aplica
```

```
Out[ ]:= $Failed
```

```
In[ ]:= ListPlot[datosAi0bis]
      |representación de lista
```

```
... ListPlot: $Failed is not a list of numbers or pairs of numbers.
```

```
Out[ ]:= ListPlot[$Failed]
```

```
In[ ]:= ajsuteCeldaAi0bis = LinearModelFit[datosAi0bis, x, x]
      |ajusta a modelo lineal
```

```
... LinearModelFit: The first argument is not a vector, matrix, or a list containing a design matrix and response vector.
```

```
Out[ ]:= LinearModelFit[$Failed, x, x]
```

```
In[ ]:= ajsuteCeldaAi0bis[0.749]
```

```
Out[ ]:= LinearModelFit[$Failed, x, x][0.749]
```

## Calibración Celda 0

```
In[ ]:= "Celda 0"
      Celda0Primero =
      Import["F:\\Isis\\Programas LabView\\Celdas de Carga\\DatosCalibracion\\Pruebas
      |importa
      10-08-2023\\CeldaAI0.dat"]
```

```
Out[ ]:= Celda 0
```

```
Out[ ]:= {{0., -0.006666}, {1037.35, 0.955338}, {2039.06, 1.89676},
      {3041.33, 2.73016}, {4045.87, 3.68702}, {5047.67, 4.64902}, {6048.93, 5.47727},
      {7049.87, 6.43927}, {8051.6, 7.30353}, {9054.04, 8.27068}, {8051.6, 7.34983},
      {7049.87, 6.43927}, {6048.93, 5.51842}, {5047.67, 4.62844}, {4045.87, 3.70245},
      {3041.33, 2.79189}, {2039.06, 1.89676}, {1037.35, 0.939904}, {0., 0.024201}}
```

```
In[ ]:= Celda0Segundo =
      Import["F:\\Isis\\Programas LabView\\Celdas de Carga\\DatosCalibracion\\Pruebas
      |importa
      11-08-2023\\CeldaAI0.dat"]
```

```
Out[ ]:= {{0., 0.055067}, {1037.35, 1.00678}, {2039.06, 1.93277},
      {3041.33, 2.8279}, {4045.87, 3.77447}, {5047.67, 4.69532}, {6048.93, 5.65218},
      {7049.87, 6.65534}, {8051.6, 7.43729}, {9054.04, 8.24496}, {8051.6, 7.4733},
      {7049.87, 6.60389}, {6048.93, 5.61617}, {5047.67, 4.63873}, {4045.87, 3.82591},
      {3041.33, 2.82276}, {2039.06, 1.92249}, {1037.35, 1.00164}, {0., 0.075645}}
```

```
In[ ]:= Celda0Total = Join[Celda0Primero, Celda0Segundo]
      |
      |junta
```

```
Out[ ]:= {{0., -0.006666}, {1037.35, 0.955338}, {2039.06, 1.89676},
          {3041.33, 2.73016}, {4045.87, 3.68702}, {5047.67, 4.64902}, {6048.93, 5.47727},
          {7049.87, 6.43927}, {8051.6, 7.30353}, {9054.04, 8.27068}, {8051.6, 7.34983},
          {7049.87, 6.43927}, {6048.93, 5.51842}, {5047.67, 4.62844}, {4045.87, 3.70245},
          {3041.33, 2.79189}, {2039.06, 1.89676}, {1037.35, 0.939904},
          {0., 0.024201}, {0., 0.055067}, {1037.35, 1.00678}, {2039.06, 1.93277},
          {3041.33, 2.8279}, {4045.87, 3.77447}, {5047.67, 4.69532}, {6048.93, 5.65218},
          {7049.87, 6.65534}, {8051.6, 7.43729}, {9054.04, 8.24496}, {8051.6, 7.4733},
          {7049.87, 6.60389}, {6048.93, 5.61617}, {5047.67, 4.63873}, {4045.87, 3.82591},
          {3041.33, 2.82276}, {2039.06, 1.92249}, {1037.35, 1.00164}, {0., 0.075645}}
```

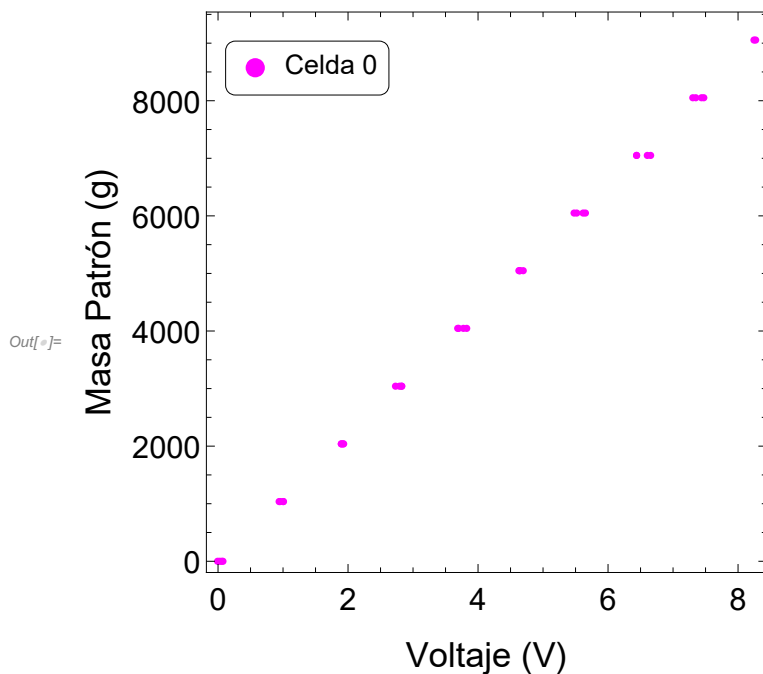
```
In[ ]:= Celda0Totalbis = Apply[ {#2, #1} &, Celda0Total, 1]
      |
      |aplica
```

