



UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
Cuna de héroes, crisol de pensadores

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

Facultad de Ingeniería Mecánica

Diseño de una máquina de ensayos biaxial de atmósfera controlada.

Tesis que para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecánica.

Presenta:

Javier Ortiz Ortiz

Asesores de tesis:

M.C. Miguel Villagómez Galindo

Dr. Marco Antonio Espinosa Medina

Morelia, Mich., marzo de 2018



CONACYT

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

CONACYT



Este trabajo está dedicado a mi familia.

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a las personas que me acompañaron y me apoyaron a lo largo de su realización.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por permitirme terminar este proyecto.

De manera especial, al M. C. Miguel Villagómez, por asesorarme en la realización de este trabajo, sus conocimientos han sido invaluable.

A Carlos, que ha estado conmigo en momentos buenos y momento difíciles, su apoyo incondicional ha sido parte clave para la terminación de este proyecto.

Al Dr. Marco Espinosa, a la Dra. Georgina Carbajal, al Dr. Juan Felipe Soriano y al Mtro. Christian David Schindler por revisar este trabajo.

Estoy agradecido con el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por su apoyo económico a lo largo de la realización de mis estudios de posgrado.

ABSTRACT

Biaxial tests of biomaterials and biological tissues have been an important issue within the scientific community and that has gradually taken on greater importance due to the interest in being able to characterize these materials that generally present anisotropy, preferred fiber directions, complex structures that with the tests Uniaxial can not be properly characterized.

Furthermore, biological tissues tend to decompose rapidly due to bacterial and other microorganism action, which causes their mechanical properties to be modified due to said decomposition, which is why the development of adequate protocols for their testing under a controlled atmosphere is required. That is why in the present work a biaxial tension testing machine is designed to determine the mechanical properties of different biomaterials in an atmosphere of controlled temperature and humidity similar to that of the human body or any other animal species.

Keywords: biomaterial, biaxial test, mechanical properties, anisotropic.

RESÚMEN

Los ensayos biaxiales de biomateriales y tejidos biológicos han sido un tema importante dentro de la comunidad científica y que paulatinamente ha ido tomando mayor importancia debido al interés en poder caracterizar estos materiales que generalmente presentan anisotropía, direcciones preferentes de fibras, estructuras complejas que con los ensayos uniaxiales no se pueden caracterizar adecuadamente.

Más aún, los tejidos biológicos tienden a descomponerse rápidamente debido a la acción bacteriana y de otros microorganismos lo que provoca que sus propiedades mecánicas se modifiquen debido a dicha descomposición, por lo que se requiere del desarrollo de protocolos adecuados para su ensayo bajo una atmósfera controlada. Es por ello que en el presente trabajo se diseña una máquina de ensayos a tensión biaxial que determine las propiedades mecánicas de diferentes biomateriales en una atmósfera de temperatura y humedad controlada similar a la del cuerpo humano o de cualquier otra especie animal.

Palabras claves: biomaterial, ensayo biaxial, propiedades mecánicas, anisotrópico, Tejidos.

ÍNDICE

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iii
ABSTRACT	iv
RESÚMEN	v
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABLAS	11
GLOSARIO	12
Capítulo 1 Introducción	13
1.1. Justificación	14
1.2. Hipótesis	15
1.3. Objetivos y aportaciones esperadas	15
1.3.1. Objetivo general	15
1.3.2. Objetivos específicos	15
1.4. Metodología	16
1.5. Trabajos relacionados con la presente tesis	17
Capítulo 2 Antecedentes	18
2.1. Introducción	18
2.2. Carga biaxial	18
2.3. Máquinas de ensayo biaxial actualmente desarrolladas	20
Capítulo 3 Selección del tamaño del espécimen a analizar en la máquina de ensayos.	23
3.1. Introducción	23
3.1.1. Selección del tamaño del espécimen a analizar en la máquina de ensayos biaxial.	24
Capítulo 4 Diseño Conceptual de la máquina para ensayos biaxiales.	27
4.1. Mesa de la máquina de ensayos biaxial	28
4.2. Soportes de motores	29
4.3. Soporte de rodamientos lineales	30
4.4. Rodamientos lineales.	30

4.5. Barra corrediza. _____	31
4.6. Placa de conexión motor-correderas _____	31
4.7. Placa de conexión correderas- celda de carga _____	32
4.8. Soporte SHF8 _____	33
4.9. Sujetador de pinzas y elementos de sujeción. _____	33
4.10. Motores a pasos o actuadores lineales _____	35
4.11. Recipiente para baño húmedo. _____	36
4.12. Brazo para cámara de video. _____	36
4.13. Mordazas para probeta. _____	37
<i>Capítulo 5 Selección de componentes electrónicos.</i> _____	39
5.1. Celdas de Carga _____	39
5.2. Interface PhidgetBridge 1046_0 _____	40
5.3. Placa Arduino MEGA _____	41
5.4. Sensor de humedad y temperatura DHT22. _____	42
5.5. Sensor de Temperatura sumergible DS18B20 _____	42
5.6. Sensor de pH. _____	43
5.7. Cámara de video. _____	44
<i>Capítulo 6 Análisis por elemento finito.</i> _____	45
6.1. Introducción _____	45
6.1. Conjunto de barras corredizas. _____	45
6.2. Soporte de motor Nema 23. _____	46
6.3. Base de pinzas: _____	47
6.4. Base de pinzas con celda de carga. _____	48
6.5. Mesa de la máquina de ensayos: _____	49
6.6. Rediseño de la mesa de trabajo. _____	51
<i>Capítulo 7 Modo de uso de la máquina de ensayos biaxial.</i> _____	54
7.1. Introducción. _____	54

7.2. Componentes del sistema.	54
7.3. Descripción del funcionamiento de la máquina de ensayos biaxial.	55
Capítulo 8 Conclusiones y recomendaciones	57
8.1. Conclusiones	57
8.2. Recomendaciones y/o trabajos futuros	58
8.3. Publicaciones derivadas de esta tesis	58
Referencias	59
Anexo: Planos de los elementos de la Máquina de Ensayos Biaxial	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Estados de esfuerzos axial y biaxial [6].	19
Figura 2 Probeta cruciforme [6].	19
Figura 4 Probeta para ensayos biaxiales de textiles de acuerdo a la norma MSAJ/M-02:1995[3].	26
Figura 5 Maqueta virtual de la primera propuesta de la máquina de ensayos biaxial.	27
Figura 6 Maqueta virtual de la segunda propuesta de Máquina de ensayos biaxial.	28
Figura 7 Mesa de la máquina de ensayos biaxial.	29
Figura 8 Soportes de motores.	29
Figura 9 Soporte de rodamientos lineales.	30
Figura 10 Rodamiento LM8UU.	31
Figura 11 Barra corrediza.	31
Figura 12 Placa de conexión motor-correderas.	32
Figura 13 Placa de conexión corredera-celda de carga.	32
Figura 14 Soporte SHF8.	33
Figura 15 Sujetador de pinzas para semieje con celda de carga.	34
Figura 16 Sujetador de pinzas para semieje sin celda de carga.	34
Figura 17 Motores a pasos o actuadores lineales.	35
Figura 18 Recipiente de baños húmedos.	36
Figura 19 Soporte de cámara de video.	37
Figura 20 Mordaza para sujeción de la probeta. (a) ensamble, (b) despiece.	38
Figura 21 Sujeción de probeta por medio de ganchos metálicos [25].	38
Figura 22 Localización de las celdas de carga en la máquina de ensayos biaxial.	39
Figura 23 Interface PhidgetBridge 1046_0.	40
Figura 24 Placa Arduino MEGA.	41
Figura 25. Sensor de humedad DTH22	42
Figura 26. Sensor de temperatura sumergible DS18B20.	43
Figura 27. Sensor de humedad.	44

<i>Figura 28. Cámara de video.</i>	44
<i>Figura 29. Análisis por elemento finito del par de barras corredizas.</i>	46
<i>Figura 30. Análisis por elemento finito del soporte de motor nema 23.</i>	47
<i>Figura 31. Análisis de elemento finito de la base de pinzas sin celda de carga.</i>	48
<i>Figura 32. Análisis de elemento finito de Base de Pinzas.</i>	49
<i>Figura 33. Análisis de elemento finito de la mesa de trabajo.</i>	50
<i>Figura 34 Rediseño de la mesa de trabajo.</i>	52
<i>Figura 35 Componentes de la máquina de ensayos biaxial.</i>	55
<i>Figura 36 Direcciones de tracción aplicada a una probeta en la máquina de ensayos biaxial.</i>	56

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1 Trabajos relacionados con la presente tesis</i>	17
<i>Tabla 2 Análisis bibliográfico de máquinas de ensayos para tejidos biológicos y su relación con el tamaño de la muestra.</i>	24
<i>Tabla 3 Especificaciones Actuator Nema 23 [24].</i>	35
<i>Tabla 4 Celdas de carga y características.</i>	40
<i>Tabla 5 Suma de las deformaciones.</i>	51
<i>Tabla 6 Suma de las deformaciones aplicando el rediseño de la mesa de trabajo.</i>	53

GLOSARIO

Tejido	Agrupación de células, fibras y productos celulares varios que forman un conjunto estructural.
Órgano	Parte del cuerpo dotada de una o varias funciones.
Biomaterial	Material del que se pretende que actúe interfacialmente con sistemas biológicos con el fin de evaluar, tratar, aumentar o substituir algún tejido, órgano o función del organismo.
Anisotropía	Variación predecible de una propiedad de un material con la dirección en la que se mide, lo cual puede producirse en todas las escalas.

Capítulo 1 Introducción

Desde la segunda mitad del siglo pasado, las estructuras tensionadas han tenido una rápida evolución gracias al desarrollo de nuevos materiales para diferentes áreas como los biomateriales, polímeros y materiales compuestos. Actualmente encontramos este tipo de estructuras en áreas tan diversas como lo son ingeniería tisular, industria aeroespacial, industria energética (celdas de hidrógeno), industria textil, estructuras inflables, entre otras.

Con el desarrollo de las herramientas computacionales, el uso de modelos de cálculo adecuados son una herramienta útil para diseñar cualquiera de éstas estructuras; para hacer buen uso de esta herramienta es necesario contar con caracterizaciones precisas de los materiales seleccionados.

El presente trabajo está estructurado en ocho capítulos, los cuales se describen a continuación:

En el capítulo 1 se realiza una introducción al tema de tesis, así como el planteamiento de la hipótesis y los objetivos de la misma.

El **capítulo 2**, proporciona los antecedentes para poder entender los términos y conceptos fundamentales para el buen desarrollo de la tesis.

En el **capítulo 3**, se presenta una revisión bibliográfica a partir de la cual se determina el rango óptimo de muestras que podrán ser analizadas en la máquina de ensayos biaxial.

Se realizan bosquejos y diversas propuestas de las piezas que conformarán la máquina de ensayos biaxial, además de una maqueta virtual de esta máquina los cuales se presentan en el **capítulo 4**.

El **capítulo 5**, muestra los componentes electrónicos seleccionados para el funcionamiento de la máquina de ensayos biaxial así como los dispositivos encargados de recolectar la información generada en los ensayos realizados.

Se realizaron los análisis por elemento finito pertinentes de las piezas que conformarán la máquina de ensayos biaxial, los resultados se estudian en el **capítulo 6**.

En el **capítulo 7**, aparece una descripción de los principales componentes de la máquina de ensayos biaxial, así como una descripción del funcionamiento de la máquina de ensayos aquí descrita,

Para finalizar, en el **capítulo 8** se presentan las conclusiones y las recomendaciones derivadas de esta tesis.

1.1. Justificación

Muchos materiales poliméricos y la mayoría de tejidos son anisotrópicos incluso a nivel macroscópico. El hueso, ligamentos y otros tejidos son más fuertes y rígidos en el sentido longitudinal de las fibras del que se componen que en dirección transversal. Para tales materiales es necesario más de una constante elástica para relacionar esfuerzo y propiedades de deformación [1].

Para poder determinar dichas constantes elásticas en más de una dirección es necesario contar con una máquina que esfuere una probeta de geometría cruciforme en dos diferentes direcciones perpendiculares en el plano. Así mismo, la máquina debe de ser capaz de medir la fuerza efectuada en la probeta y la deformación causada por la misma.

Por otra parte, los tejidos biológicos al ser degradados por la acción de bacterias y otros microorganismos, requieren de un control adecuado de las condiciones ambientales como son humedad y temperatura además de condiciones que impidan la proliferación de bacterias principalmente en ensayos que requieren muchas horas como los de tensión relajación encaminados a obtener las propiedades viscoelásticas de los biomateriales. Como resultado de la revisión bibliográfica preliminar, así como la búsqueda en internet de compañías que fabriquen máquinas de ensayo biaxiales con semejantes controles biológicos se desprende la casi inexistencia de los mismos, limitándose en muchos de los casos a baños húmedos sin control de temperatura, por lo que el presente trabajo podría

contribuir al desarrollo de un equipo experimental para su uso en el campo tan especializado de la biomecánica, los biomateriales y la ingeniería tisular.

1.2. Hipótesis

Es posible diseñar un dispositivo que permita evaluar el estado de esfuerzo biaxial y permita determinar las propiedades mecánicas de diversos biomateriales y tejidos bajo un medio controlado de humedad, temperatura y bioseguridad.

1.3. Objetivos y aportaciones esperadas

Obtener el diseño de una máquina a tensión biaxial que nos permita obtener las propiedades mecánicas de diversos biomateriales en dos diferentes direcciones en un medio controlado.

1.3.1. Objetivo general

Diseñar una máquina para ensayos a tensión bidireccional para caracterizar diversos biomateriales y tejidos en dos direcciones perpendiculares en un plano, controlando el medio en el que se desarrolla el ensayo.

1.3.2. Objetivos específicos

- Hacer una revisión bibliográfica para determinar el tamaño de espécimen más adecuado para tejidos biológicos y biomateriales blandos.
- Diseñar las diferentes partes mecánicas de la máquina.
- Seleccionar los sensores y actuadores adecuados para el funcionamiento del equipo.

Aportaciones esperadas

Dentro de las aportaciones que se pueden esperar del desarrollo de esta tesis están:

- El diseñar una máquina de ensayos a tensión biaxial que nos permita determinar las propiedades mecánicas de biomateriales en dos diferentes direcciones.
- Otra aportación es la incorporación de un sistema que permita desarrollar los ensayos de materiales con bioseguridad.

1.4. Metodología

Para solucionar los diferentes problemas a lo largo de la investigación se recurrió a la búsqueda bibliográfica y al análisis de elemento finito.

Materiales:

Se requiere del software de diseño Autodesk Inventor para realizar los bosquejos y diseños generados en esta investigación, así como también el software multifísica Ansys para realizar los análisis de elemento finito y simulaciones.

Las propiedades mecánicas de materiales fueron tomadas a partir de la bibliografía, así como datos obtenidos de fabricantes.

Técnicas:

La revisión bibliográfica desprende un tamaño de muestra óptimo y porcentajes de elongación máximos aplicados para a partir de ahí dimensionar el espacio de trabajo de la máquina de ensayo a tensión biaxial.

Posteriormente se continuó con los bosquejos de piezas, análisis de elemento finito y la selección de componentes mecánicos y electrónicos.

1.5. Trabajos relacionados con la presente tesis

A la fecha en la revisión bibliografía que se ha realizado en relación al desarrollo de tecnologías enfocadas al estudio de las propiedades mecánicas de los materiales de manera biaxial, se encontró que existen pocos autores que traten el tema, los cuales se enlistan en la tabla 1 realizando una clasificación de estos autores de acuerdo al tipo de máquina desarrollada. En el presente trabajo se utilizó para el diseño de la máquina de ensayos biaxial, un sistema de aplicación de fuerza de cargas simétricas.

Tabla 1 Trabajos relacionados con la presente tesis

Autor	Configuración de aplicación de la fuerza		
	Marco Flotante	Cargas simétricas	Batería de Servomotores
Carvelli et al[2].		x	
Sadegh et al[3].		x	
Taiyo Kogyo Corp[3].		x	
Zhang et al[4].		x	
Bridgens et al[3].	x		
Alex Heslop[3].	x		
Losch[3].			x

Cabe mencionar que en los trabajos mencionados en la tabla 1 no consideran un control de temperatura y humedad para las probetas a analizar, por lo cual se puede concluir que el presente trabajo representa un aporte para el estado del arte.

Capítulo 2 Antecedentes

2.1. Introducción

El conocimiento de un biomaterial dentro de aplicaciones médicas o patológicas está basado en el funcionamiento y requerimientos impuestos en la especificación funcional del dispositivo médico, implante, etc., así como los requerimientos de la metodología para el tratamiento de la patología médica específica. Para tal fin, el biomaterial deberá ser analizado por completo de sus propiedades mecánicas, químicas, biológicas, etc. [5].

Cada categoría del análisis requiere caracterizaciones detalladas de las propiedades intrínsecas y superficiales del biomaterial así como las características dimensionales. Las características intrínsecas de un biomaterial pueden ser divididas en los siguientes grupos: 1. Mecánicas, 2. Físicas, 3. Químicas, 4. Biológicas [5].

El comportamiento mecánico de los materiales está caracterizado por la forma y los límites a los que varían los valores de sus propiedades mecánicas bajo la acción de la influencia externa derivada de las condiciones de uso. Estas propiedades consisten mayormente de la resistencia a la tracción, rigidez y resistencia a la fatiga[5].

2.2. Carga biaxial

En el estado de esfuerzo biaxial, las fuerzas trabajan en dos direcciones en un volumen infinitesimal, la tercera dimensión es la dirección fuera del plano que es relacionada las dos direcciones en el plano, sólo como un estado de esfuerzos axial como se muestra en la figura 1. Los esfuerzos que actúan en el volumen bajo esfuerzo biaxial pueden ser visualizados como lo muestra la figura 1: las fuerzas están actuando en cuatro áreas perpendiculares al plano, de las cuales los esfuerzos pueden ser calculados dividiendo la fuerza entre el área en la que están actuando [6].

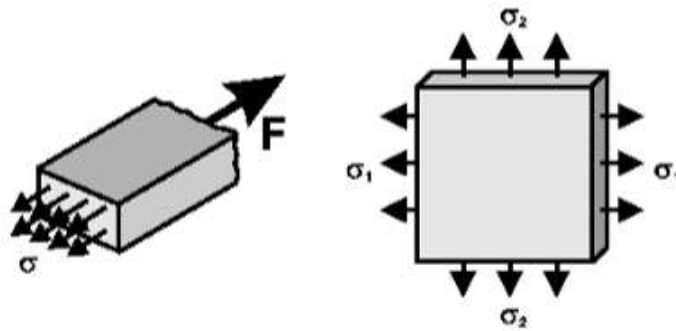


Figura 1 Estados de esfuerzos axial y biaxial [6].

Un factor complicado en el caso biaxial es determinar el área donde las fuerzas están actuando, que nos hace posible determinar los esfuerzos en las direcciones de aplicación de la fuerza, más complicado que en el caso de esfuerzo axial [6].

La básica idea de una probeta en forma de cruz está basada en una prueba de tensión estandarizada, pero con una segunda dirección adherida. Los cuatro brazos de la cruz pueden desplazarse mediante la aplicación de fuerzas a tensión a lo largo de cada uno de ellos, tal como se puede ver en la figura 2 [6].

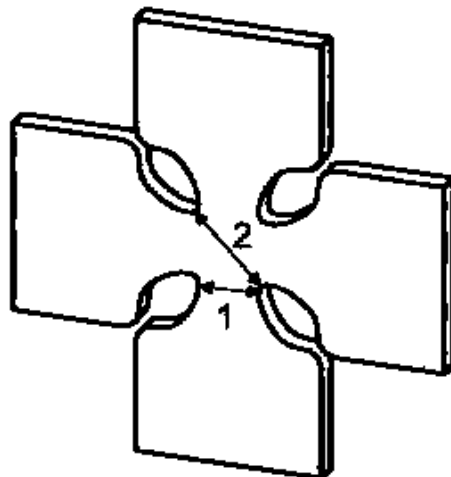


Figura 2 Probeta cruciforme [6].

2.3. Máquinas de ensayo biaxial actualmente desarrolladas

Las primeras investigaciones sobre el uso potencial de ensayos biaxiales fueron llevados a cabo por Reichardt et al (1953) [3][7] (ReichardtCH, 1953) Checkland et al (1958)[3] y Klein (1959), cuyas investigaciones representan el primer enfoque sistemático para la construcción de máquinas de ensayos que pudieran reproducir en las probetas el estado de esfuerzo biaxial. Hoy en día este tema está siendo abordado por muchos investigadores y laboratorios alrededor del mundo, tales como el Instituto para estructuras ligeras y diseño conceptual (ILEK) en Stuttgart, Carvelli et al del Politécnico de Milán, Minami de Taiyo Kogyo Corp., entre otros [3].

