



Acta de Correcciones al Proyecto de Grado Ingeniería Mecánica

Fecha: 28/7/2023

Autores: Eduardo José Ramírez González y Manuela Zuluaga Aristizábal

Nombre del Proyecto de Grado: Mejoramiento del diseño mecánico para la producción masiva de la plataforma multisensorial para fenotipado de cultivos en tierra (PhenoAgro)

Director:

Como indica el artículo 2.27 de las Directrices de Trabajo de Grado, he verificado que los estudiantes indicados arriba han implementado todas las correcciones que los Jurados del Proyecto de Grado definieron que se efectuaran, como consta en el Acta de Calificación correspondiente.

Director: Andrés Jaramillo Botero, Ph.D

Director Instituto de Ciencias OMICAS
Pontificia Universidad Javeriana Cali
Calle 17 # 121B- 155

Co-Director: Jhonattan de la Roche Yepes, Ph.D

Docente de Cátedra
Pontificia Universidad Javeriana Cali
Calle 18 # 118-250

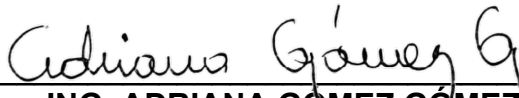
Nota de Aceptación

Aprobado por el Comité de Trabajo de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Pontificia Universidad Javeriana para optar el título de Ingeniero Mecánico.



Dr. CAMILO ROCHA

Decano de la Facultad de Ingeniería



ING. ADRIANA GÓMEZ GÓMEZ

Directora de la Carrera de Ingeniería Mecánica.



Dr. ANDRÉS JARAMILLO BOTERO

Director(a) Trabajo



Dr. JHONATTAN DE LA ROCHE YEPES

Codirector(a) Trabajo



ING. ADRIANA GÓMEZ GÓMEZ

Jurado 1



ING. MARIO FERNANDO MUÑOZ VELEZ

Jurado 2

Santiago de Cali, 22 de junio de 2023

Dra.

Adriana Gómez Gómez

Directora Ingeniería Mecánica

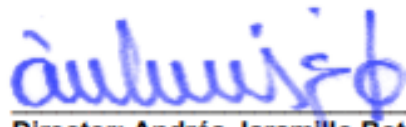
Facultad de Ingeniería y Ciencias

Pontificia Universidad Javeriana - Cali

Asunto: Aval proyecto de grado *"Mejoramiento del diseño mecánico para la producción masiva de la plataforma multisensorial para fenotipado de cultivos en tierra (PhenoAgro)"*

La presente es para informar que como tutores avalamos el proyecto de grado titulado *"Mejoramiento del diseño mecánico para la producción masiva de la plataforma multisensorial para fenotipado de cultivos en tierra (PhenoAgro)"* el cual se realizó por los estudiantes Eduardo José Ramírez González con código 8953028 y Manuela Zuluaga Aristizábal con código 8954135 estudiantes de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Pontificia Universidad Javeriana Cali

Atentamente,

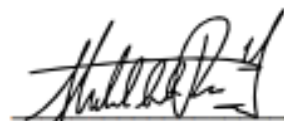


Director: Andrés Jaramillo Botero, Ph.D

Director Instituto de Ciencias OMICAS

Pontificia Universidad Javeriana Cali

Calle 17 # 121B- 155



Co-Director: Jhonattan de la Roche Yepes, Ph.D

Docente de Cátedra

Pontificia Universidad Javeriana Cali

Calle 18 # 118-250



Proyecto de Grado

Mejoramiento del diseño mecánico para la producción masiva de la plataforma multisensorial para fenotipado de cultivos en tierra (PhenoAgro).

