

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**

**SEDE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA**

**DISEÑO DE EQUIPO PARA MEDICION DE ABERRACIONES EN  
SUPERFICIES CURVAS BASADO EN EL METODO DE FOUCAULT**

Trabajo de Titulación para optar al Título de  
Ingeniero en FABRICACIÓN Y DISEÑO  
INDUSTRIAL con Licenciatura en  
Ingeniería en fabricación y diseño industrial.

Alumno:

Victor Francisco Gonzalez Nadales

Profesor Guía:

Titulo Mario Salinas Psijas

**2024**

## **RESUMEN**

KEYWORDS:

FOUCAULT AUTOMATIZADO CONTROL NUMERICO

El proyecto busca desarrollar un equipo automatizado para realizar pruebas de Foucault en espejos curvos, superando limitaciones actuales de movimientos manuales propensos a errores humanos. Se explorarán alternativas morfológicas y tecnológicas con el objetivo de reducir el tiempo y mejorar la precisión en las mediciones. El proceso incluirá un análisis de antecedentes, identificación de problemáticas actuales y un exhaustivo diseño de alternativas centrado en las necesidades del usuario. Finalmente, se construirá un prototipo que se someterá a pruebas de laboratorio para evaluar su cumplimiento con los objetivos planteados.

### **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo con profundo agradecimiento al equipo de trabajo del Núcleo Milenio de Formación Planetaria, quienes me brindaron la oportunidad de enfrentar el mayor desafío de mi formación académica como ingeniero en fabricación y diseño industrial. Asimismo, quiero expresar mi gratitud a mi familia, ya que, sin su apoyo incondicional, no habría llegado hasta aquí. Envío un especial reconocimiento al grupo deportivo de balonmano de la universidad, cuya influencia ha sido una de las experiencias más enriquecedoras de mi vida universitaria, enseñándome la importancia del trabajo en equipo, la perseverancia y cómo todo mejora cuando se realiza con dedicación. Finalmente, dedico unas palabras de agradecimiento a mi novia, quien llegó en este último tramo universitario y comprendió la ansiedad que experimenté a lo largo de este año, brindándome apoyo en cada paso. Agradezco enormemente a todos los docentes que contribuyeron a mi formación como próximo ingeniero en fabricación y diseño industrial.

ÍNDICE

RESUMEN.....2

INTRODUCCIÓN .....13

1 ANTECEDENTES DEL PROYECTO .....15

1.1 MÉTODO DE FOUCAULT .....15

1.2 DESCRIPCIÓN.....15

1.3 NÚCLEO MILENIO DE FORMACIÓN PLANETARIA (NPF) .....20

1.4 FABRICACION DE ESPEJOS EN EL AREA DE INGERIA DE NPF .....21

1.5 ANTECEDENTES DE ESTUDIOS YA EXISTENTES.....28

1.5.1 ESTUDIO Y PROPUESTA PARA LA AUTOMATIZACIÓN DE PRUEBAS  
ÓPTICAS DE CONTROL DE CURVATURA EN ESPEJOS ASTRONÓMICOS.....28

1.6 ANTECEDENTES GENERALES.....28

1.6.1 PROBLEMÁTICA GENERAL .....31

1.6.2 PROBLEMÁTICAS ESPECIFICAS.....31

1.6.3 OBJETIVO GENERAL .....31

1.6.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....31

2 DEFINICIÓN.....33

2.1 OBJETIVOS DEL PRODUCTO A DISEÑAR .....33

2.1.1 DEFINICIÓN DE SUBSISTEMAS .....33

2.2 ANÁLISIS Y DEFINICIÓN DE ALTENATIVAS MORFOLÓGICAS Y  
TECNOLÓGICAS.....35

2.2.1 ANÁLISIS Y DEFINICIÓN DEL SISTEMA DE FUENTE DE LUZ .....35

2.2.2 ANÁLISIS Y DEFINICIÓN DEL SISTEMA DE MOVIMIENTO PRIMARIO  
37

2.3 DISEÑO PARA FABRICABILIDAD.....40

2.4 ANÁLISIS Y DEFINICIÓN DE PROCESOS DE FABRICACIÓN.....43

2.5 PROPUESTA DE FABRICACIÓN DE PROTOTIPO. ....48

3 EVALUACIÓN MVP.....51

3.1 PROCESO DE FABRICACIÓN DEL EQUIPO DE MEDICIÓN.....51

3.1.1 COMPONENTES FABRICADOS.....51

3.1.2 COMPONENTES TECNOLÓGICOS .....53

3.1.3 ARMADO DEL PROTOTIPO .....54

3.2 ANÁLISIS DE INVERSIÓN .....60

3.3 PRUEBA EN LABORATORIO .....62

3.4 ANÁLISIS DE EFICIENCIA DEL SISTEMA ACTUAL VS SISTEMA  
PROPUESTO.....63

3.5 OPORTUNIDADES DE MEJORA .....64

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....65

BIBLIOGRAFÍA .....66

ANEXOS .....67

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1-1 Método de Foucault para probar una lente.....                                                                                                                           | 16 |
| Figura 1-2 Configuración cuchillo al probar un espejo cóncavo. ....                                                                                                                | 17 |
| Figura 1-3 Gráficos de Foucault de un espejo parabólico, (a) Antes de introducir cuchillo<br>(b) Después de introducir cuchillo. ....                                              | 17 |
| Figura 1-4 Prueba de filo del cuchillo de una lente sin aberraciones.....                                                                                                          | 18 |
| Figura 1-5 Gráficos de Foucault de un espejo libre de aberraciones con errores de enfoque.<br>(a) En el interior del foco. (b) Fuera de foco. Navaja introducida desde abajo. .... | 18 |
| Figura 1-6 La visualización de las placas de sombra formadas cuando se utiliza la fuente<br>de luz imaginaria y el filo del cuchillo.....                                          | 19 |
| Figura 1-7 Gráfico de Foucault de un espejo irregular. ....                                                                                                                        | 19 |
| Figura 1-8 Diferentes disposiciones para la fuente y el filo.....                                                                                                                  | 20 |
| Figura 1-9 Prueba de filo de navaja de una lente con aberración esférica.....                                                                                                      | 20 |
| Figura 1-10 Mandrel en labores de control de superficies. ....                                                                                                                     | 23 |
| Figura 1-11 Proceso de desbaste. ....                                                                                                                                              | 23 |
| Figura 1-12 torta de brea para pulido de espejos. ....                                                                                                                             | 24 |
| Figura 1-13 Proceso de Lay up. ....                                                                                                                                                | 24 |
| Figura 1-14 Proceso de bolsa de vacío para su curado. ....                                                                                                                         | 25 |
| Figura 1-15 Preparación de para el proceso de curado. ....                                                                                                                         | 25 |
| Figura 1-16 diagrama de como la impresión a través de la fibra se mitiga (parcialmente)<br>aplicando una capa extra de resina.....                                                 | 25 |
| Figura 1-17 Prueba de calidad con el método de interferencia de Fizeau. ....                                                                                                       | 26 |
| Figura 1-18 test de Foucault en una de las réplicas. ....                                                                                                                          | 26 |
| Figura 1-19 Línea de producción para la elaboración de espejos en fibra de carbono. ...                                                                                            | 27 |
| Figura 1-20 Instrumento de Foucault utilizado por el equipo de NPF para realizar las<br>pruebas .....                                                                              | 29 |
| Figura 1-21 Prueba de Foucault en el laboratorio de óptica donde se está alineado los rayos<br>de salida con los de entrada.....                                                   | 30 |
| Figura 2-1 Primera alternativa de fuente de luz de ranura .....                                                                                                                    | 35 |
| Figura 2-2 Alternativa de fuente de luz con sistema ajuste de presión .....                                                                                                        | 36 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2-3 Alternativa de unión deslizante. ....                                                                                                                                                                                                                                                   | 37 |
| Figura 2-4 muestra de la primera alternativa en el movimiento primario semejante al que ocupa la impresora 3D con un sistema de correa y polea. ....                                                                                                                                               | 38 |
| Figura 2-5 segunda alternativa de movimiento primario con sistema de eje helicoidal con ruedas en la parte interior. ....                                                                                                                                                                          | 39 |
| Figura 2-6 segunda alternativa de movimiento primario con sistema de eje helicoidal y tuerca de movimiento. ....                                                                                                                                                                                   | 39 |
| Figura 2-7 alternativa de eje helicoidal con sistema de ruedas con excéntricas en la parte exterior se decidió por este sistema ya que, si se necesita ajustar las excéntricas no hay necesidad de desarmar todo el sistema, ahorrando mucho tiempo en comparación a la alternativa anterior. .... | 40 |
| Figura 2-8 impresora 3D FDM de la marca creality modelo Ender 3 pro que está en el FABLAB de la universidad. ....                                                                                                                                                                                  | 46 |
| Figura 2-9 sierra circular que está en el Fablab de la universidad. ....                                                                                                                                                                                                                           | 46 |
| Figura 2-10 impresora de resina que está en el Fablab de la universidad. ....                                                                                                                                                                                                                      | 47 |
| Figura 2-11 centro de curado para completar el proceso de curado de las piezas que se hacen en resina. ....                                                                                                                                                                                        | 47 |
| Figura 2-12 maquina WaterJet que está en el laboratorio dima de la universidad. ....                                                                                                                                                                                                               | 48 |
| Figura 2-13 propuesta aceptada por el equipo de NPF en vista frontal. ....                                                                                                                                                                                                                         | 49 |
| Figura 2-14 propuesta aceptada por el equipo de NPF en vista posterior. ....                                                                                                                                                                                                                       | 49 |
| Figura 3-1 Ensamble de soporte motor con la unión a la estructura. ....                                                                                                                                                                                                                            | 54 |
| Figura 3-2 ensamble de motor paso a paso con su respectivo soporte. ....                                                                                                                                                                                                                           | 54 |
| Figura 3-3 unión de conjunto de motriz principal con estructura. ....                                                                                                                                                                                                                              | 55 |
| Figura 3-4 ensamble de placa de montaje con riel de cremallera y soporte de fuente de luz a mesa móvil. ....                                                                                                                                                                                       | 55 |
| Figura 3-5 montaje de soporte de motor con perfil de aluminio del soporte de la fuente de luz. ....                                                                                                                                                                                                | 56 |
| Figura 3-6 ensamble de motor paso a paso con su respectivo soporte. ....                                                                                                                                                                                                                           | 56 |
| Figura 3-7 unión de motor paso a paso con piñón. ....                                                                                                                                                                                                                                              | 57 |
| Figura 3-8 montaje de cremallera con cuchillo a su riel correspondiente junto al piñón. ....                                                                                                                                                                                                       | 57 |
| Figura 3-9 montaje de estructura móvil a la estructura junto con el eje helicoidal. ....                                                                                                                                                                                                           | 58 |
| Figura 3-10 montaje de estructura soporte de cámara con placa de montaje. ....                                                                                                                                                                                                                     | 58 |
| Figura 3-11 montaje de fuente de luz a la estructura principal lista para realizar pruebas con el equipo. ....                                                                                                                                                                                     | 59 |

|                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3-12 realizando labores de alineación del instrumentó con respecto al espejo para realizar una prueba de Foucault. .... | 59 |
| Figura 3-13 realización de conexiones electrónicas de los motores y la ramps.....                                              | 60 |
| Figura 3-14 fotografía de un espejo parabólico con el equipo de medición propuesto. ..                                         | 62 |
| Figura 3-15 fotografía del mismo espejo, pero ocupando un filtro para mostrar más cualidades del espejo.} .....                | 63 |
| Figura 3-16 pantalla LCD 12864 .....                                                                                           | 64 |

INDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 lista de sistema con componentes que entran en cada uno. ....33

Tabla 2-2 listado de piezas y componentes completa del equipo de medición.....40

Tabla 2-3 aquí se muestran las piezas y componentes con su proceso de manufactura correspondiente. ....44

Tabla 3-1 listado de componentes que se fabricaron en el proceso de prototipado.....51

Tabla 3-2 listado de componentes tecnológicos que se ocuparon la construcción del prototipo. ....53

Tabla 3-3 listado de componentes que se compraron para la construcción del prototipo. ....60

Tabla 3-4 comparativa de sistemas. ....63

INDICE DE ANEXOS

**Anexo A** plano isométrico del equipo de medición.....67

**Anexo B** plano isométrico del sistema de piñón con cremallera. ....67

**Anexo C** Plano de fabricación de cuchillo. ....68

**Anexo D** plano de fabricación de soporte stepper .....68

**Anexo E** plano de conjunto de sistema de fuente de luz. ....69

**Anexo F** plano de fabricación de lenteja de 10 mm. ....69

**Anexo G** plano de fabricación de cuerpo de fuente de luz. ....70

**Anexo H** plano de fabricación de soquet para linterna.....70

**Anexo I** plano de fabricación de tapa de difusor. ....71

**Anexo J** plano de fabricación de lenteja de 1 mm. ....71

**Anexo K** plano isométrico de soporte de fuente de luz. ....72

**Anexo L** plano isométrico de sistema motriz principal. ....72

**Anexo M** plano de fabricación de unión de soporte stepper con estructura. ....73

**Anexo N** plano de fabricación de soporte stepper .....73

Anexo O plano isométrico de tapas de perfil. ....74

Anexo P plano isométrico de sistema de tuerca de movimiento.....74

Anexo Q plano isométrico de mesa móvil. ....75

Anexo R plano isométrico de soporte de cámara.....75

Anexo S Plano de fabricación de soporte de cámara. ....76

Anexo T plano de fabricación de regulador de altura. ....76

Anexo U plano de fabricación de cuerpo del soporte. ....77

Anexo V plano de fabricación de acople con placa de montaje. ....77

Anexo W plano isométrico de placa de montaje.....78

Anexo X Plano de fabricación de placa de montaje. ....78

Anexo Y plano de fabricación de riel para cremallera.....79

SIMBOLOGÍAS

**SIMBOLOGÍA**

|     |                   |
|-----|-------------------|
| mm: | Milímetros        |
| m2: | Metros Cuadrados  |
| N:  | Newton            |
| µm: | Micra de metro    |
| UF: | Unidad de fomento |

## INTRODUCCIÓN

A lo largo de los próximos capítulos, se detallará el proceso de diseño que conduce a la fabricación de un dispositivo de medición fundamentado en el método de Foucault. Esta travesía constará de tres hitos cruciales que guiarán la narrativa. En primera instancia, se emprenderá la fase de recopilación de datos, la cual implicará un análisis exhaustivo de trabajos existentes. En esta etapa, se proporcionará un contexto sólido para el trabajo y se esbozará con claridad la esencia de llevar a cabo una prueba de Foucault.

Seguidamente, nos sumergiremos en la etapa de diseño de ingeniería, donde se desarrollarán alternativas conceptuales que servirán como base para la creación de un prototipo funcional. Este proceso abarcará el análisis de opciones morfológicas, la selección de materiales para los componentes y la elección del método de manufactura más adecuado.

Concluyendo este periplo de diseño, se procederá a la creación de un prototipo funcional del equipo. La finalidad de esta fase será evaluar la correspondencia entre el diseño propuesto, los objetivos iniciales y la información recopilada. Para validar el cumplimiento de las expectativas funcionales, se llevará a cabo una prueba de laboratorio exhaustiva. Este proceso integral garantizará la coherencia entre la concepción teórica, la ejecución práctica y la funcionalidad esperada del equipo de medición basado en el método de Foucault.

## **CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES DEL PROYECTO**

## **1 ANTECEDENTES DEL PROYECTO**

En este capítulo se define la prueba de Foucault, se desarrolla un estudio de problemáticas y objetivos donde irá apuntada el proyecto, junto con describir el proceso productivo de lo que realiza Núcleo milenio de formación planetaria en su taller además de definir que es NPF.

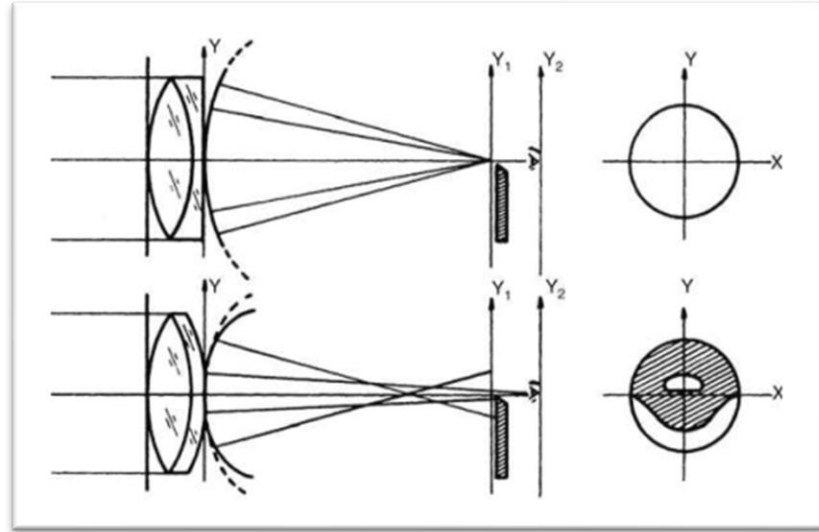
### **1.1 MÉTODO DE FOUCAULT**

El método del cuchillo, propuesto por Foucault en los años 1858 y 1859, junto con las diversas técnicas de Schlieren desarrolladas por Töpler (1864, 1866, 1868), Ritchey (1904), Hartmann (1908), Platzeck y Gaviola (1939), y Wolter (1949 y 1956), ha demostrado ser altamente eficaz para la evaluación de superficies ópticas. Las aberraciones ópticas, la difracción o irregularidades en una superficie pueden desviar los rayos de sus trayectorias previstas, causando deformaciones en los frentes de onda. Las técnicas de Schlieren abordan este problema al detectar los desplazamientos laterales de los rayos mediante el bloqueo o la modificación de aquellos que se desvían. Este bloqueo o modificación se logra mediante la colocación de pantallas en los planos de convergencia de la luz que atraviesa o se refleja en la superficie óptica bajo evaluación. Las técnicas de Schlieren se destacan por su notable sensibilidad y simplicidad tanto en el diseño experimental como en la interpretación cualitativa, especialmente desde un enfoque geométrico. Sin embargo, para evaluar las ventajas relativas de este método en comparación con otros de su tipo, es esencial estudiar sus características cuando se utiliza para detectar (a) aberraciones que superan la longitud de onda de la radiación iluminante (según la teoría geométrica de la formación de imágenes) y (b) aberraciones que son menores que la longitud de onda (de acuerdo con la teoría física de la formación de imágenes). La elección de la prueba específica dependerá de las circunstancias particulares.

### **1.2 DESCRIPCIÓN**

La prueba de Foucault, también conocida como prueba del cuchillo, puede ser conceptualizada, en términos generales, como un método diseñado para identificar la presencia de aberraciones transversales. Este procedimiento implica la obstrucción deliberada de una porción de un plano atravesado por rayos o luz difractada, resultando en la formación de una sombra sobre la región afectada, como ilustra la Figura 1-1. La marcada simplicidad tanto en la ejecución como en la interpretación confiere a la prueba de Foucault una singularidad entre los métodos de evaluación óptica. Este enfoque, destacado por su simplicidad, ha sido fundamental en la evolución de las pruebas ópticas, y su relevancia es respaldada por el Optical Shop Testing Third Edition, que reconoce la prueba de Foucault como pionera en el campo y como la primera de una serie de

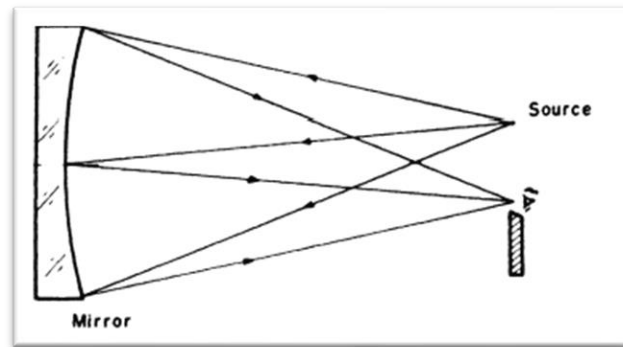
metodologías que sentaron las bases para el desarrollo de numerosas pruebas ópticas subsiguientes.



Fuente: *Optical Shop Testing Third Edition*.

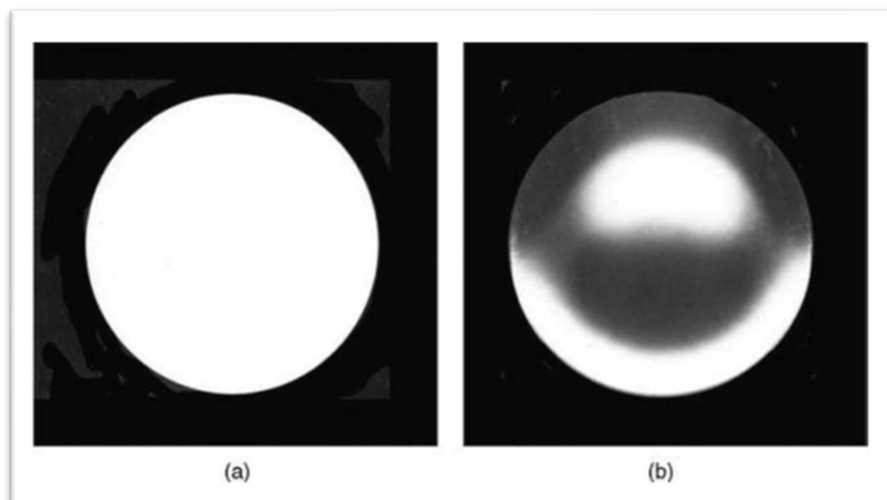
Figura 1-1 Método de Foucault para probar una lente.

El carácter único del ensayo de Foucault dentro de los métodos de evaluación óptica se destaca como un hito en la historia de las pruebas ópticas. Este ensayo, considerado como el precursor de los ensayos ópticos en el ámbito práctico, ha dado origen a una serie de métodos adicionales. La esencia del ensayo de Foucault radica en la disposición de una fuente de luz estenopeica en un lado del centro de curvatura de un espejo esférico cóncavo, como se representa en la Figura 1-2. La imagen resultante de esta fuente iluminada adquiere la forma del espejo esférico cóncavo, presentando una figura puntual en el lado opuesto al centro de curvatura del espejo. Al introducir un filo de cuchillo que intercepta el haz iluminante que forma la imagen, un observador situado detrás de dicha imagen percibe la aparición de un patrón de sombras en la superficie previamente uniformemente iluminada, como se ilustra en las Figuras 1-1 y 1-3. En el caso de un espejo esférico considerado "perfecto", al insertar el filo del cuchillo dentro del foco (hacia el espejo), el patrón de sombra se manifiesta como una clara separación entre una región oscura y una región brillante, como se evidencia en las Figuras 1-4 y 1-5. Al desplazar la cuchilla, estas regiones se separan, y la región oscura parece desplazarse a través del espejo en la misma dirección que el filo de la cuchilla. En contraste, al introducir el filo de la cuchilla fuera del foco (a cierta distancia del espejo), la región oscura del patrón de sombras adopta una configuración diferente.



Fuente: *Optical Shop Testing Third Edition*.