De acuerdo al principio adoptado para aplicar la tracción a la probeta, las máquinas de ensayo biaxial se pueden dividir en tres grandes categorías: los sistemas basados en cargas simétricas, los cuales mantienen la probeta centrada en una posición inicial, para posteriormente poder jalarla de los cuatro lados de la probeta en forma de cruz (ver fig. 3); la segunda solución la conforma un marco rígido conformado con baterías de servomotores independientes en cada lado, lo que permite el movimiento perpendicular a la dirección de la fuerza (ver fig. 4); y finalmente sistemas basados en marcos flotantes con dos extremos de la probeta fija y los otros dos tensionando (ver fig. 5)[3].

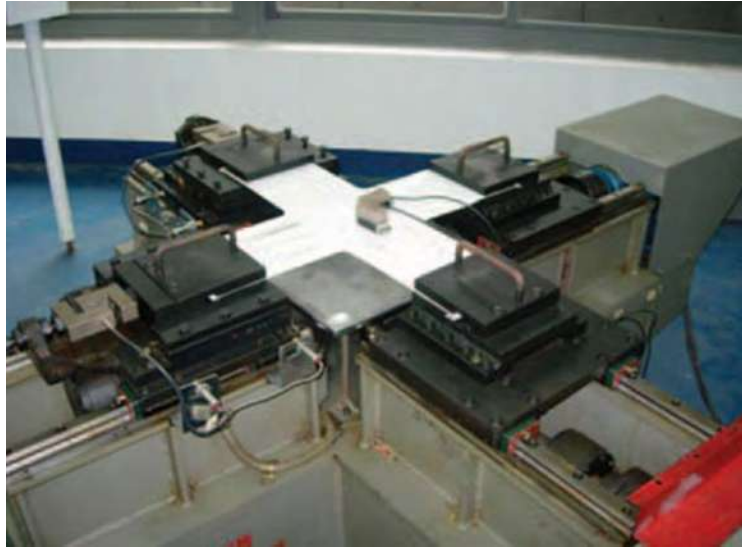


Figura 3 Maquina de ensayo biaxial de cargas simétricas[3].



Figura 4 Maquina de ensayo biaxial en base a servomotores[3].



Figura 5 Máquina de ensayo biaxial de marco flotante[3].

Capítulo 3 Selección del tamaño del espécimen a analizar en la máquina de ensayos.

3.1. Introducción

Un espécimen cruciforme comprende, esencialmente, de una sección de prueba y cuatro brazos de carga unidos a ella. Estos brazos son fijados a una máquina de ensayos a tensión que ejerce tensión biaxial [8].

Los criterios que un espécimen cruciforme ideal debe cumplir son:

1. La región esfuerzo y deformación en la sección de prueba debe ser espacialmente uniforme[8].
2. Como resultado del punto anterior, el esfuerzo puede ser determinado dividiendo la fuerza aplicada entre el área de la sección [8].
3. Ningún otro esfuerzo que no sea en el plano principal de esfuerzos debería desarrollarse en la sección de pruebas. Además, las orientaciones en el plano principal deben estar orientadas con la dirección de los ejes de carga y seguir así a lo largo del experimento [8].
4. La interferencia entre las direcciones de carga deben ser mínima[8].
5. Grandes deformaciones deben ser alcanzadas en el ensayo antes de la falla [8].
6. La falla debe iniciar dentro de la sección de prueba y no fuera de ellas o en sus límites [8].
7. El espécimen debe ser fabricado económicamente [8].

3.1.1. Selección del tamaño del espécimen a analizar en la máquina de ensayos biaxial.

Para la selección del tamaño de espécimen que ha de analizarse en la máquina de ensayos propuesta, se realizó un análisis bibliográfico de pruebas y ensayos a tensión de tejidos vivos (ver tabla 2), en los cuales se encuentra que el tamaño mínimo de muestra es una porción de tejido de 3.5x3.5 mm [9], y un tamaño máximo de muestra de 80 mm de diámetro [10], así como un porcentaje de deformación máximo de entre 170% [11] y 210% [12], por lo cual el rango de muestras para las que la máquina estará diseñada será de 3.5x3.5 mm a 25x25 mm, el porcentaje de elongación máximo considerado para el diseño será de 200%; por lo tanto, el área de trabajo de la máquina será de 3.5 a 50mm.

La tabla 2 nos muestra los artículos revisados, así como también los parámetros para el dimensionamiento de las muestras y el porcentaje de deformación al cual fueron sometidos.

Tabla 2 Análisis bibliográfico de máquinas de ensayos para tejidos biológicos y su relación con el tamaño de la muestra.

Título del Artículo	Tamaño de muestra (mm)	Porcentaje de deformación máximo
A murine experimental model for the mechanical behavior of viable right-ventricular myocardium [13].	20 x 20	ND
An examination of the mechanical properties of the annulus fibrosus: The effect of vibration on the intra-lamellar matrix strength[14].	4 x 4	175
Biaxial mechanical testing of human sclera[12].	6 x 6	210

Biomechanical Properties of the Transverse Carpal Ligament under Biaxial Strain[15].	5 x 5	150
Combined biaxial and uniaxial mechanical characterization of prosthetic meshes in a rabbit model[11].	30 x 30	170
Comparison of methods used to measure the thickness of soft tissues and their influence on the evaluation of tensile stress[16].	14 x 14 y 9.5 x 9.5	ND
Experimental and theoretical analyses of the age-dependent large-strain behavior of Sylgard 184 (10:1) silicone elastomer[17].	10 x 60 uniaxial 50 diámetro Inflación	ND
Human thoracic and abdominal aortic aneurysmal tissues: Damage experiments, statistical analysis and constitutive modeling[10].	4 x 15 uniaxial , 45-80 diámetro	ND
Material model calibration from planar tension tests on porcine linea alba[18].	50 uniaxial	120
Mechanical analysis of ovine and pediatric pulmonary artery for heart valve stent design[9]	3.5 x 3.5	150
Regional and depth variability of porcine meniscal mechanical properties through biaxial testing[19]	7 x 7	ND
Should a native depth-dependent distribution of human meniscus constitutive components be considered in FEA-model soft heknee joint[20]	5.6-14 x 3.2-9.3	ND
The biaxial mechanical behaviour of abdominal aortic aneurysm intraluminal thrombus: Classification of morphology and the determination of layer and regions specific properties[21]	14 x 14	115
The Biomechanics of eyelid tarsus tissue[22]	5 x 5	25
Uniaxial and biaxial mechanical properties of porcine linea alba[23]	20 x 20	135

ND: Dato no disponible

Cabe mencionar que ya con este análisis se cumple con el primer objetivo específico de la presente tesis que es: hacer una revisión bibliográfica para determinar el tamaño de espécimen más adecuado para tejidos biológicos y biomateriales blandos. Como ya se mencionó, el área de trabajo de la máquina de ensayos biaxial será de un mínimo de 3.5 mm x 3.5 mm, hasta un máximo de 50 mm x 50 mm, por lo cual la información presentada en la tabla 2 es útil para determinar uno de las consideraciones de diseño del presente trabajo.

De acuerdo a la revisión bibliográfica, se encontró también que la norma japonesa MSAJ/M-02:1995 sugiere indicaciones respecto al tamaño y la forma de probetas en forma de cruz aplicable a materiales textiles (ver fig. 4)[3], la cual podría ser en parte aplicable a la generación de probetas de tejidos biológicos y biomateriales, con la limitante de la disponibilidad del biomaterial y del tamaño de tejido biológico a analizar. Se toma la norma antes mencionada debido a la inexistencia de una norma de estandarización de probetas cruciformes para tejidos biológicos o biomateriales.

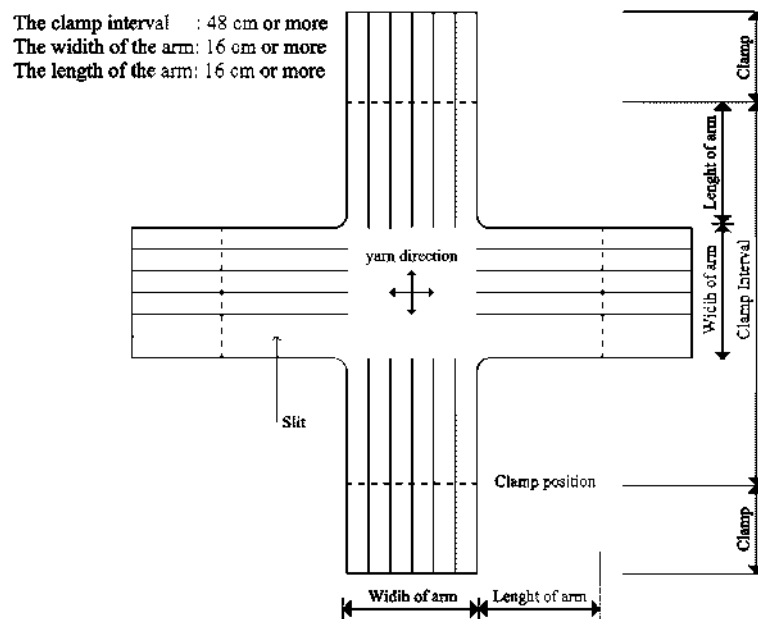


Figura 3 Probeta para ensayos biaxiales de textiles de acuerdo a la norma MSAJ/M-02:1995[3].

Capítulo 4 Diseño Conceptual de la máquina para ensayos biaxiales.

En virtud de la revisión bibliográfica y la oferta de equipos que actualmente se encuentran en el mercado, se eligió una arquitectura cartesiana con un par de motores a pasos por eje, es decir, que se tendrá en el eje x desplazamientos opuestos de las mordazas y de igual manera en el eje y. Se realizaron unos bocetos directamente en el programa de modelado sólido Autodesk Inventor.

Como resultado de la consideración de diferentes factores, dentro de la continuidad del trabajo, se han hecho modificaciones en el diseño de partes y componentes, así como en las dimensiones de algunas partes de la máquina.

En la figura 5 se muestra el ensamble de las piezas propuestas en el principio de este trabajo para la conformación de la máquina de ensayos biaxial; así mismo, en la figura 6 se puede observar la propuesta más reciente.

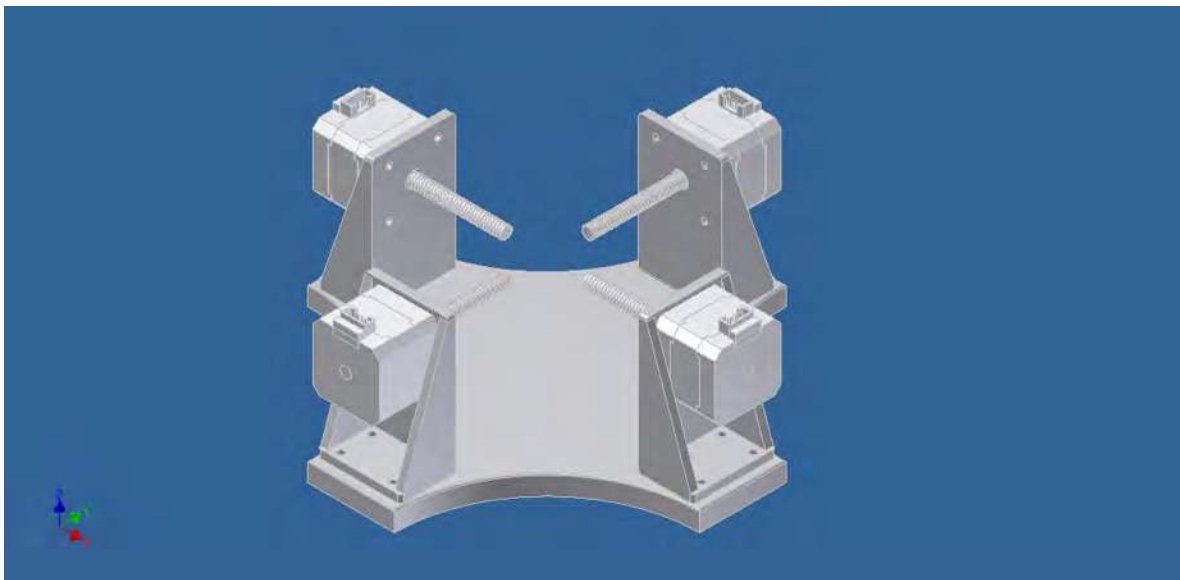


Figura 4 Maqueta virtual de la primera propuesta de la máquina de ensayos biaxial.

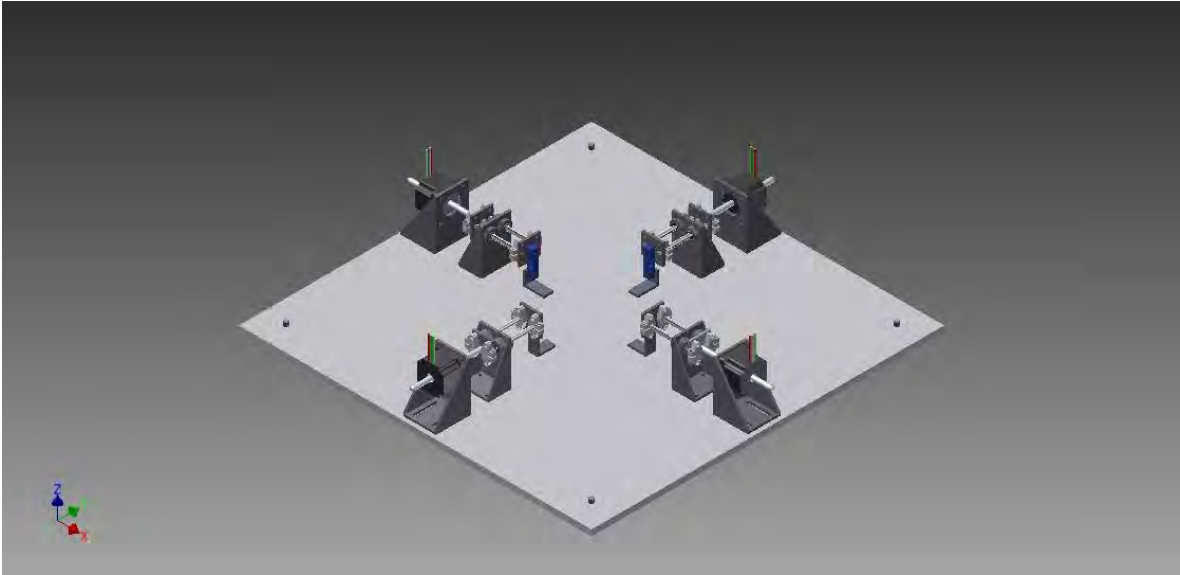


Figura 5 Maqueta virtual de la segunda propuesta de Máquina de ensayos biaxial.

A continuación, se hará una descripción de los elementos o piezas que conformarán la máquina

4.1. Mesa de la máquina de ensayos biaxial

Para la mesa de la máquina de ensayos biaxial se propone una placa metálica en forma de cruz que tendrá como función soportar los motores, fijar aditamentos a la máquina de ensayos biaxial como son: baños húmedos, cámaras de video, extensómetros, campanas con ambientes controlados, etc.

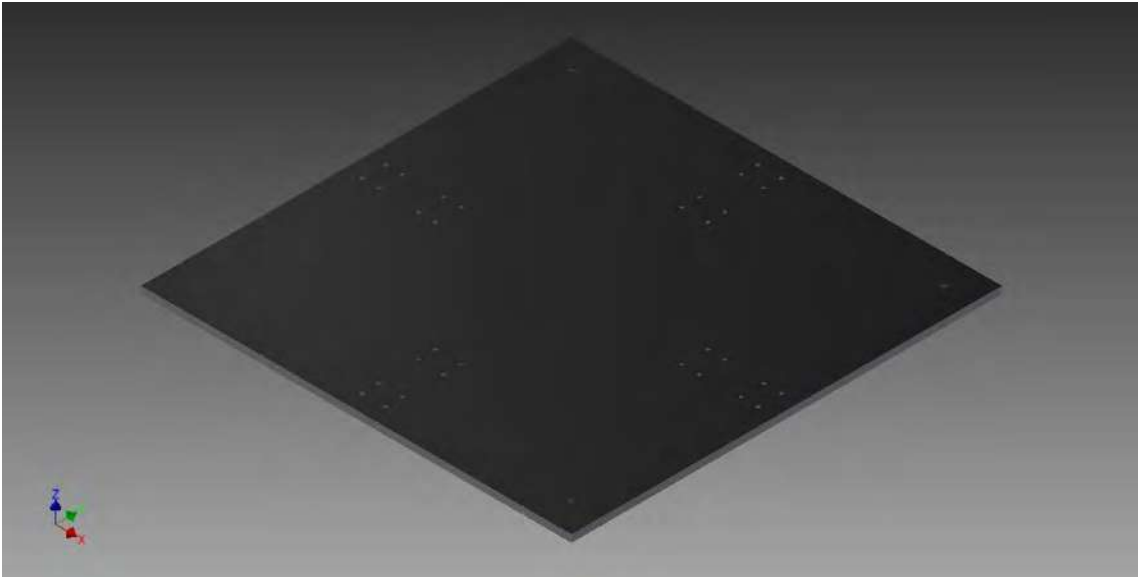


Figura 6 Mesa de la máquina de ensayos biaxial.

4.2. Soportes de motores

Tienen como función sujetar los motores a la mesa y servir como base. Se requerirán cuatro elementos.



Figura 7 Soportes de motores.

4.3. Soporte de rodamientos lineales

Su función es alojar y soportar los rodamientos lineales que servirán como guía de las barras corredizas; se requieren 4 elementos.



Figura 8 Soporte de rodamientos lineales.

4.4. Rodamientos lineales.

Se eligieron rodamientos lineales LM8UU que tendrán la finalidad de proveer de movimiento axial con baja fricción a un eje de 8 mm. Se requieren 8 elementos.



Figura 9 Rodamiento LM8UU.

4.5. Barra corrediza.

Se trata de eje comercial de 8 mm que tiene la función de servir de riel para el desplazamiento rectilíneo de diversos elementos; se usarán 2 piezas en cada dirección en que se efectuará movimiento, requiriéndose en total 8 elementos.

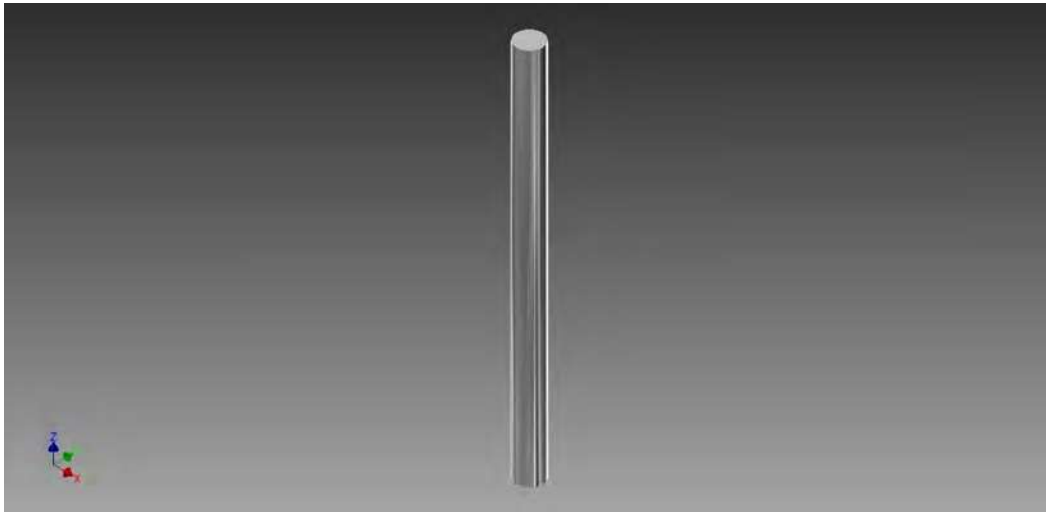


Figura 10 Barra corrediza.

4.6. Placa de conexión motor-correderas

Se trata de una placa que une mecánicamente el eje del motor con las barras corredizas. Se requieren 4 elementos.