Dirigido por: PhD. Andrés Jaramillo y PhD. Jhonattan de la Roche

Ramírez González, Eduardo José

eduardo1@javerianacali.edu.co

Zuluaga Aristizábal, Manuela

manuzuluaga@javerianacali.edu.co

22 de junio de 2023

Resumen

Para optimizar la adquisición de datos tomados de los cultivos, son necesarias las estrategias y las plataformas de alto rendimiento para fenotipificación (HTP). Estas permiten al agricultor tomar decisiones del manejo del cultivo y de la selección de la variedad de interés, ya que permiten acceder a la información en tiempo real del estado del cultivo, a un menor costo y con una mayor precisión. Aunque ya existen este tipo de dispositivos comercialmente, por lo general no miden suficientes variables, muchos de ellos no cuentan con movilidad, para tomar datos en diferentes ángulos, y son muy costosos, con precios que rondan entre los 1000 y 3000 dólares por unidad. Este proyecto propone una mejora en el diseño mecánico de una plataforma del internet de las cosas (IoT) distribuida para fenotipificación de alto rendimiento de cultivos, llamada PhenoAgro perteneciente al cuarto proyecto del programa OMICAS. El programa cuenta con un prototipo cercano al nivel de sistema operacional planificado, en una etapa donde se busca eliminar riesgos de ingeniería y de manufactura, y disminuir el costo. Para lograr esto se identificaron dos mecanismos encargados de dos grados de movimiento de la plataforma como los componentes más críticos. El primero es el mecanismo de cadera, el cual permite a la plataforma dar un giro de 360 grados. El segundo es el mecanismo de movimiento telescópico, el cual permite que la plataforma suba y baje, siguiendo el crecimiento del cultivo. Siguiendo la metodología de diseño en ingeniería, diseño para manufactura y ensamble y selección de materiales de Ashby se propondrá una mejora para la producción en masa, mejorando el diseño actual y buscando reducir costos, para hacer un producto completo y accesible. Los resultados obtenidos incluyen diseños y simulaciones en SolidWorks de las piezas analizando los esfuerzos a los que se someten, y cálculos de elementos mecánicos, comprobando la correcta selección de motores y resistencia de material de prototipado. Además, a partir iteraciones de diseño se logró obtener un prototipo funcional de los mecanismos con el uso de manufactura aditiva usando PLA. Mediante la metodología de selección de materiales de Ashby se seleccionó el PETG como material final de las piezas personalizadas y una fabricación mediante modelado por deposición fundida (FDM), a partir de este método de fabricación y material se realizaron ensayos mecánicos para evaluar la resistencia de las piezas. Finalmente se establecieron costos de fabricación y como estos podrían disminuirse al aprovechar la flexibilidad de la manufactura aditiva, usando la optimización topológica y la consolidación de piezas.

Palabras clave: Fenotipado, Diseño mecánico, Producción masiva, Mecanismos.

Abstract:

To optimize the acquisition of data from crops, high-throughput phenotyping (HTP) strategies and platforms are necessary. These enable farmers to make decisions regarding crop management and selection of desired varieties by providing access to real-time crop information at a lower cost and with higher precision. Although such devices are already available commercially, they often lack the measurement of sufficient variables, mobility to capture data from various angles, and are quite expensive, with prices ranging from \$1000 to \$3000 per unit. This project proposes an improvement in the mechanical design of a distributed Internet of Things (IoT) platform for high-throughput crop phenotyping, called PhenoAgro, which is part of the fourth project under the OMICAS program. The program is currently at a stage where it aims to eliminate engineering and manufacturing risks and reduce costs. To achieve this, two critical components responsible for the platform's two degrees of movement were identified. The first is the hip mechanism, which allows the platform to rotate 360 degrees. The second is the telescopic movement mechanism, which enables the platform to move up and down, following the crop's growth. The engineering design methodology, design for manufacturing and assembly, and material selection according to Ashby's approach are employed to propose improvements for mass production. This involves enhancing the current design and seeking cost reductions to create a complete and accessible product. The obtained results include SolidWorks designs and simulations of the parts, analyzing the stresses they endure, as well as calculations of mechanical elements to ensure proper motor selection and prototype material strength. Additionally, through design iterations, a functional prototype of the mechanisms was successfully produced using additive manufacturing with PLA. Following Ashby's material selection methodology, PETG was chosen as the final material for custom parts, and manufacturing was carried out through fused deposition modeling (FDM). Mechanical tests were conducted to evaluate the parts' resistance. Finally, manufacturing costs were established, and potential cost reductions were explored by leveraging the flexibility of additive manufacturing, utilizing topological optimization and part consolidation.

Keywords: Phenotyping, Mechanical Design, Mass Production, Mechanisms.