```
Out[ ]:= {{-0.006666, 0.}, {0.955338, 1037.35}, {1.89676, 2039.06},
          {2.73016, 3041.33}, {3.68702, 4045.87}, {4.64902, 5047.67}, {5.47727, 6048.93},
          {6.43927, 7049.87}, {7.30353, 8051.6}, {8.27068, 9054.04}, {7.34983, 8051.6},
          {6.43927, 7049.87}, {5.51842, 6048.93}, {4.62844, 5047.67}, {3.70245, 4045.87},
          {2.79189, 3041.33}, {1.89676, 2039.06}, {0.939904, 1037.35},
          {0.024201, 0.}, {0.055067, 0.}, {1.00678, 1037.35}, {1.93277, 2039.06},
          {2.8279, 3041.33}, {3.77447, 4045.87}, {4.69532, 5047.67}, {5.65218, 6048.93},
          {6.65534, 7049.87}, {7.43729, 8051.6}, {8.24496, 9054.04}, {7.4733, 8051.6},
          {6.60389, 7049.87}, {5.61617, 6048.93}, {4.63873, 5047.67}, {3.82591, 4045.87},
          {2.82276, 3041.33}, {1.92249, 2039.06}, {1.00164, 1037.35}, {0.075645, 0.}}
```

```

In[ ]:= grafCelda0 = ListPlot[Celda0Totalbis, Frame → True,
    representación de lista marco verdadero
  AspectRatio → 1, PlotStyle → {{RGBColor[255 / 255, 0 / 255, 255 / 255]}},
  cociente de aspecto estilo de represe... color RGB
  FrameStyle → {{Black, FontFamily → "Arial", 16}, {Black, FontFamily → "Arial", 16}},
  estilo de marco negro familia de tipo de letra negro familia de tipo de letra
  {Black, Automatic}, {Black, Automatic}}, FrameLabel →
  negro automático negro automático etiqueta de marco
  {StyleForm["Voltaje (V)", FontSize → 18], StyleForm["Masa Patrón (g)", FontSize → 18]},
  forma de estilo tamaño de tipo de l... forma de estilo tamaño de tipo de letra
  PlotLegends → Placed[LineLegend[{StyleForm["Celda 0", FontSize → 14]}], Joined →
  leyendas de rep... colocado línea leyenda forma de estilo tamaño de tipo de le... unido
  Automatic, LegendFunction → Frame, LegendMarkerSize → {20, 15}], {0.18, 0.90}]]
  automático función de leyenda marco tamaño de marcador de leyenda

```



In[ ]:=

```

In[ ]:= ajusteCelda0Totalbis = LinearModelFit[Celda0Totalbis, x, x]
ajusta a modelo lineal

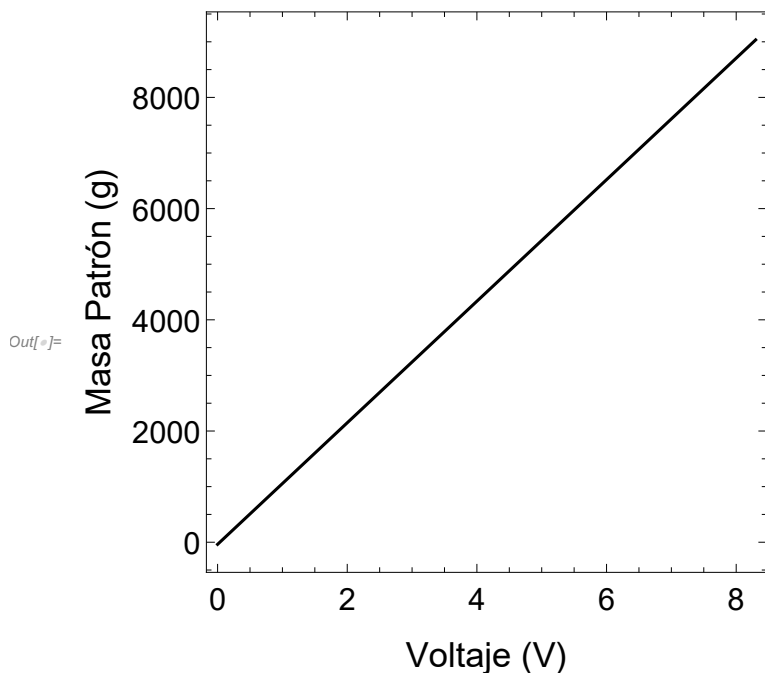
```

Out[ ]:= FittedModel[ $-37.8991 + 1093. x$ ]

```

In[ ]:= grafCelda0Model = Plot[ajusteCelda0Totalbis[x], {x, 0, 8.3}, Frame → True,
    representación gráfica marco verdadero
    AspectRatio → 1, PlotStyle → {Black}, FrameStyle → {{Black, FontFamily → "Arial", 16},
    cociente de aspecto estilo de repre... negro estilo de marco negro familia de tipo de letra
    {Black, FontFamily → "Arial", 16}, {Black, Automatic}, {Black, Automatic}}, FrameLabel →
    negro familia de tipo de letra negro automático negro automático etiqueta de marco
    {StyleForm["Voltaje (V)", FontSize → 18], StyleForm["Masa Patrón (g)", FontSize → 18]}]
    forma de estilo tamaño de tipo de l... forma de estilo tamaño de tipo de letra

```



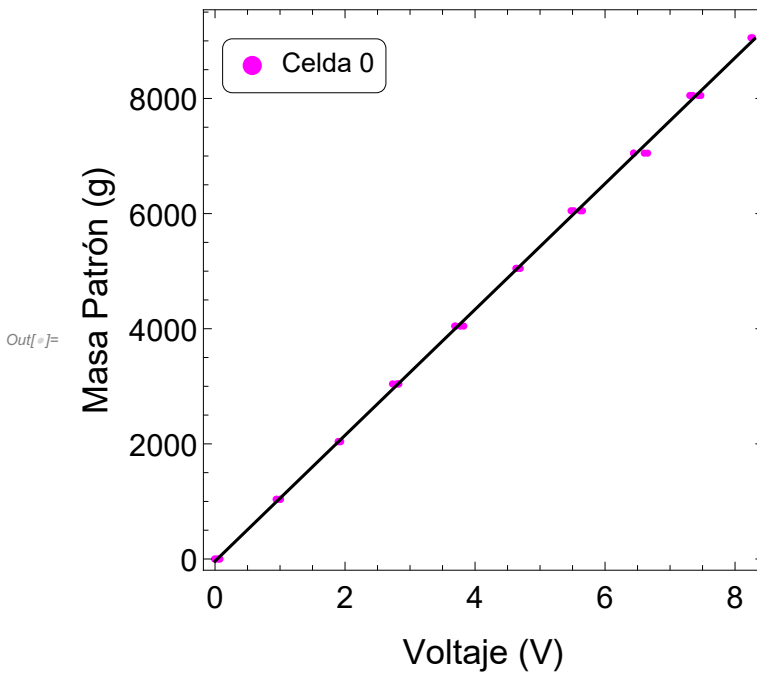
```