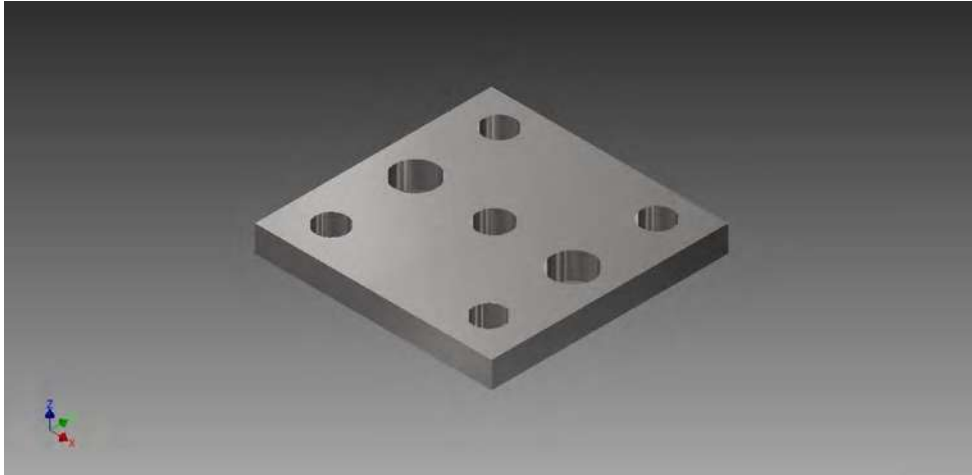


Figura 11 Placa de conexión motor-correderas.

4.7. Placa de conexión correderas- celda de carga

Su función es servir de soporte a las diferentes celdas de carga que serán utilizadas en la máquina de ensayos biaxial. Esta placa conectará por un lado la celda de carga y por el otro las correderas que proporcionan el movimiento rectilíneo. Se requieren dos elementos debido a que se utilizará una celda de carga por eje, una para el eje “x”, y otra para el eje “y”.

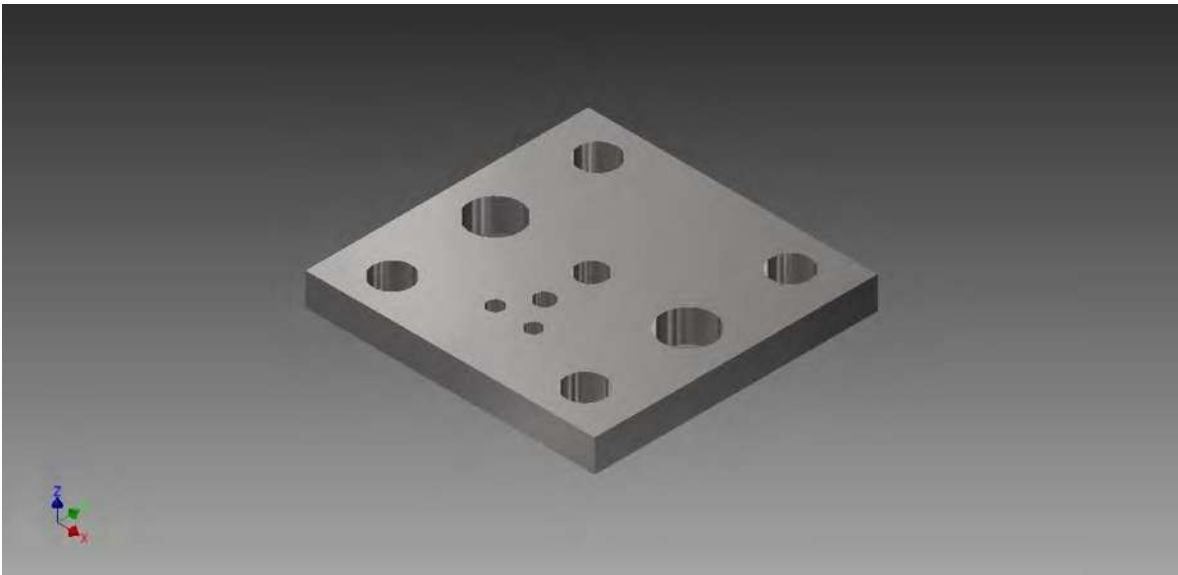


Figura 12 Placa de conexión corredera-celda de carga.

4.8. Soporte SHF8

Se seleccionó el soporte comercial SHF8 para sujetar las barras correderas a las placas de conexión mediante tornillos. Se requieren 8 elementos.



Figura 13 Soporte SHF8.

4.9. Sujetador de pinzas y elementos de sujeción.

Tienen la finalidad de sujetar los elementos de sujeción y pinzado de la probeta a la máquina de ensayos biaxial, se requieren dos tipos de base, una para los semiejes que contarán con celda de carga; (figura 15) y otro para los semiejes que no cuentan con celda de carga (figura 16).

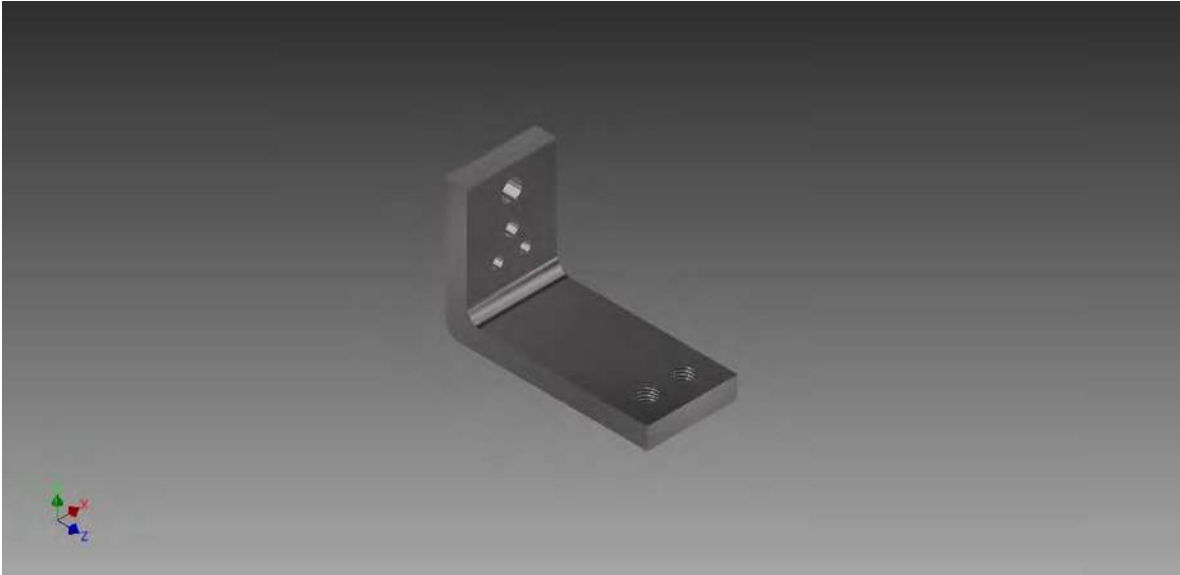


Figura 14 Sujetador de pinzas para semieje con celda de carga.



Figura 15 Sujetador de pinzas para semieje sin celda de carga.

4.10. Motores a pasos o actuadores lineales

Se seleccionaron motores a pasos debido a la precisión que pueden otorgar, se evaluarán las características del motor o actuador a seleccionar, posiblemente Nema 17 o Nema 23, requiriéndose cuatro elementos.

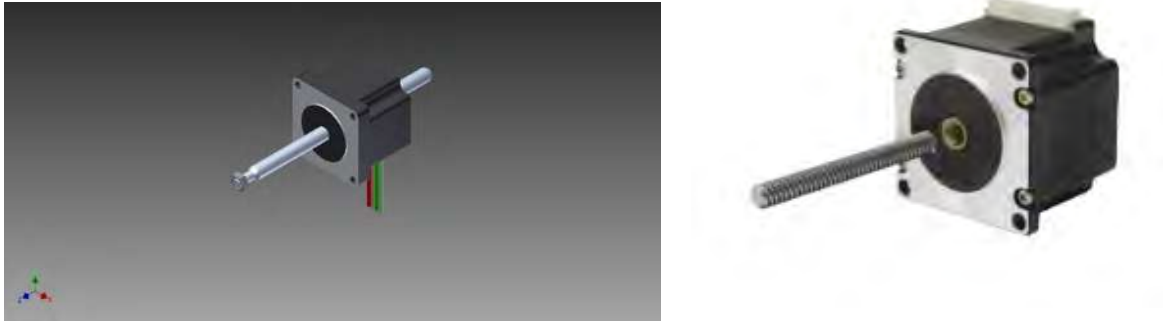


Figura 16 Motores a pasos o actuadores lineales.

Como se puede observar en la tabla 3, de acuerdo a las características de precisión, fuerza y recorrido que se pueden obtener del actuador lineal Nema 23 modelo 23LS20-2006N, [24] sería el motor más adecuado para utilizarse en la máquina de ensayos biaxial.

Tabla 3 Especificaciones Actuador Nema 23 [24].

Model	Resolution mm/Step	Thrust N	Current A/Phase	Resistance Ohm/Phase	Inductance mH/Phase	Length mm	Weight Kg
23LS17-0504N	0.04	180	0.5	12	20	41	0.7
23LS17-1006N	0.02	200	1	5	5	41	0.7
23LS17-0706N	0.01	240	0.7	17	15	45	0.85
23LS20-0884N	0.02	230	0.88	7	21	51	1.0
23LS20-2006N	0.01	250	2	1.72	2.86	51	1.0

4.11. Recipiente para baño húmedo.

Este elemento tiene la finalidad de contener las sustancias donde se sumerja la probeta el tiempo en el que se lleve a cabo el ensayo, además de contener los sensores de humedad, temperatura, sensor de pH y resistencias calentadoras con la finalidad de controlar el medio donde se desarrolla el ensayo.

El recipiente tiene forma de cruz tal como lo muestra la figura 18, con el objetivo de mantener sumergida la probeta mientras se llevan a cabo los procesos de elongación y relajamiento de la probeta según sea el caso.

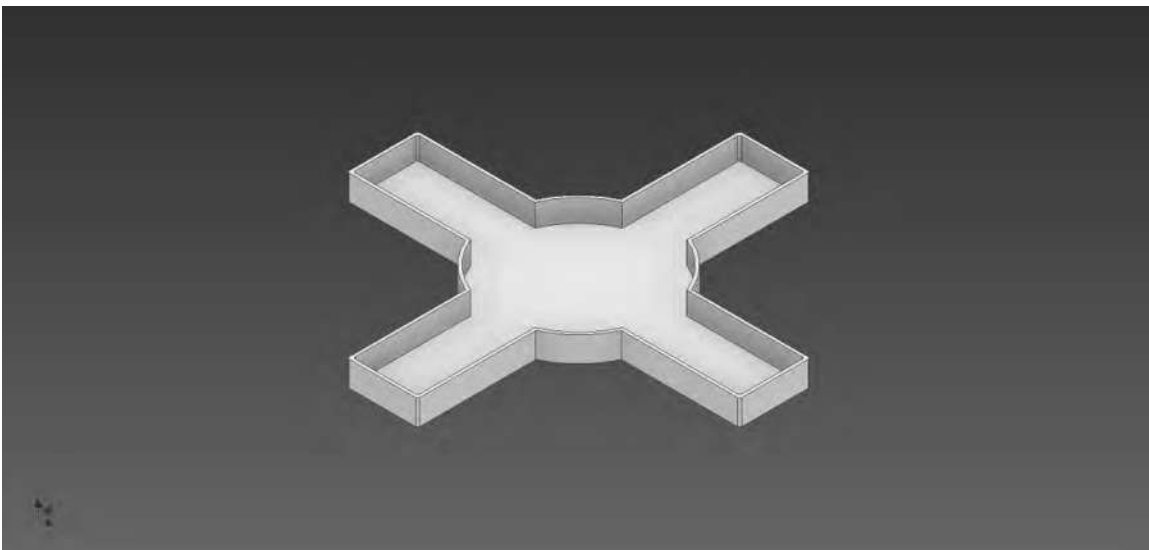


Figura 17 Recipiente de baños húmedos.

4.12. Brazo para cámara de video.

Como elemento de la máquina de ensayos biaxial se incluye una cámara de video que tendrá la función de recopilar imágenes para posteriormente se analizarán para determinar las elongaciones sufridas en la probeta. Debido a la necesidad de incluir esta cámara de video, se ha diseñado un brazo que tiene la función de sujetar y enfocar éste determinado componente para de esta manera obtener de manera correcta las imágenes. El brazo será

ajustable tanto en altura como en la posición respecto al centro de la probeta tal como lo muestra la figura 19.

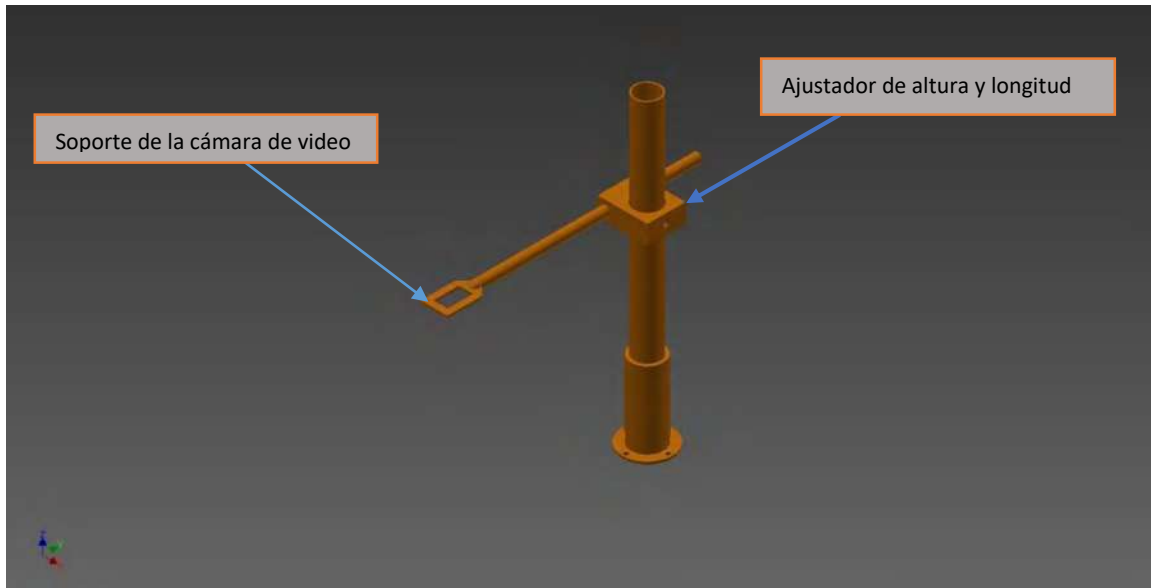


Figura 18 Soporte de cámara de video.

4.13. Mordazas para probeta.

Estas piezas tienen la función de sujetar la probeta en las cuatro direcciones perpendiculares mientras se les aplica tracción. Estas piezas están en contacto por una parte con la parte motriz de la máquina de ensayos, y por otra parte con la probeta, y deben de ser capaces de sujetar la probeta mientras se realiza el ensayo y no permitir su deslizamiento para no causar efectos adversos en la medición de las deformaciones. Se propone un par de mordazas con dientes que geoméricamente se complementan unos con otros para asegurar la fijación de la probeta, tal como se muestra en la figura 20.

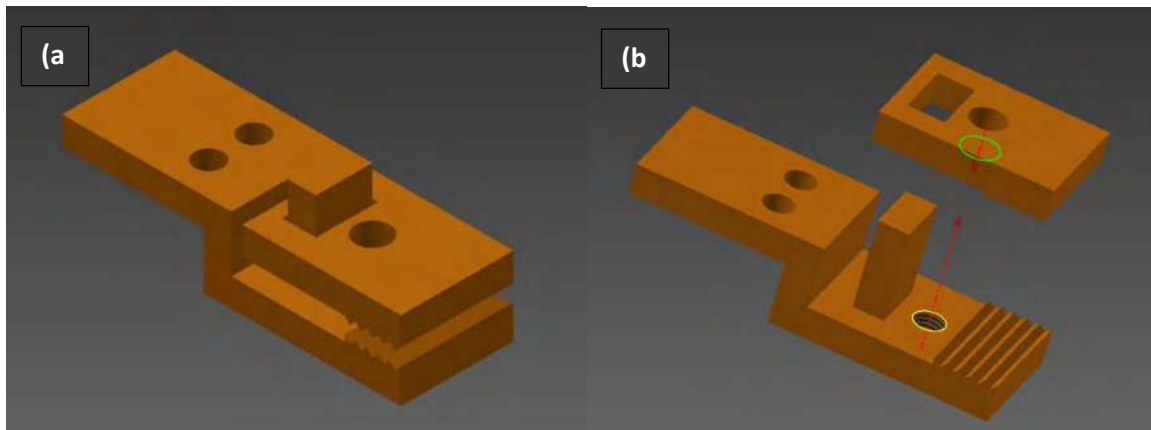


Figura 19 Mordaza para sujeción de la probeta. (a) ensamble, (b) despiece.

Cabe señalar que debido a la variedad de tamaños y texturas de probetas que es posible ensayar, este tipo de mordazas no serán las más adecuadas, siendo sustituidas por ganchos metálicos directamente aplicados a la probeta, tal como lo realiza Cooney et. al.[25] en su investigación, se muestra éste tipo de sujeción en la figura 20.



Figura 20 Sujeción de probeta por medio de ganchos metálicos [25].

Capítulo 5 Selección de componentes electrónicos.

5.1. Celdas de Carga

Una celda de carga es un módulo de medición de fuerza. Las células de carga están diseñados para medir un tipo específico de la fuerza, y no hacer caso de otras fuerzas que se aplican, por lo cual se debe tener cuidado con la dirección de la aplicación de la fuerza, así como con el montaje de la celda de carga [26].

Con la finalidad de obtener un amplio rango de medición de fuerza, con la mayor precisión posible se seleccionaron las celdas de carga mostradas en la tabla (4), requiriéndose 2 elementos de cada una.

La función de las celas de carga en la máquina de ensayos biaxial será medir la fuerza aplicada en la probeta tanto en el eje “x” como en el eje “y”; la ubicación de las mismas en la máquina de ensayos será como se muestra en la figura 22.

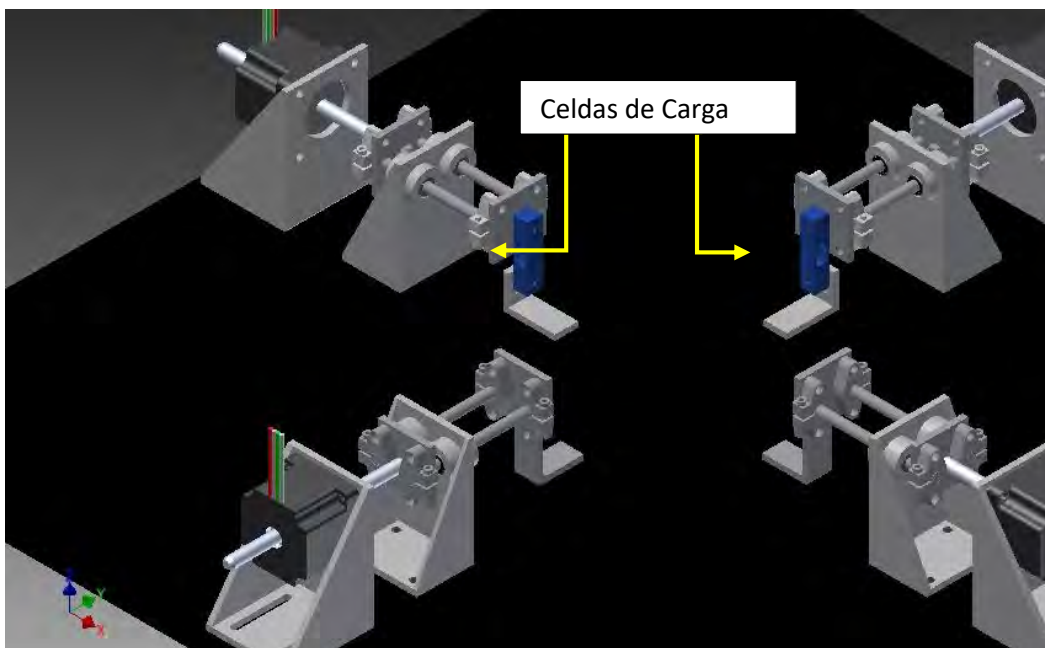


Figura 21 Localización de las celdas de carga en la máquina de ensayos biaxial.

Tabla 4 Celdas de carga y características.

Celda de Carga	Fuerza Máxima (N)
RB-Phi-203	0.981
CZL616C	7.651
CZL635	49.05
CZL635-20	196.2

5.2. Interface PhidgetBridge 1046_0

Esta interface nos servirá para conectar las celdas de carga vía USB con la PC y observar así la fuerza medida en pantalla, es necesario un elemento debido a que la a interface se pueden conectar hasta cuatro celdas de carga [27].