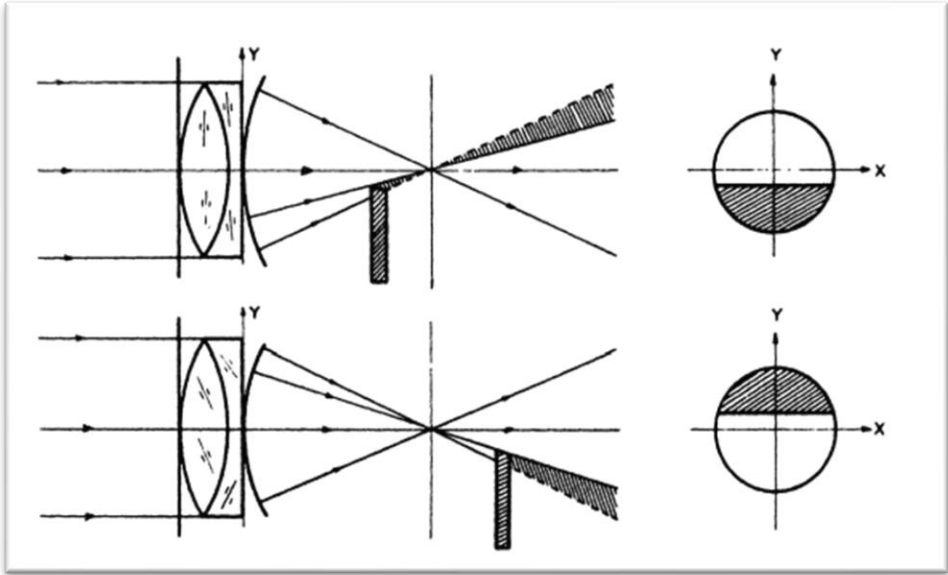
Figura 1-2 Configuración cuchillo al probar un espejo cóncavo.



Fuente: *Optical Shop Testing Third Edition*.

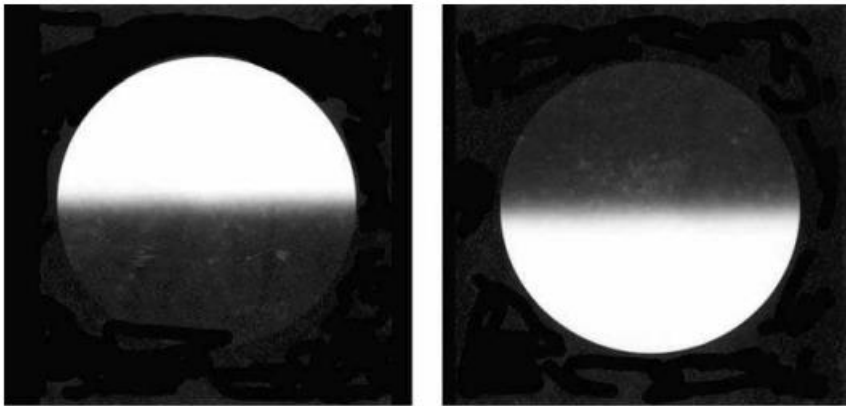
Figura 1-3 Gráficos de Foucault de un espejo parabólico, (a) Antes de introducir cuchillo (b) Después de introducir cuchillo.

Cuando el filo del cuchillo avanza sobre el espejo, su trayectoria se contrapone al movimiento del filo. Al posicionar el filo exactamente en el foco, se produce una súbita oscuridad en el espejo sin que haya un desplazamiento discernible en el patrón de sombras. Este método representa una manera altamente precisa de determinar el centro de curvatura. Además, en el caso de un espejo cóncavo no esférico, cada región en la superficie del espejo exhibe un radio de curvatura único. En consecuencia, al introducir el filo del cuchillo, la región correspondiente se sombrea de manera distintiva para diversas posiciones del filo a lo largo del eje óptico. Se puede ver un ejemplo de cómo se ve un Foucault de manera grafica en la figura 1-6, figura 1-7, figura 1-8 y figura 1-9.



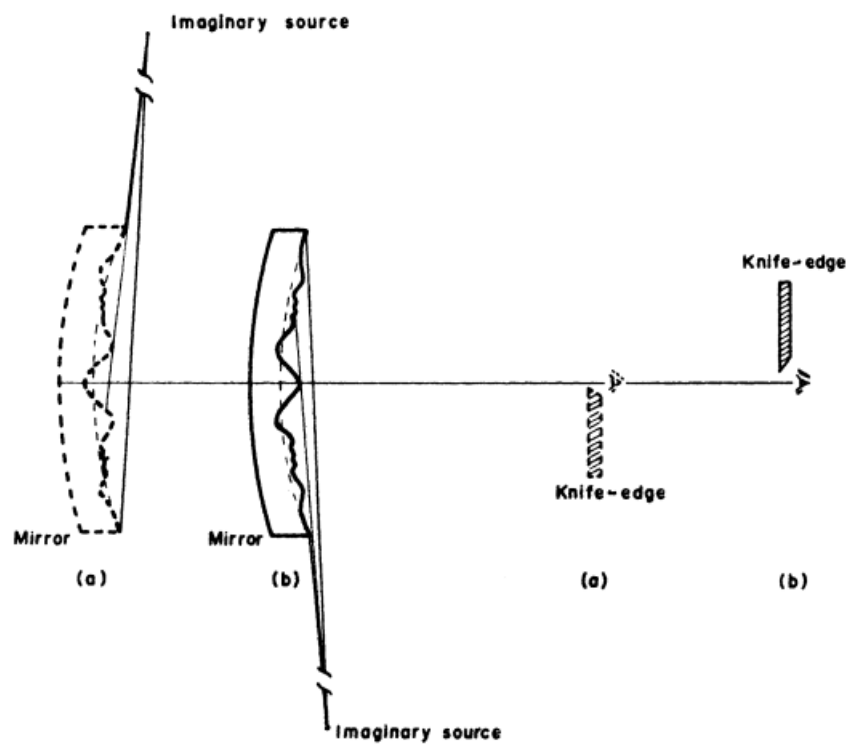
Fuente: Optical Shop Testing Third Edition.

Figura 1-4 Prueba de filo del cuchillo de una lente sin aberraciones.



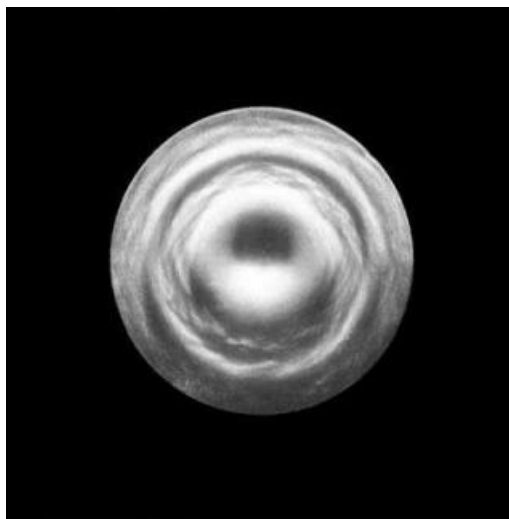
Fuente: Optical Shop Testing Third Edition.

Figura 1-5 Gráficos de Foucault de un espejo libre de aberraciones con errores de enfoque. (a) En el interior del foco. (b) Fuera de foco. Navaja introducida desde abajo.



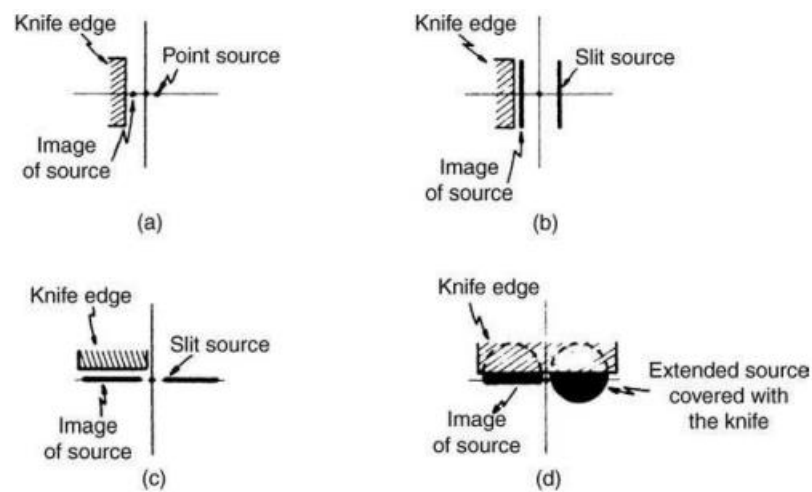
Fuente: Optical Shop Testing Third Edition.

Figura 1-6 La visualización de las placas de sombra formadas cuando se utiliza la fuente de luz imaginaria y el filo del cuchillo.



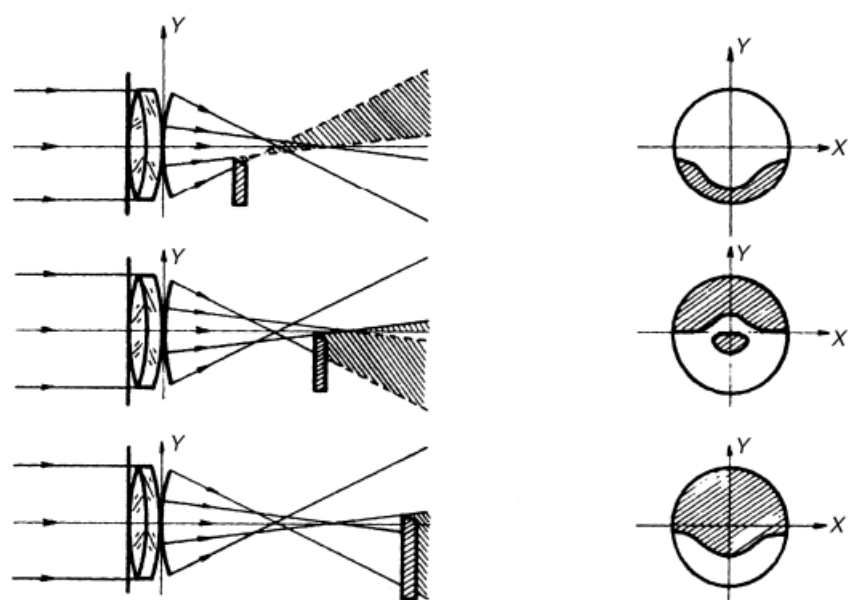
Fuente: Optical Shop Testing Third Edition.

Figura 1-7 Gráfico de Foucault de un espejo irregular.



Fuente: Optical Shop Testing Third Edition.

Figura 1-8 Diferentes disposiciones para la fuente y el filo.



Fuente: Optical Shop Testing Third Edition.

Figura 1-9 Prueba de filo de navaja de una lente con aberración esférica.

1.3 NÚCLEO MILENIO DE FORMACIÓN PLANETARIA (NPF)

Cómo se formaron los planetas de nuestro propio sistema solar y cuán reproducibles los mismos procesos son en otros sistemas, es una de las principales preguntas abiertas de la astrofísica moderna. El hecho de que conozcamos miles de exoplanetas con una espectacular variedad de propiedades nos lleva a inferir que la complejidad de los mecanismos detrás de esta formación no puede ser menor. Ya que estos objetos se forman en discos alrededor de estrellas jóvenes, los procesos de formación planetaria han de estar ligados a la evolución de estos discos y, probablemente, una variedad de procesos físicos en distintos puntos de esta evolución, son los responsables de la diversidad de sistemas planetarios. Por esto, el entendimiento de la formación planetaria es un desafío con muchas aristas unidas por preguntas sin respuesta.

Para atacar este desafío se crea el Núcleo Milenio de Formación Planetaria, centro dedicado a la investigación que estudia cada paso fundamental de la evolución de sistemas susceptibles de formar planetas.

El área de ingeniería está con la investigación y el desarrollo de espejos elaborados con fibra de carbono, para reemplazar los espejos de vidrio, que es de lo que están hechos los espejos de los observatorios ahora mismo. Para esta investigación se usa un molde de vidrio que a éste se le ponen las capas de fibra de carbono, y posteriormente le hacen el curado correspondiente en un horno con una bolsa de vacío. Después de la obtención de la réplica se le realizan las pruebas ópticas para ver la calidad de esta, las pruebas a las que se somete la réplica son, la prueba de Foucault, la prueba de Ronchi. Con los datos obtenidos de estas pruebas se clasifica la réplica y pasa a una línea de post procesos de los cuales se definen como:

#### I. Proceso de capa extra de resina:

Esta consiste en aplicar una capa extra de resina en la superficie útil de la réplica para su posterior pulido con la finalidad de corregir aberraciones ópticas de ésta.

#### II. Aluminizado o plateado

Este proceso se lleva a cabo de dos maneras: el aluminizado, que es el método al que se somete la gran mayoría de los espejos para lograr una mayor capacidad reflectiva. Para realizar el aluminizado, se requiere el uso de una cámara de vacío que posibilita el proceso mediante sublimación. La segunda opción es el plateado, un método más artesanal que se puede realizar mediante el uso de productos químicos y la aplicación de un aerosol de plata.

El área de astronomía se dedica al área de Astrofísica teórica, Astrofísica observacional e Instrumentación. Este último grupo tiene por objetivo crear instrumentos astronómicos que faciliten la comprensión de la formación de planetas. Se determinó que una de las formas más eficaces de lograr dicha meta es mediante interferómetros ópticos formados por múltiples telescopios, en forma similar a los radios interferómetros como ALMA. (El Atacama Large Millimeter/submillimeter Array, una asociación internacional entre Europa, Norteamérica y Asia del Este, en colaboración con la República de Chile, es el mayor proyecto astronómico del mundo. Ubicado en San Pedro de Atacama en la región de Antofagasta Chile.)

### **1.4 FABRICACION DE ESPEJOS EN EL AREA DE INGENIERIA DE NPF**

La razón de este apartado es detallar toda la línea de producción para la elaboración de un espejo de fibra de carbono dentro del taller de NPF.

Primeramente, se elabora un mandrel (espejo de vidrio convexo se muestra en la figura 1.10), más menos de una pulgada de grosor, las mejores marcas de vidrio para la elaboración de espejos son los M de Saint Gobain, Durán, Zerodur y Pyrex. Este último se utiliza por su alto punto de fusión y que además no presenta deformaciones por el cambio de temperaturas a las que estará sometido en su vida útil. Como primer paso se le somete a una prueba de estrés al bloque de vidrio, si pasa la prueba se someterá a las labores de desbaste y pulidos en una máquina que elaboró un integrante del equipo (como se observa en la figura 1-11), para este proceso se emplean abrasivos tales como:

- Carburo de silicio (carborundum): se emplea en las etapas de desbaste y alisado, que son las más básicas en el trabajo del vidrio, donde éste es apenas un disco tosco de caras casi planas. En la selección de este elemento abrasivo se buscan grit o granos de distintas medidas.
- Óxido de cerio, ferroso, titanio o aluminio: se emplea en la etapa del pulido propiamente tal y se caracteriza por consistir en granos mucho más finos que los anteriores, del orden de los 0,3 a 0,5  $\mu\text{m}$ .

Posteriormente, se elabora una torta de una brea óptica junto al abrasivo de pulido, con el fin de suavizar la superficie del vidrio. (Se puede observar en la figura 1-12).

Para comenzar el proceso de elaboración del espejo de fibra de carbono se toma el mandrel previamente fabricado, se le aplica una película de desmoldante para después proceder con el posicionado de las láminas de fibra, que estas se dispondrán en distintos ángulos (se puede visualizar en la figura 1-13) para obtener un grado mayor al efecto de retracción al momento de desmoldarlo. Cuando ya se culminó el proceso de laminación se introduce mandrel con fibra en una bolsa de vacío elaborada con bagging film, además está en su interior se le introdujo breather y posteriormente se le da paso al curado en un horno a una temperatura controlada en un rango de 155 a 165 grados Celsius (se puede apreciar en la figura 1-14 y figura 1-15). Al término del curado se desmolda la réplica obtenida de mandrel, a esta réplica se somete a pruebas ópticas para su posterior post proceso que es una aplicación de capa extra de resina y el pulido de ésta para obtener los parámetros deseados con pruebas ópticas de control de por medio. (como se puede apreciar en la figura 1-16, figura 1-17 y figura 1-18). Para resumir el proceso de fabricación de espejos en fibra de carbono, se adjuntará un diagrama que ilustra de manera más gráfica dicho procedimiento. (se observa en la figura 1-19).



*Fuente: Elaboración propia sacada en taller de uno de los miembros de NPF*

*Figura 1-10 Mandrel en labores de control de superficies.*



*Fuente: Elaboración propia sacada en taller de uno de los miembros de NPF*

*Figura 1-11 Proceso de desbaste.*



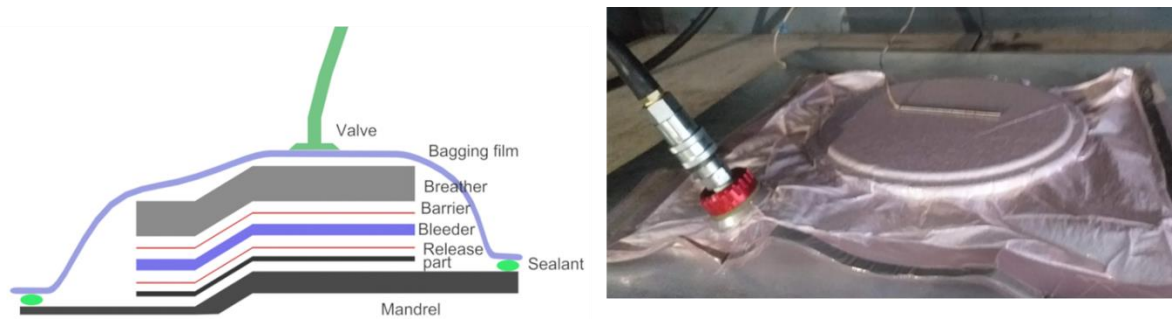
Fuente: Elaboración propia sacada en taller de uno de los miembros de NPF

Figura 1-12 torta de brea para pulido de espejos.



Fuente: Elaboración propia hecha con fotografías facilitadas por el equipo de NPF

Figura 1-13 Proceso de Lay up.



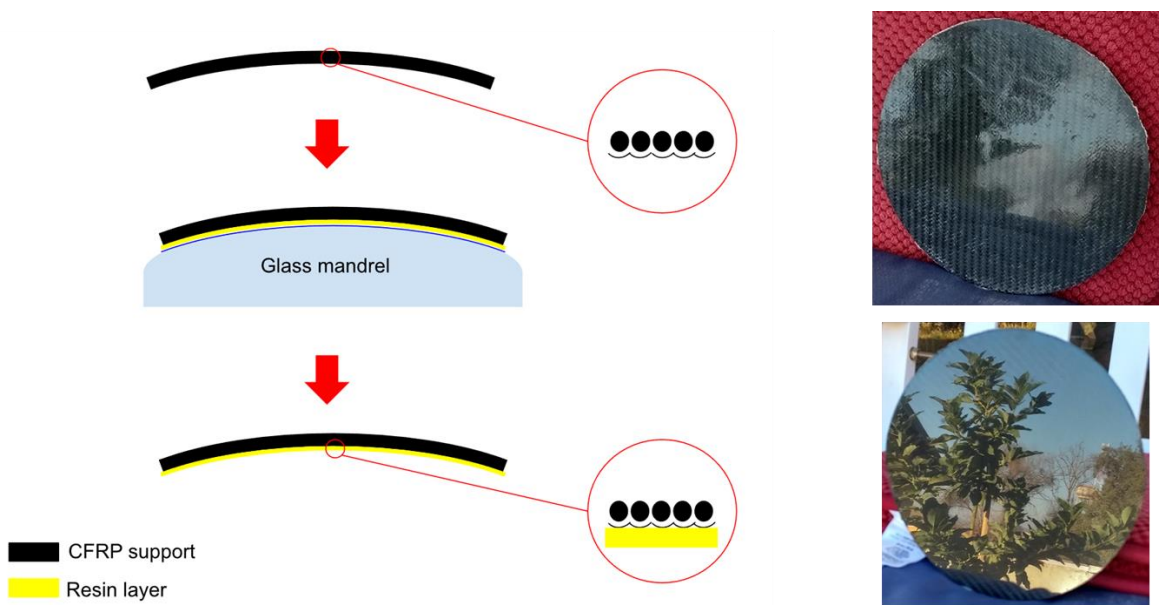
Fuente: Elaboración propia hecha con fotografías facilitadas por el equipo de NPF

Figura 1-14 Proceso de bolsa de vacío para su curado.



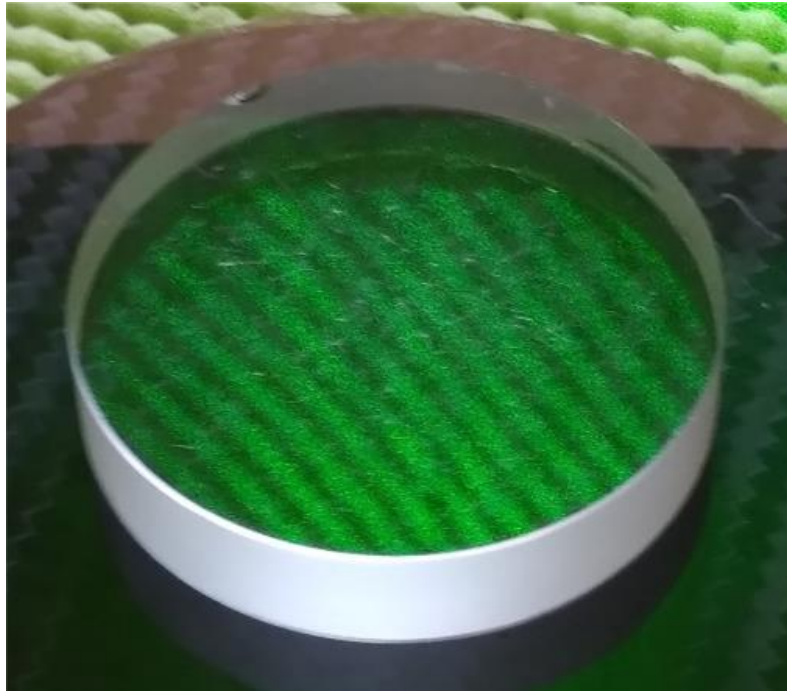
Fuente: Elaboración propia fotografía sacada del taller de NPF

Figura 1-15 Preparación de para el proceso de curado.