Agradecimientos

Agradecemos al instituto OMICAS que nos brindó la oportunidad de desarrollar este proyecto, al profesor Andrés Jaramillo Botero y Jhonattan de la Roche por sus recomendaciones y acompañamiento, al Ingeniero Simón Plata por apoyarnos en el proceso de ideación y fabricación, a nuestros profesores de la facultad y colaboradores que tuvieron disposición a resolver nuestras dudas y a todas las personas que también hicieron parte del proceso, especialmente nuestras familias y amigos.

Dedicación especial: María del Carmen Jiménez-Alfaro QEPD

Tabla de contenido

Introducción	10
Capítulo 1 Planteamiento del Problema.....	11
Capítulo 2 Marco Teórico	11
2.1 Fenotipado de alto rendimiento (HTP por sus siglas en ingles High-throughput phenotyping).....	11
2.2 El diseño en ingeniería mecánica.....	12
2.3 Diseño para la manufactura y diseño para el ensamblaje.....	12
2.4 Diseño para el ambiente (DPA)	12
2.5 Construcción de prototipos	13
2.5.1 Tecnologías de construcción de prototipos	13
2.6 Herramientas y recursos de diseño.....	14
2.6.1. Aspectos económicos	14
2.7 Selección de materiales	14
2.8 Teoría general de análisis en el diseño de elementos de máquinas.....	14
2.8.1 Consideraciones básicas para el análisis de elementos mecánicos	15
2.8.2 Diseño por resistencia	15
2.8.3 Diseño por rigidez.....	15
2.8.4 Factor de carga en el diseño de un elemento.....	15
2.8.5 Factor de seguridad	16
2.9 Estándares de protección IP y NEMA: para equipos electrónicos expuestos al ambiente.....	16
Capítulo 3. Estado del arte	17
Plataformas de fenotipado “Base de poste/ torre”.....	18
3.1 Antecedentes PhenoAgro	18
3.2 Instaweather e Instasoil.....	19
3.3 Arable Mark 2	20
3.4 Estación de planta Daimob.....	20
3.5 Phenode.....	21
Capítulo 4. Objetivos	22
4.1 Objetivo general.....	22
4.2 Objetivos específicos	22
Capítulo 5 Metodología	23
5. 1. Análisis de prototipo actual.....	23
5.2 Diseño CAD de mejoras mecánicas	23
Diseño para manufactura (<i>Design For Manufacturing-DFM</i>).....	24
Diseño para ensamble (<i>Design For Assembly-DFA</i>)	25
5.3 Parámetros para simulación en SolidWorks.....	25
5.4 Fabricación de prototipos.....	26
5.5 Selección de materiales y costos de fabricación	27
5.5.1 Verificación de propiedades.....	29
5.6. Levantamiento de planos y propuesta del proceso/ medios de fabricación.....	30

Capítulo 6. Resultados	31
6.1 Análisis de prototipo actual.....	31
6.1.1 Requerimientos generales de plataforma PhenoAgro	32
6.2 Diseño CAD de mejoras mecánicas	32
6.2.1 Movimiento de cadera.....	32
6.2.2 Movimiento telescópico	35
Parte media.....	36
6.3 Cálculos de mecanismos diseñados	37
6.3.1 Piñón y corona.....	37
6.3.2 Tornillo de potencia	40
6.4 Selección de materiales y costos de fabricación	42
6.4.1 Traducir los requerimientos de diseño	42
6.4.2 Seleccionar usando restricciones.....	44
6.4.3 Calificar usando el objetivo	46
6.4.4 Información de soporte	48
6.4.5 Ensayos filamento PETG	49
6.5. Diseño para manufactura y ensamble	51
6.5.1 Estimar los costos de manufactura y ensamble.....	51
6.5.2 Reducir costos de manufactura y ensamble	54
6.6 Validación e implementación.....	57
6.6.1 Mecanismo de cadera.....	58
6.6.2 Mecanismo telescópico	59
Capítulo 7. Conclusiones	61
Bibliografía	62
Anexos	62
Anexo 1. Información soporte del PLA, PP, PA y ASA.....	66
Anexo 2. Precio unitario y total de las piezas de los mecanismos	68
Anexo 3: Cotización de otros métodos de mecanizado.....	70
Anexo 4: Planos de fabricación.....	70