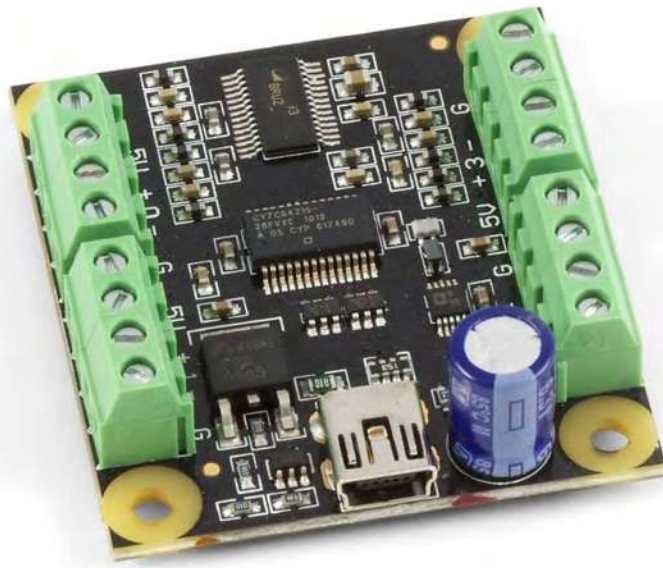


Figura 22 Interface PhidgetBridge 1046_0.

5.3. Placa Arduino MEGA

Es un circuito integrado que consiste en una placa de circuito impreso con un microcontrolador, puertos analógicos y digitales de entrada/ salida los cuales pueden conectarse a sensores, actuadores y otros circuitos integrados, además de tener la posibilidad de intercambiar datos con LabVIEW [28] y MATLAB [29] para hacer el tratamiento de datos y obtener las gráficas esfuerzo-deformación.

Se necesitarán cuatro pines de conexión por celda de carga, cuatro por cada motor, por lo cual podemos sumar 20 pines al momento; además de que se requerirán sensores de humedad, temperatura, pH para la operación de la máquina de ensayos biaxial, los cuales deberán ser conectados.

En virtud a que Arduino MEGA cuenta con 54 pines de conexión, de los cuales 16 son analógicos, es necesaria una placa de este tipo.

Sera necesaria una pieza de este circuito integrado para el control de los motores a pasos y para la recolección de datos de las celdas de carga y demás sensores [30].



Figura 23 Placa Arduino MEGA.

5.4. Sensor de humedad y temperatura DHT22.

Este sensor nos servirá para saber la humedad relativa y la temperatura a la que se está realizando la prueba. Este parámetro es de interés debido a que los tejidos tienden a deshidratarse en condiciones de baja humedad y alta temperatura, por lo cual estos valores deben ser supervisados y controlados. Se muestra el sensor mencionado en la figura 25.

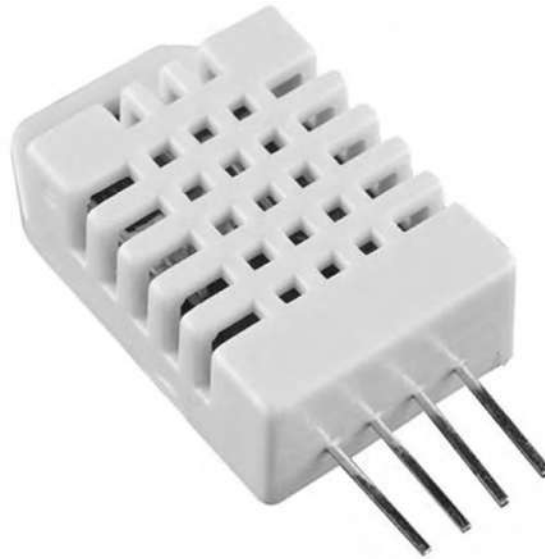


Figura 24. Sensor de humedad DHT22

5.5. Sensor de Temperatura sumergible DS18B20

Será necesario un sensor de temperatura que sea posible sumergir a líquidos con el objetivo de realizar las pruebas a tensión en baños húmedos controlados de temperatura, o en su defecto, baños de vapor. Este sensor cuenta con un tubo de acero inoxidable de 6mm de diámetro y 35 mm de longitud. Se muestra en la siguiente figura un ejemplo del mismo.



Figura 25. Sensor de temperatura sumergible DS18B20.

5.6. Sensor de pH.

Este sensor nos medirá la acidez o alcalinidad de la solución acuosa en la que se sumerja el tejido a analizar. Un valor de pH bajo, inhibe el crecimiento microbiológico que se relaciona con la descomposición de un tejido biológico, afectando sus propiedades mecánicas, es por esto que se justifica la medición de este parámetro. Se muestra en la figura 27 el sensor a utilizar [24].



Figura 26. Sensor de humedad.

5.7. Cámara de video.

La cámara de video ayudará a medir las elongaciones sufridas en la probeta producto de la fuerza aplicada y de esta manera minimizar el error que pudiera provocar la elongación de las celdas de carga o algún otro componente de la máquina de ensayos. Se le tendrán que hacer diversas marcas al espécimen a analizar y por medio de comparación de imágenes medir la elongación.



Figura 27. Cámara de video.

Capítulo 6 Análisis por elemento finito.

6.1. Introducción

Como parte del proceso de diseño, se han llevado a cabo las simulaciones pertinentes en el programa multifísica ANSYS con las condiciones estimadas de funcionamiento en cuanto a fuerzas aplicadas.

Se realizaron las simulaciones bajo las condiciones de carga máxima que el motor a pasos podría aplicar y considerando que el material es acero comercial con módulo de Young de 200 GPa y coeficiente de Poisson de 0.3.

6.1. Conjunto de barras corredizas.

Se trata del ensamble de las barras que someterán a tensión la probeta a analizar, las condiciones de trabajo son un extremo fijo y un extremo sometido a la máxima fuerza que se podría aplicar a la probeta, es decir, la máxima fuerza que el motor pudiera ejercer.

El análisis de elemento finito se realizó con 1033447 nodos y 649483 elementos.

Se encontró que la deformación máxima a lo largo de la dirección de tracción de los motores es $2.5958 \times 10^{-6} m$, así mismo, el esfuerzo máximo es $1.0567 \times 10^7 Pa$, el cual no está sobrepasa el esfuerzo de fluencia del material. Se puede ver en la figura 29 las deformaciones esperadas en la dirección de tracción.

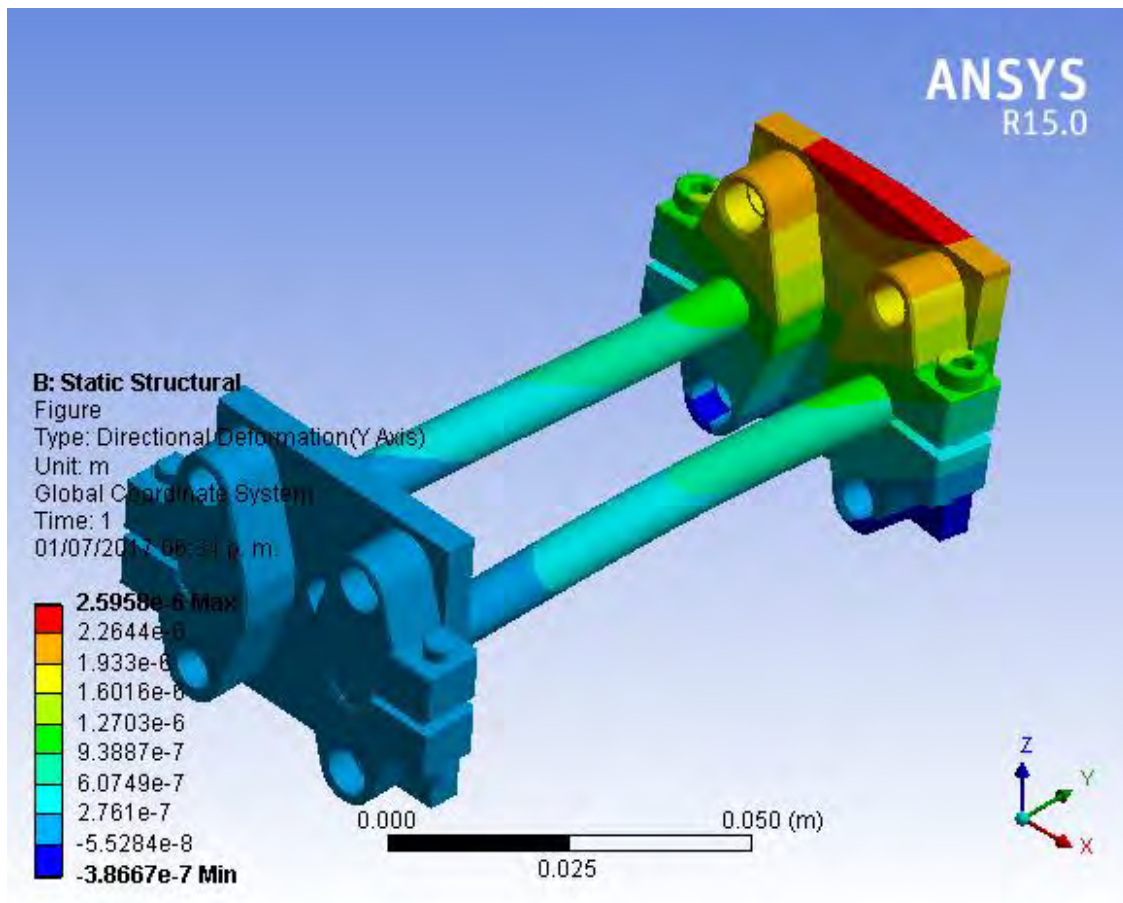


Figura 28. Análisis por elemento finito del par de barras corredizas.

6.2. Soporte de motor Nema 23.

Para estas piezas, el análisis de elemento finito se realizó ejerciendo la misma fuerza máxima y poniendo como fija la parte inferior. El número de nodos es 870887 y 598393 el número de elementos.

Se encontró que la deformación máxima es $3.0066 \times 10^{-9} m$ y el esfuerzo máximo es $1.8191e \times 10^7 Pa$, por lo cual tampoco se rebasa el límite máximo del material.

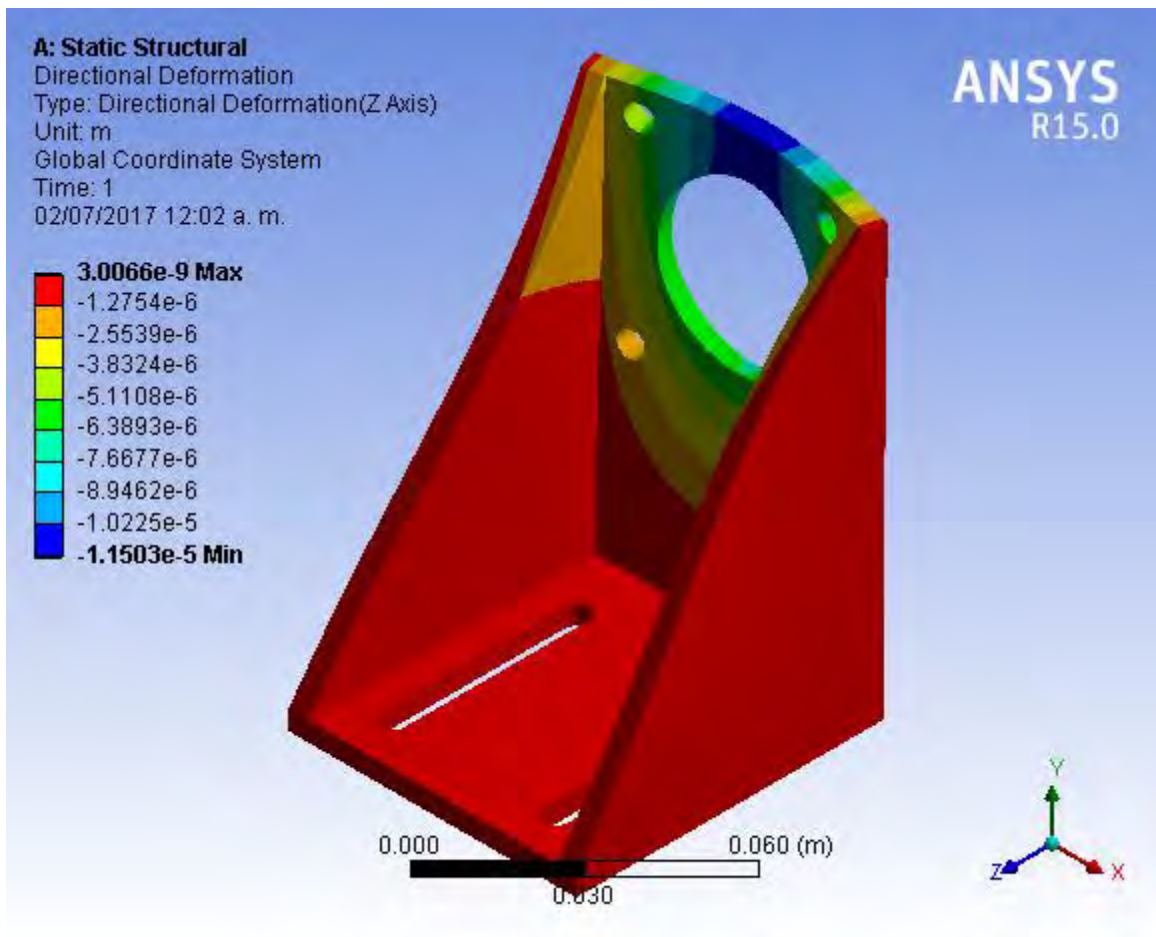


Figura 29. Análisis por elemento finito del soporte de motor nema 23.

6.3. Base de pinzas:

Estas piezas son sometidas a tensión con el espécimen en uno de sus extremos mientras el otro permanece sujeto a la máquina de ensayos. Se generaron 30293 nodos y 19043 elementos. La deformación máxima en la dirección de la carga es $1.0407 \times 10^{-6} \text{ m}$; por otro lado, el esfuerzo máximo es $6.4848 \times 10^6 \text{ Pa}$.

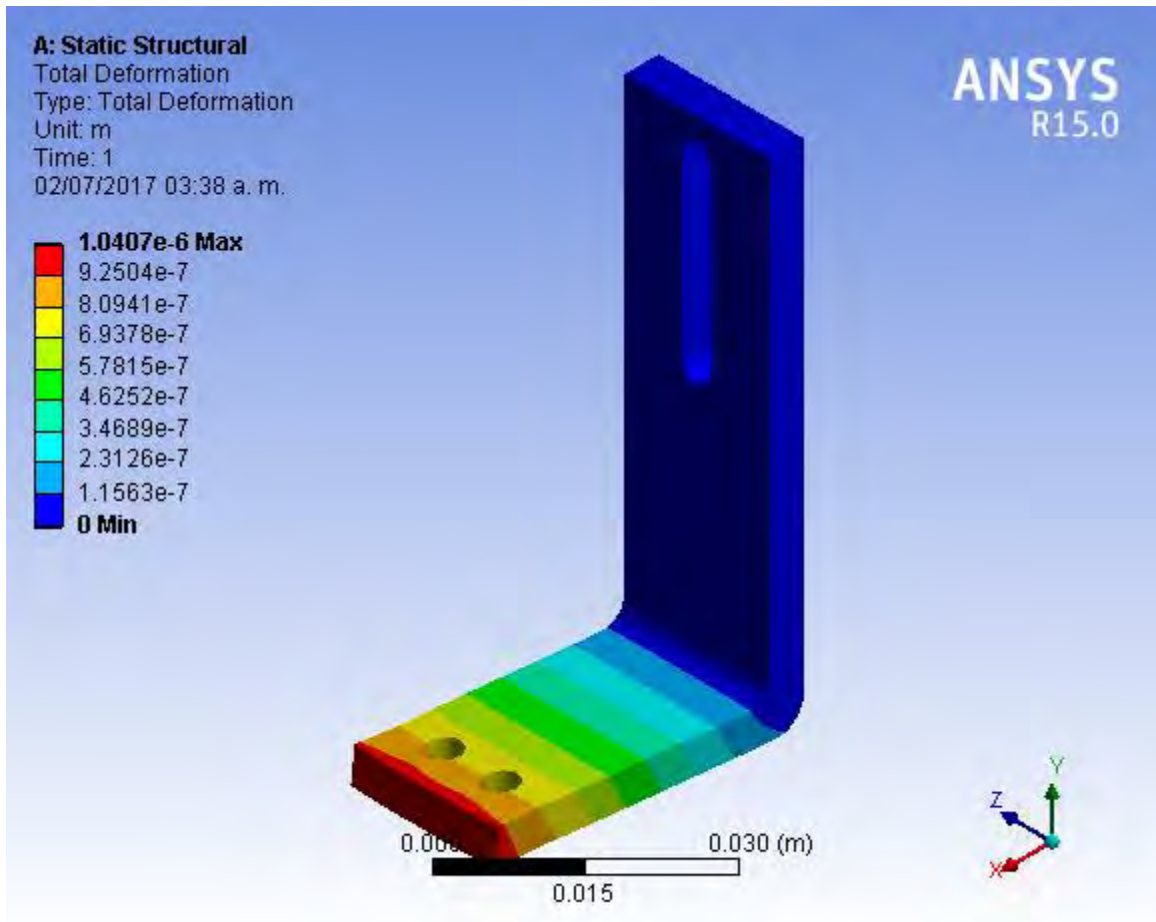


Figura 30. Análisis de elemento finito de la base de pinzas sin celda de carga.

6.4. Base de pinzas con celda de carga.

En este caso se trata de las piezas que son sometidas a tensión por un lado y por el otro está unida a la celda de carga. Se le aplicaron las mismas condiciones y en el elemento finito se obtuvieron 6065 nodos y 3254 elementos. La deformación máxima para este elemento es $6.2246 \times 10^{-7} m$ y el esfuerzo máximo es $6.8518 \times 10^6 Pa$, el cual no sobrepasa el límite elástico del material. Se puede observar la deformación de esta pieza en la siguiente figura.

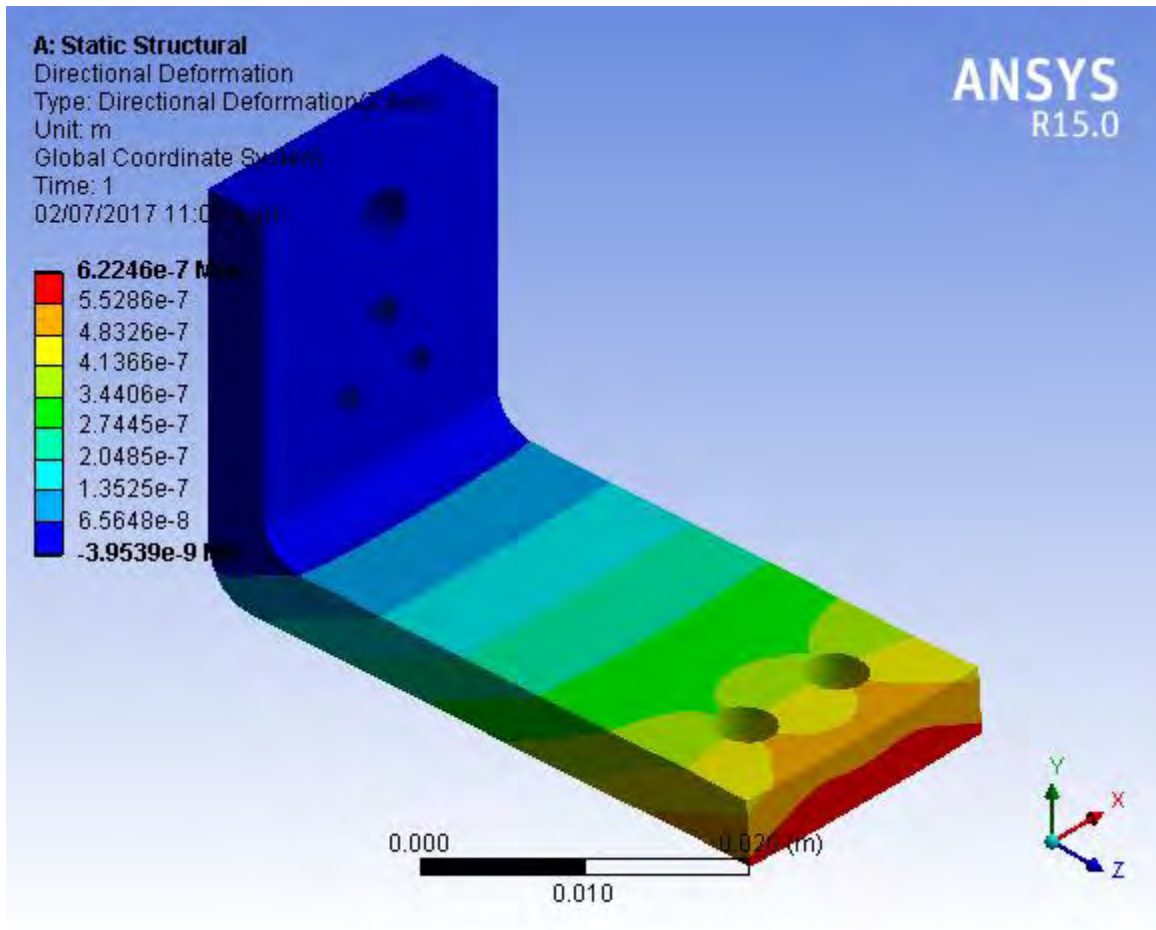


Figura 31. Análisis de elemento finito de Base de Pinzas.