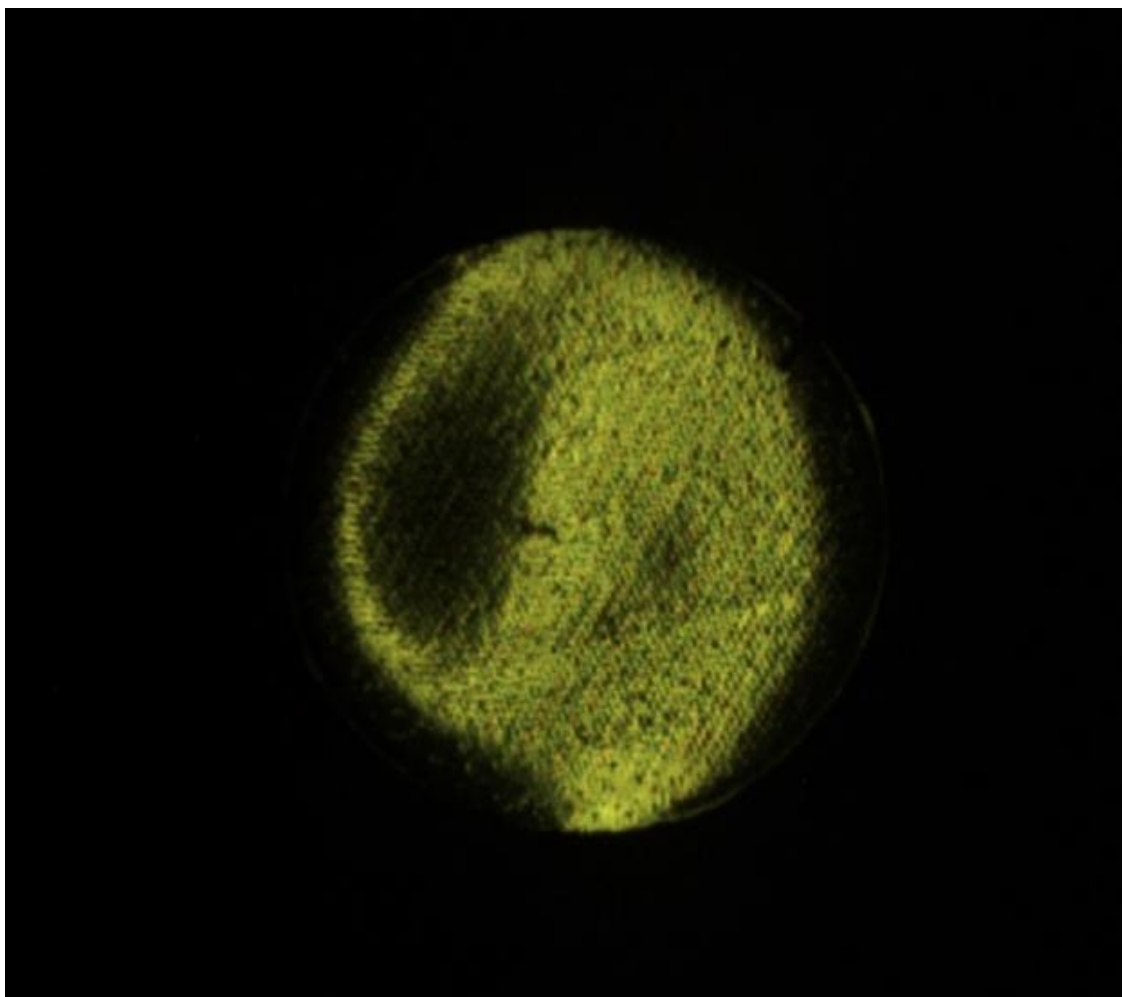
Fuente: Elaboración propia hecha con fotografías facilitadas por el equipo de NPF

Figura 1-16 diagrama de como la impresión a través de la fibra se mitiga (parcialmente) aplicando una capa extra de resina.



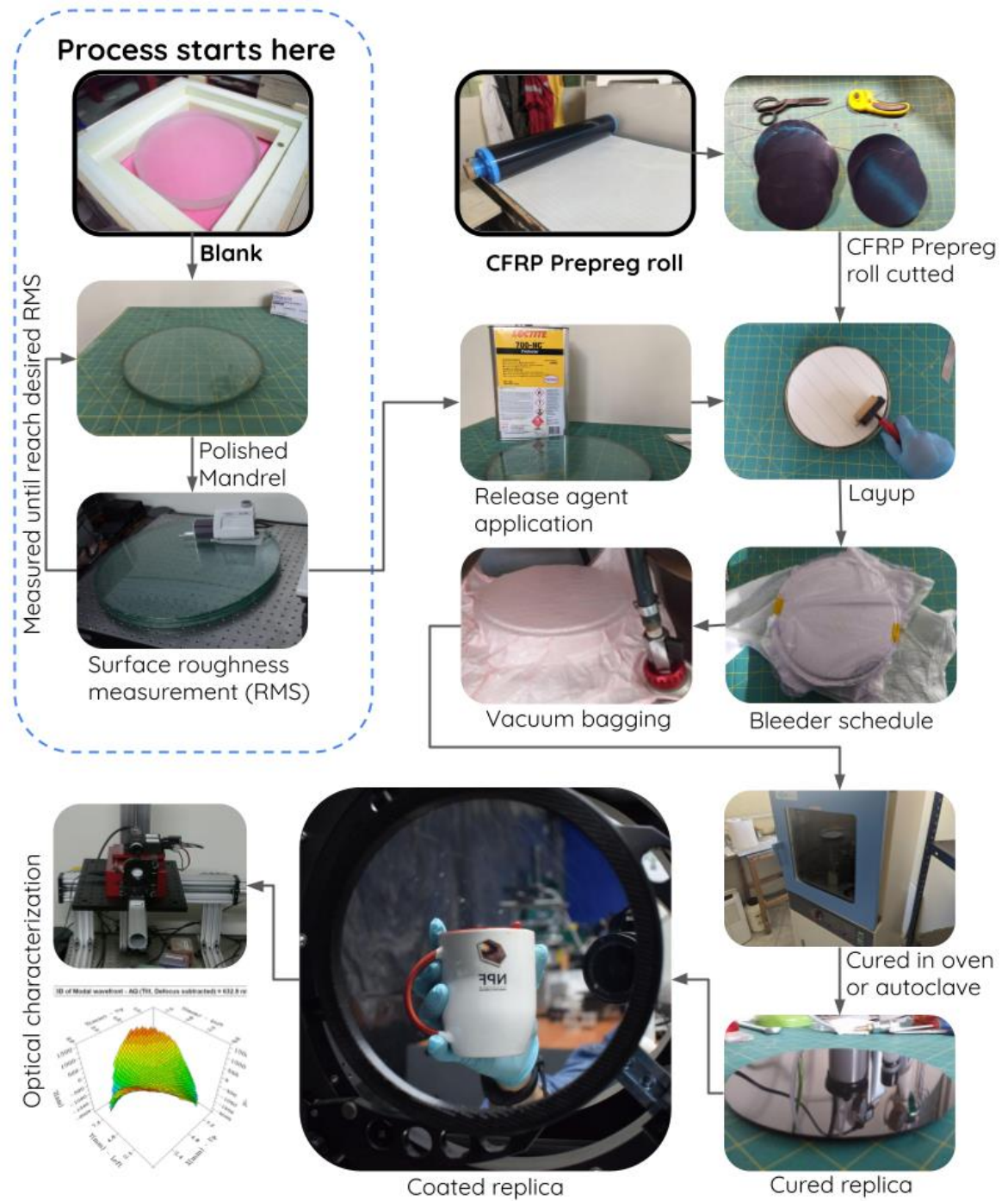
*Fuente: Elaboración propia fotografía hecha en un control de calidad de un espejo de fibra de carbono.*

*Figura 1-17 Prueba de calidad con el método de interferencia de Fizeau.*



*Fuente: Elaboración propia fotografía sacada de un espejo de fibra de carbono al momento de hacerle una prueba de Foucault.*

*Figura 1-18 test de Foucault en una de las réplicas.*



*Fuente: Diagrama facilitado por el equipo de NPF que habían hecho para resumir sus procesos*

Figura 1-19 Línea de producción para la elaboración de espejos en fibra de carbono.

## **1.5 ANTECEDENTES DE ESTUDIOS YA EXISTENTES**

### **1.5.1 ESTUDIO Y PROPUESTA PARA LA AUTOMATIZACIÓN DE PRUEBAS ÓPTICAS DE CONTROL DE CURVATURA EN ESPEJOS ASTRONÓMICOS**

El estudio realizado por un estudiante de la universidad Santiago de Chile, elabora una memoria de las principales pruebas que permiten el control de calidad en las superficies de espejos astronómicos, que estos son principalmente los espejos esféricos y parabólicos.

Además de la fabricación de un prototipo para la prueba de Foucault de manera automatizada, con un enfoque a la realización posterior de una prueba que debe estar diseñada de tal manera que optimice e implemente el desarrollo de una innovación en tecnologías digitales de control y análisis. Con el fin de conseguir una prueba automatizada.

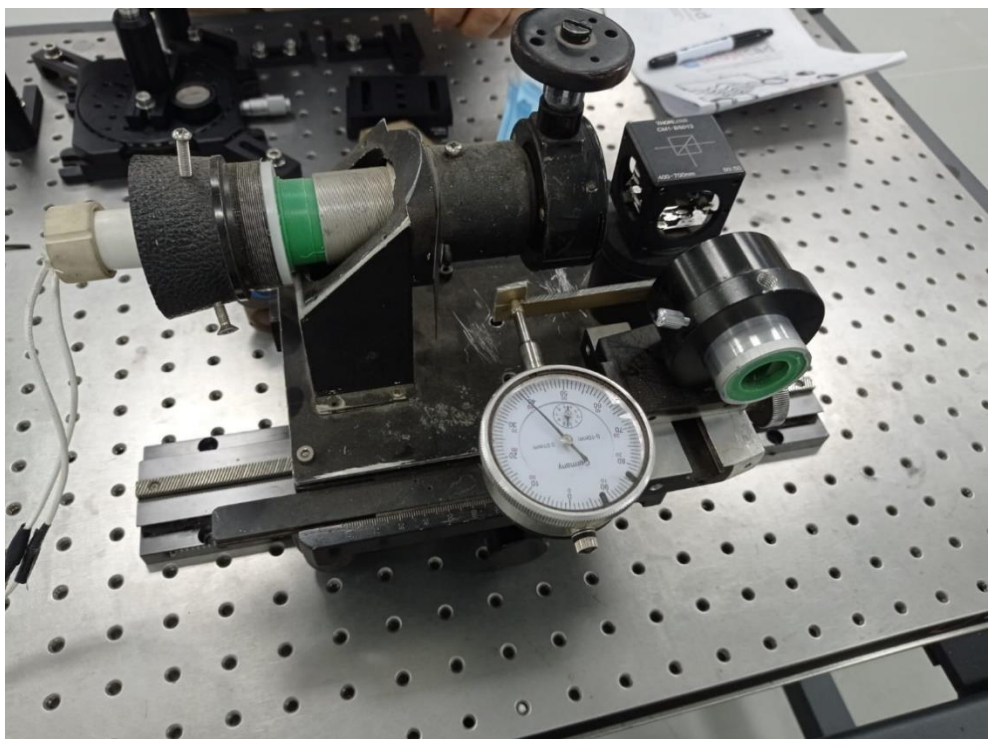
Que además este estudio contiene un capítulo dedicado a fundamentos teóricos necesarios para la comprensión de lo que se está tratando de llegar con este proyecto de título, los alcances y mecanismos para la correcta implementación para el sistema.

## **1.6 ANTECEDENTES GENERALES**

En esta fase del desarrollo del equipo de medición, se expondrá la problemática general, así como sus problemáticas específicas. Posteriormente, se abordarán los objetivos del proyecto, junto con sus correspondientes objetivos específicos. Además, se proporcionará un análisis sobre la interacción de este equipo con el usuario encargado de llevar a cabo el proceso de control de los espejos.

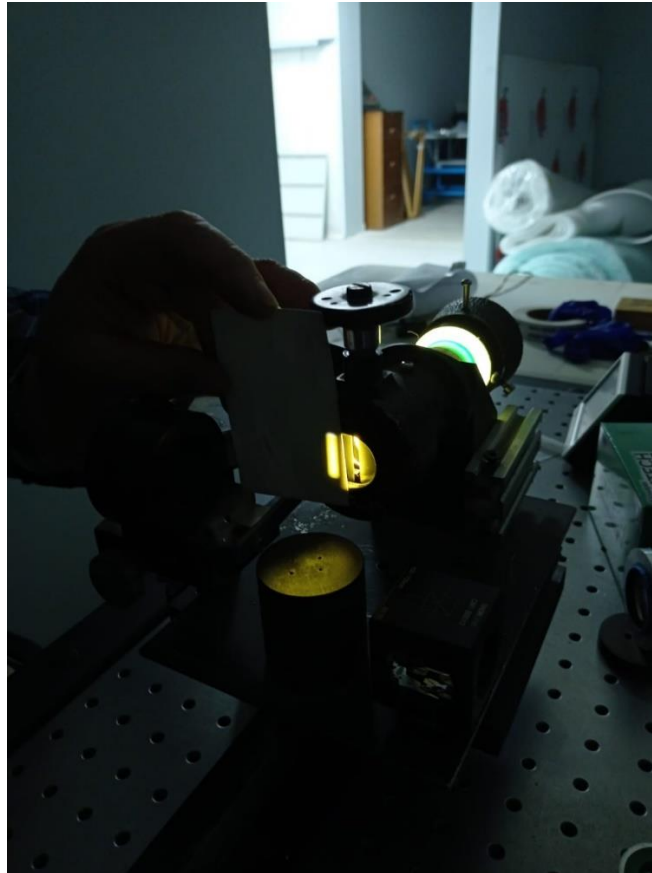
El contexto que se presenta en el proyecto es, que se necesita encontrar una opción de mejora a un equipo de mediciones de aberraciones ópticas con el propósito de reducir el error humano, para el estudio y control de la elaboración de espejos hecho de fibra de carbono, con el propósito de la aplicación de éstos, en observatorios astronómicos. Los espejos que se están elaborado en el laboratorio de NPF son parabólicos, además estos cuentan con la cualidad que éstos son de  $f/3$  a  $f/6$ . (Eso corresponde a la relación entre el diámetro del espejo con el radio de curvatura de éste mismo). El proceso completo de medición toma muchas horas de preparación y análisis en la situación actual dentro del taller.

Dentro del taller todo este proceso se hace de manera manual con instrumentos elaborados dentro de éste mismo, exceptuando la mesa óptica que se utiliza para montar este sistema de medición. (se muestra en la figura 1-20 y figura 1-21)



*Fuente: Elaboración propia fotografía sacada del taller de NPF*

*Figura 1-20 Instrumento de Foucault utilizado por el equipo de NPF para realizar las pruebas*



*Fuente: Elaboración propia fotografía sacada del taller de NPF*

*Figura 1-21 Prueba de Foucault en el laboratorio de óptica donde se está alineando los rayos de salida con los de entrada*

### **1.6.1 PROBLEMÁTICA GENERAL**

La problemática que se presenta es, lo demoroso en realizar en el proceso mediciones en la prueba de Foucault en los espejos, teniendo en cuenta que el sistema actual se realiza de manera manual, como consecuencia tiene una alta probabilidad de error humano ya que hay que controlar muchas variables.

### **1.6.2 PROBLEMÁTICAS ESPECIFICAS**

- La poca eficiencia en el proceso de montaje y alineado del instrumento de medición.
- Falta de confiabilidad en la precisión en los carros para la realización de medidas.

### **1.6.3 OBJETIVO GENERAL**

Diseñar un equipo de medición de la aberración longitudinal o “caustica” (frente de ondas), que permita una optimización en el tiempo para la obtención de medidas, además de una reducción de error humano en el momento de realizar las labores de montaje y de medición.

### **1.6.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Diseñar una estructura que facilite las variables de alineación del instrumento de medición con el espejo (alineación del instrumento de medición con el espejo en ejes x, z). también este debe contar con un sistema de movimiento controlado de manera electrónica
- Elaborar un presupuesto de costos en materiales y componentes necesarios de manera inicial para la elaboración del dispositivo.

## CAPÍTULO 2: DISEÑO DE INGENIERÍA

2 DEFINICIÓN.

En este capítulo se van a definir las características morfológicas y técnicas del instrumento de medición para una correcta fabricación y su armado.

2.1 OBJETIVOS DEL PRODUCTO A DISEÑAR

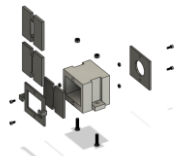
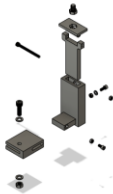
Los objetivos que se tienen en mente a cumplir son:

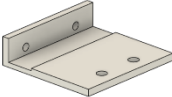
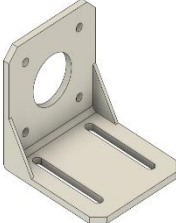
- Realizar una interfase que se pueda controlar mediante un computador.
- Implementar un sistema motriz con motores pasos a paso controlados por una shield CNC.
- Diseñar un sistema de transmisión adecuado para que la precisión del movimiento principal sea de 0.1 mm.
- Diseñar un movimiento secundario paralelo al principal que este estará encargado de mover el cuchillo (este movimiento no es relevante una precisión tan exacta).

2.1.1 DEFINICIÓN DE SUBSISTEMAS

La tabla subsiguiente exhibirá los componentes que desempeñarán funciones en los diversos subsistemas. (se muestra en la tabla 2-1).

Tabla 2-1 lista de sistema con componentes que entran en cada uno.

| Nombre del sistema | Nombre del componente | Imagen de referencia                                                                  |
|--------------------|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Sistema de trabajo | Fuente de luz         |  |
|                    | Soporte de cámara     |  |
| Sistema de control | Shield CNC RAMPS 1.4  |  |
|                    | A4988 Stepper Drivers |  |

|                        |                                                     |                                                                                       |
|------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|                        | Sensor Final de Carrera Mecánico                    |    |
| Sistema de motriz      | nema 17 stepper motor                               |    |
| Sistema de transmisión | Barra de acero con hilo M8                          |    |
|                        | Acoplamiento Flexible                               |   |
|                        | 2664N314 Metal Metric Gears - 20° Pressure Angle    |  |
|                        | 2485N241_Metal Gear Rack - 20 Degree Pressure Angle |  |
| Sistema de estructural | C-Beam 40x80x500 Linear Rail                        |  |
|                        | V-Slot 20x40x500 Linear Rail                        |  |
|                        | Black Angle Corner Connector                        |  |
|                        | Unión de soporte con estructura                     |  |
|                        | Soporte de Nema 17                                  |  |

## 2.2 ANÁLISIS Y DEFINICIÓN DE ALTERNATIVAS MORFOLÓGICAS Y TECNOLÓGICAS.

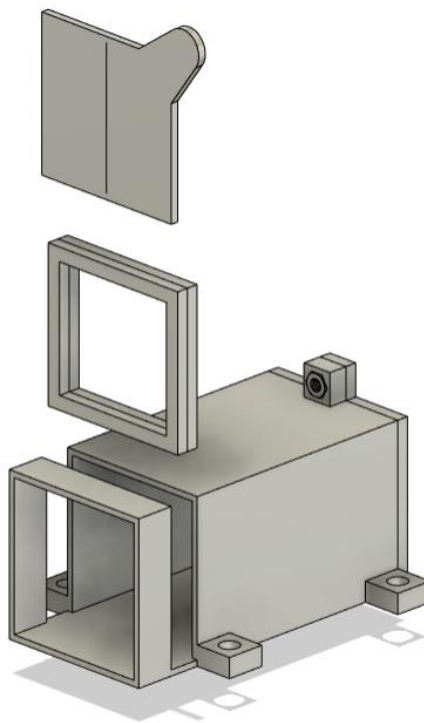
Las alternativas que más complicaciones presentaron fueron en los sistemas de fuente de luz junto con el sistema del movimiento primario.

### 2.2.1 ANÁLISIS Y DEFINICIÓN DEL SISTEMA DE FUENTE DE LUZ

En parte del desarrollo del diseño se barajaron 3 opciones de formato para la fuente de luz:

- La primera que cuenta con una canal donde se introducen las lentillas con las ranuras y un marco donde va el difusor de luz (como se muestra en la figura 2-1).

Esta alternativa fue rechazada por la razón de que la ranura deja una alta interacción con el usuario y que este diseño no restringe la variedad de posiciones de donde se puede colocar el soporte del difusor junto con la lentilla provocando un mal uso de este.

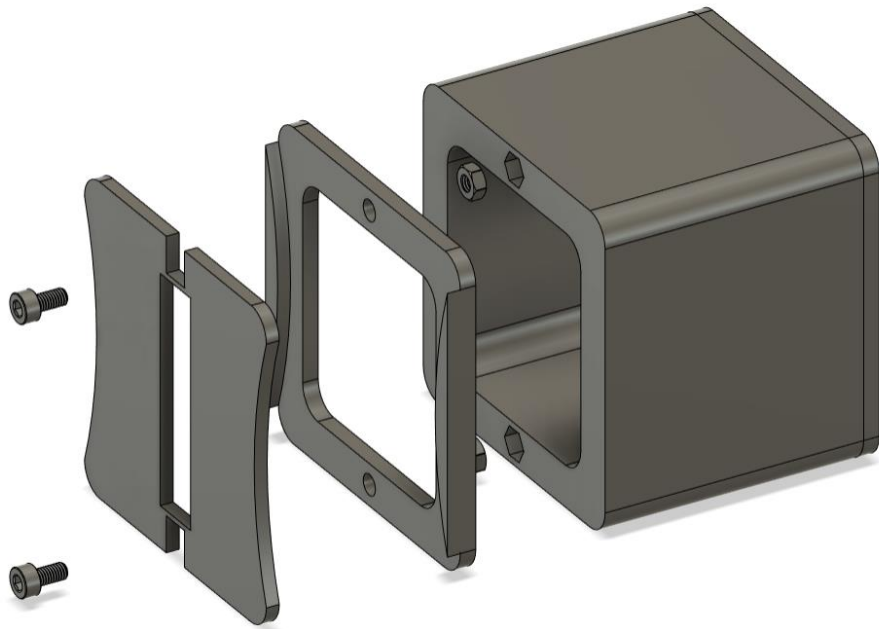


*Fuente: Elaboración propia fotografía sacada de fusión 360 del modelo 3D del equipo de medición.*

*Figura 2-1 Primera alternativa de fuente de luz de ranura*

- La segunda opción que se presentó fue un sistema donde el soporte va unido al cuerpo de la fuente de luz mediante una tuerca que va incrustada al cuerpo y un perno que mantiene en su posición al soporte del difusor, además este tiene una

forma donde la lentilla va unida de con un ajuste de presión (como se muestra en la figura 2-2).

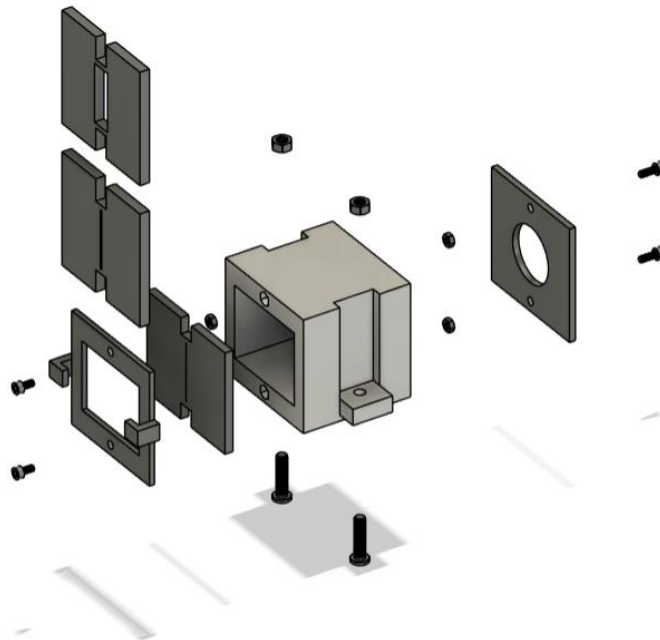


*Fuente: Elaboración propia fotografía sacada de fusión 360 del modelo 3D del equipo de medición.*

*Figura 2-2 Alternativa de fuente de luz con sistema ajuste de presión*

Esta alternativa también fue rechazada por la simple razón que como esta pieza al ser muy delgada con la prueba de ajuste la lentilla presento una curvatura al momento de unirlo a soporte de difusor, que esto representa una condición fatal ya que si esto se ocupara guiaría los rayos de las ondas de luz con la misma curvatura dando como resultado una medición distorsionada.