PlotLegends → Placed[LineLegend[{StyleForm["Celda 0", FontSize → 14]}, Joined → Automatic,
    leyendas de rep... colocado línea leyenda forma de estilo tamaño de tipo de le... unido automático
    LegendFunction → Frame, LegendMarkerSize → {20, 15}], {0.18, 0.90}]
    función de leyenda marco tamaño de marcador de leyenda

```

```
In[*]:= Show[grafCelda0, grafCelda0Model]
```

```
└muestra
```



## Calibración Celda 0 pasando a fuerza

```
In[*]:= Celda0Fuerza = Apply[{{#2, (#1 * 10-3) * 9.81} &, Celda0Total, 1]
```

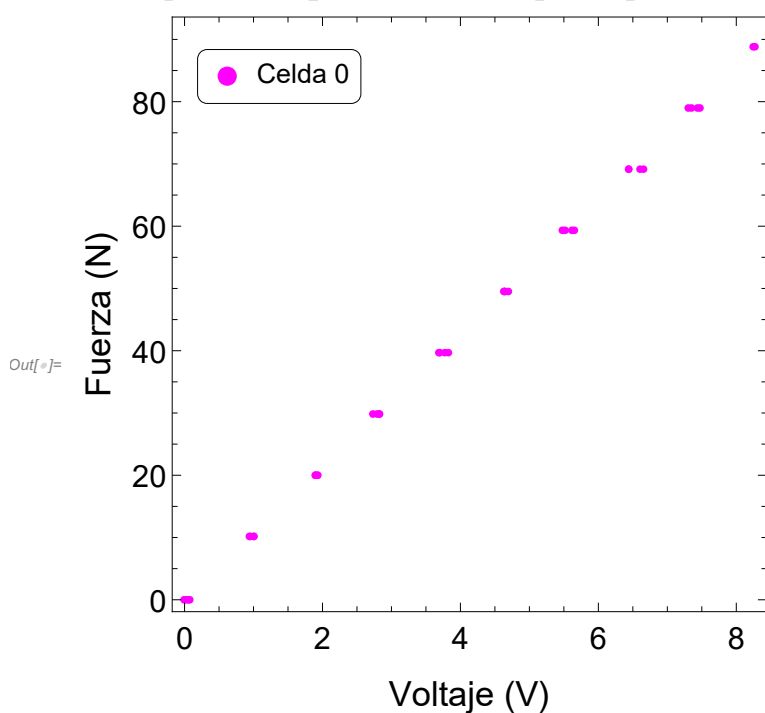
```
└aplica
```

```
Out[*]= {{-0.006666, 0.}, {0.955338, 10.1764}, {1.89676, 20.0032},
{2.73016, 29.8354}, {3.68702, 39.69}, {4.64902, 49.5176}, {5.47727, 59.34},
{6.43927, 69.1592}, {7.30353, 78.9862}, {8.27068, 88.8201}, {7.34983, 78.9862},
{6.43927, 69.1592}, {5.51842, 59.34}, {4.62844, 49.5176}, {3.70245, 39.69},
{2.79189, 29.8354}, {1.89676, 20.0032}, {0.939904, 10.1764},
{0.024201, 0.}, {0.055067, 0.}, {1.00678, 10.1764}, {1.93277, 20.0032},
{2.8279, 29.8354}, {3.77447, 39.69}, {4.69532, 49.5176}, {5.65218, 59.34},
{6.65534, 69.1592}, {7.43729, 78.9862}, {8.24496, 88.8201}, {7.4733, 78.9862},
{6.60389, 69.1592}, {5.61617, 59.34}, {4.63873, 49.5176}, {3.82591, 39.69},
{2.82276, 29.8354}, {1.92249, 20.0032}, {1.00164, 10.1764}, {0.075645, 0.}}
```

```

In[ ]:= grafCelda0Fuerza = ListPlot[Celda0Fuerza, Frame → True,
    [representación de lista [marco [verdadero
    AspectRatio → 1, PlotStyle → {{RGBColor[255 / 255, 0 / 255, 255 / 255]}},
    [cociente de aspecto [estilo de represe... [color RGB
    FrameStyle → {{Black, FontFamily → "Arial", 16}, {Black, FontFamily → "Arial", 16},
    [estilo de marco [negro [familia de tipo de letra [negro [familia de tipo de letra
    {Black, Automatic}, {Black, Automatic}}, FrameLabel →
    [negro [automático [negro [automático [etiqueta de marco
    {StyleForm["Voltaje (V)", FontSize → 18], StyleForm["Fuerza (N)", FontSize → 18]}},
    [forma de estilo [tamaño de tipo de l... [forma de estilo [valo... [tamaño de tipo de letra
    PlotLegends → Placed[LineLegend[{StyleForm["Celda 0", FontSize → 14]}, Joined →
    [leyendas de rep... [colocado [línea leyenda [forma de estilo [tamaño de tipo de le... [unido
    Automatic, LegendFunction → Frame, LegendMarkerSize → {20, 15}], {0.18, 0.90}]]
    [automático [función de leyenda [marco [tamaño de marcador de leyenda

```