6.5. Mesa de la máquina de ensayos:

Esta pieza tendrá la función de soportar las cargas de los cuatro motores a la vez proporcionando la suficiente rigidez para que su deformación no sea significativa al momento de analizar los resultados, se realizó un análisis de elemento finito en el cual en el mallado se obtuvieron 468714 nodos y 87334 elementos. Las deformaciones máximas se muestran en la siguiente figura:

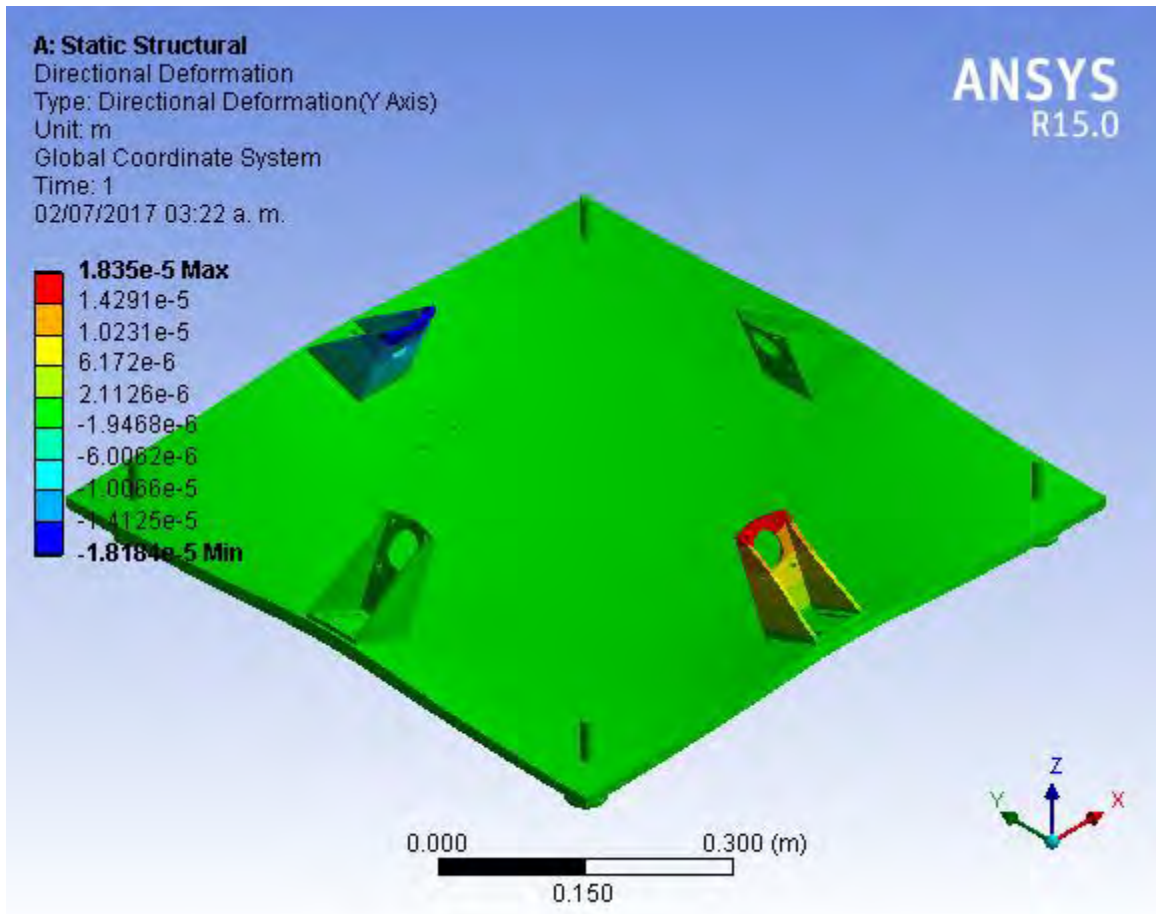


Figura 32. Análisis de elemento finito de la mesa de trabajo.

Como se puede observar, la deformación máxima es de $1.835 \times 10^{-5} m$. Así mismo, del mismo elemento finito se obtiene que el esfuerzo máximo es de $3.8699 \times 10^6 Pa$, el cual, como en los casos anteriores, no excede el límite elástico del material.

Al hacer una suma de las deformaciones de las piezas, encontramos que la deformación total en condiciones de carga máxima en dirección de la aplicación de la carga es de $2.2 \times 10^{-5} m$, tal como lo muestra la tabla 5. Además podemos observar que en este caso no agregamos el valor de la deformación de la base del motor debido a que se encuentra integrada en el conjunto de la mesa de trabajo.

Tabla 5 Suma de las deformaciones.

Acumulación de deformaciones	
Pieza	Deformación (m)
Base de motor.	
Conjunto de barras corredizas.	2.60E-06
Base de Pinzas.	1.04E-06
Mesa	1.84E-05
Total	2.20E-05

Al observar esta suma de deformaciones se tiene que es mayor a la resolución por paso que puede otorgar el motor seleccionado la cual es de 0.01 mm, lo cual sería equivalente a que el motor en carga máxima otorgue dos de sus pasos y no tengamos desplazamiento en la probeta que se esté analizando, por lo cual se debe bajar esta deformación.

6.6. Rediseño de la mesa de trabajo.

Debido a la deformación observada en la parte anterior, fue necesario aumentar los calibres seleccionados para el diseño de la mesa de trabajo que tendrá como función sujetar todas las piezas de la máquina de ensayos; como resultado de este rediseño se tiene el siguiente análisis de elemento finito el cual consta de 126395 nodos y 67004 elementos. En particular la deformación máxima en este caso es de 7.5435×10^{-6} m y el esfuerzo máximo 3.622×10^6 Pa como lo podemos observar en la figura 26.

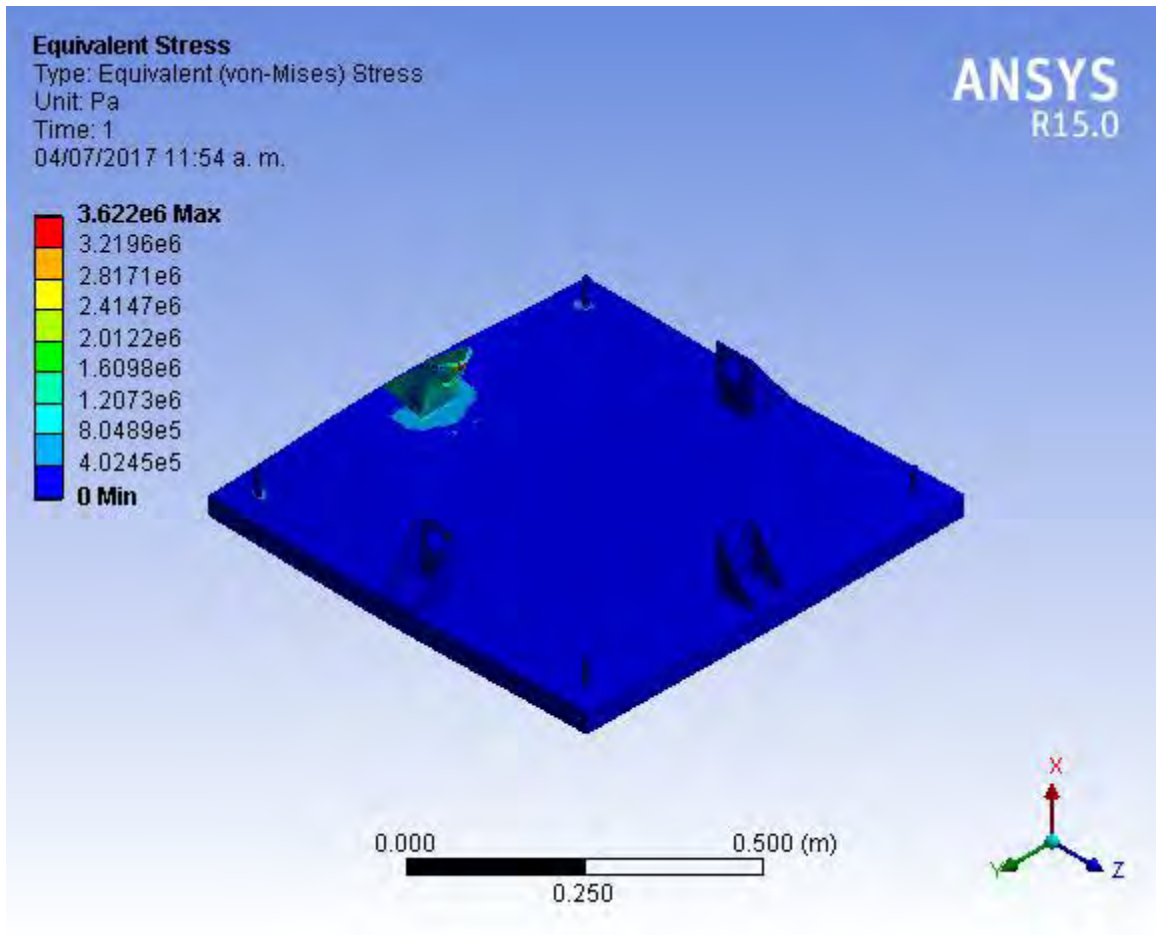


Figura 33 Rediseño de la mesa de trabajo.

Al realizar de nueva cuenta la suma de las deformaciones totales en condición de carga máxima tenemos como resultado la tabla 6 la cual nos muestra que disminuye la deformación total en estas condiciones hasta $1.12 \times 10^{-5}m$.

Tabla 6 Suma de las deformaciones aplicando el rediseño de la mesa de trabajo.

Acumulación de deformaciones	
Pieza	Deformación (m)
Base de motor.	
Conjunto de barras corredizas.	2.60E-06
Base de Pinzas.	1.04E-06
Mesa	7.54E-06
Total	1.12E-05

Capítulo 7 Modo de uso de la máquina de ensayos biaxial.

7.1. Introducción.

La máquina de ensayos biaxial está diseñada para el ensayo a tensión biaxial de especímenes biológicos o biomateriales cuadrangulares o cruciformes cuya medida podrá variar entre 3.5 mm a 50 mm por lado, por lo cual deben ser especímenes delgados. Se diseñó también un control de temperatura, humedad y pH del medio donde se realizará el ensayo, aun así, se recomienda realizar todas las pruebas y ensayos en lugares cerrados.

En este capítulo se realizará una breve descripción de la manera de realizar los ensayos en dicha máquina.

7.2. Componentes del sistema.

Se muestra a continuación una breve descripción de las partes principales de la máquina de ensayos a tensión biaxial, así como su funcionamiento. Se muestra en la figura 35 una señalización de dichos componentes.

1. Mordazas: Su función es sujetar la probeta a evaluar mientras se les aplica una fuerza de tracción en cuatro distintas direcciones perpendiculares. La máquina de ensayos a tensión biaxial requerirá cuatro elementos para su funcionamiento.
2. Conjuntos motrices. Son un conjunto de elementos y móviles y fijos que en conjunto tienen la función de ejercer fuerza y movimiento a la probeta a analizar.
3. Cámara de video. Tiene la función de captar imágenes de las elongaciones producidas a partir de la fuerza aplicada por los elementos motrices. Éstas imágenes serán posteriormente analizadas por un software que determinará las elongaciones ejercidas a la probeta ensayada.
4. Celdas de carga. Éstos elementos serán los encargados de medir la fuerza que se esté siendo aplicada a la probeta en un determinado momento. La información

- proporcionada por estos elementos será utilizada para obtener las propiedades de el material que se esté probando.
5. Alojamiento de baños húmedos. Se trata de un depósito de líquidos para realizar el ensayo en un medio controlado de humedad y temperatura. En este alojamiento tendrán lugar el sensor de temperatura y el sensor de pH para monitorear el estado de la prueba.

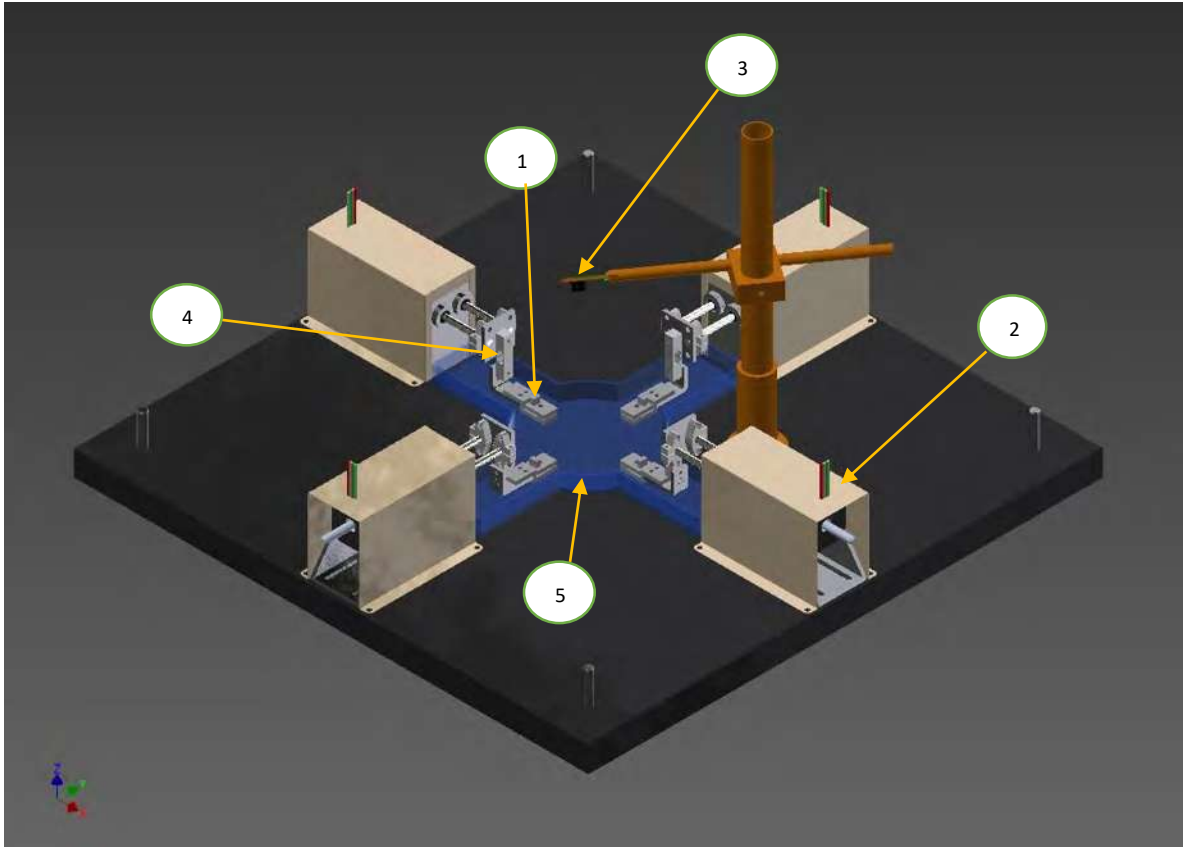


Figura 34 Componentes de la máquina de ensayos biaxial.

7.3. Descripción del funcionamiento de la máquina de ensayos biaxial.

En la figura 36 se muestra una maqueta virtual de una probeta cruciforme sujeta por sus extremos a la máquina de ensayos biaxial. Se muestran también las direcciones de tracción en que la máquina de ensayos ejercerá fuerza y desplazamiento; en color rojo se observa

la dirección “x”, tanto positiva como negativa, y en color verde observamos la dirección “y” de igual manera en sentido positivo como negativo.

La cámara de video se sitúa justo en la parte superior de la probeta, sus articulaciones le permitirán moverla a la zona de mejor ubicación para obtener las imágenes que posteriormente serán analizadas para obtener las deformaciones causadas a la probeta.

El alojamiento para baños húmedos contendrá sustancias que hidratarán y prevendrán la descomposición de la muestra que se esté analizando, además de que la temperatura se monitoreará y controlará para que se mantenga estable durante el tiempo de realización de la prueba.

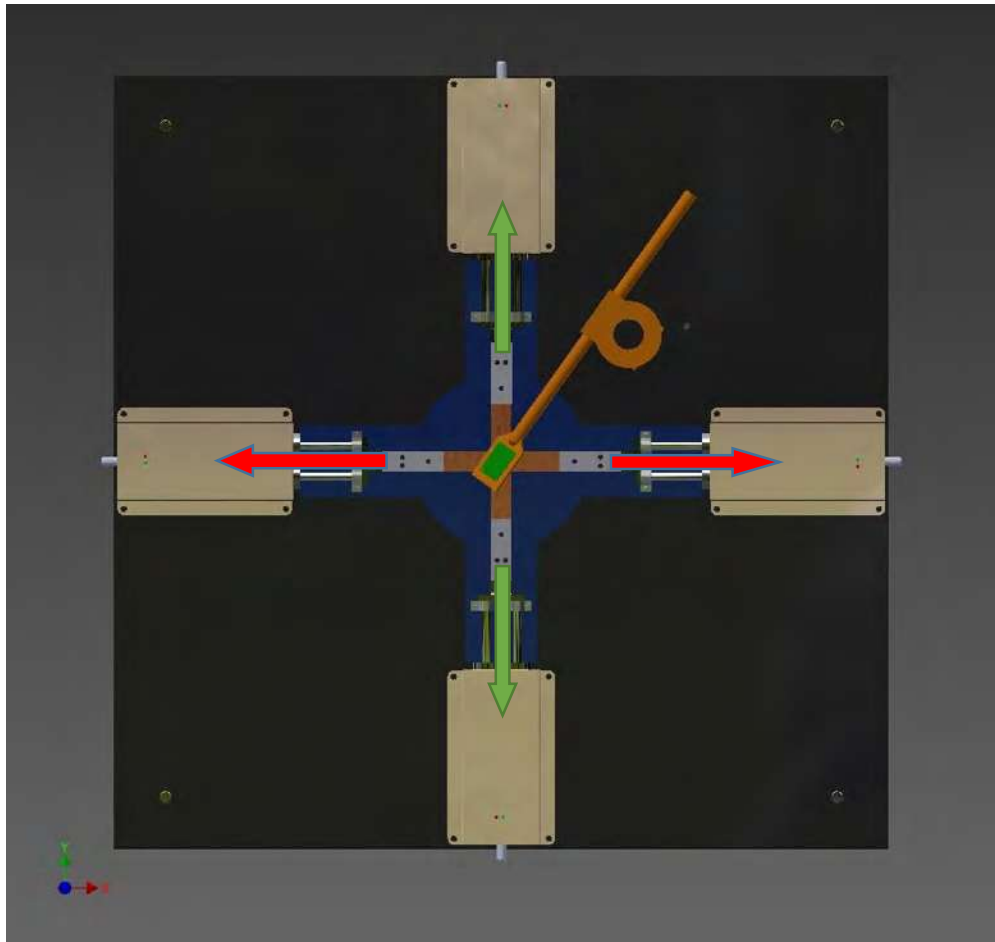


Figura 35 Direcciones de tracción aplicada a una probeta en la máquina de ensayos biaxial.

Capítulo 8 Conclusiones y recomendaciones

8.1. Conclusiones

Como conclusiones derivadas del presente trabajo de tesis, se pueden citar:

- Se llevó a cabo una investigación bibliográfica de la cual se desprende un tamaño promedio de muestras de 3.5x3.5 mm a 25x25, lo que asegura un amplio rango de aplicación de la máquina de ensayos biaxial. Este resultado de la investigación es uno de los parámetros de diseño para determinar el espacio de trabajo de la máquina de ensayos biaxial, el cual es de 3.5 mm x 3.5 mm a 50 mm x 50 mm de acuerdo a las elongaciones máximas desprendidas de la misma revisión bibliográfica.
- De acuerdo a la configuración cartesiana de la máquina de ensayos biaxial, y a la colocación y a la variedad de celdas de carga se asegura la precisión de en la medición de fuerzas efectuadas sobre la probeta.
- Conforme a los resultados de los análisis por elemento finito de las piezas que conformarán la máquina de ensayos biaxial que se realizaron, no se rebasan los límites elásticos de ninguna de las piezas, y en total la suma de las deformaciones no supera la resolución máxima por paso que nos puede otorgar alguno de los motores, esto es a plena carga.
- Se diseñó un dispositivo que alojará la probeta sumergida en un baño húmedo mientras se esté realizando la prueba para mantener bajo control la humedad y la temperatura; además se contará con un monitoreo de pH el cual está relacionado con la proliferación bacteriana.
- Dadas las anteriores conclusiones, se puede decir que se la hipótesis del presente trabajo de tesis es verdades, cumpliéndose con el diseño de una máquina de ensayos que permita evaluar las propiedades mecánicas de diversos biomateriales y tejidos bajo un medio controlado de humedad, temperatura y bioseguridad.