- Como tercera alternativa se tomó como referencia la anterior, pero cambiando el sistema unión mediante el ajuste de presión por un sistema donde la lentilla se desliza en el difusor con una ligera presión (como se muestra en la figura 2-3).



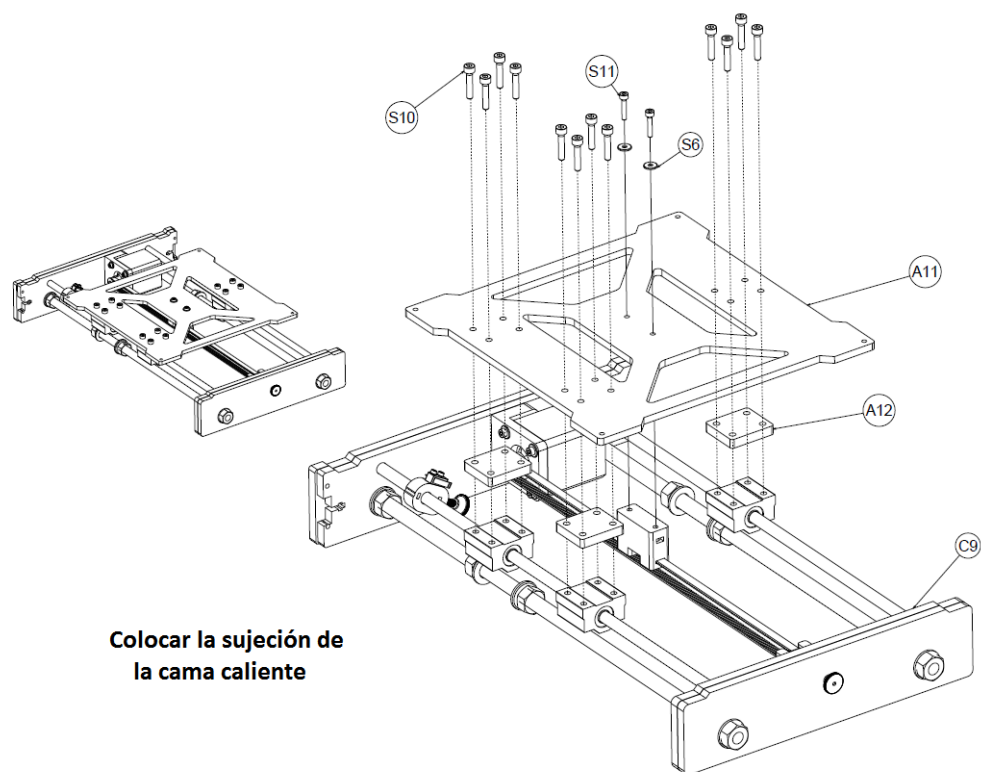
*Fuente: Elaboración propia fotografía sacada de fusión 360 del modelo 3D del equipo de medición.*

*Figura 2-3 Alternativa de unión deslizante.*

Esta fue la opción que más convenció al equipo de NPF cuando se hizo una presentación de diseño para la fuente de luz ya que al tener imanes las lentillas facilitarían el intercambio de estas para realizar la labor de centrar los rayos de luz con respecto al espejo que se desea medir.

### **2.2.2 ANÁLISIS Y DEFINICIÓN DEL SISTEMA DE MOVIMIENTO PRIMARIO**

- La primera alternativa del sistema de transmisión del movimiento consiste en un sistema de correa conectada a un motor paso a paso, la correa está conectada a la mesa de trabajo que moverá la fuente de luz junto con el movimiento secundario. Para ayudar a la estabilidad del movimiento se le añadiría 2 ejes cilíndricos estos servirían como guía para el movimiento (se puede observar en la figura 2-4).



Fuente: Imagen extraída de la página web [www.prometec.net](http://www.prometec.net)

Figura 2-4 muestra de la primera alternativa en el movimiento primario semejante al que ocupa la impresora 3D con un sistema de correa y polea.

Esta alternativa se rechazó por la razón de que la dimensión de la mesa son 100 x 150 x 5 mm, estas dimensiones de la mesa de trabajo solo se podría utilizar una guía cilíndrica no aportando la totalidad de estabilidad necesaria a la mesa, además que estos sistemas cuentan con un pequeño juego, que esto afectaría de manera negativa a la hora de la obtención de medidas.

- La segunda opción propuesta consiste en la instalación de una mesa de trabajo en un perfil C de aluminio. Dicha mesa está equipada con un sistema de ruedas y excéntricas que se acoplan al riel interno del perfil. El movimiento es transmitido por un motor paso a paso conectado a un eje helicoidal. Es importante señalar que la mesa de trabajo incluirá una tuerca para facilitar su desplazamiento, como se ilustra en las Figuras 2-5 y 2-6.



*Fuente: Elaboración propia fotografía sacada de fusión 360 del modelo 3D del equipo de medición.*

*Figura 2-5 segunda alternativa de movimiento primario con sistema de eje helicoidal con ruedas en la parte interior.*



*Fuente: Elaboración propia fotografía sacada de fusión 360 del modelo 3D del equipo de medición.*

*Figura 2-6 segunda alternativa de movimiento primario con sistema de eje helicoidal y tuerca de movimiento.*

Esta alternativa fue rechazada por la razón de que, si al momento de ajustar las excéntricas se tendrá que desmontar gran parte del sistema, generando un gran consumo de tiempo en las labores de desarme del sistema y armado.

- Como tercera alternativa se movieron el sistema de ruedas con excéntricas de la parte interna a la externa, (como se muestra en la figura 2-7).



Fuente: Elaboración propia fotografía sacada de fusión 360 del modelo 3D del equipo de medición.

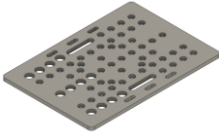
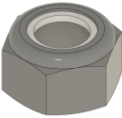
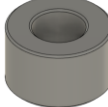
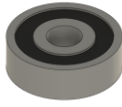
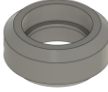
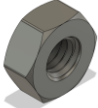
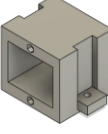
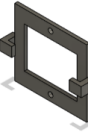
Figura 2-7 alternativa de eje helicoidal con sistema de ruedas con excéntricas en la parte exterior se decidió por este sistema ya que, si se necita ajustar las excéntricas no hay necesidad de desarmar todo el sistema, ahorrando mucho tiempo en comparación a la alternativa anterior.

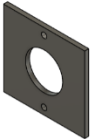
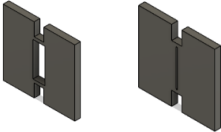
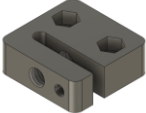
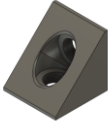
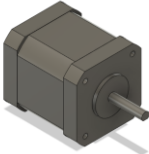
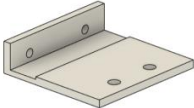
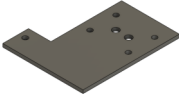
2.3 DISEÑO PARA FABRICABILIDAD.

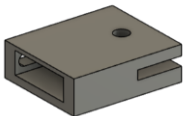
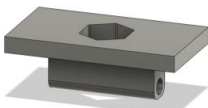
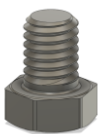
En la siguiente tabla se graficará el listado completo de piezas del equipo con las que se especificara si se fabricara o se compra, el material de que estará hecho incluyendo una foto para ayudar a la comprensión de lo que se está hablando. (como se muestra en la Tabla 2-2).

Tabla 2-2 listado de piezas y componentes completa del equipo de medición.

| Pieza o componente           | Material | ¿Se compra o se fabrica? | Imagen de referencia                                                                  |
|------------------------------|----------|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| C-Beam 40x80x500 Linear Rail | Aluminio | Se compra                |  |
| C-Beam End Mount             | Aluminio | Se compra                |  |

|                                              |                |            |                                                                                       |
|----------------------------------------------|----------------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| V-Slot Gantry Plate 20-80mm                  | Aluminio       | Se compra  |    |
| Pernos M5                                    | Acero          | Se compra  |    |
| Tuerca de seguridad con inserto de nailon M5 | Acero y nailon | Se compra  |    |
| Espaciador Aluminio 6mm                      | Aluminio       | Se compra  |   |
| Ball Bearing 5 x 16 x 5 v1                   | Acero          | Se compra  |  |
| Xtreme Solid V Wheel                         | caucho         | Se compra  |  |
| Eccentric Spacer 6mm                         | Acero          | Se compra  |  |
| Tuerca M3                                    | Acero          | Se compra  |  |
| Pernos M3                                    | Acero          | Se compra  |  |
| Cuerpo de fuente de luz                      | PLA            | Se fábrica |  |
| Tapa del difusor                             | PLA            | Se fabrica |  |

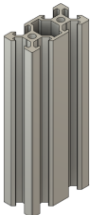
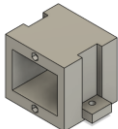
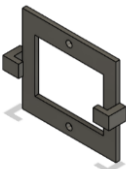
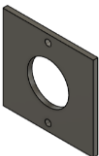
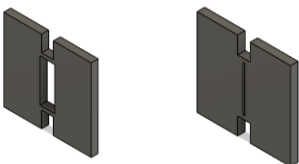
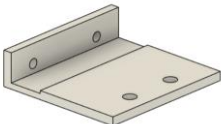
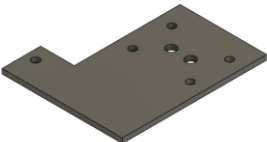
|                                  |          |            |                                                                                       |
|----------------------------------|----------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Tapa trasera de fuente de luz    | PLA      | Se fabrica |    |
| Lentillas para salida de luz     | ABS      | Se fabrica |    |
| 8mm Acme Anti Backlash Nut Block | Aluminio | Se compra  |    |
| Soporte de motores Nema 17       | PLA      | Se fabrica |   |
| V-Slot 20x40x100 Linear Rail     | Aluminio | Se compra  |  |
| Black Angle Corner Connector     | Aluminio | Se compra  |  |
| Nema 17 motor stepper            |          | Se compra  |  |
| Unión de soporte con estructura  | PLA      | Se fabrica |  |
| Barra con hilo M8                | Acero    | Se compra  |  |
| Acople Flexible 5 mm x 8 mm      | Aluminio | Se compra  |  |
| Mesa para montaje                | Acero    | Se fabrica |  |

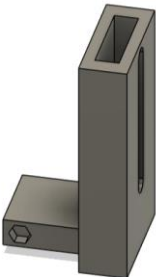
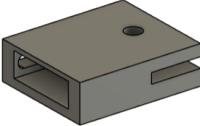
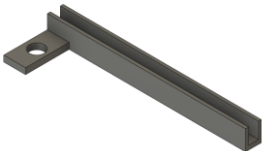
|                                                                   |       |            |                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------|-------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Acople con placa de montaje                                       | PLA   | Se fabrica |    |
| Cuerpo del soporte de cámara                                      | PLA   | Se fabrica |    |
| Regulador de altura para la cámara                                | PLA   | Se fabrica |    |
| Soporte de cámara                                                 | PETG  | Se fabrica |   |
| Perno de 3/8" x 1/2"                                              | acero | Se compra  |  |
| Piñon dentado<br>(2664N324_Metal Gear - 20 Degree Pressure Angle) | Acero | Se compra  |  |
| Cremallera (2485N241_Metal Gear Rack - 20 Degree Pressure Angle)  | Acero | Se compra  |  |

2.4 ANÁLISIS Y DEFINICIÓN DE PROCESOS DE FABRICACIÓN.

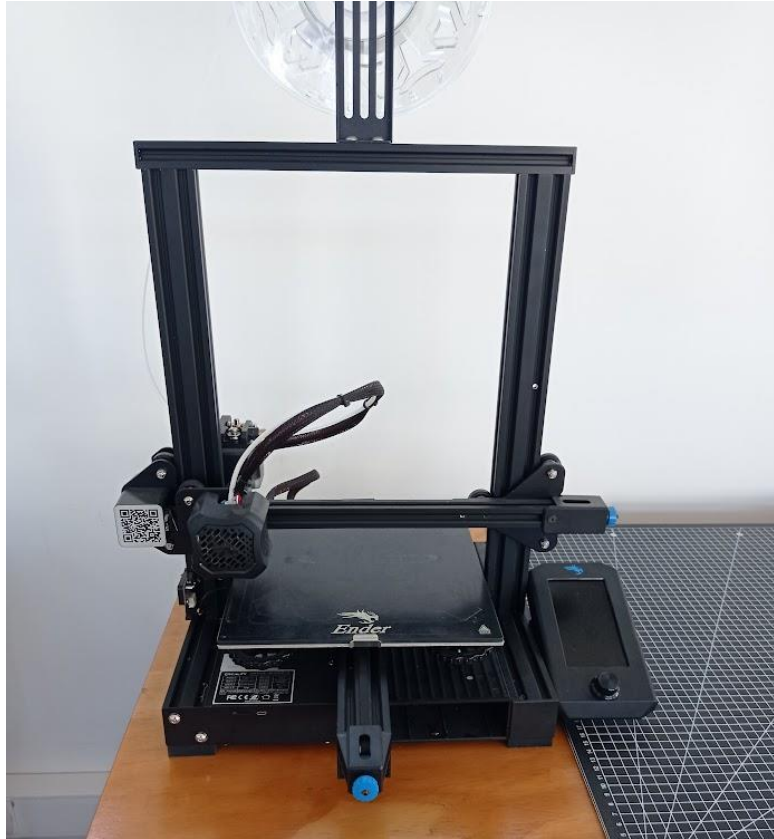
Mediante la siguiente tabla se muestran el listado de piezas que se van fabricaran y mecanizaran para poder llevar a cabo un prototipado inicial del equipo de medición, (se muestra en la tabla 2-3).

Tabla 2-3 aquí se muestran las piezas y componentes con su proceso de manufactura correspondiente.

| Pieza o componente              | Imagen de la pieza o componente                                                      | Proceso de manufactura    |
|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| V-Slot 20x40x100 Linear Rail    |    | Corte por sierra circular |
| Cuerpo de fuente de luz         |   | Impresión 3D en FDM       |
| Tapa del difusor                |  | Impresión 3D en FDM       |
| Tapa trasera de fuente de luz   |  | Impresión 3D en FDM       |
| Lentillas para salida de luz    |  | Impresión 3D FMD          |
| Soporte de motores Nema 17      |  | Impresión 3D en FDM       |
| Unión de soporte con estructura |  | Impresión 3D en FDM       |
| Mesa para montaje               |  | Corte por agua            |

|                                    |                                                                                      |                     |
|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| Cuerpo del soporte de cámara       |    | Impresión 3D en FDM |
| Regulador de altura para la cámara |   | Impresión 3D en FDM |
| Soporte de cámara                  |  | Impresión 3D FMD    |
| Acople con placa de montaje        |  | Impresión 3D FMD    |
| Cuchillo                           |   | Impresión 3D en FDM |
| Riel para Cremallera               |  | Impresión 3D FDM    |

Estas son las maquinas herramientas que estarán involucradas en los procesos para realizar las piezas que están presentes en la tabla anterior. (se muestran en la figura 2-8, figura 2-9, figura 2-10, figura 2-11 y figura 2-12)



*Fuente: Elaboración propia fotografía sacada de uno de los laboratorios del DIMA*

*Figura 2-8 impresora 3D FDM de la marca creality modelo Ender 3 pro que está en el FABLAB de la universidad.*



*Fuente: Elaboración propia fotografía sacada de uno de los laboratorios del DIMA*

*Figura 2-9 sierra circular que está en el Fablab de la universidad.*



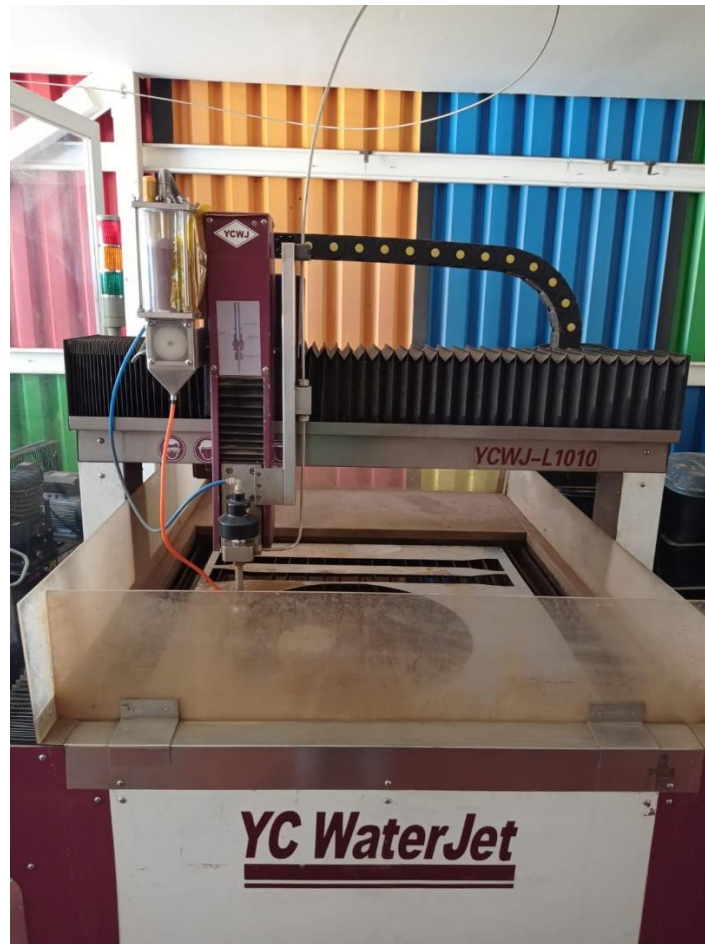
*Fuente: Elaboración propia fotografía sacada de uno de los laboratorios del DIMA*

*Figura 2-10 impresora de resina que está en el Fablab de la universidad.*



*Fuente: Elaboración propia fotografía sacada de uno de los laboratorios del DIMA*

*Figura 2-11 centro de curado para completar el proceso de curado de las piezas que se hacen en resina.*

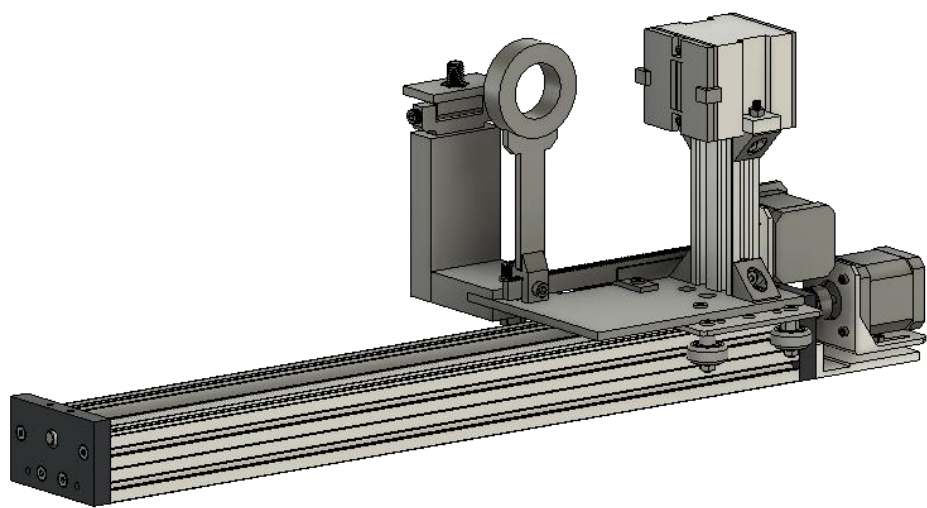


*Fuente: Elaboración propia fotografía sacada de uno de los laboratorios del DIMA*

*Figura 2-12 maquina WaterJet que está en el laboratorio dima de la universidad.*

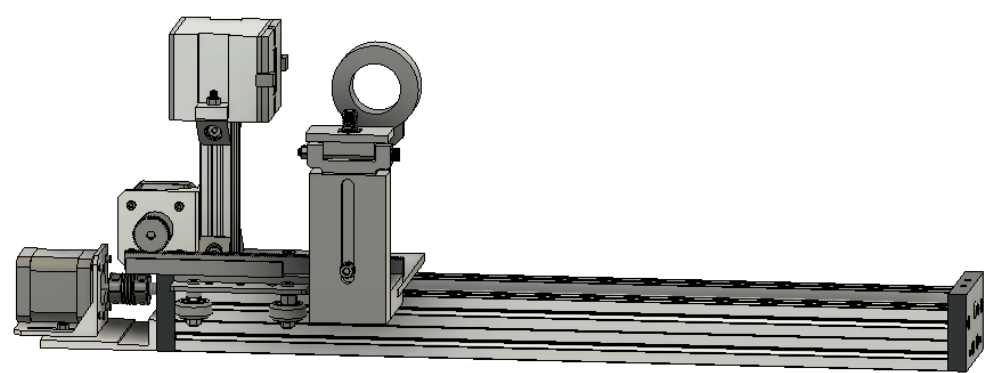
## **2.5 PROPUESTA DE FABRICACIÓN DE PROTOTIPO.**

A manera de conclusión del proceso de diseño se llegó a la última propuesta que fue bien evaluada por el equipo de NPF donde se destacó su factibilidad a la hora de prototipar con los materiales y maquinas disponibles, así es como se ve el prototipo del equipo de medición se muestra en la figura 2-13 y figura 2-14



*Fuente: Elaboración propia fotografía sacada de fusión 360 del modelo 3D del equipo de medición.*

*Figura 2-13 propuesta aceptada por el equipo de NPF en vista frontal.*



*Fuente: Elaboración propia fotografía sacada de fusión 360 del modelo 3D del equipo de medición.*

*Figura 2-14 propuesta aceptada por el equipo de NPF en vista posterior.*

### **CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN DE PROTOTIPO**

3 EVALUACIÓN MVP

Mediante el siguiente capitulo se mostrará el proceso de armado puesta en marcha con realización de pruebas en laboratorio, también hacer un análisis de inversión de los materiales necesarios para la confección del prototipo inicial del equipo de medición.

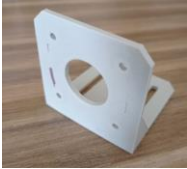
3.1 PROCESO DE FABRICACIÓN DEL EQUIPO DE MEDICIÓN

Mediante los siguientes puntos se mostrará el proceso de fabricado y armado del equipo de medición, junto con los componentes tecnológicos que se tuvieron que comprar para la confección de esté.