```

In[ ]:= ajusteCelda0Fuerza = LinearModelFit[Celda0Fuerza, x, x]
    [ajusta a modelo lineal

```

Out[ ]:= FittedModel[ $-0.37179 + 10.7223 x$ ]

```

In[ ]:= ajusteCelda0Fuerza["ParameterTable"]

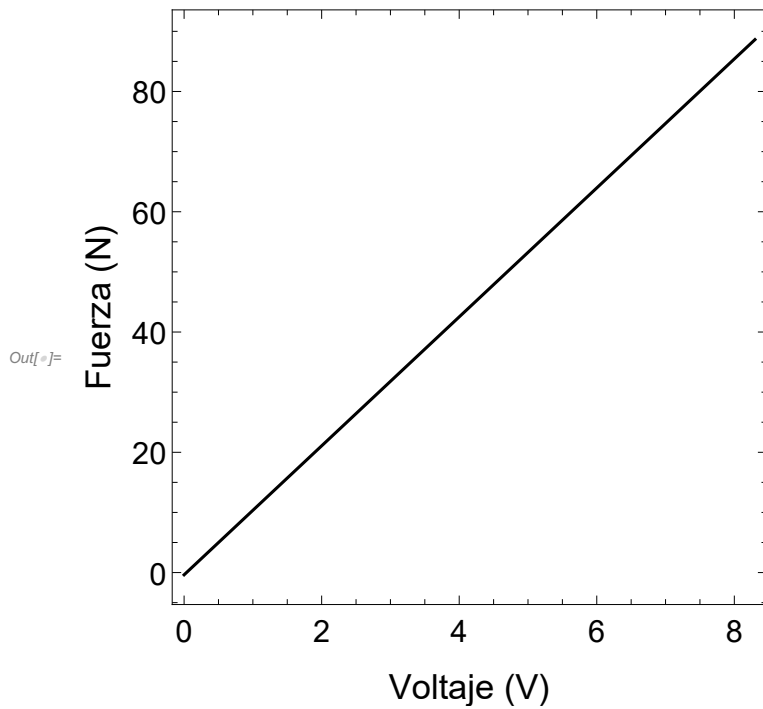
```

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
1	-0.37179	0.192553	-1.93085	0.0614069
x	10.7223	0.0409027	262.142	$1.15584 \times 10^{-60}$

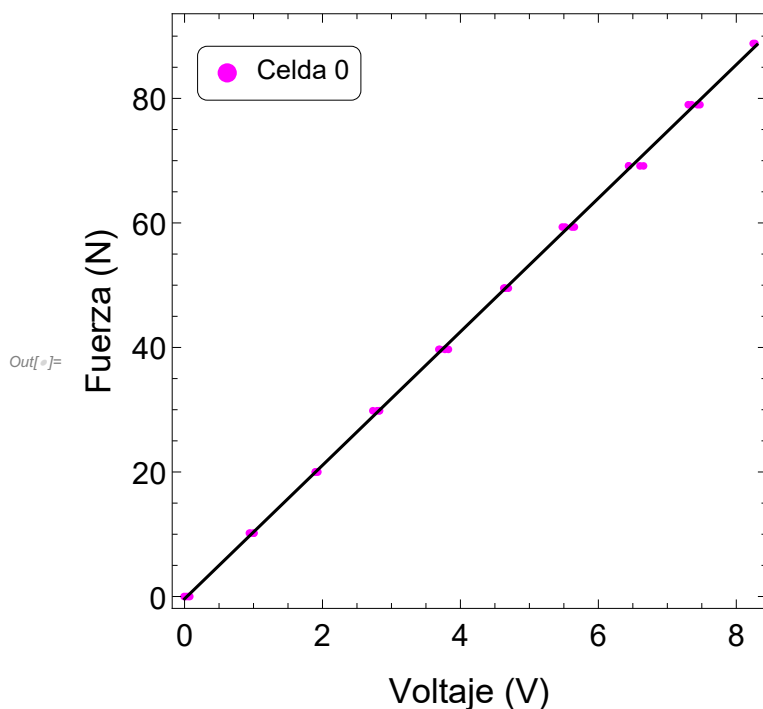
```

In[ ]:= grafCelda0ModelFuerza = Plot[ajusteCelda0Fuerza[x], {x, 0, 8.3}, Frame → True,
    [representación gráfica [marco [verdadero
  AspectRatio → 1, PlotStyle → {Black}, FrameStyle → {{Black, FontFamily → "Arial", 16},
    [cociente de aspecto [estilo de repre... [negro [estilo de marco [negro [familia de tipo de letra
    {Black, FontFamily → "Arial", 16}, {Black, Automatic}, {Black, Automatic}}, FrameLabel →
    [negro [familia de tipo de letra [negro [automático [negro [automático [etiqueta de marco
    {StyleForm["Voltaje (V)", FontSize → 18], StyleForm["Fuerza (N)", FontSize → 18]}]
    [forma de estilo [tamaño de tipo de l... [forma de estilo [valo... [tamaño de tipo de letra

```



```
In[ ]:= ModeloFuerzaCelda0 = Show[grafCelda0Fuerza, grafCelda0ModelFuerza]
      muestra
```



```
In[ ]:= Export["F:\\Isis\\Programas LabView\\Celdas de Carga\\DatosCalibracion\\Pruebas
      exporta
      10-08-2023\\ModeloFuerzaCelda0.svg", ModeloFuerzaCelda0]
```

Out[ ]:= F:\\Isis\\Programas LabView\\Celdas de Carga\\DatosCalibracion\\Pruebas 10-08-2023\\ModeloFuerzaCelda0.svg

## Calibración Celda 1

```
In[ ]:= "Celda 1"
      Celda1Primero =
      Import["F:\\Isis\\Programas LabView\\Celdas de Carga\\DatosCalibracion\\Pruebas
      importa
      10-08-2023\\CeldaAI1.dat"]
```

Out[ ]:= Celda 1