8.2. Recomendaciones y/o trabajos futuros

- Construir la máquina de ensayos biaxial.
- Desarrollar un algoritmo de programación basado en la plataforma Arduino para controlar los actuadores y monitorear la información de los diversos actuadores.
- Validar la máquina de ensayos biaxial comparando los resultados que se obtengan con resultados consultados en bibliografía de algún material específico.
- Hacer un manual de usuario conforme a procedimientos específicos a realizarse antes y durante la ejecución de la prueba.

8.3. Publicaciones derivadas de esta tesis

Se presentó el artículo titulado “Diseño de una Máquina de Ensayos Biaxial de Atmósfera Controlada” en el Congreso Internacional de Investigación Academia Journals Tabasco 2017”, celebrado en la ciudad de Villahermosa, Tabasco, llevado a cabo del 29 al 31 de marzo de 2017.

Referencias

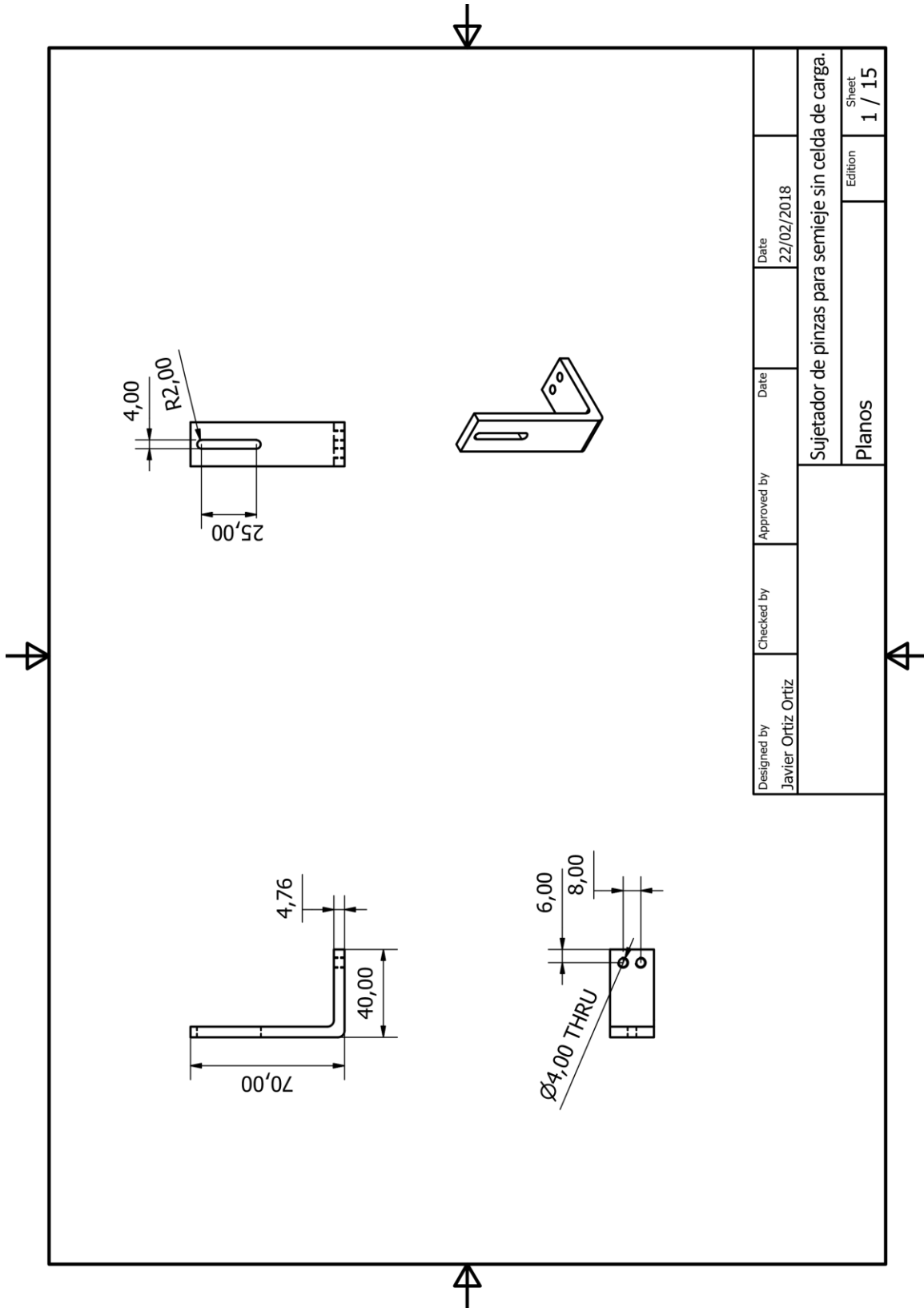
- [1] M. F. Refojo, *Application of Materials in Medicine and Dentistry: Ophthalmologic Applications*. 1996.
- [2] V. Carvelli, C. Corazza, and C. Poggi, "Mechanical modelling of monofilament technical textiles," *Comput. Mater. Sci.*, vol. 42, no. 4, pp. 679–691, 2008.
- [3] S. Briefs and I. N. Applied, *SPRINGER BRIEFS IN APPLIED SCIENCES AND Biaxial Testing for Fabrics and Foils Optimizing Devices and Procedures*. .
- [4] Z. Yingying, Z. Qilin, L. ke, and K. Bei-Lei, "Experimental analysis of tensile behaviors of polytetrafluoroethylene-coated fabrics subjected to monotonous and cyclic loading," *Text. Res. J.*, vol. 84, no. 3, pp. 231–245, 2014.
- [5] D. R. Tobergte and S. Curtis, "Methods and techniques for bio-system's materials behaviour analysis," *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2013.
- [6] G. Quaak, "Biaxial Testing of Sheet Metal : An Experimental-Numerical Analysis," pp. 23–28, 2008.
- [7] † and D. J. M. C. H. Reichardt,* H. K. Woo, "A Two-Dimensional Load-Extension Tester for Woven Fabrics," *Text. Res. J.*, pp. 424–428, 1953.
- [8] N. Deng, T. Kuwabara, and Y. P. Korkolis, "Cruciform Specimen Design and Verification for Constitutive Identification of Anisotropic Sheets," pp. 1005–1022, 2015.
- [9] M. S. Cabrera, C. W. J. Oomens, C. V. C. Bouten, A. J. J. C. Bogers, S. P. Hoerstrup, and F. P. T. Baaijens, "Mechanical analysis of ovine and pediatric pulmonary artery for heart valve stent design," *J. Biomech.*, vol. 46, no. 12, pp. 2075–2081, 2013.
- [10] D. M. Pierce *et al.*, "Human thoracic and abdominal aortic aneurysmal tissues: Damage experiments, statistical analysis and constitutive modeling," *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 41, pp. 92–107, 2015.
- [11] B. R??hrnbauer, Y. Ozog, J. Egger, E. Werbrouck, J. Deprest, and E. Mazza, "Combined biaxial and uniaxial mechanical characterization of prosthetic meshes in a rabbit model," *J. Biomech.*, vol. 46, no. 10, pp. 1626–1632, 2013.
- [12] A. Eilaghi, J. G. Flanagan, I. Tertinegg, C. A. Simmons, G. Wayne Brodland, and C. Ross Ethier, "Biaxial mechanical testing of human sclera," *J. Biomech.*, vol. 43, no. 9, pp. 1696–1701, 2010.
- [13] D. Valdez-Jasso, M. A. Simon, H. C. Champion, and M. S. Sacks, "A murine experimental model for the mechanical behaviour of viable right-ventricular myocardium.," *J. Physiol.*, vol. 590, no. 18, pp. 4571–84, 2012.
- [14] D. E. Gregory and J. P. Callaghan, "An examination of the mechanical properties of the annulus fibrosus: The effect of vibration on the intra-lamellar matrix strength," *Med. Eng.*

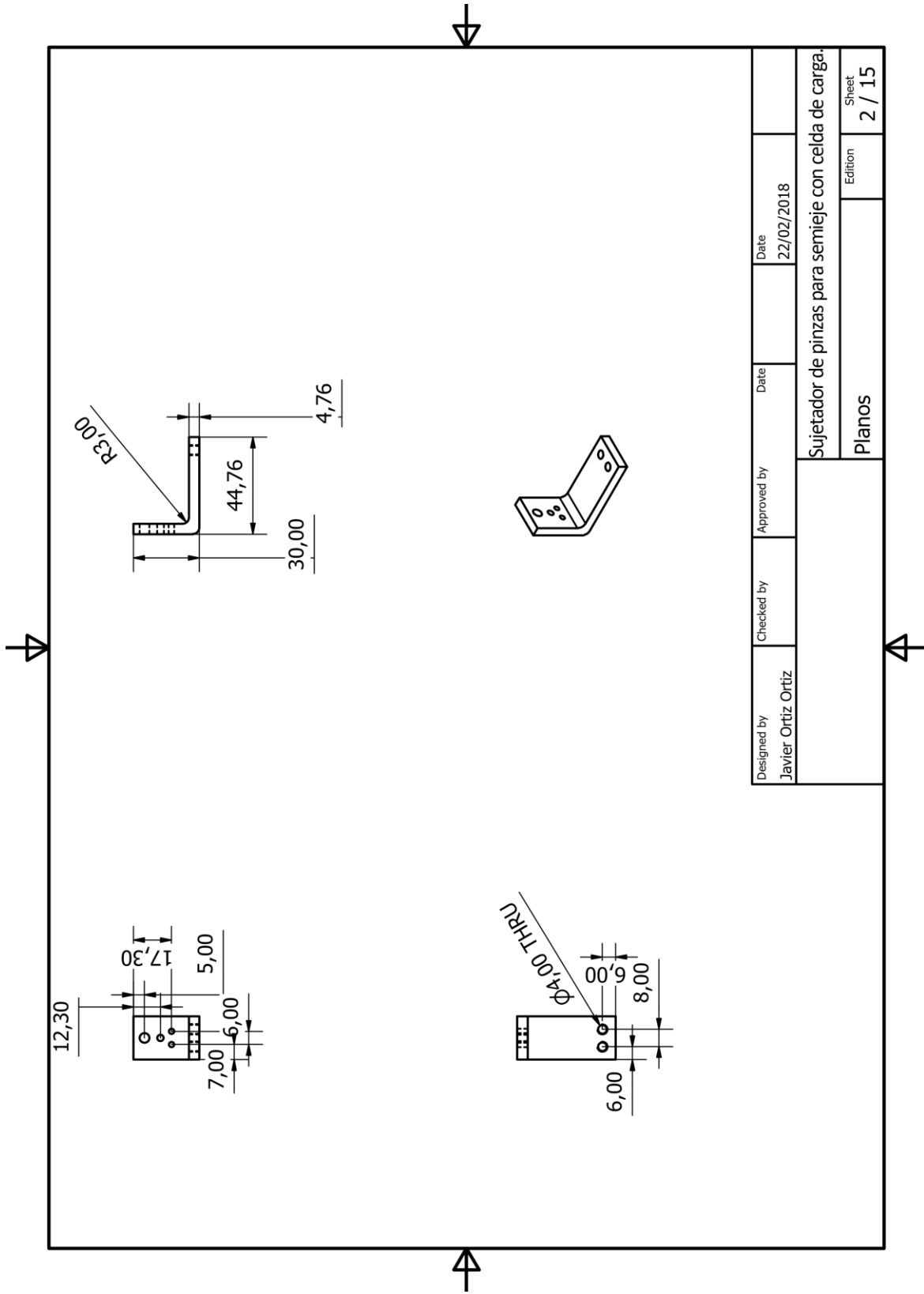
- Phys.*, vol. 34, no. 4, pp. 472–477, 2012.
- [15] M. W. R. Holmes, S. J. Howarth, J. P. Callaghan, and P. J. Keir, “Biomechanical properties of the transverse carpal ligament under biaxial strain,” *J. Orthop. Res.*, vol. 30, no. 5, pp. 757–763, 2012.
- [16] S. A. O’Leary, B. J. Doyle, and T. M. McGloughlin, “Comparison of methods used to measure the thickness of soft tissues and their influence on the evaluation of tensile stress,” *J. Biomech.*, vol. 46, no. 11, pp. 1955–1960, 2013.
- [17] R. Hopf, L. Bernardi, J. Menze, M. Zündel, E. Mazza, and A. E. Ehret, “Experimental and theoretical analyses of the age-dependent large-strain behavior of Sylgard 184 (10:1) silicone elastomer,” *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 60, pp. 425–437, 2016.
- [18] V. Acosta Santamaría *et al.*, “Material model calibration from planar tension tests on porcine linea alba,” *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 43, pp. 26–34, 2014.
- [19] A. Kahlon, M. B. Hurtig, and K. D. Gordon, “Regional and depth variability of porcine meniscal mechanical properties through biaxial testing,” *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 41, pp. 108–114, 2015.
- [20] J. M. Párraga Quiroga, P. Emans, W. Wilson, K. Ito, and C. C. van Donkelaar, “Should a native depth-dependent distribution of human meniscus constitutive components be considered in FEA-models of the knee joint?,” *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 38, pp. 242–250, 2014.
- [21] S. A. O’Leary, E. G. Kavanagh, P. A. Grace, T. M. McGloughlin, and B. J. Doyle, “The biaxial mechanical behaviour of abdominal aortic aneurysm intraluminal thrombus: Classification of morphology and the determination of layer and region specific properties,” *J. Biomech.*, vol. 47, no. 6, pp. 1430–1437, 2014.
- [22] M. T. Sun *et al.*, “The Biomechanics of eyelid tarsus tissue,” *J. Biomech.*, vol. 48, no. 12, pp. 3455–3459, 2015.
- [23] G. M. Cooney, K. M. Moerman, M. Takaza, D. C. Winter, and C. K. Simms, “Uniaxial and biaxial mechanical properties of porcine linea alba,” *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 41, pp. 68–82, 2015.
- [24] “Linear Actuators Nema Size 17 Non-Captive Specification :,” pp. 28837284–28837284.
- [25] G. M. Cooney, K. M. Moerman, M. Takaza, D. C. Winter, and C. K. Simms, “Uniaxial and biaxial mechanical properties of porcine linea alba,” *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 41, pp. 68–82, Jan. 2015.
- [26] “Mechanical Drawing 3132 - Micro Load Cell (0-780g) - CZL616C.”
- [27] “No Title.” [Online]. Available: http://www.phidgets.com/docs/1046_User_Guide.
- [28] “No Title.” [Online]. Available: <http://www.ni.com/labview/esa/>.
- [29] “No Title.” [Online]. Available:

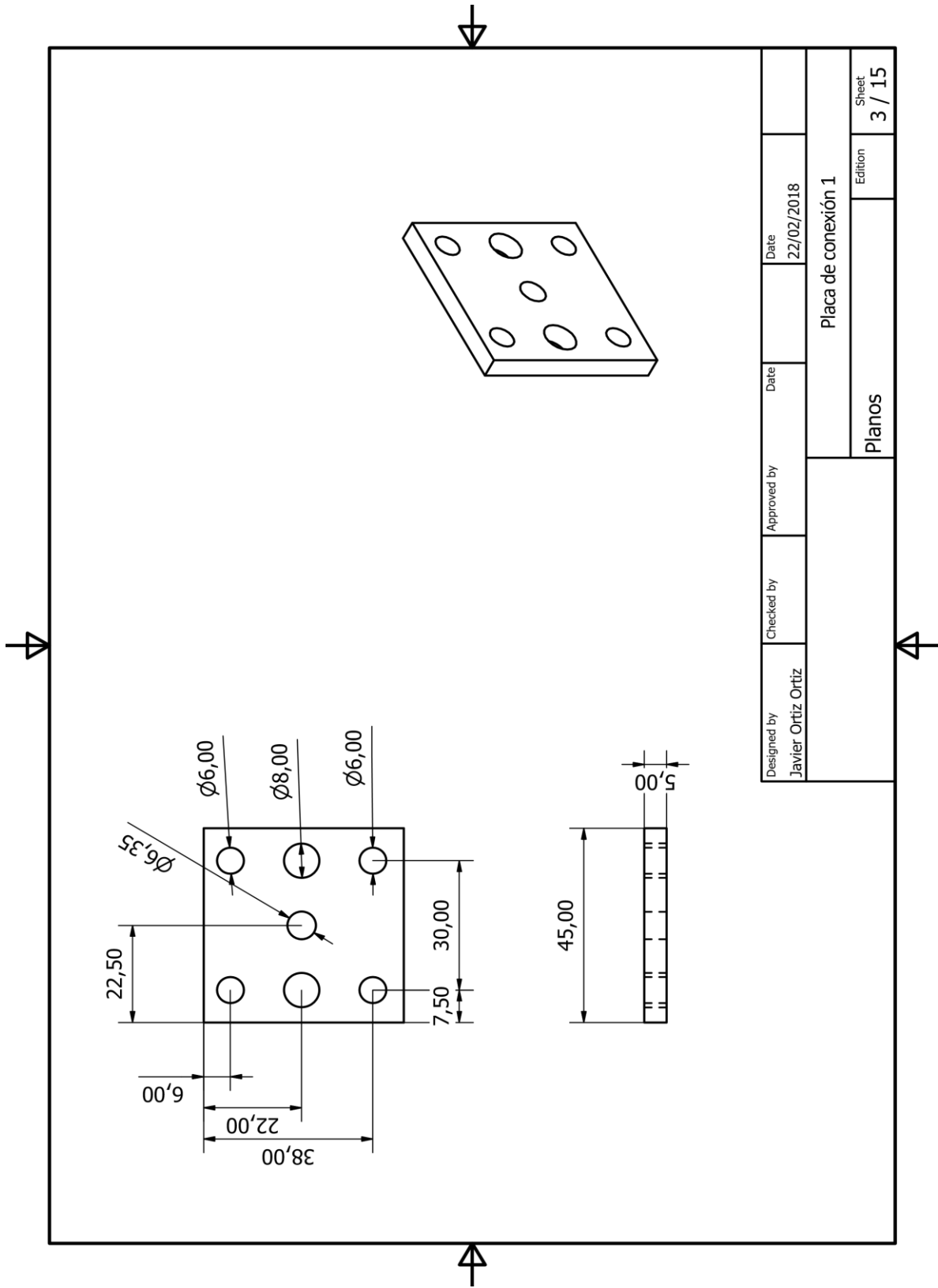
https://www.mathworks.com/campaigns/products/ppc/google/matlab-trial-request.html?s_eid=ppc_29850150442&q=matlab.

[30] "No Title." [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardUno>.