3.1.1 COMPONENTES FABRICADOS

Los componentes que se fabricaron para la confección del prototipo se muestran en la siguiente tabla. (tabla 3-1).

Tabla 3-1 listado de componentes que se fabricaron en el proceso de prototipado.

| Nombre del componente           | Método de fabricación  | Material | Imagen del componente                                                                 |
|---------------------------------|------------------------|----------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Placa de montaje                | Corte por agua         | SAE 1040 |  |
| Cuchillo                        | Impresión 3D FDM       | PLA      |  |
| Cremallera                      | Impresión 3D en resina | ABS      |  |
| piñón                           | Impresión 3D en resina | ABS      |  |
| Soporte stepper ranura de 5.2mm | Impresión 3D FDM       | PLA      |  |
| Soporte stepper ranura de 4.2mm | Impresión 3D FDM       | PETG     |  |

|                                 |                  |      |                                                                                       |
|---------------------------------|------------------|------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Unión de soporte con estructura | Impresión 3D FDM | PETG |    |
| Acople con placa de montaje     | Impresión 3D FDM | PETG |    |
| Cuerpo de soporte               | Impresión 3D FDM | PLA  |    |
| Regulador de altura             | Impresión 3D FDM | PETG |   |
| Soporte de Cámara               | Impresión 3D FDM | PETG |  |
| Soquet de linterna              | Impresión 3D FDM | PLA  |  |
| Cuerpo de fuente de luz         | Impresión 3D FDM | PLA  |  |
| Tapa de difusor                 | Impresión 3D FDM | PLA  |  |
| Lentilla de 10 mm               | Impresión 3D FDM | PLA  |  |
| Lentilla de 1 mm                | Impresión 3D FDM | PLA  |  |

Es necesario aclarar que, aunque se haya fabricado inicialmente los componentes del piñón y la cremallera (se fabricaron en impresora 3D en resina), se optará por adquirirlos posteriormente, ya que están disponibles en el mercado y no fueron diseñados originalmente.

- Para el piñón se selecciono es de 23.5 mm de diámetro con 45 dientes con un modulo de 0.5 mm con una precisión de 20°. (se puede encontrar con el siguiente código 2664N324).
- Para la cremallera seleccionada tiene como características 500 mm de longitud, 20 mm de espesor y 25 mm de altura tiene una precisión de 20° y la altura de paso es de 23 mm. (se puede encontrar con el siguiente código 2485N241).

3.1.2 COMPONENTES TECNOLÓGICOS

Los componentes tecnológicos que se ocuparon para la construcción del prototipo inicial se mostraran en la siguiente tabla. (tabla 3-2).

Tabla 3-2 listado de componentes tecnologicos que se ocuparon la construcción del prototipo.

| Nombre del componente                                     | Precio aproximado en UF | Imagen de referencia                                                                  |
|-----------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Motor Stepper Nema 17 1,8°                                | 0,54                    |  |
| Arduino Mega 2560                                         | 0.41                    |  |
| Drive para motor paso a paso A4988DRV                     | 0,053                   |  |
| Final de carrera mecánico (limit switch) con PCB + cables | 0,062                   |  |
| Tarjeta controladora Ramps 1.4 (Roja)                     | 0.22                    |  |

|                                                     |      |                                                                                     |
|-----------------------------------------------------|------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| ZWO-cámara astronómica planetaria de alta velocidad | 5,63 |  |
|-----------------------------------------------------|------|-------------------------------------------------------------------------------------|

3.1.3 ARMADO DEL PROTOTIPO

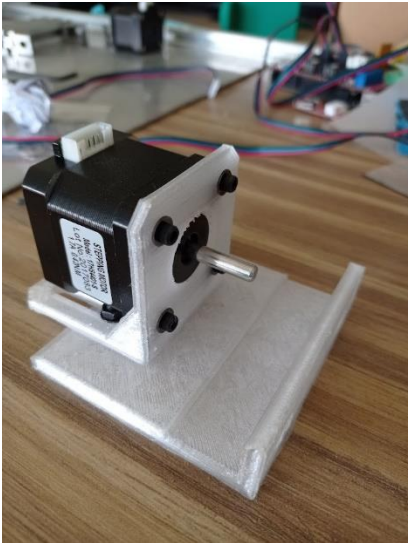
Teniendo todos los componentes listos se empezó en armado del sistema movimiento principal ensamblado las partes como se muestra en la Figura 3-1.



Fuente: Elaboración propia fotografía sacada mientras se armaba el equipo de medición.

Figura 3-1 Ensamble de soporte motor con la unión a la estructura.

Posteriormente se ensambló el motor paso a paso al soporte como se muestra en la Figura 3-2.



Fuente: Elaboración propia fotografía sacada mientras se armaba el equipo de medición.

Figura 3-2 ensamble de motor paso a paso con su respectivo soporte.

A continuación, se unió este conjunto a la estructura principal como se muestra en la Figura 3-3.



*Fuente: Elaboración propia fotografía sacada mientras se armaba el equipo de medición.*

*Figura 3-3 unión de conjunto de motriz principal con estructura.*

Por otro lado, se empezó a realizar el armado del carro principal como se muestra con la secuencia de las Figuras 3-4, 3-5, 3-6, 3-7, 3-8, 3-9.



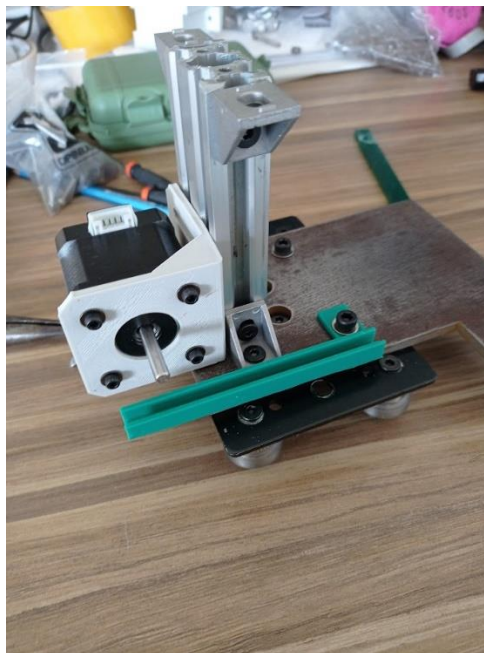
*Fuente: Elaboración propia fotografía sacada mientras se armaba el equipo de medición.*

*Figura 3-4 ensamble de placa de montaje con riel de cremallera y soporte de fuente de luz a mesa móvil.*



*Fuente: Elaboración propia fotografía sacada mientras se armaba el equipo de medición.*

*Figura 3-5 montaje de soporte de motor con perfil de aluminio del soporte de la fuente de luz.*



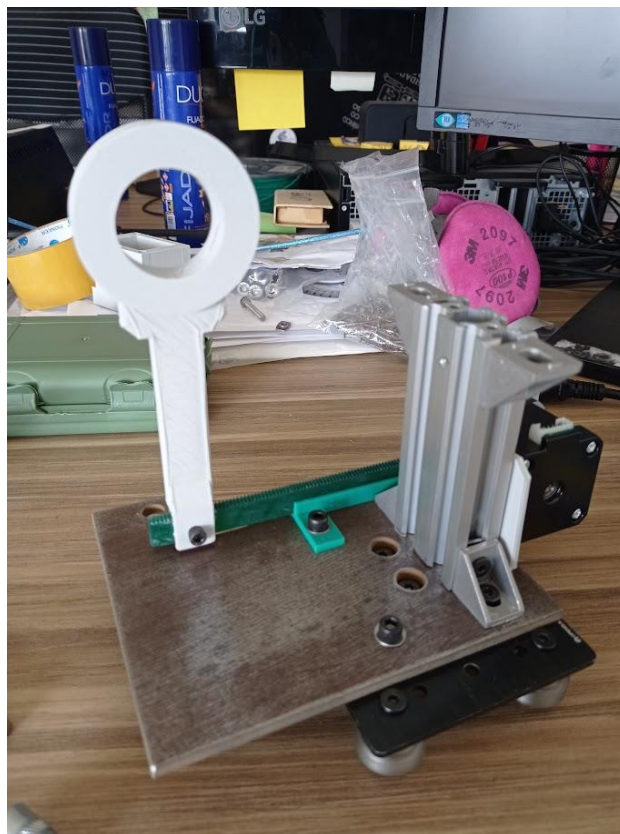
*Fuente: Elaboración propia fotografía sacada mientras se armaba el equipo de medición.*

*Figura 3-6 ensamble de motor paso a paso con su respectivo soporte.*



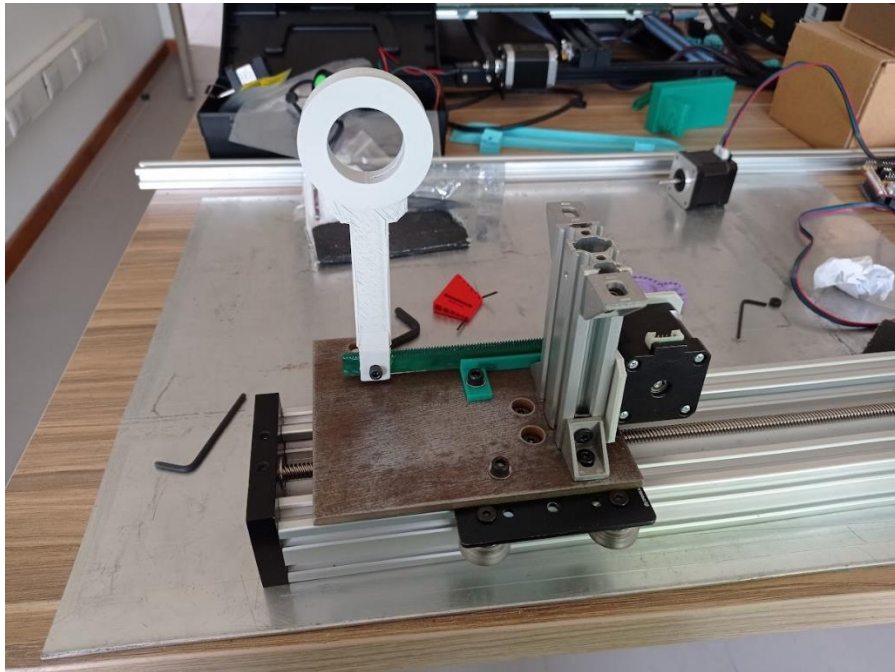
*Fuente: Elaboración propia fotografía sacada mientras se armaba el equipo de medición.*

*Figura 3-7 unión de motor paso a paso con piñón.*



*Fuente: Elaboración propia fotografía sacada mientras se armaba el equipo de medición.*

*Figura 3-8 montaje de cremallera con cuchillo a su riel correspondiente junto al piñón.*



*Fuente: Elaboración propia fotografía sacada mientras se armaba el equipo de medición.*

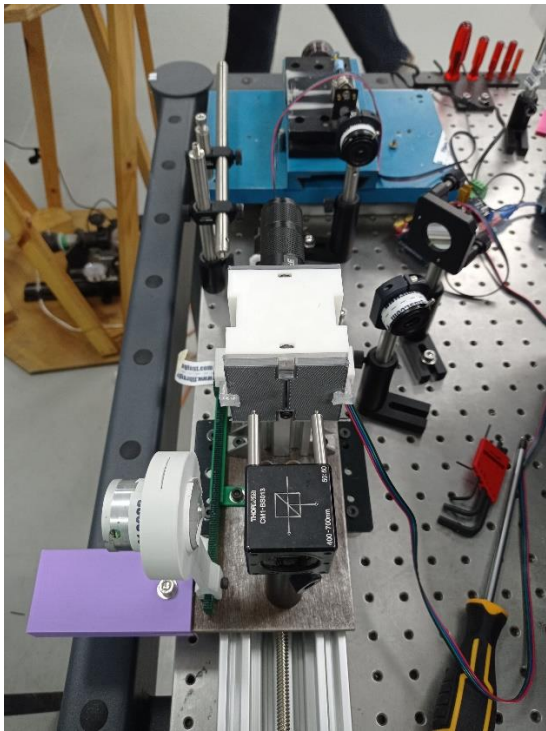
*Figura 3-9 montaje de estructura móvil a la estructura junto con el eje helicoidal.*

Por otro lado, se realizó el ensamble de la fuente de luz y el soporte de cámara como se muestra en la figura 3-10 y figura 3-11.



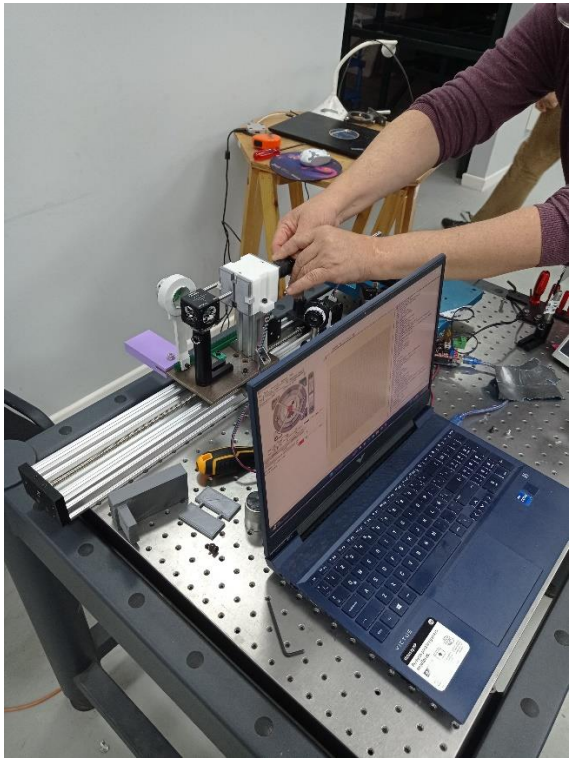
*Fuente: Elaboración propia fotografía sacada mientras se armaba el equipo de medición.*

*Figura 3-10 montaje de estructura soporte de cámara con placa de montaje.*



Fuente: Elaboración propia fotografía sacada mientras se armaba el equipo de medición.

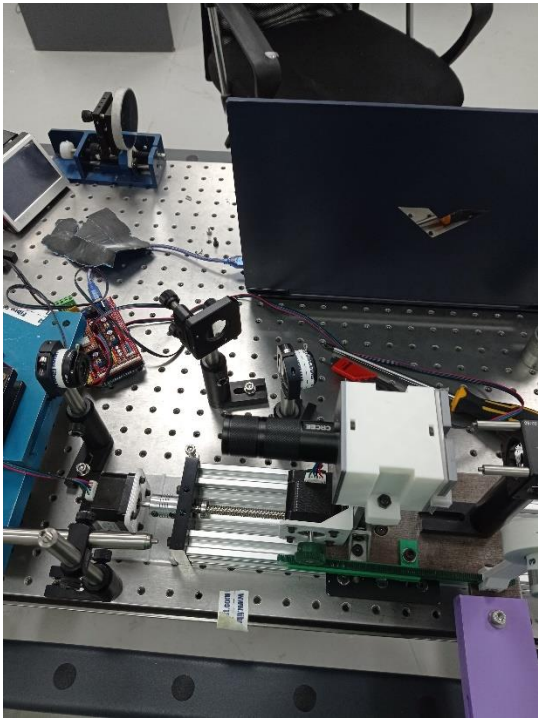
Figura 3-11 montaje de fuente de luz a la estructura principal lista para realizar pruebas con el equipo.



Fuente: Elaboración propia fotografía sacada mientras se armaba el equipo de medición.

Figura 3-12 realizando labores de alineación del instrumentó con respecto al espejo para realizar una prueba de Foucault.

Realización de conexiones electrónicas a los motores paso a paso como se muestra en la Figura 3-13.



Fuente: Elaboración propia fotografía sacada mientras se armaba el equipo de medición.

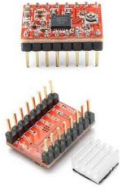
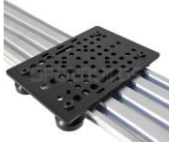
Figura 3-13 realización de conexiones electrónicas de los motores y la ramps.

3.2 ANÁLISIS DE INVERSIÓN

En la siguiente tabla se mostrará todos los componentes que se compraran con los precios que están dentro de la tabla se sacaron de las páginas de OpenBuilds y Cimech3D. también está la consideración que el cambio de dólar a peso se hizo con el dólar a 862 pesos chilenos. (como se muestra en la tabla 3-3).

Tabla 3-3 listado de componentes que se compraron para la construcción del prototipo.

| Nombre del componente                                     | Precio en dólares | Precio en UF | Imagen del componente                                                                 |
|-----------------------------------------------------------|-------------------|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Perfil C-Beam 40x80x500                                   | \$17.99           | 0,42         |  |
| Riel lineal V-Slot® 20x40x250                             | \$3.99            | 0,094        |  |
| Final de carrera mecánico (limit switch) con PCB + cables | 2,64              | 0,062        |  |
| Arduino Mega 2560                                         | \$17,27           | 0,41         |  |

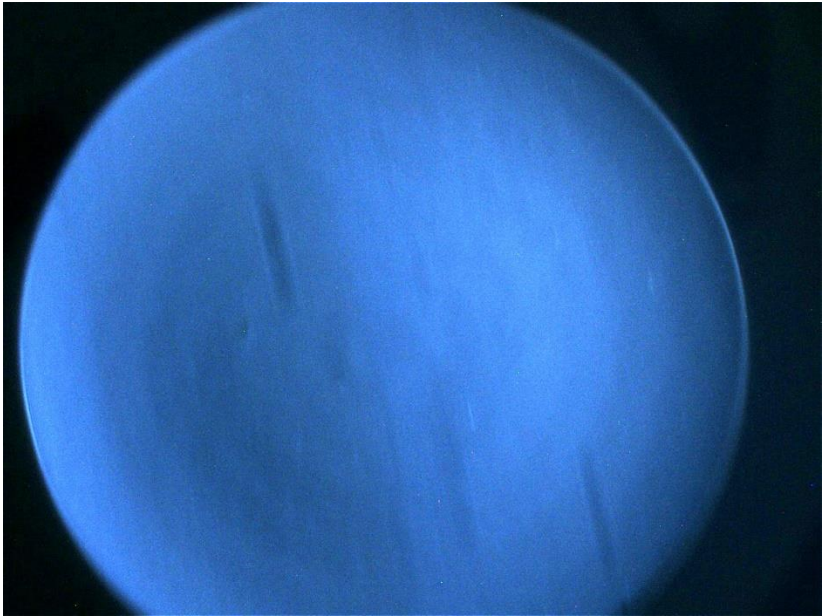
|                                                                    |         |       |                                                                                       |
|--------------------------------------------------------------------|---------|-------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Ramps 1,4                                                          | \$9,20  | 0,22  |    |
| Drive de motor stepper A4988DRV x2                                 | \$4,52  | 0,11  |    |
| Motor stepper Nema 17 1,8° x2                                      | \$46,06 | 1,09  |    |
| Bloque de tuercas anti-retroceso para husillo Acme métrico de 8 mm | \$9.99  | 0,24  |  |
| Tornillo de avance Acme métrico de 8 mm (540mm)                    | \$21.99 | 0,52  |  |
| V-Slot Gantry Kit - Universal                                      | \$37.99 | 0,90  |  |
| Rodamiento Bridado 688ZZ 8x16x5 x2                                 | \$2.98  | 0,070 |  |
| Conector de esquina de ángulo negro x4                             | \$11.96 | 0,28  |  |
| Tornillos de perfil bajo M5x20mm (paquete de 10) x2                | \$2.58  | 0,061 |  |
| Tornillos de perfil bajo M5x6mm (paquete de 10)                    | \$1,78  | 0,042 |  |
| Montaje del extremo de la viga C x2                                | \$17.98 | 0,42  |  |

|                                                           |        |       |                                                                                     |
|-----------------------------------------------------------|--------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Tuercas en T - M5<br>(paquete de 10)                      | \$2.99 | 0,070 |  |
| Tornillos de perfil bajo<br>M3x8mm (paquete de 10)        | \$1,99 | 0,047 |  |
| ZWO-cámara<br>astronómica planetaria<br>de alta velocidad | 238,88 | 5,63  |  |
| Acoplamiento flexible de<br>5 mm * 8 mm                   | \$6.99 | 0,16  |  |

A modo de conclusión, haciendo la sumatoria de todos los componentes la inversión inicial seria de 322.34 dólares que eso a UF equivaldría a 10,846. Se consideraron únicamente los costos asociados a los componentes esenciales para la producción del equipo.

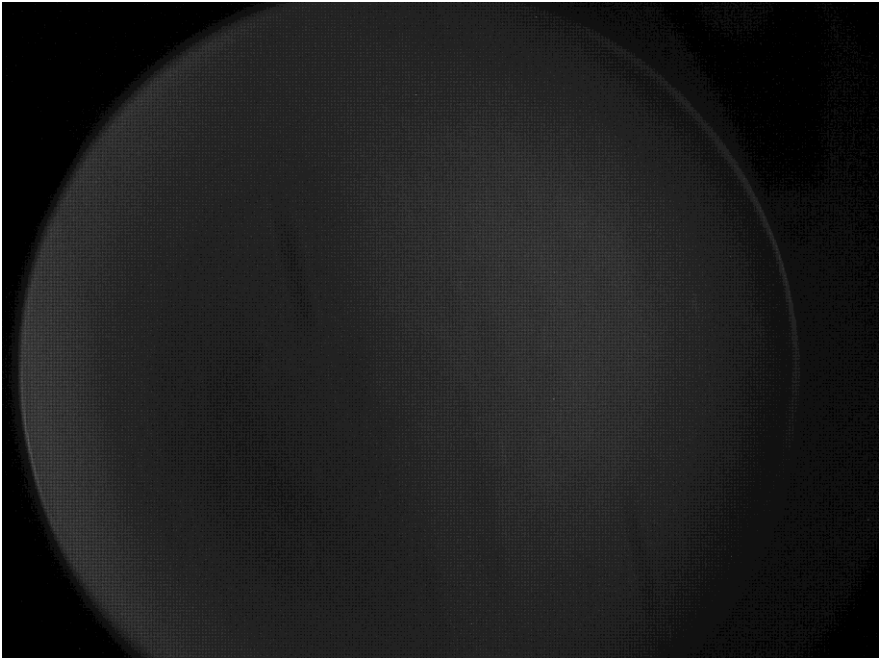
3.3 PRUEBA EN LABORATORIO

El dispositivo fue sometido a realizar una prueba de Foucault de manera ocular esto quiere decir que no se ocupó la cámara de esta destinada a las pruebas ya que esto genera una agilidad a la hora de visualizar las formas que se reflejan en el espejo luego de ver que el instrumento paso las pruebas de funcionalidad se montó la cámara y se tomó una fotografía al espejo como se muestra en las Figuras 3-14 y 3-15.



Fuente: Elaboración propia fotografía sacada mientras se hacía en test de Foucault con el equipo de medición,

Figura 3-14 fotografía de un espejo parabólico con el equipo de medición propuesto.