```
Out[ ]:= {{0., -0.09424}, {1037.35, 0.862663}, {2039.06, 1.87101},
      {3041.33, 2.66329}, {4045.87, 3.59961}, {5047.67, 4.55651}, {6048.93, 5.58544},
      {7049.87, 6.39315}, {8051.6, 7.31404}, {9054.04, 8.24007}, {8051.6, 7.33976},
      {7049.87, 6.39829}, {6048.93, 5.59573}, {5047.67, 4.57709}, {4045.87, 3.59447},
      {3041.33, 2.74046}, {2039.06, 1.90702}, {1037.35, 0.878097}, {0., -0.078806}}
```



```
In[*]:= Celda1Segundo =
  Import["F:\\Isis\\Programas LabView\\Celdas de Carga\\DatosCalibracion\\Pruebas
  |importa
  11-08-2023\\CeldaAI1.dat"]
```

```
Out[*]:= {{0., -0.073661}, {1037.35, 0.919254}, {2039.06, 1.95847},
  {3041.33, 2.83306}, {4045.87, 3.80025}, {5047.67, 4.73143}, {6048.93, 5.7192},
  {7049.87, 6.64524}, {8051.6, 7.76677}, {9054.04, 8.39441}, {8051.6, 7.7822},
  {7049.87, 6.5835}, {6048.93, 5.76036}, {5047.67, 4.69542}, {4045.87, 3.75395},
  {3041.33, 2.81248}, {2039.06, 1.84529}, {1037.35, 0.924399}, {0., -0.053083}}
```

```
In[*]:= Celda1Total = Join[Celda1Primero, Celda1Segundo]
  |junta
```

```
Out[*]:= {{0., -0.09424}, {1037.35, 0.862663}, {2039.06, 1.87101},
  {3041.33, 2.66329}, {4045.87, 3.59961}, {5047.67, 4.55651}, {6048.93, 5.58544},
  {7049.87, 6.39315}, {8051.6, 7.31404}, {9054.04, 8.24007}, {8051.6, 7.33976},
  {7049.87, 6.39829}, {6048.93, 5.59573}, {5047.67, 4.57709}, {4045.87, 3.59447},
  {3041.33, 2.74046}, {2039.06, 1.90702}, {1037.35, 0.878097},
  {0., -0.078806}, {0., -0.073661}, {1037.35, 0.919254}, {2039.06, 1.95847},
  {3041.33, 2.83306}, {4045.87, 3.80025}, {5047.67, 4.73143}, {6048.93, 5.7192},
  {7049.87, 6.64524}, {8051.6, 7.76677}, {9054.04, 8.39441}, {8051.6, 7.7822},
  {7049.87, 6.5835}, {6048.93, 5.76036}, {5047.67, 4.69542}, {4045.87, 3.75395},
  {3041.33, 2.81248}, {2039.06, 1.84529}, {1037.35, 0.924399}, {0., -0.053083}}
```

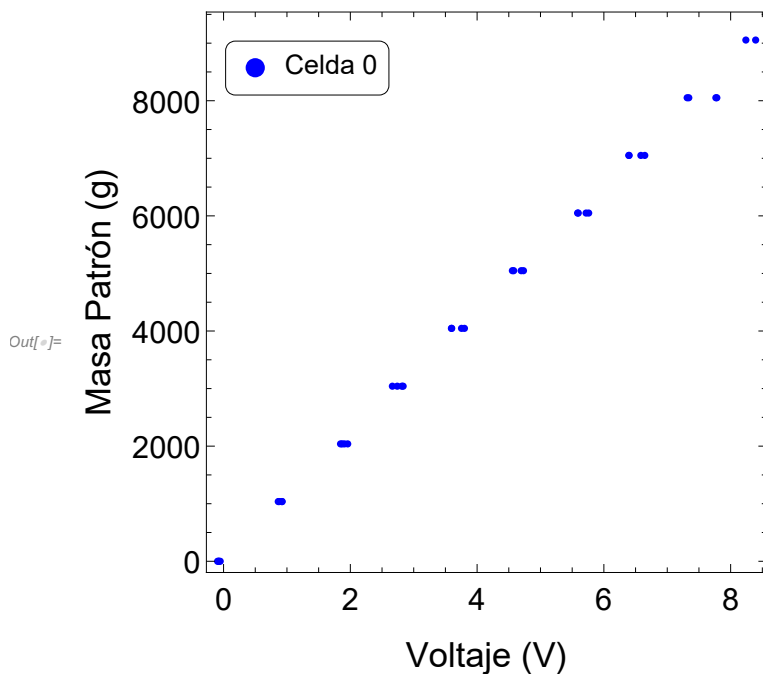
```
In[*]:= Celda1Totalbis = Apply[{{#2, #1} &, Celda1Total, 1]
  |aplica
```

```
Out[*]:= {{-0.09424, 0.}, {0.862663, 1037.35}, {1.87101, 2039.06},
  {2.66329, 3041.33}, {3.59961, 4045.87}, {4.55651, 5047.67}, {5.58544, 6048.93},
  {6.39315, 7049.87}, {7.31404, 8051.6}, {8.24007, 9054.04}, {7.33976, 8051.6},
  {6.39829, 7049.87}, {5.59573, 6048.93}, {4.57709, 5047.67}, {3.59447, 4045.87},
  {2.74046, 3041.33}, {1.90702, 2039.06}, {0.878097, 1037.35},
  {-0.078806, 0.}, {-0.073661, 0.}, {0.919254, 1037.35}, {1.95847, 2039.06},
  {2.83306, 3041.33}, {3.80025, 4045.87}, {4.73143, 5047.67}, {5.7192, 6048.93},
  {6.64524, 7049.87}, {7.76677, 8051.6}, {8.39441, 9054.04}, {7.7822, 8051.6},
  {6.5835, 7049.87}, {5.76036, 6048.93}, {4.69542, 5047.67}, {3.75395, 4045.87},
  {2.81248, 3041.33}, {1.84529, 2039.06}, {0.924399, 1037.35}, {-0.053083, 0.}}
```