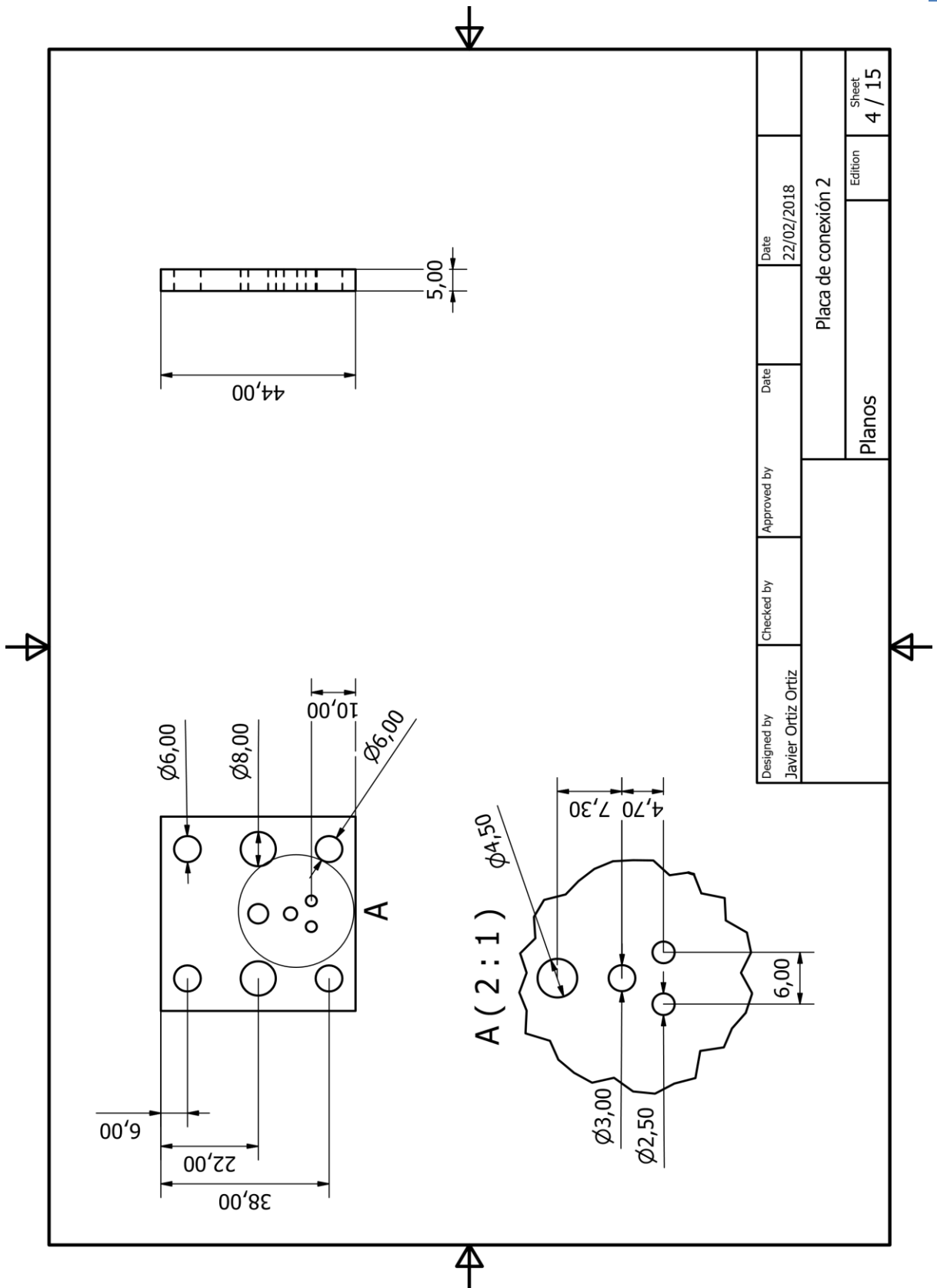
**Anexo: Planos de los elementos
de la Máquina de Ensayos
Biaxial**



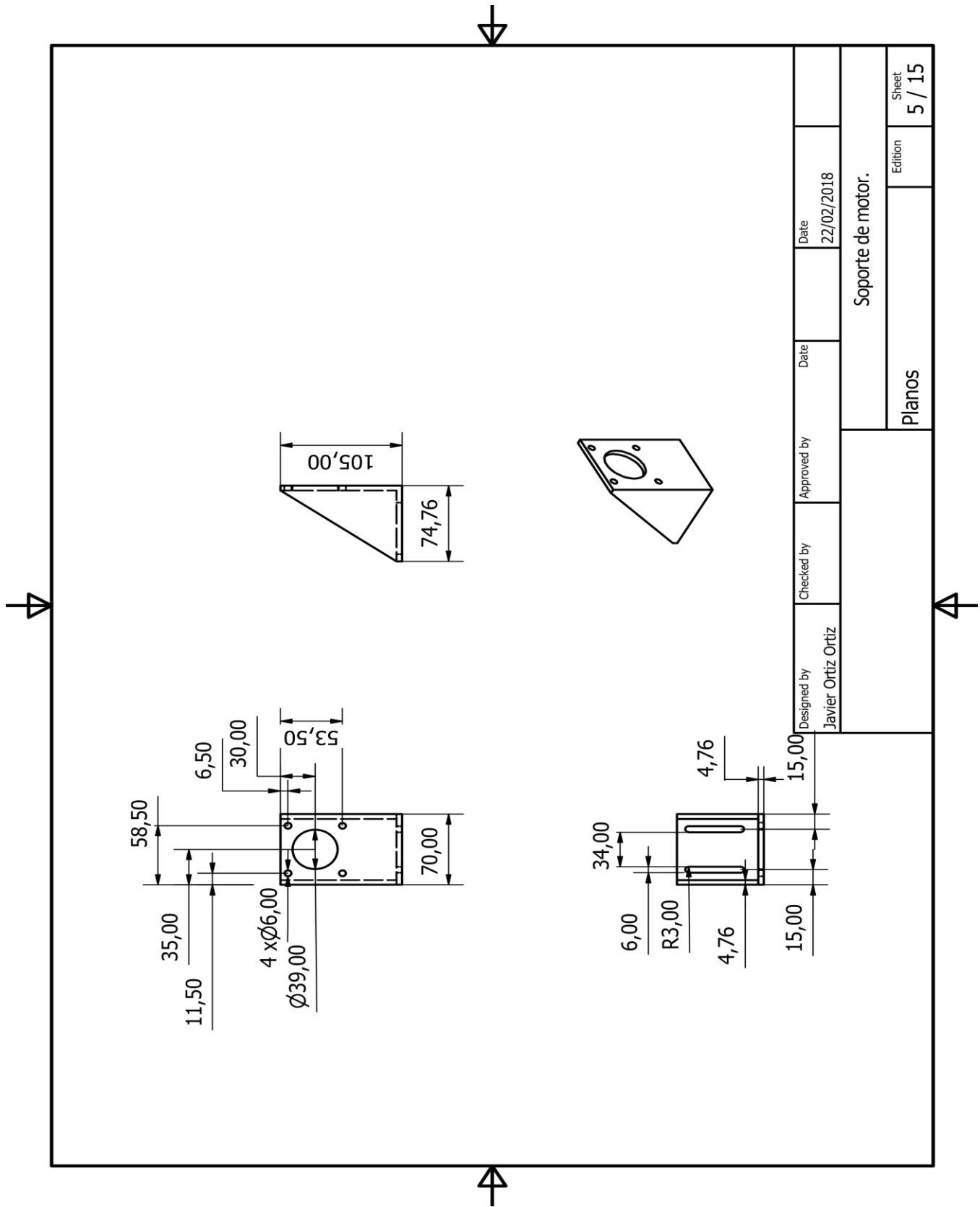


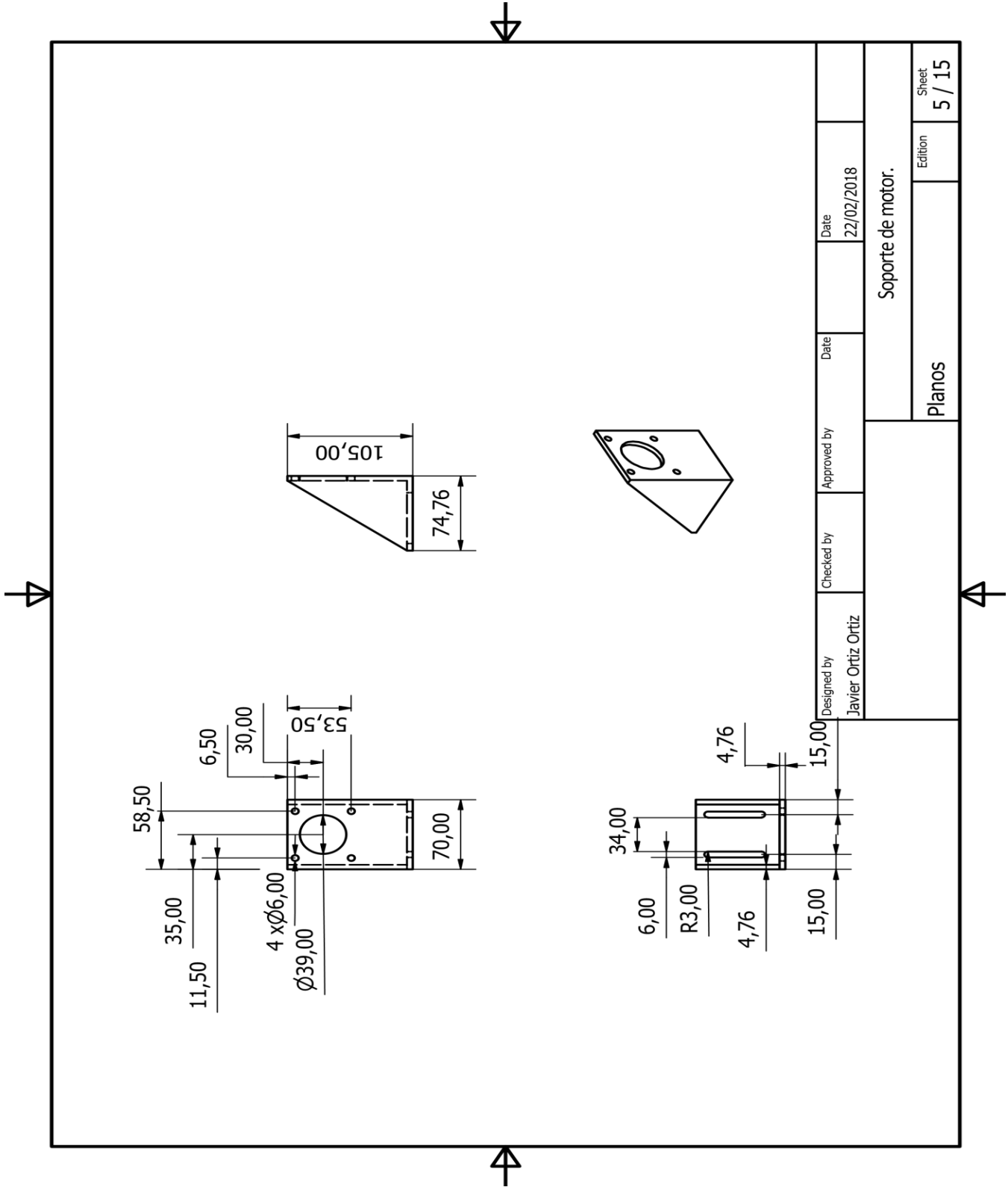


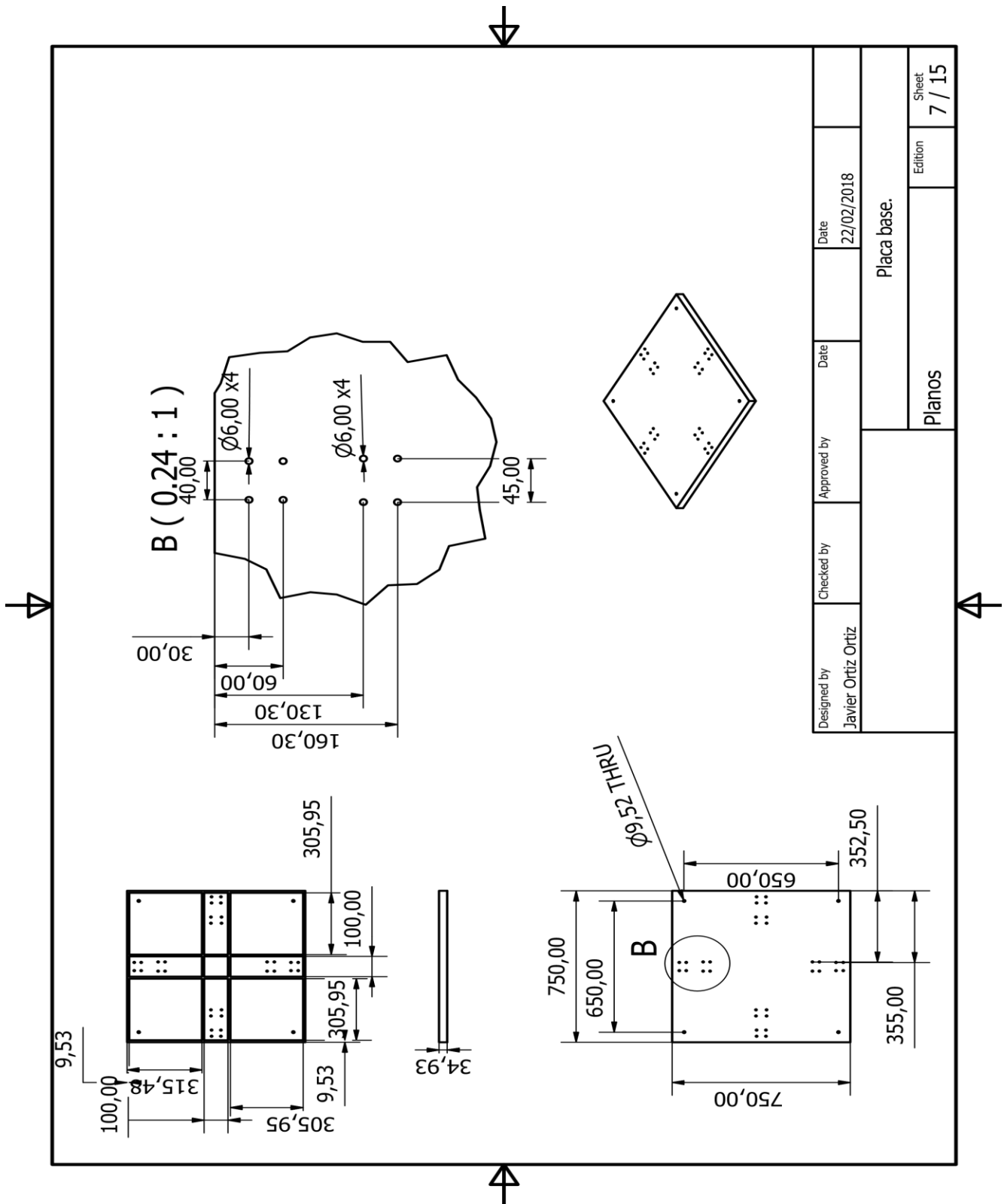
Designed by Javier Ortiz Ortiz	Checked by	Approved by	Date 22/02/2018	Date 22/02/2018	Sheet 3 / 15
Planos			Placa de conexión 1		
			Edition		

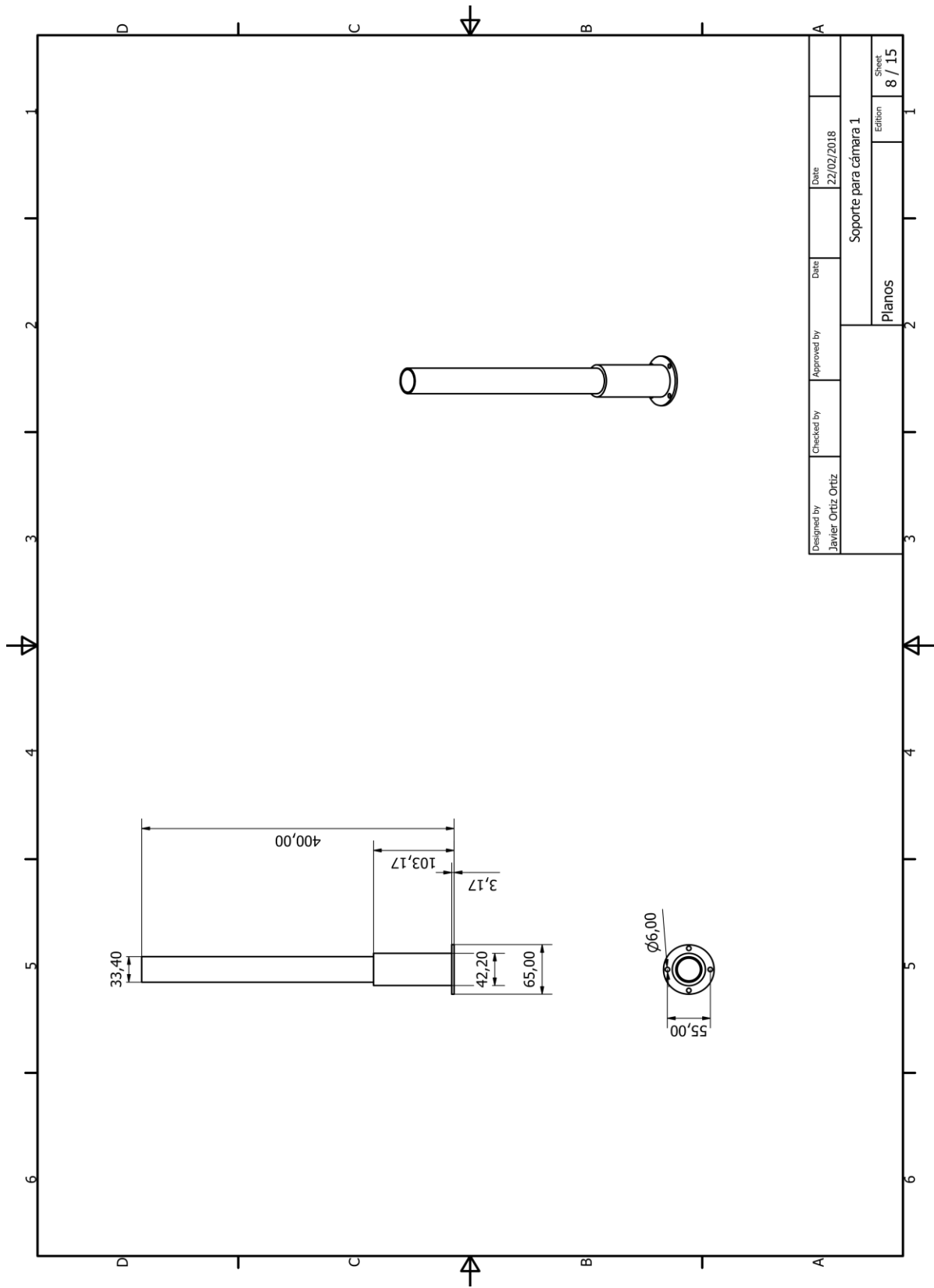


Designed by Javier Ortiz Ortiz	Checked by	Approved by	Date 22/02/2018	Date 22/02/2018
Planos			Placa de conexión 2	
			Edition	Sheet 4 / 15