Fuente: Elaboración propia fotografía sacada mientras se hacía en test de Foucault con el equipo de medición,

Figura 3-15 fotografía del mismo espejo, pero ocupando un filtro para mostrar más cualidades del espejo. }

**3.4 ANÁLISIS DE EFICIENCIA DEL SISTEMA ACTUAL VS SISTEMA PROPUESTO**

Mediante la prueba en laboratorio se pueden sacar las siguientes comparativas con el sistema ya existente versus con el que se está proponiendo. (se muestra la comparativa en la tabla 3-4)

Tabla 3-4 comparativa de sistema manual versus sistema propuesto.

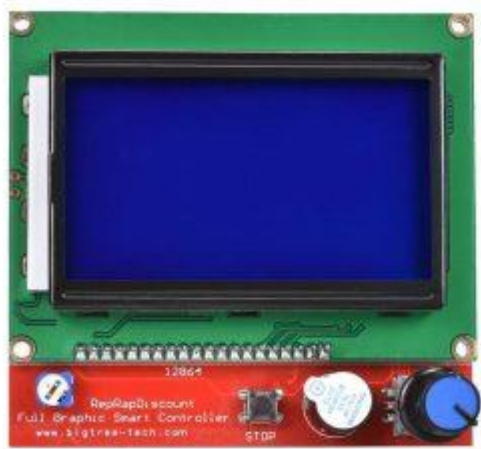
| Ítems de comparación         | Sistema actual (manual)                                                         | Sistema propuesto (automatizado)                  |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Precisión en los movimientos | El sistema actual tiene una precisión real de 0,6 mm en la obtención de medidas | El sistema tiene una precisión bruta de 0.1 mm    |
| Repetibilidad de medida      | El sistema no cuenta esta característica                                        | El sistema propuesto si tiene esta característica |

|                                                        |                                                                       |                                                                                                    |
|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tiempo de realización en labores de estudio de espejos | El tiempo de estudio de espejos demora aproximadamente de 5 a 6 horas | Con el sistema propuesto se tiene la expectativa de que el estudio duerme aproximadamente una hora |
|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|

3.5 OPORTUNIDADES DE MEJORA

Las mejoras que se pueden hacer al prototipo hecho durante este proceso son:

- La implementación de una pantalla LCD donde también se pueden controlar los motores paso a paso, ya que la ramps 1.4 tiene un puerto donde conectarla. (Como se muestra en la Figura 3.16)



Fuente: imagen extraída de la página web de [www.cimech3d.cl](http://www.cimech3d.cl).

Figura 3-16 pantalla LCD 12864

- Cambiar el sistema de Piñón con cremallera hecha por impresión 3D en resina por componentes fabricados en acero o aluminio.
- La configuración especializada en el código de Arduino para el control de los motores junto con los fines de carrera dentro del prototipo.
- Implementar un nuevo sistema para el cambio de lentillas en la fuente de luz para así facilitar el intercambio de ranuras de manera más fluida.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIÓN:

Tras el exhaustivo análisis llevado a cabo posterior a la prueba de laboratorio a la que fue sometido el equipo de medición, se han derivado las siguientes conclusiones:

- El equipo demuestra plenamente su capacidad para desplazar sus motores paso a paso, facilitando la obtención de medidas con una precisión inicial de 0.1 mm. Se destaca la posibilidad de ajustar este nivel de precisión mediante el software, logrando alcanzar una finura de hasta 0.01 mm.
- El equipo cumple de manera efectiva con el objetivo de ser controlado por un sistema de control numérico para los motores paso a paso.
- Se identifica una falencia en la alineación del movimiento del cuchillo durante el análisis de espejos, lo cual requiere atención.
- La fineza del movimiento del cuchillo se revela insuficiente, ya que durante la prueba se observó un salto de fase de 0.1 mm en la cremallera en un solo movimiento. Esta problemática puede abordarse mediante una reducción del movimiento a una proporción de 1:10, o explorando otras alternativas para sustituir el movimiento del cuchillo.
- El soporte de cámara fabricado mediante impresión 3D presenta deficiencias, especialmente en cuanto a su idoneidad para sostener la cámara, evidenciando holguras en sus partes al ser montada. Como recomendación futura, se sugiere la fabricación de un soporte utilizando materiales metálicos, que garantice mayor resistencia ante las deformaciones causadas por el peso de la cámara.
- Se propone la implementación de un sistema de alineación mediante un láser colimado. Este sistema facilitará la alineación precisa en el eje óptico entre el espejo y el instrumento de Foucault.
- La inversión para la compra de los materiales necesarios para el armado el dispositivo inicial es de 10.846 UF.

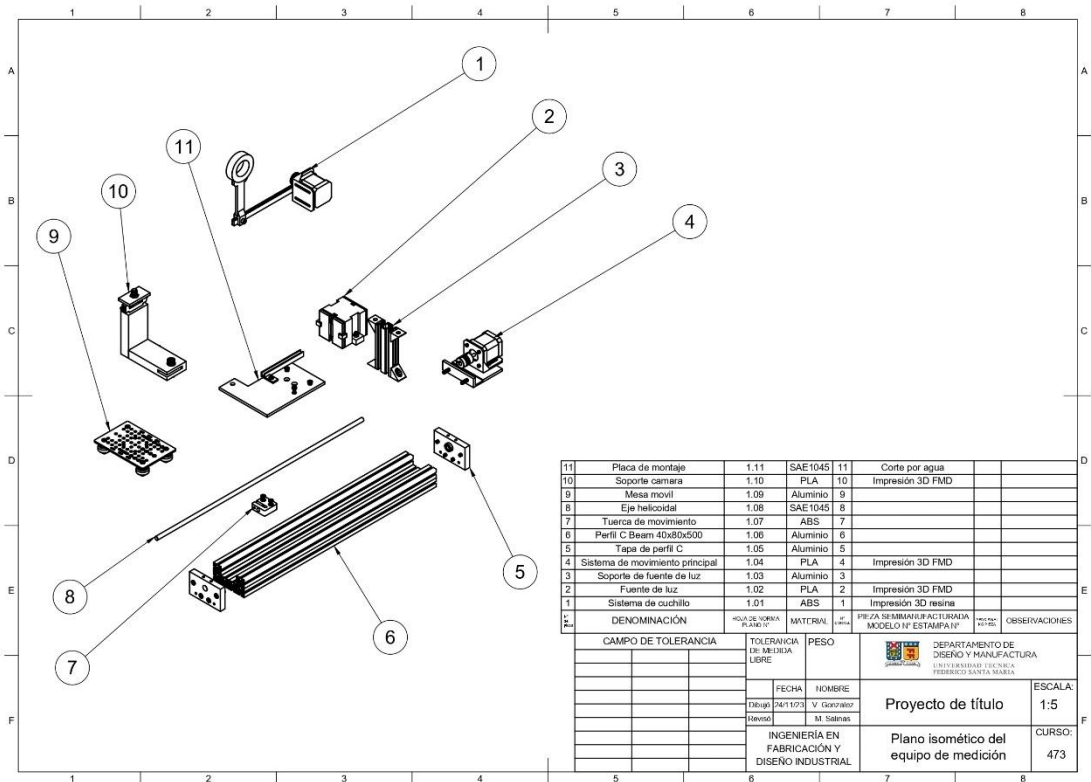
### RECOMENDACIONES:

- Como recomendación futura, se sugiere fabricación de un soporte utilizando materiales metálicos, que garantice mayor resistencia ante las deformaciones causadas por el peso de la cámara.
- Se propone la implementación de un sistema de alineación mediante un láser colimado. Este sistema facilitará la alineación precisa en el eje óptico entre el espejo y el instrumento de Foucault.

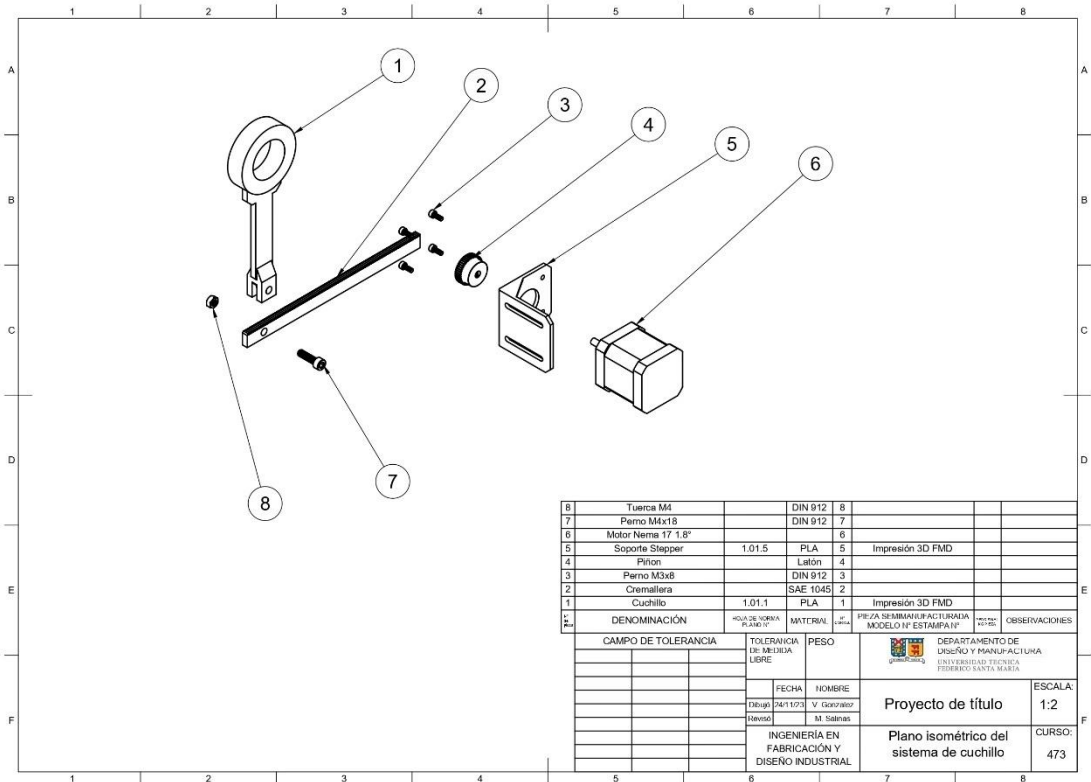
## **BIBLIOGRAFÍA**

- Optical Shop Testing Third Edition.
- Estudio y propuesta para la automatización de pruebas ópticas de control de curvatura de espejos astronómicos. Rafael Ignacio Orden Adolfssen.

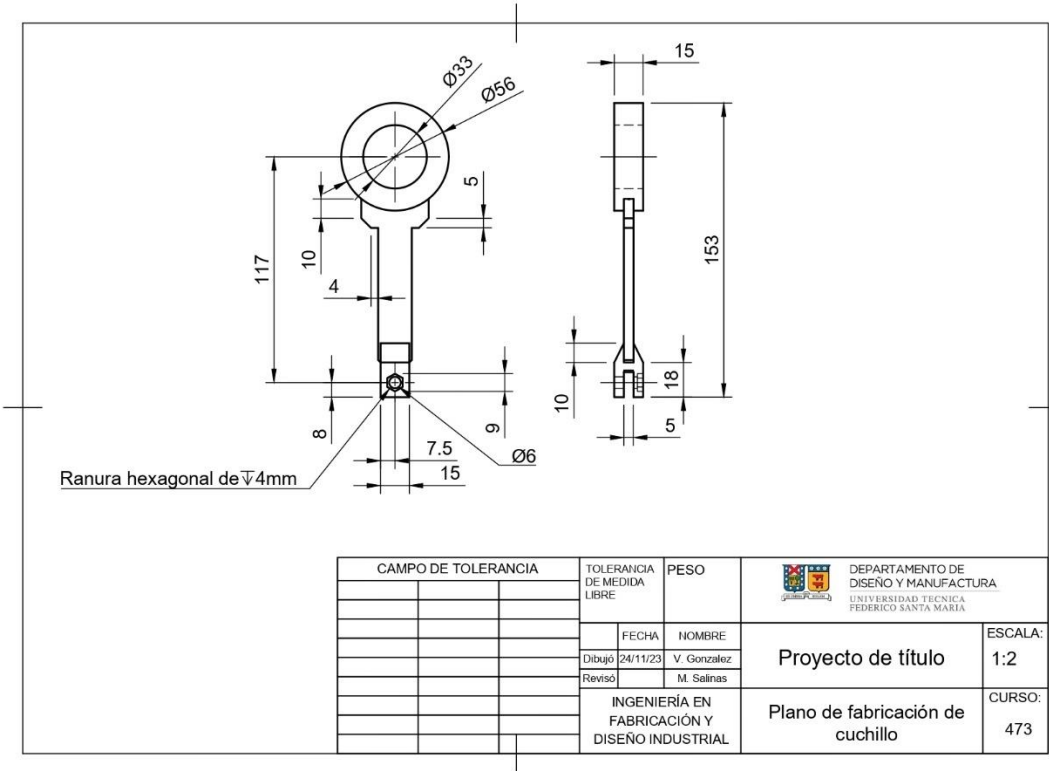
ANEXOS



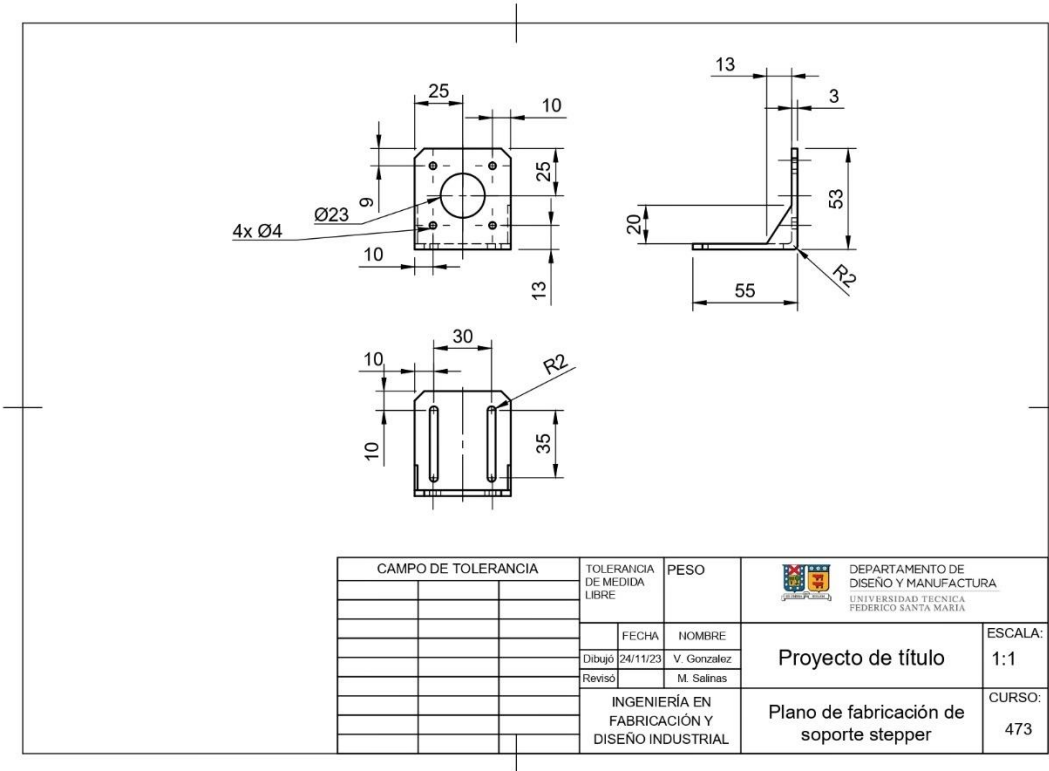
Anexo A plano isométrico del equipo de medición.



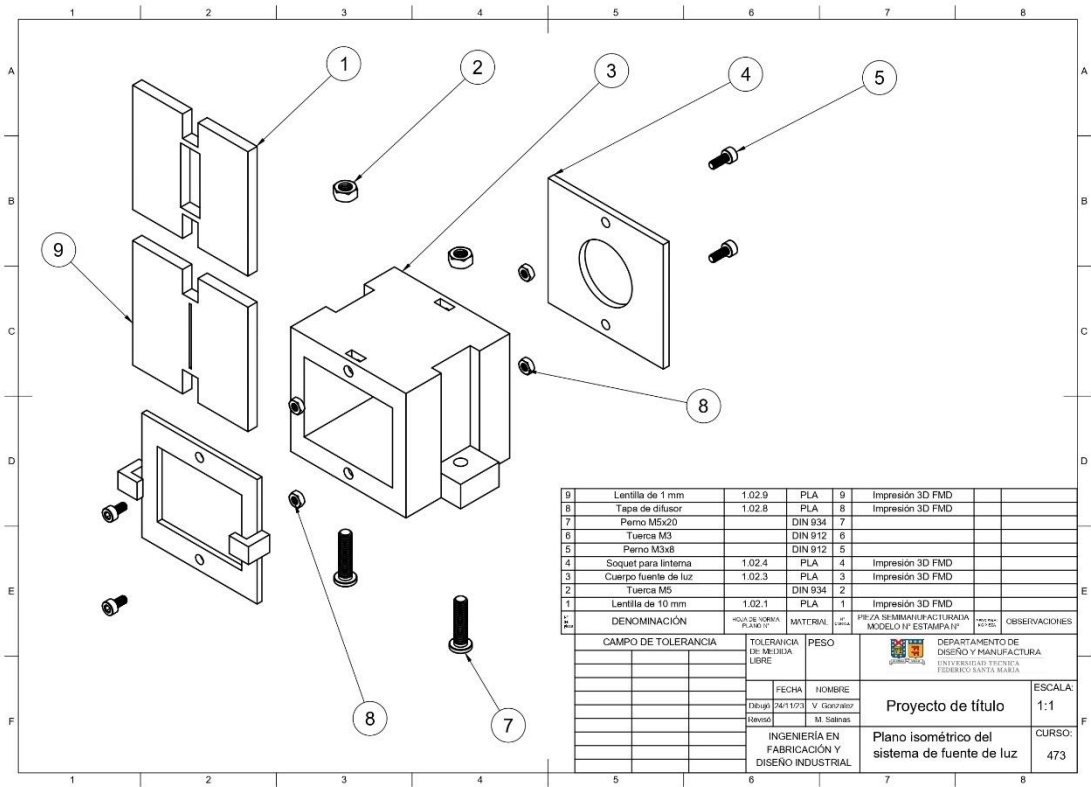
Anexo B plano isométrico del sistema de piñón con cremallera.



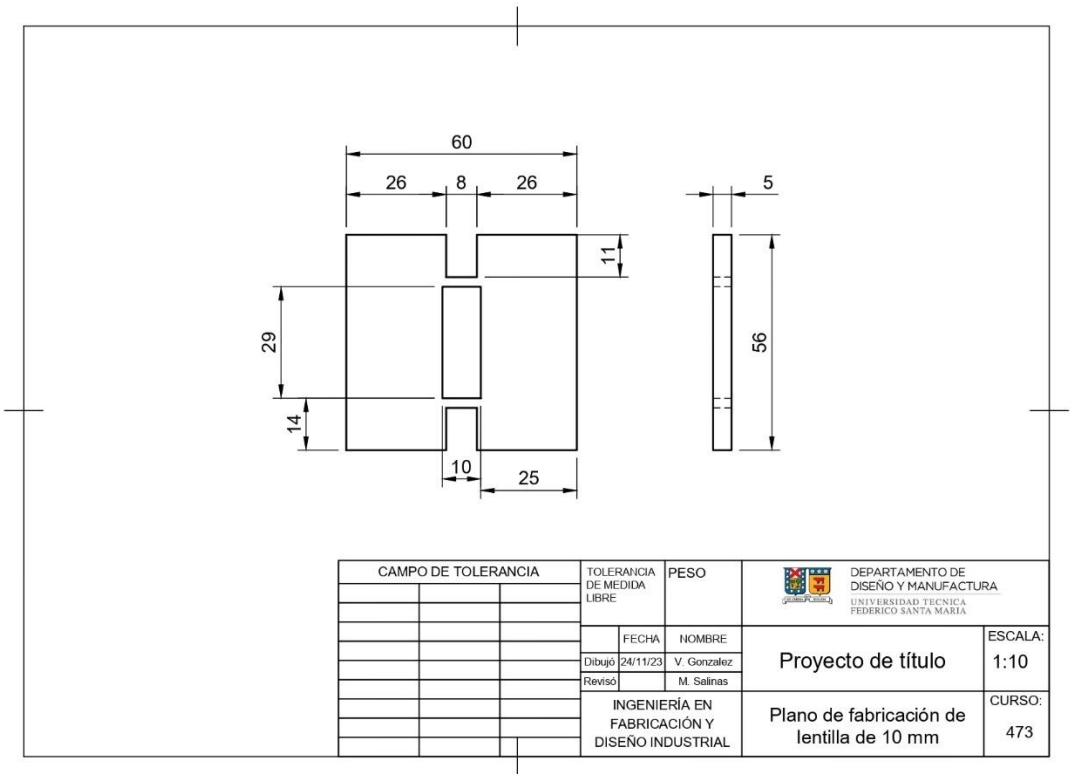
Anexo C Plano de fabricación de cuchillo.



Anexo D plano de fabricación de soporte stepper



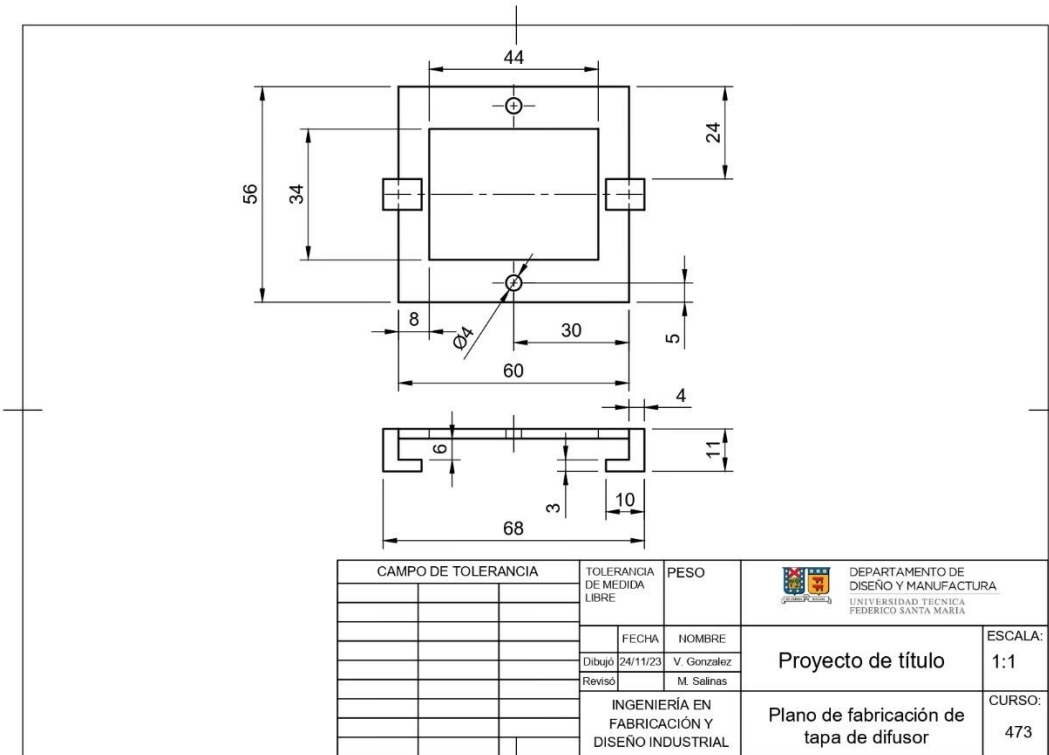
Anexo E plano de conjunto de sistema de fuente de luz.