```

In[ ]:= grafCelda1 = ListPlot[Celda1Totalbis, Frame → True,
    representación de lista marco verdadero
    AspectRatio → 1, PlotStyle → {{RGBColor[0 / 255, 0 / 255, 255 / 255]}},
    cociente de aspecto estilo de represe... color RGB
    FrameStyle → {{Black, FontFamily → "Arial", 16}, {Black, FontFamily → "Arial", 16}},
    estilo de marco negro familia de tipo de letra negro familia de tipo de letra
    {Black, Automatic}, {Black, Automatic}}, FrameLabel →
    negro automático negro automático etiqueta de marco
    {StyleForm["Voltaje (V)", FontSize → 18], StyleForm["Masa Patrón (g)", FontSize → 18]},
    forma de estilo tamaño de tipo de l... forma de estilo tamaño de tipo de letra
    PlotLegends → Placed[LineLegend[{StyleForm["Celda 0", FontSize → 14]}], Joined →
    leyendas de rep... colocado línea leyenda forma de estilo tamaño de tipo de le... unido
    Automatic, LegendFunction → Frame, LegendMarkerSize → {20, 15}], {0.18, 0.90}]]
    automático función de leyenda marco tamaño de marcador de leyenda

```



```

In[ ]:= ajusteCelda1Totalbis = LinearModelFit[Celda1Totalbis, x, x]
    ajusta a modelo lineal

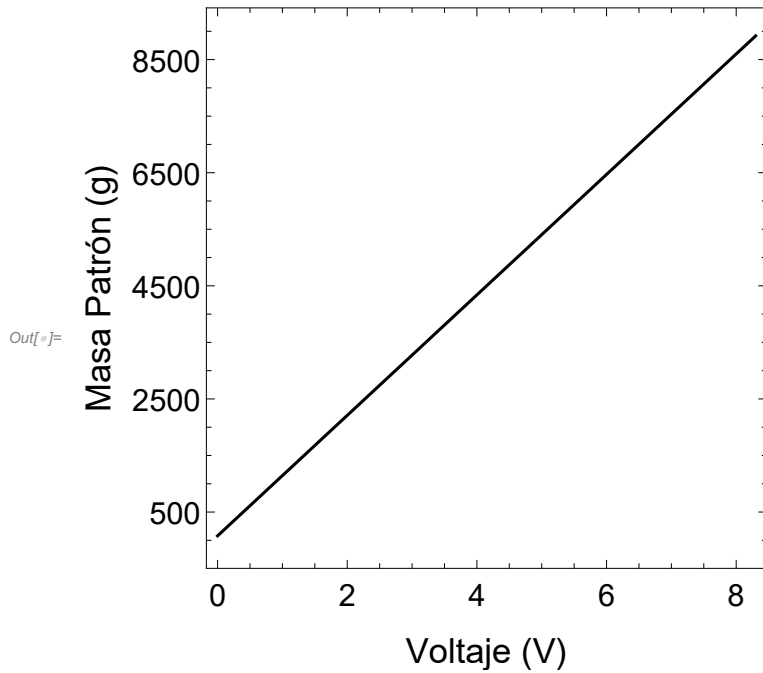
```

Out[ ]:= FittedModel [ 79.388 + 1064.98 x ]

```

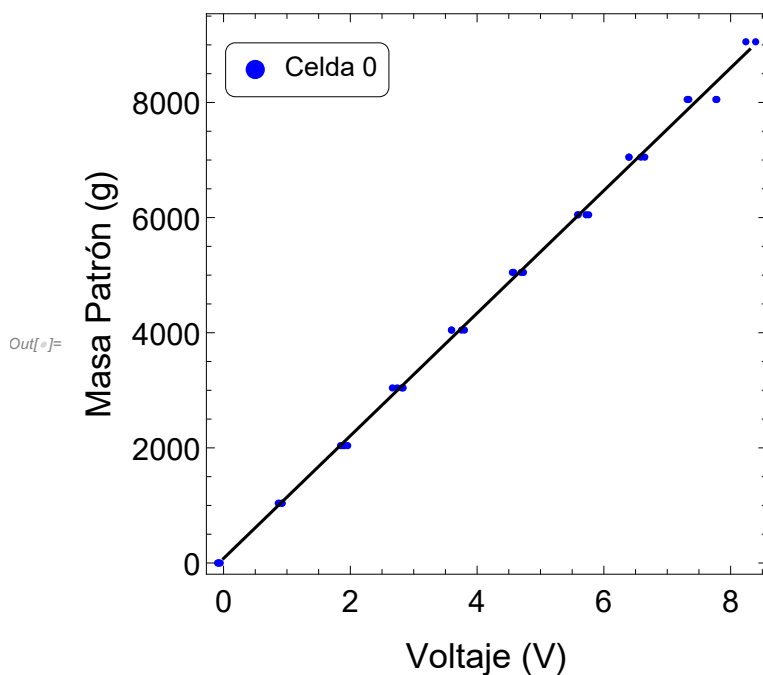
In[ ]:= grafCelda1Model = Plot[ajusteCelda1Totalbis[x], {x, 0, 8.3}, Frame → True,
    representación gráfica marco verdadero
    AspectRatio → 1, PlotStyle → {Black}, FrameStyle → {{Black, FontFamily → "Arial", 16},
    cociente de aspecto estilo de repre... negro estilo de marco negro familia de tipo de letra
    {Black, FontFamily → "Arial", 16}, {Black, Automatic}, {Black, Automatic}}, FrameLabel →
    negro familia de tipo de letra negro automático negro automático etiqueta de marco
    {StyleForm["Voltaje (V)", FontSize → 18], StyleForm["Masa Patrón (g)", FontSize → 18]}]
    forma de estilo tamaño de tipo de l... forma de estilo tamaño de tipo de letra

```