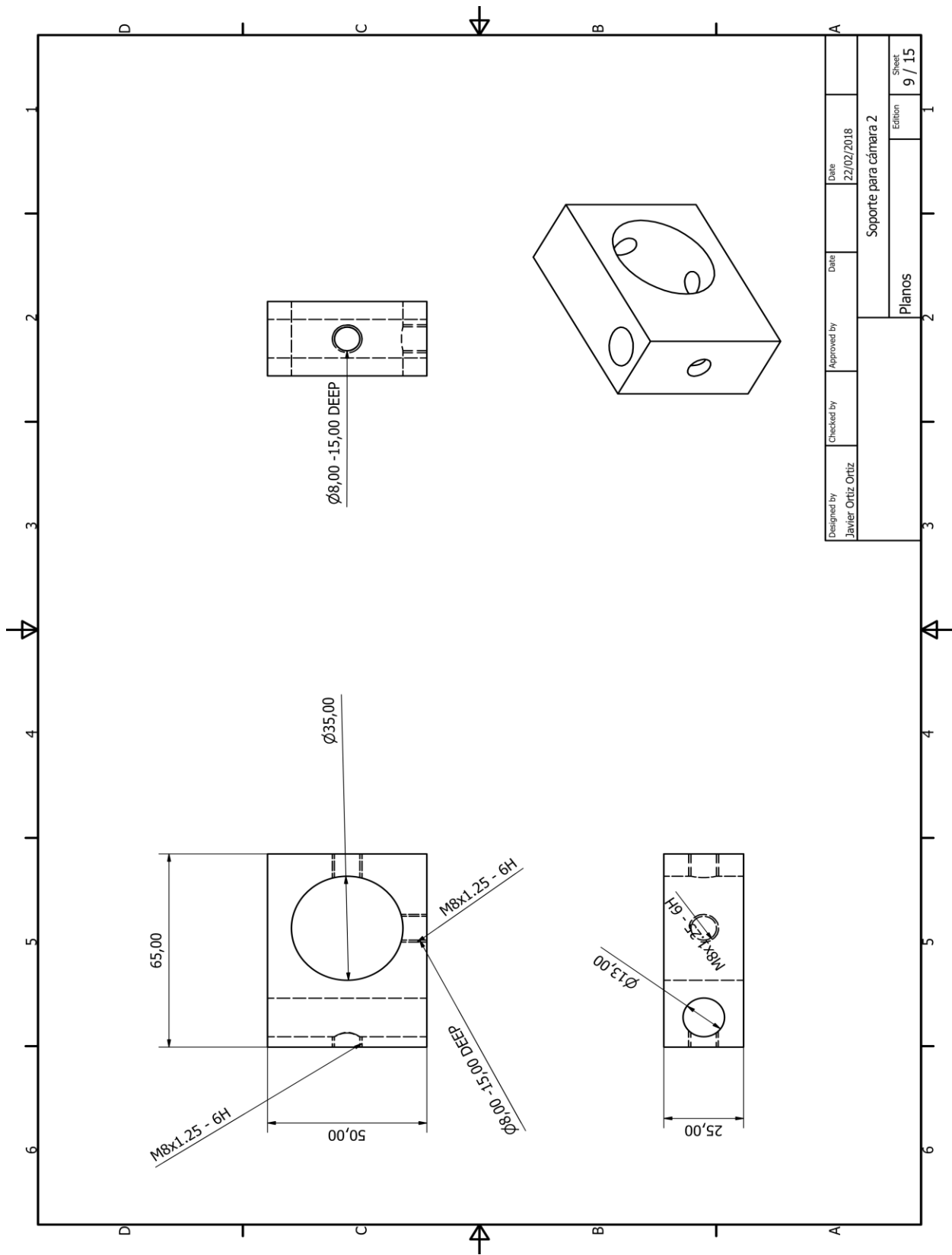




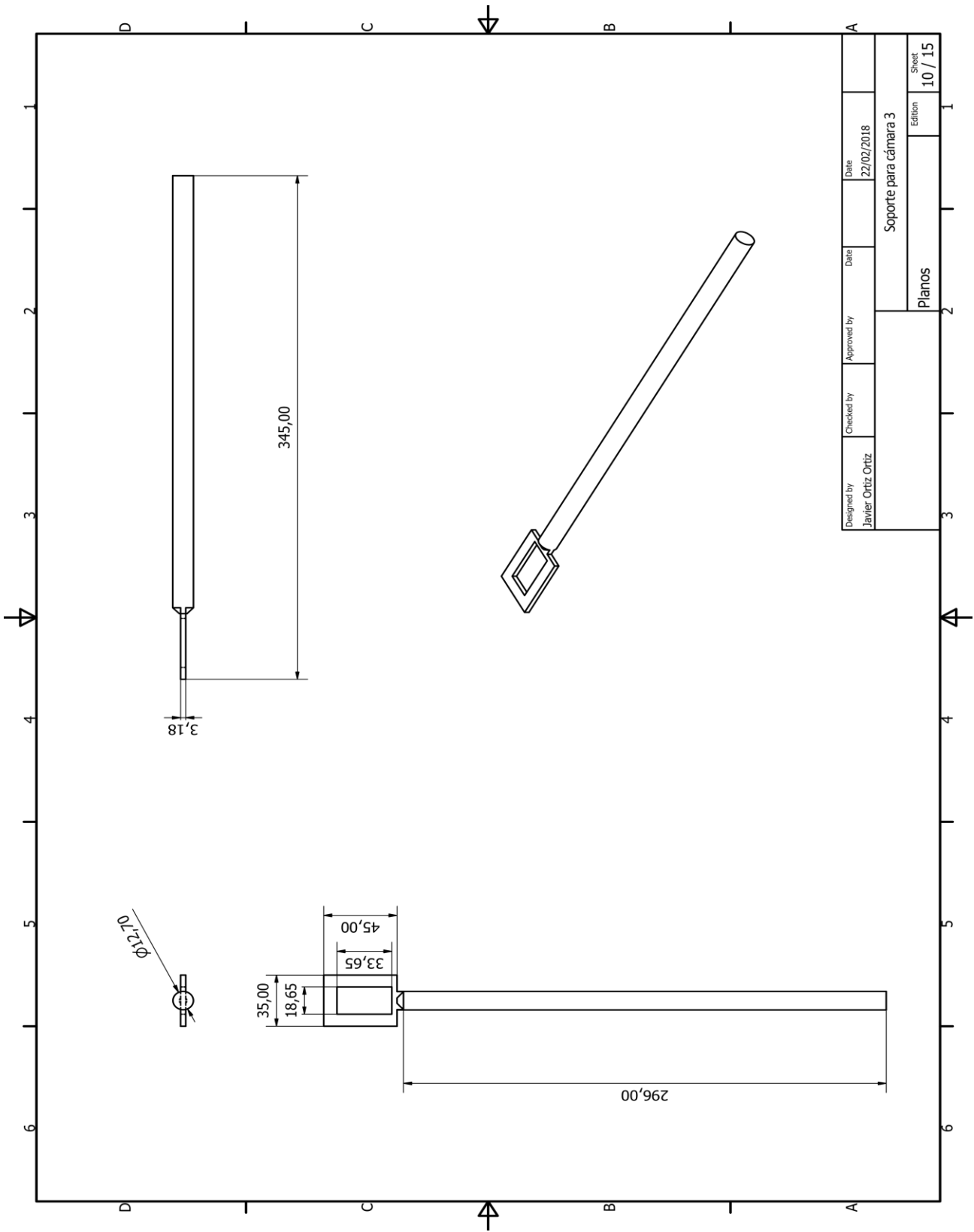


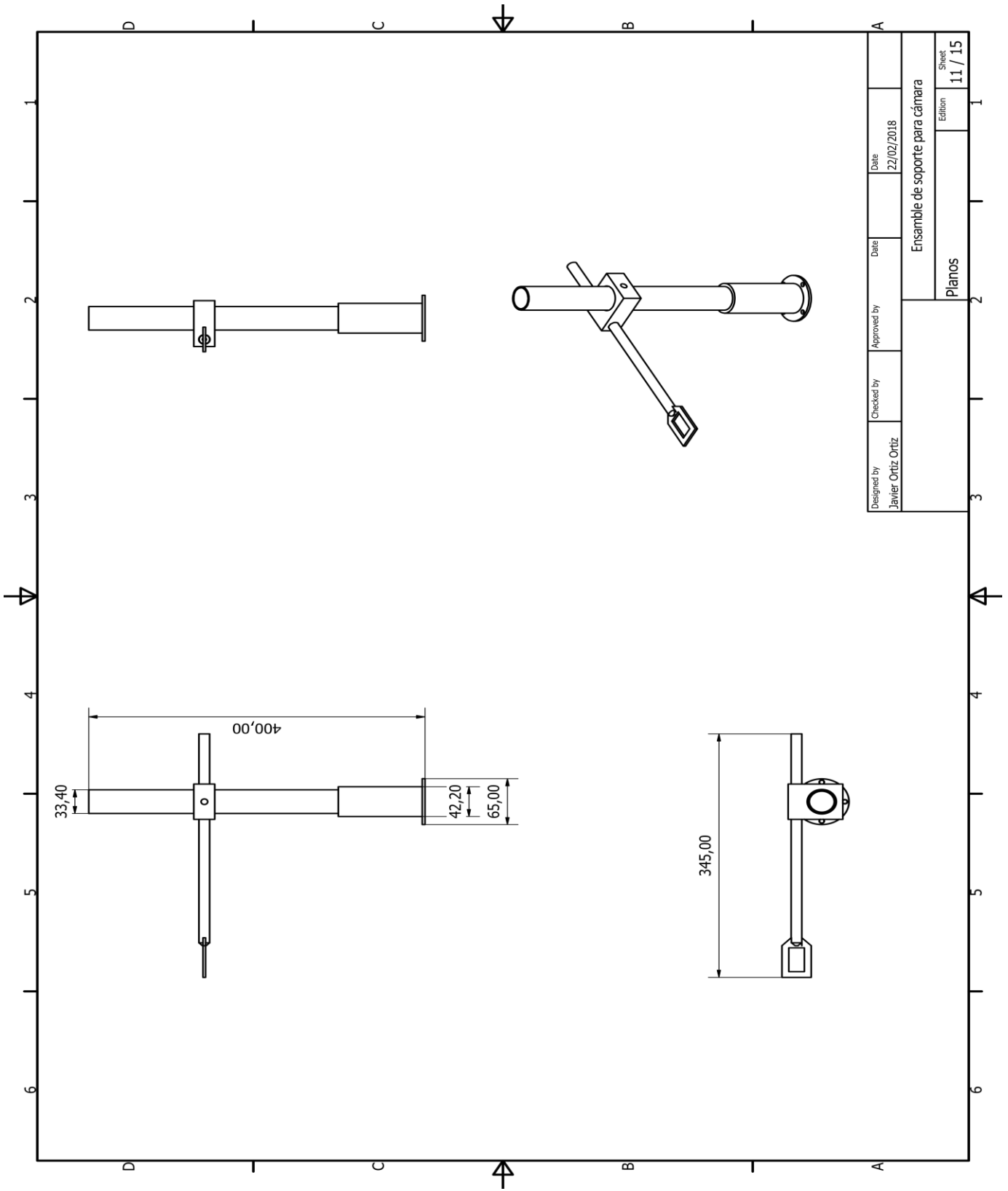


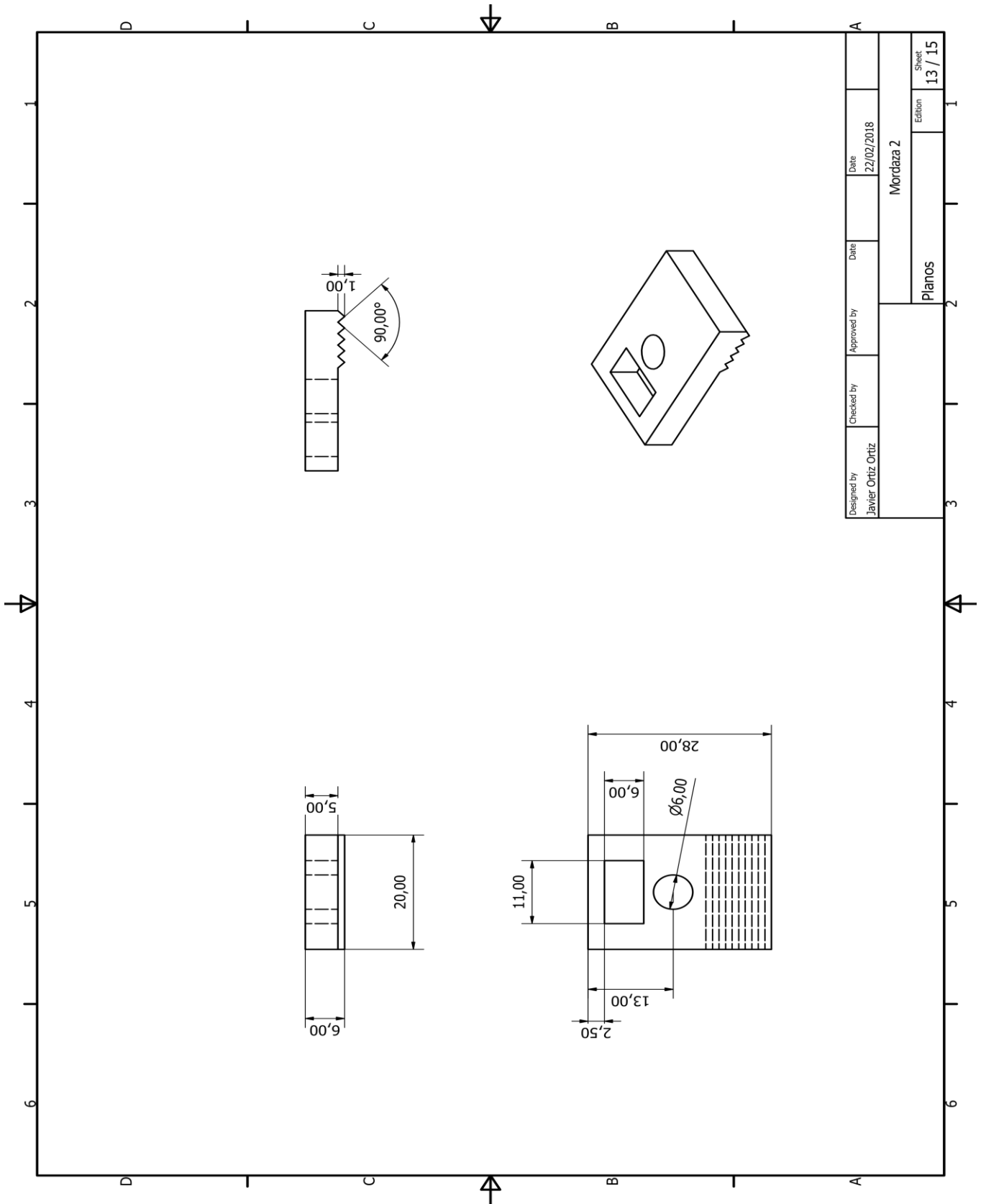
Designed by Javier Ortiz Ortiz	Checked by	Approved by	Date	Date 22/02/2018	Soporte para cámara 1	Sheet 8 / 15
Planos				Edition		



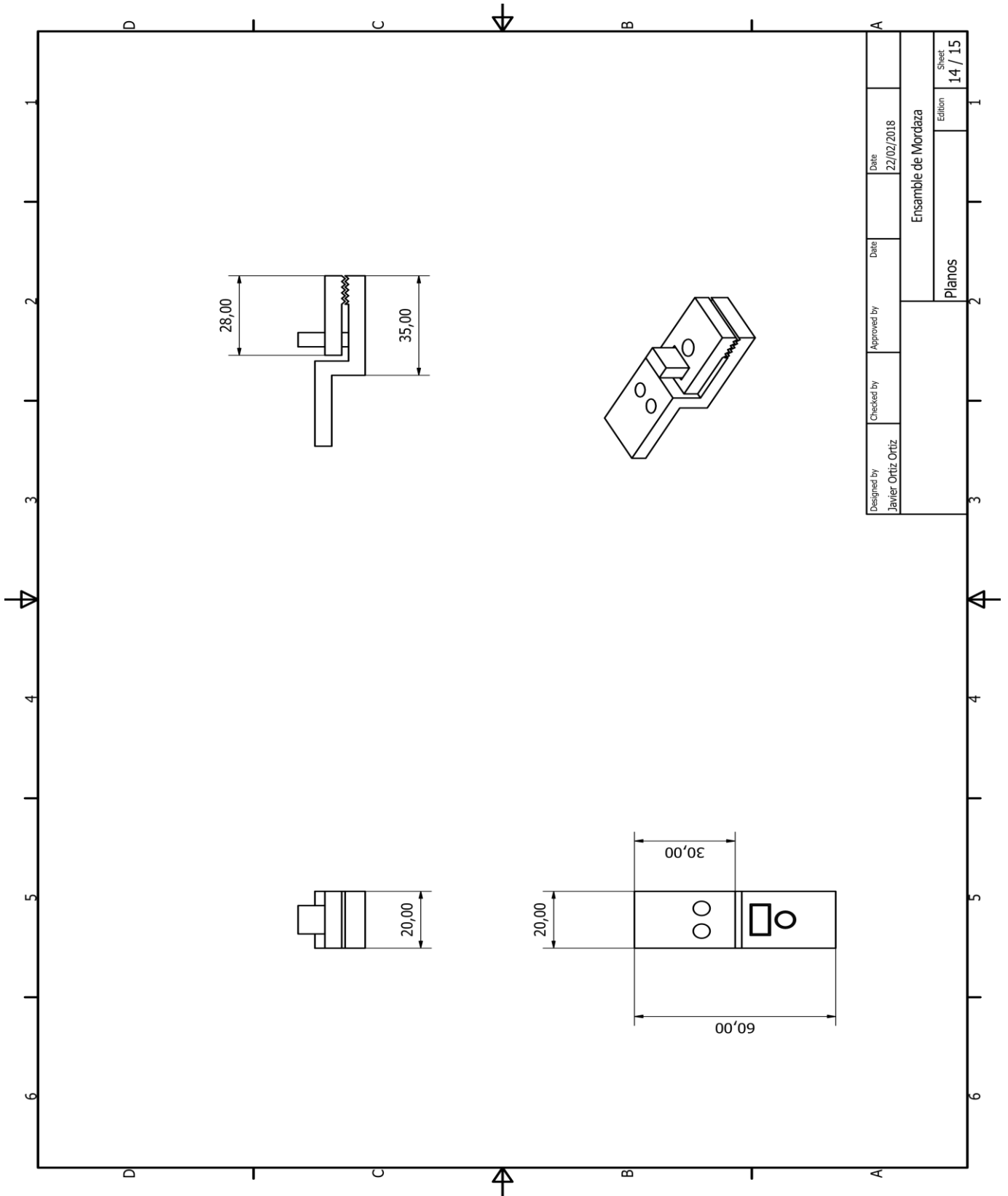
Designed by Javier Ortiz Ortiz	Checked by	Approved by	Date 22/02/2018	Date	Date	Sheet 9 / 15
SopORTE para cámara 2				Planos		



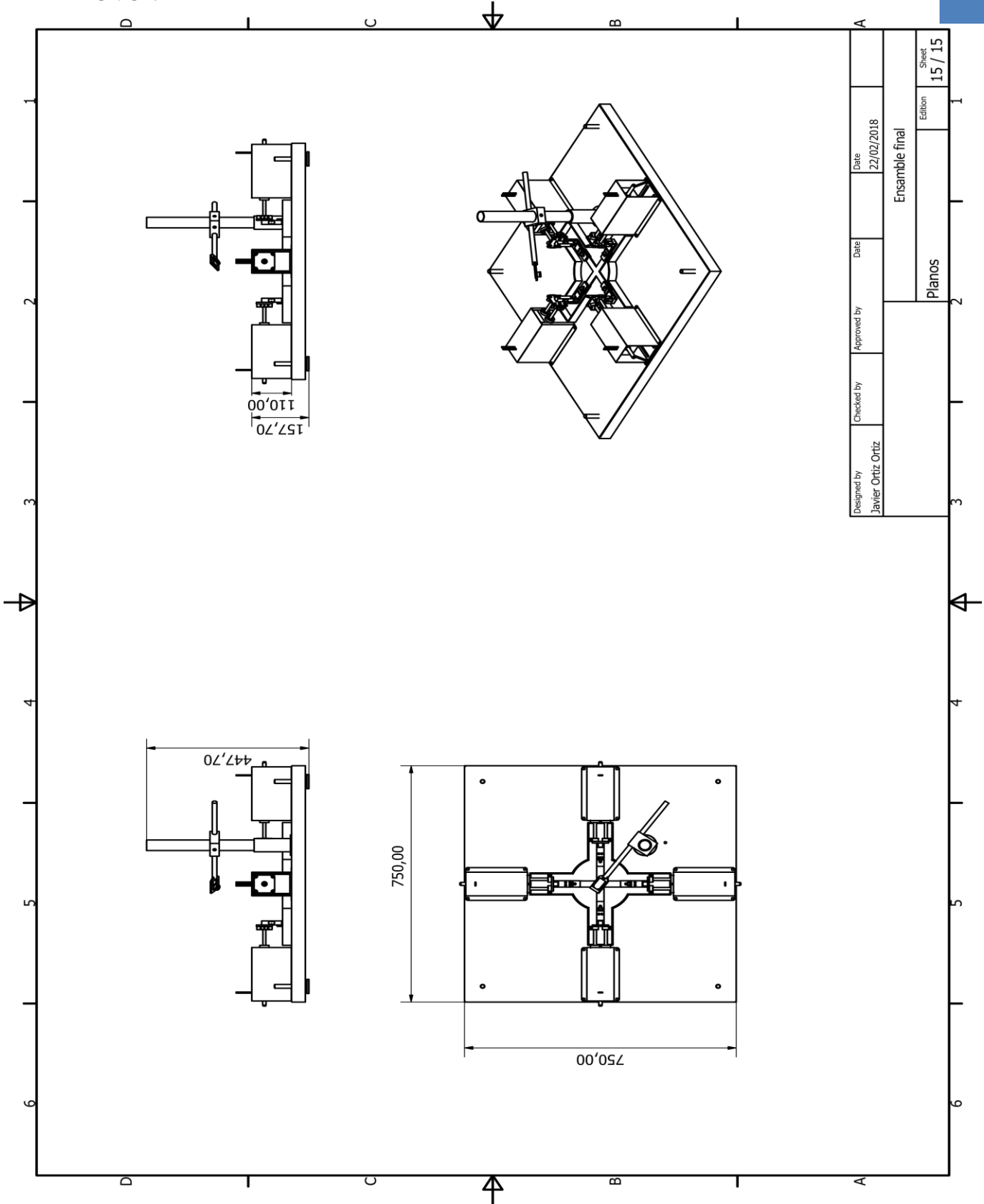




Designed by Javier Ortiz Ortiz	Checked by	Approved by	Date 22/02/2018	Date 22/02/2018
Mordaza 2				Sheet 13 / 15
Planos				Edition



Designed by Javier Ortiz Ortiz	Checked by	Approved by	Date 22/02/2018	Date
Ensamble de Mordaza				Sheet 14 / 15
Planos				Edition



Designed by Javier Ortiz Ortiz	Checked by	Approved by	Date 22/02/2018	Date	Sheet 15 / 15
Planos				Ensamble final	