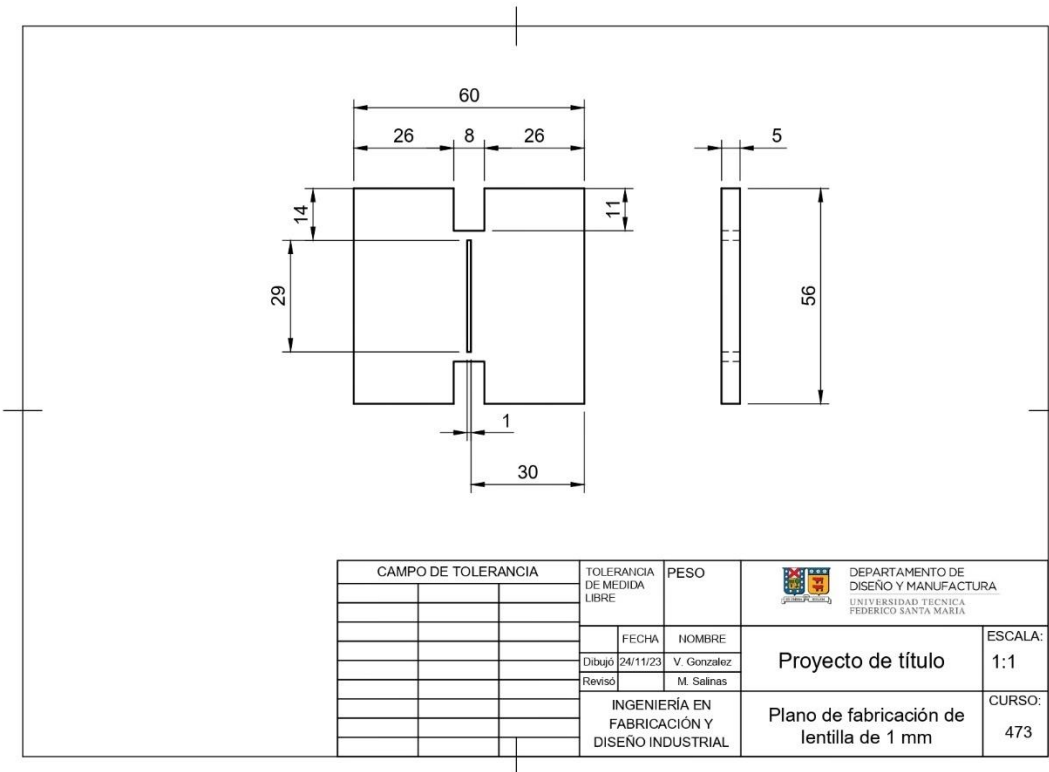
Anexo F plano de fabricación de lentilla de 10 mm.

Technical drawing of a lamp socket (soquet) for a lamp. The drawing shows a front view and a side view. The front view is a square with a central circular hole. The side view is a rectangle. Dimensions are given in millimeters. The front view has a total width of 60 mm and a total height of 28 mm. The central hole has a diameter of 28 mm. There are two small holes, each with a diameter of 4 mm, located 30 mm from the top and bottom edges and 30 mm from the left and right edges. The side view shows a total width of 3 mm and a total height of 56 mm.

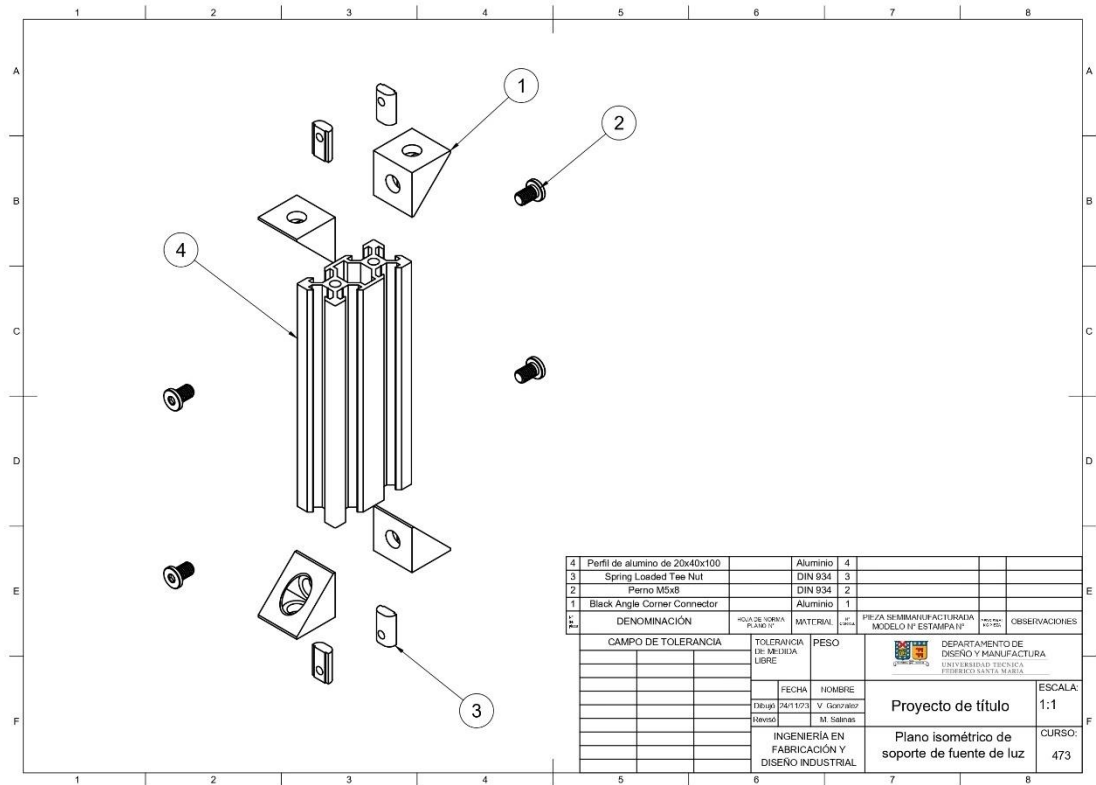
| CAMPO DE TOLERANCIA |  |  | TOLERANCIA DE MEDIDA LIBRE | PESO |  DEPARTAMENTO DE DISEÑO Y MANUFACTURA<br>UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA | ESCALA:                   |            |
|---------------------|--|--|----------------------------|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|------------|
|                     |  |  |                            |      |                                                                                                                                                                        | <b>Proyecto de título</b> | <b>1:1</b> |
|                     |  |  |                            |      |                                                                                                                                                                        |                           |            |
|                     |  |  |                            |      |                                                                                                                                                                        |                           |            |
|                     |  |  |                            |      | <b>Plano de fabricación de soquet para linterna</b>                                                                                                                    | <b>CURSO:</b><br>473      |            |
|                     |  |  |                            |      |                                                                                                                                                                        |                           |            |
|                     |  |  |                            |      |                                                                                                                                                                        |                           |            |



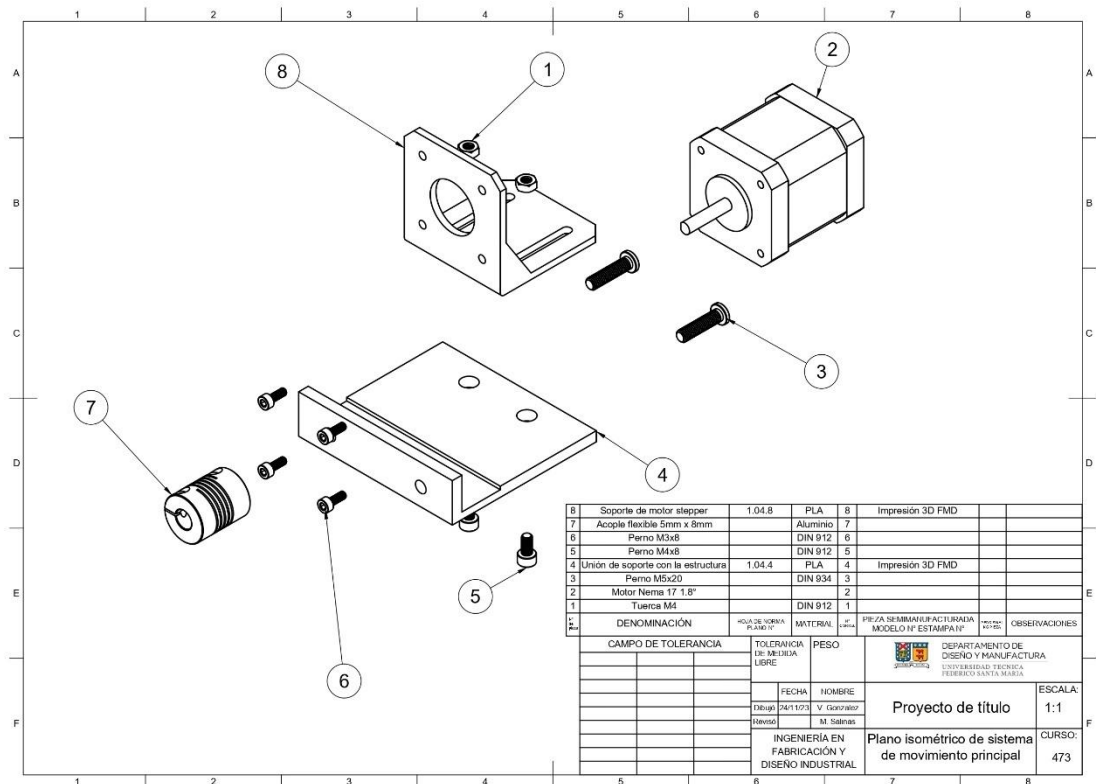
Anexo I plano de fabricación de tapa de difusor.



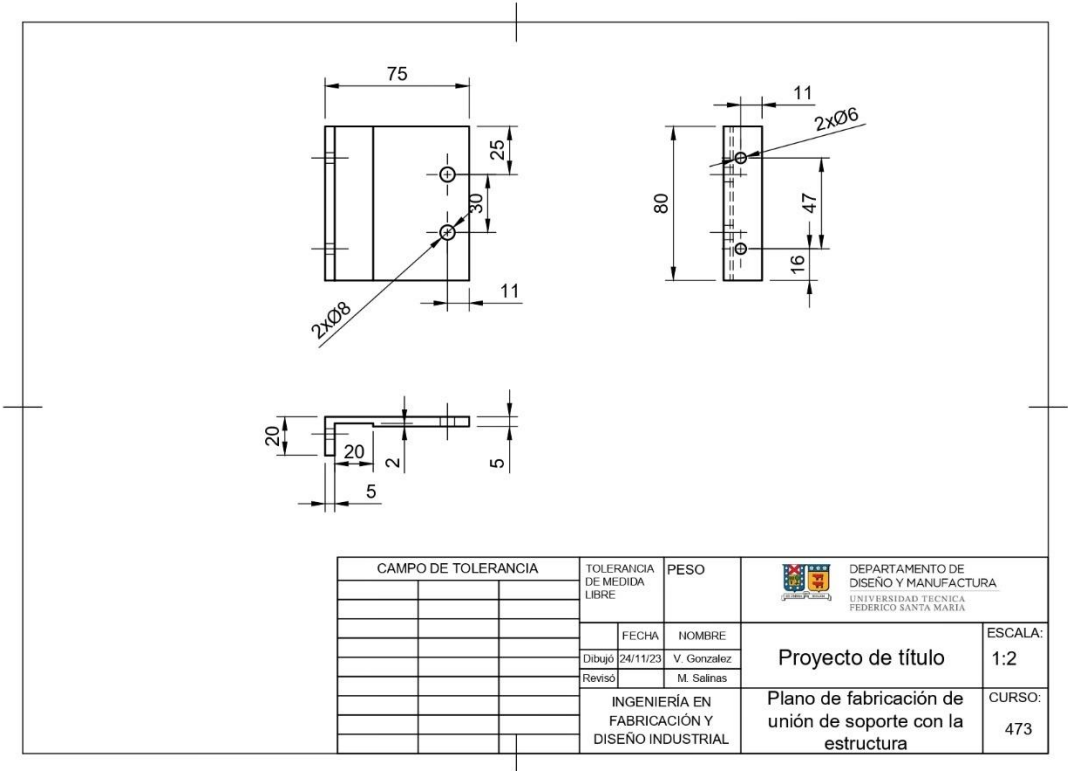
Anexo J plano de fabricación de lentilla de 1 mm.



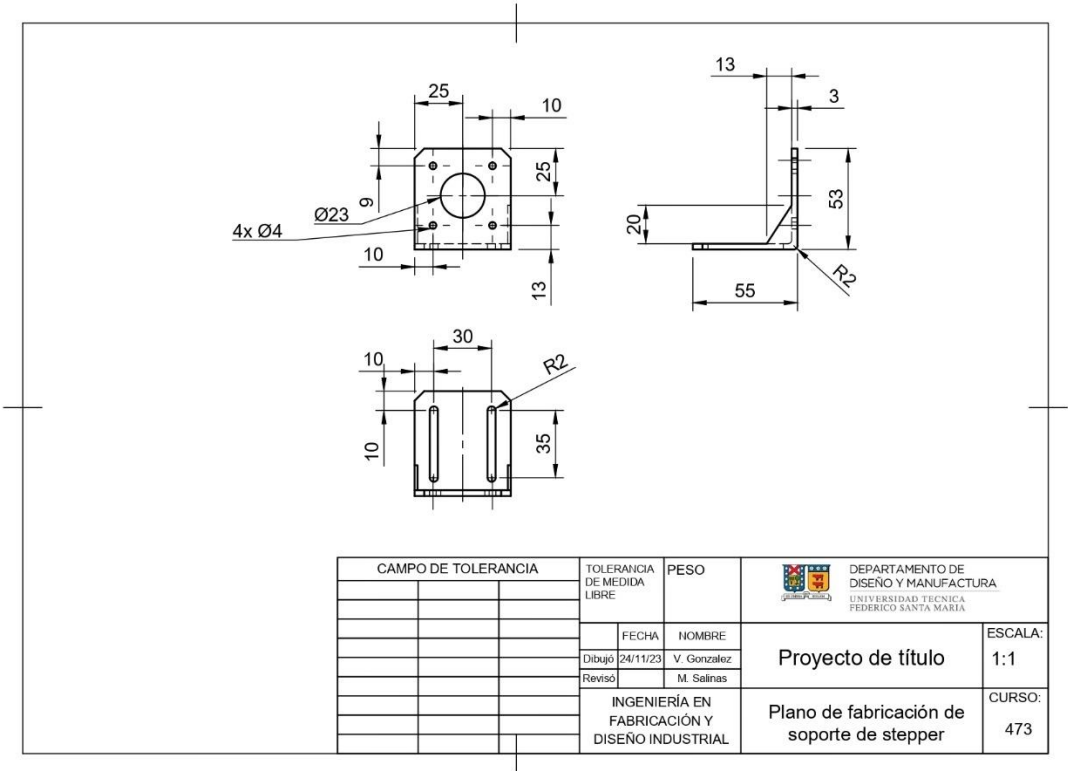
Anexo K plano isométrico de soporte de fuente de luz.



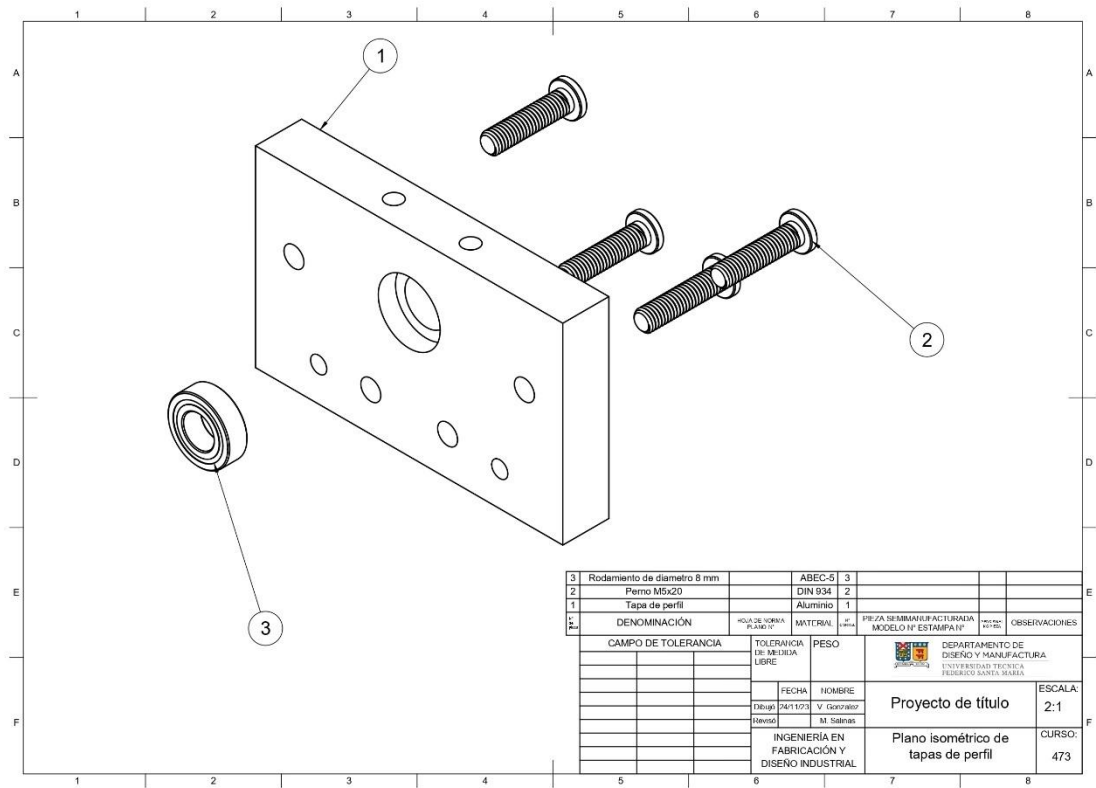
Anexo L plano isométrico de sistema motriz principal.



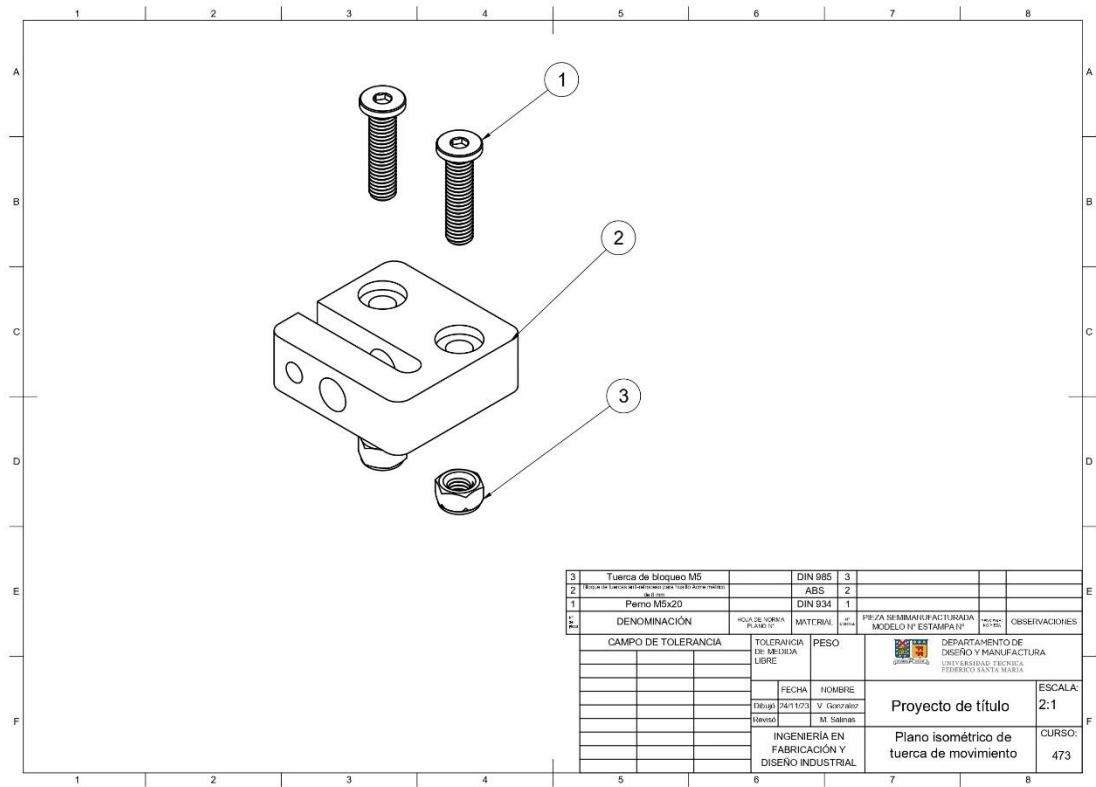
Anexo M plano de fabricación de unión de soporte stepper con estructura.