```
In[*]:= Show[grafCelda1, grafCelda1Model]
```

```
└─ muestra
```



## Calibración Celda 1 pasando a fuerza

```
In[*]:= Celda1Fuerza = Apply[{{#2, (#1 * 10-3) * 9.81} &, Celda1Total, 1]
```

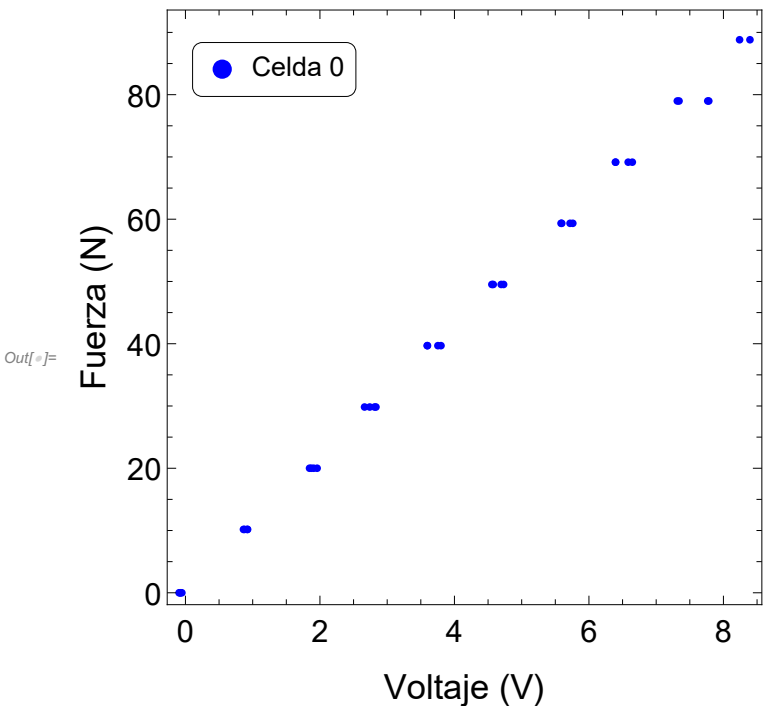
```
└─ aplica
```

Out[\*]=

```
{{-0.09424, 0.}, {0.862663, 10.1764}, {1.87101, 20.0032},
 {2.66329, 29.8354}, {3.59961, 39.69}, {4.55651, 49.5176}, {5.58544, 59.34},
 {6.39315, 69.1592}, {7.31404, 78.9862}, {8.24007, 88.8201}, {7.33976, 78.9862},
 {6.39829, 69.1592}, {5.59573, 59.34}, {4.57709, 49.5176}, {3.59447, 39.69},
 {2.74046, 29.8354}, {1.90702, 20.0032}, {0.878097, 10.1764},
 {-0.078806, 0.}, {-0.073661, 0.}, {0.919254, 10.1764}, {1.95847, 20.0032},
 {2.83306, 29.8354}, {3.80025, 39.69}, {4.73143, 49.5176}, {5.7192, 59.34},
 {6.64524, 69.1592}, {7.76677, 78.9862}, {8.39441, 88.8201}, {7.7822, 78.9862},
 {6.5835, 69.1592}, {5.76036, 59.34}, {4.69542, 49.5176}, {3.75395, 39.69},
 {2.81248, 29.8354}, {1.84529, 20.0032}, {0.924399, 10.1764}, {-0.053083, 0.}}
```

```

In[ ]:= grafCelda1Fuerza = ListPlot[Celda1Fuerza, Frame → True,
    [representación de lista [marco [verdadero
    AspectRatio → 1, PlotStyle → {{RGBColor[0 / 255, 0 / 255, 255 / 255]}},
    [cociente de aspecto [estilo de represe... [color RGB
    FrameStyle → {{Black, FontFamily → "Arial", 16}, {Black, FontFamily → "Arial", 16}},
    [estilo de marco [negro [familia de tipo de letra [negro [familia de tipo de letra
    {Black, Automatic}, {Black, Automatic}}, FrameLabel →
    [negro [automático [negro [automático [etiqueta de marco
    {StyleForm["Voltaje (V)", FontSize → 18], StyleForm["Fuerza (N)", FontSize → 18]}},
    [forma de estilo [tamaño de tipo de l... [forma de estilo [valo... [tamaño de tipo de letra
    PlotLegends → Placed[LineLegend[{StyleForm["Celda 0", FontSize → 14]}], Joined →
    [leyendas de rep... [colocado [línea leyenda [forma de estilo [tamaño de tipo de le... [unido
    Automatic, LegendFunction → Frame, LegendMarkerSize → {20, 15}], {0.18, 0.90}]]
    [automático [función de leyenda [marco [tamaño de marcador de leyenda
  
```



```

In[ ]:= ajusteCelda1Fuerza = LinearModelFit[Celda1Fuerza, x, x]
    [ajusta a modelo lineal
  
```