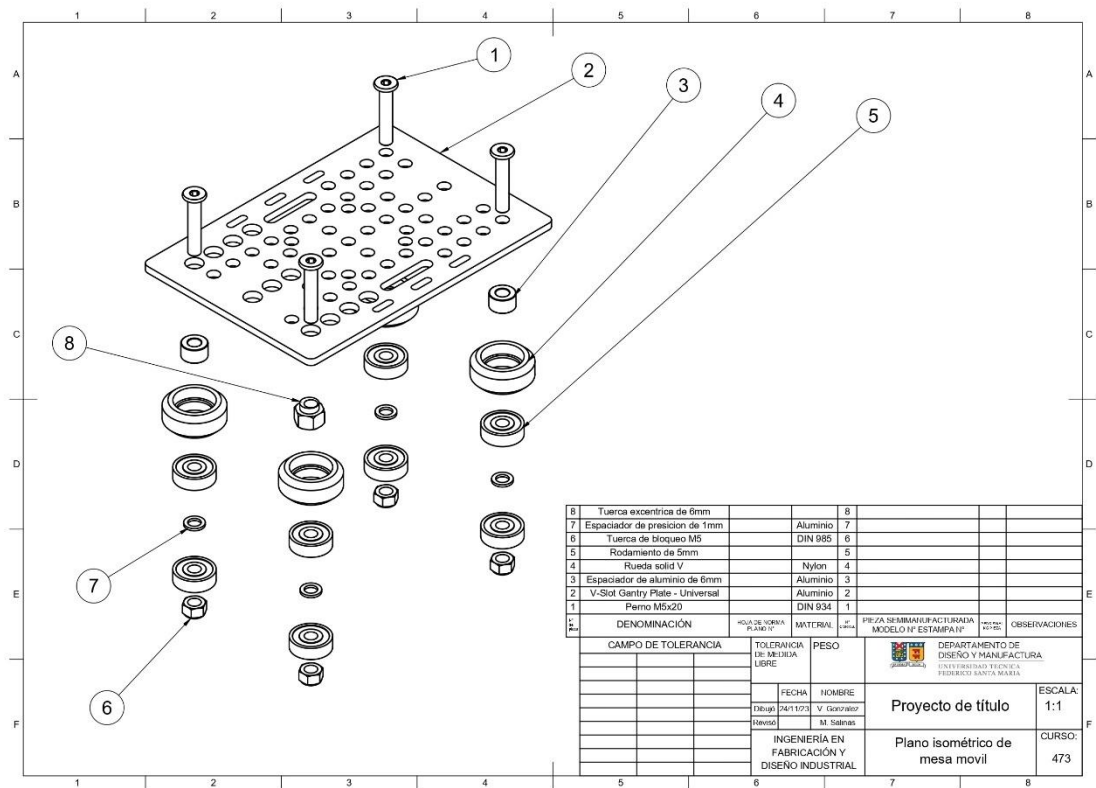
Anexo N plano de fabricación de soporte stepper



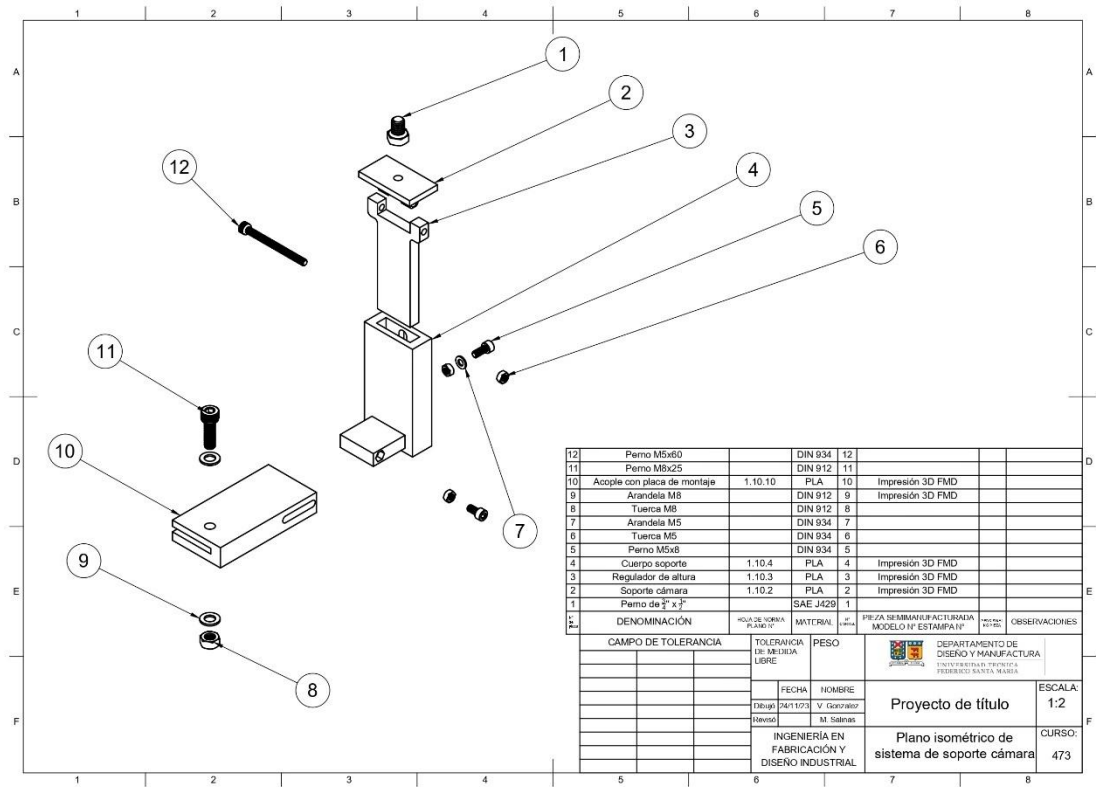
Anexo O plano isométrico de tapas de perfil.



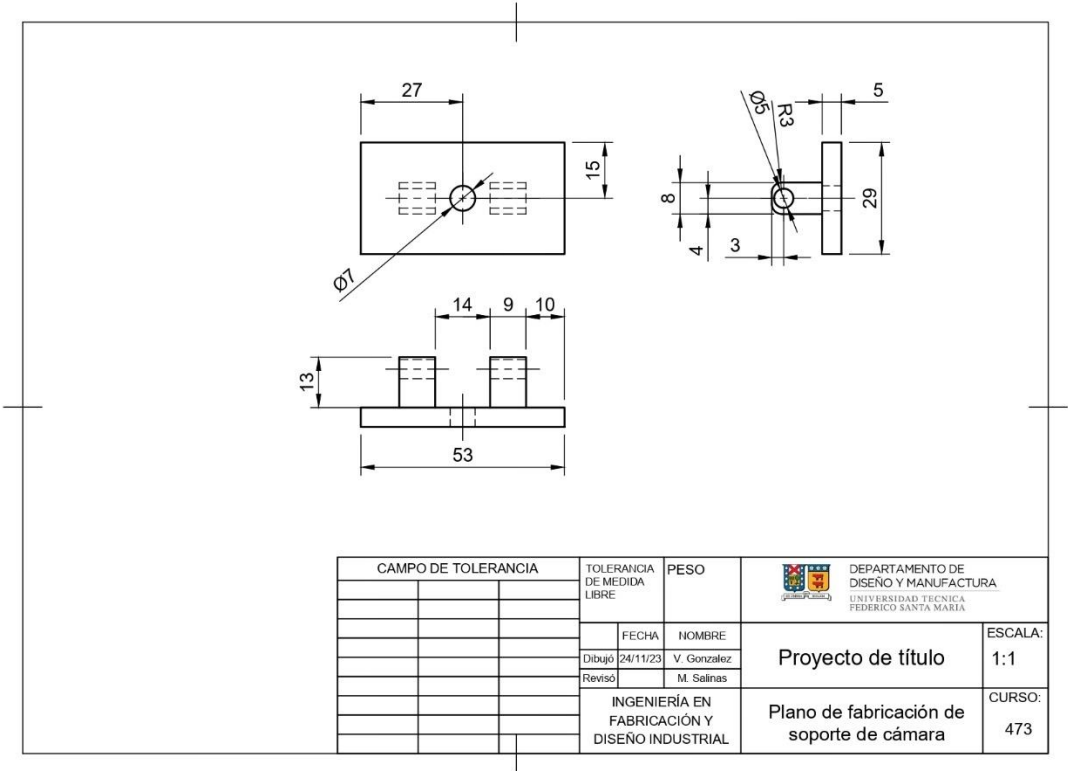
Anexo P plano isométrico de sistema de tuerca de movimiento.



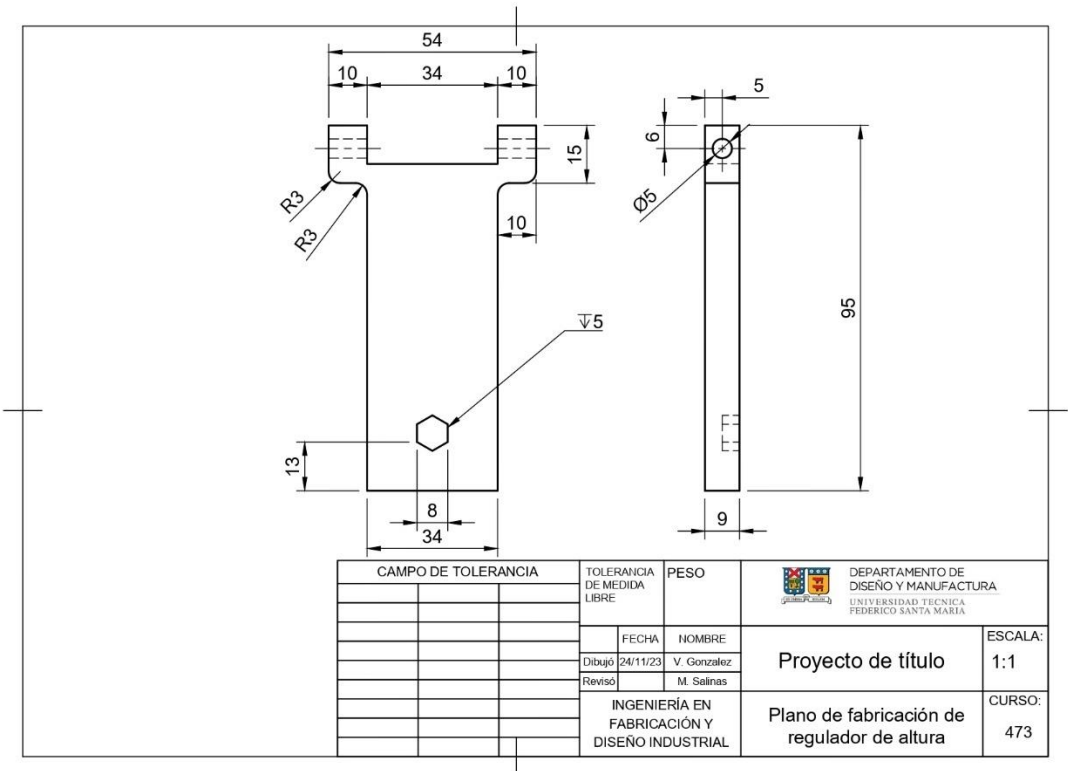
Anexo Q plano isométrico de mesa móvil.



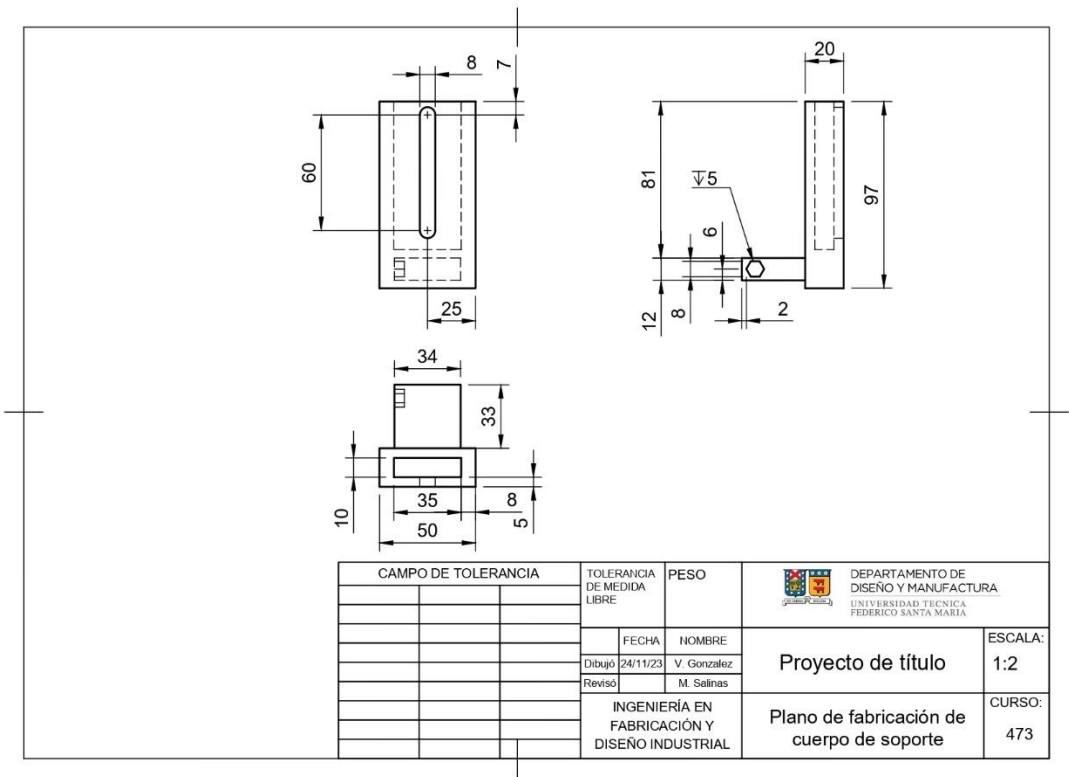
Anexo R plano isométrico de soporte de cámara.



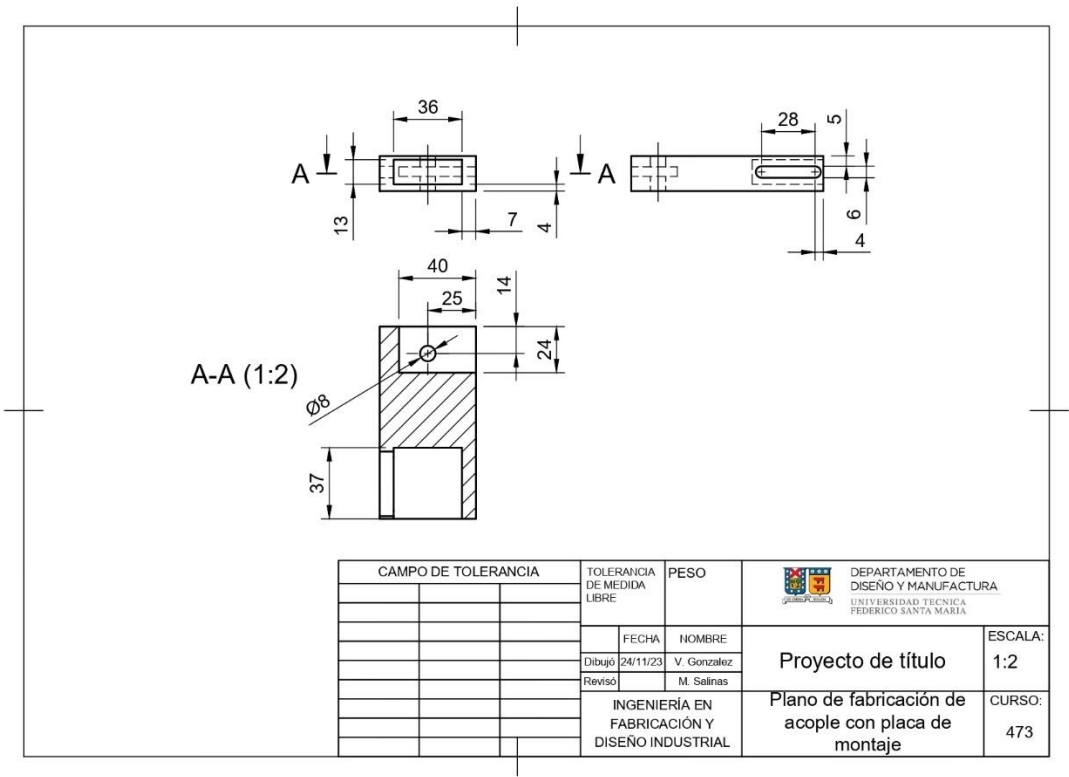
Anexo S Plano de fabricación de soporte de cámara.



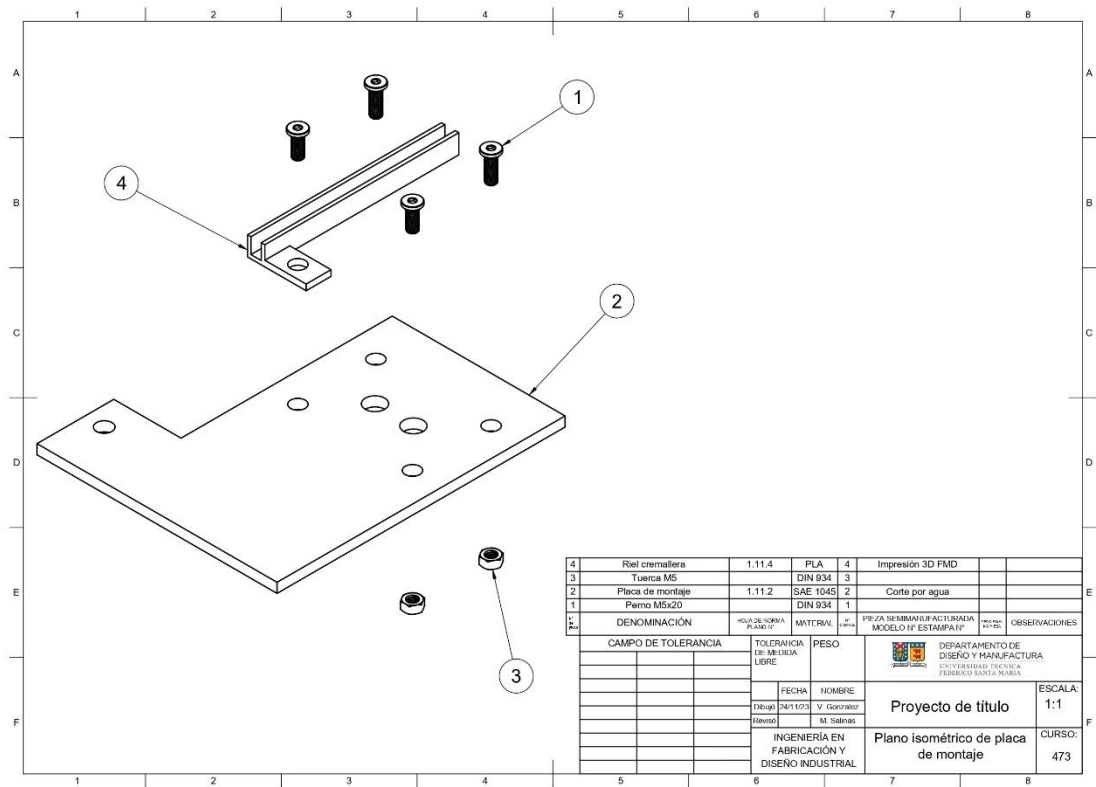
Anexo T plano de fabricación de regulador de altura.



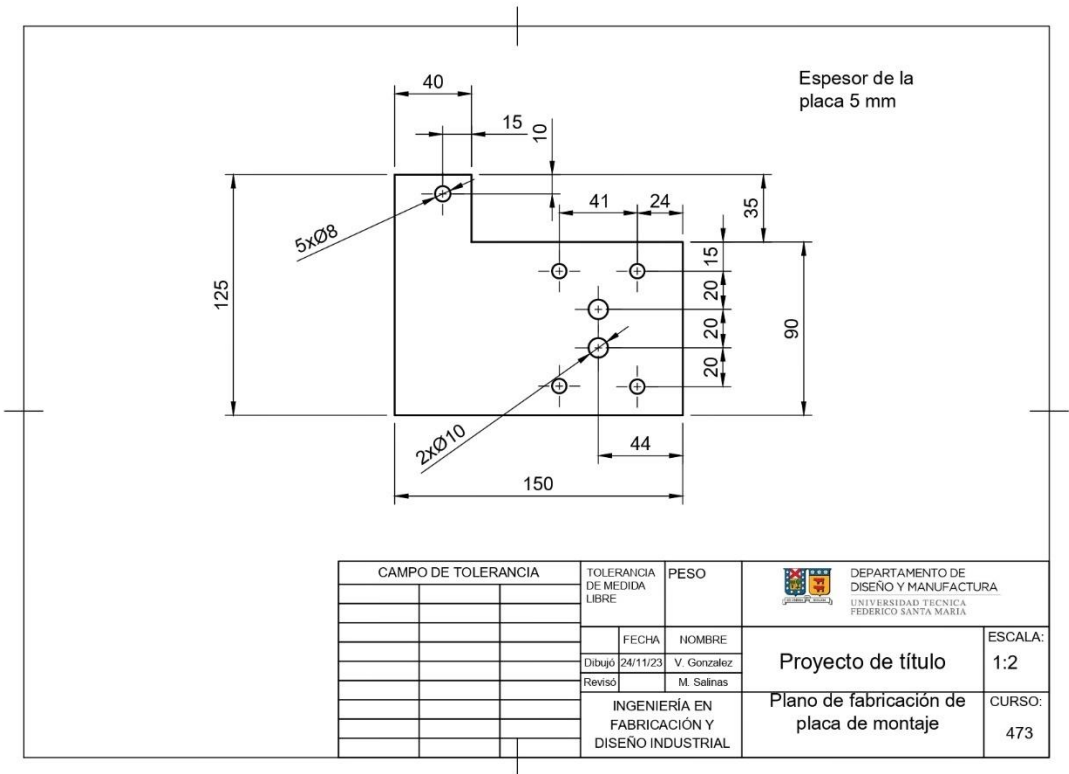
Anexo U plano de fabricación de cuerpo del soporte.



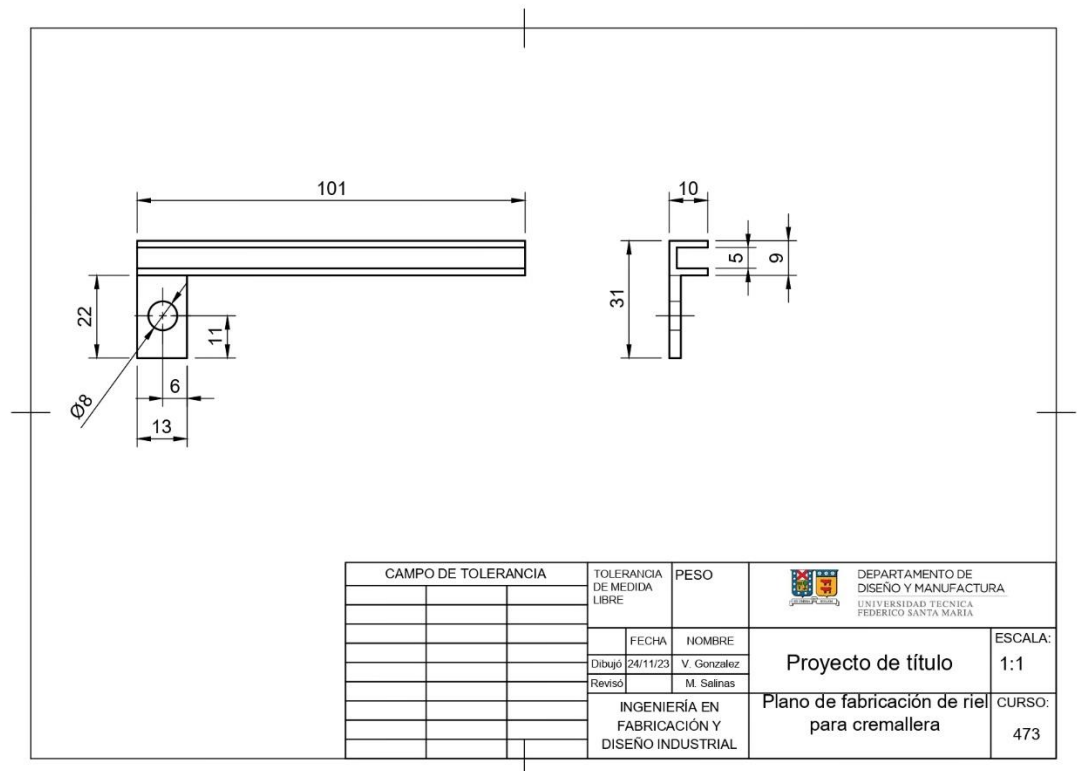
Anexo V plano de fabricación de acople con placa de montaje.



Anexo W plano isométrico de placa de montaje.



Anexo X Plano de fabricación de placa de montaje.



Anexo Y plano de fabricación de riel para cremallera.