```

Out[ ]:= FittedModel[ 0.778796 + 10.4475 x ]
  
```

```

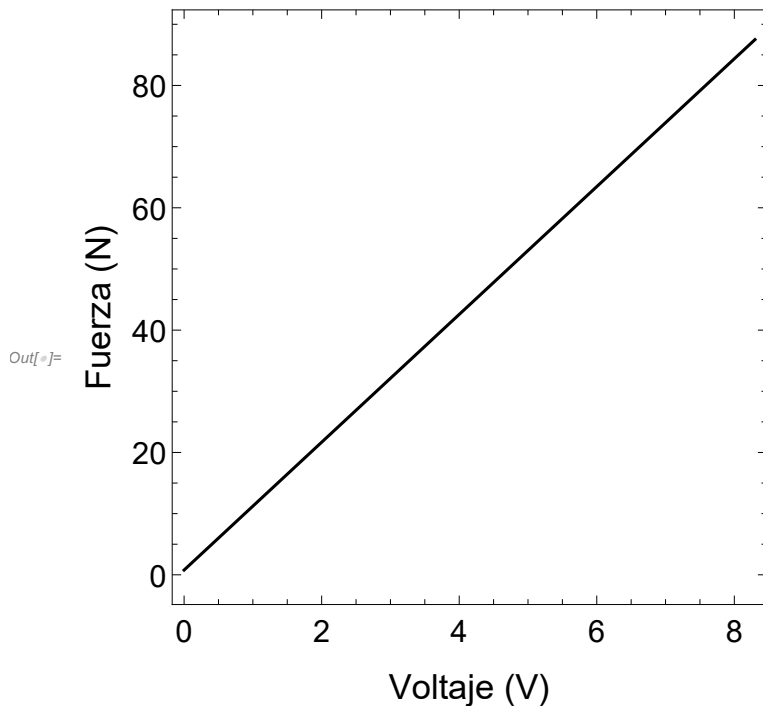
In[ ]:= ajusteCelda1Fuerza["ParameterTable"]
  
```

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
1	0.778796	0.347947	2.23826	0.0314809
x	10.4475	0.0734378	142.263	4.06814 × 10 <sup>-51</sup>

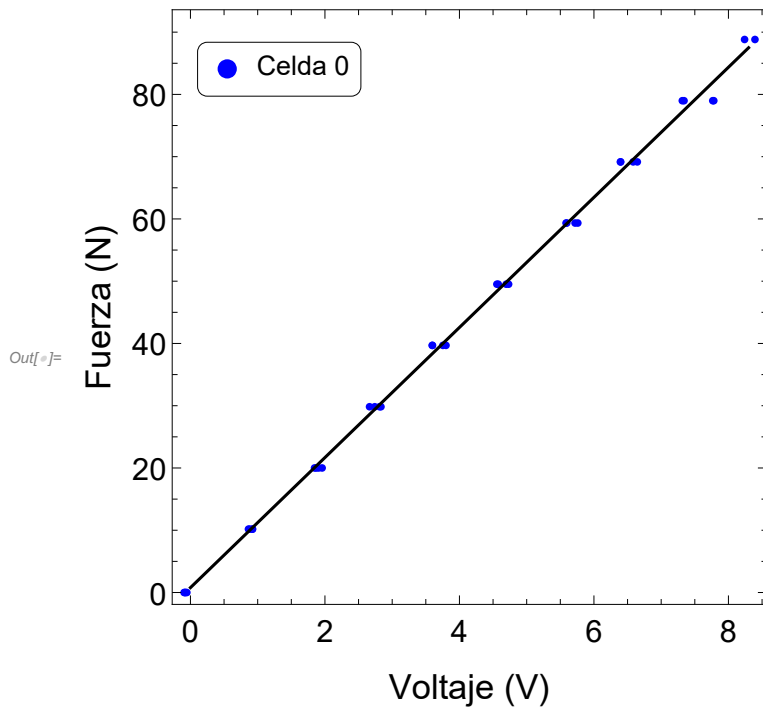
```

In[ ]:= grafCelda1ModelFuerza = Plot[ajusteCelda1Fuerza[x], {x, 0, 8.3}, Frame → True,
    [representación gráfica [marco [verdadero
  AspectRatio → 1, PlotStyle → {Black}, FrameStyle → {{Black, FontFamily → "Arial", 16},
    [cociente de aspecto [estilo de repre... [negro [estilo de marco [negro [familia de tipo de letra
    {Black, FontFamily → "Arial", 16}, {Black, Automatic}, {Black, Automatic}}, FrameLabel →
    [negro [familia de tipo de letra [negro [automático [negro [automático [etiqueta de marco
    {StyleForm["Voltaje (V)", FontSize → 18], StyleForm["Fuerza (N)", FontSize → 18]}}]
    [forma de estilo [tamaño de tipo de l... [forma de estilo [valo... [tamaño de tipo de letra

```



```
In[*]:= ModeloFuerzaCelda1 = Show[grafCelda1Fuerza, grafCelda1ModelFuerza]  
      muestra
```



```
In[*]:= Export["F:\\Isis\\Programas LabView\\Celdas de Carga\\DatosCalibracion\\Pruebas  
      exporta  
      10-08-2023\\ModeloFuerzaCelda1.svg", ModeloFuerzaCelda1]
```

Out[\*]:= F:\\Isis\\Programas LabView\\Celdas de  
 Carga\\DatosCalibracion\\Pruebas 10-08-2023\\ModeloFuerzaCelda1.svg

## Apéndice K

Liga con información adicional de la cámara de Thorlabs utilizada.

Liga: <https://www.thorlabs.com/catalogpages/Obsolete/2021/DCC1240M.pdf>





## Bibliografía

---

- [1] C. Hardy, *Ingenieros y las torres de marfil*. México: McGraw-Hill, 1998. [2](#)
- [2] P. G. Mayor, *Introducción a la ingeniería*. Bogotá, Colombia: Prentice may., 2001. [2](#)
- [3] A. M. D., “Tres esferas de acción del pensamiento crítico en ingeniería,” *Revista Iberoamericana De Educación*, vol. 49, no. 3, pp. 2–3, 2009. [2](#)
- [4] D. R. Askeland, P. P. Fulay, and W. J. Wright, *Ciencia e ingeniería de materiales*. CENGAGE Learning, 2012. [6](#)
- [5] H. W. Reinhardt., “On the biaxial testing and strength of coated fabrics,” *Experimental Mechanics*, vol. 16, no. 2, pp. 71–74, 1976. [9](#), [15](#)
- [6] A. Smits, “Design of a cruciform specimen for biaxial testing of fibre reinforced composite laminates,” *Composites Science and Technology*, vol. 66, no. 7, pp. 964–975, 2006. [13](#)
- [7] F. A. F. António B. Pereira, “Biaxial testing machine: Development and evaluation,” *Machines 2020*, vol. 8, no. 40, 2020. [20](#)
- [8] M. Jiang, “A versatile biaxial testing platform for soft tissues,” *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2020. [20](#)
- [9] D. O. F. Vázquez, “Probador Mecanico para Ensayos de Tracción Uniaxial en Materiales Suaves y Tejidos Biológicos,” Master’s thesis, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México, Enero 2014. [21](#)
- [10] A. R. Prado, “Diseño Y manufactura de equipo para pruebas de traccion biaxial,” Master’s thesis, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México, 2016. [22](#)

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [11] A. N. Annaidh, “Characterization of the anisotropic mechanical properties of excised human skin,” *J Mech Behav Biomed Mater*, vol. 5, no. 1, 2012. [24](#)