Índice de Figuras

Figura 1. Ciclo de vida natural y ciclo de vida del producto [19].....	13
Figura 2. Escala de plataformas de fenotipado de alto rendimiento. a) Escaneo del terreno usando sensor portátil, b) Sensor ambiental fijo de tierra, c) vehículo de tierra para fenotipado, d) plataforma de escaneo de campo, e) torre de fenotipado, f) vehículo aéreo no tripulado, g) helicóptero de fenotipado de baja altitud, h) globo aerostático de fenotipado, i) plataforma satélite de detección remota [24].....	17
Figura 3. Primer prototipo de PhenoAgro [8]	19
Figura 4. Características Instaweather [17].....	19
Figura 5. Características Instasoil [17].....	20
Figura 6. Arable Mark 2 [25]	20
Figura 7. Daimob [26].....	21
Figura 8. Phenode. a) Componentes y sensores Phenode, b) Módulos para modificar altura de dispositivo [27] .	21
Figura 9. PhenoAgro actual. a) Prototipo físico, b) Prototipo virtual	23
Figura 10. Fases del proceso de diseño con múltiples retroalimentaciones e iteraciones	24
Figura 11. Método de diseño para manufactura [16]	24
Figura 12. Tamaño de malla para análisis en SolidWorks. a) Malla de la pieza, b) Tamaño de elementos de malla vs Esfuerzo de Von Mises máximo.....	26
Figura 13. Máquinas para prototipado. a) Impresora 3D Dremel 3D40, b) Cortadora láser Mastercnc laser 1390, c) Centro de mecanizado CNC.....	27
Figura 14. Proceso de selección de materiales [31]	28
Figura 15. Diagrama de Ashby donde muestra el Limite elástico vs densidad materiales. Tomado de CES-Edupack.....	29
Figura 16. Ensayo a tensión. a) Dimensiones para probeta, b) Ensayo	30
Figura 17. Ensayo a flexión. a) Dimensiones para probeta, b) Ensayo.....	30
Figura 18. Esquema de partes, sistema PhenoAgro	31
Figura 19. Movimiento de cadera versión 1	33
Figura 20. Movimiento de cadera versión 2, a) Ensamble versión 2 en SolidWorks, b) Prototipo para pruebas versión 2, c) Piñón y corona impresos en PLA	34
Figura 21. Movimiento de cadera versión 3.....	34
Figura 22. Parte superior mecanismo telescópico, a) Ensamble en SolidWorks parte superior mecanismo telescópico, b) Prototipo ensamblado parte superior, c) Prototipo de acople para motor y varilla roscada.....	35
Figura 23. Parte media mecanismo telescópico, a) Ensamble en SolidWorks parte media mecanismo telescópico, b) Prototipo ensamblado de tapa con tuerca para varilla roscada	36
Figura 24. Parte inferior mecanismo telescópico, a) Ensamble Solidworks de parte inferior mecanismo telescópico, b) Prototipo de ranura y anillo guía, c) Varilla roscada de mecanismo telescópico	36
Figura 25. Mecanismo telescópico completo.....	37
Figura 26. Diagrama de fuerzas en diente de engrane [13].....	38
Figura 27. Estudio de elementos finitos en SolidWorks. a) Esfuerzos de von Mises, b) Desplazamiento	39
Figura 28. Fuerzas en un tornillo de potencia [13]	40
Figura 29. Rosca cuadrada y rosca ASME.....	41
Figura 30. Limite elástico vs densidad materiales CES-Edupack con restricción de densidad [35].....	44
Figura 31. Limite elástico vs densidad termoplásticos CES-Edupack con restricciones [35]	45
Figura 32. a) Esfuerzo de tensión vs deformación de probetas a 3 densidades de relleno, b) Falla en prueba de tensión	50
Figura 33. Esfuerzo de flexión vs deformación de probetas a 3 densidades de relleno	51
Figura 34. a) Piezas movimiento de cadera, b) Piezas movimiento telescópico.....	52
Figura 35. Diagrama (re) diseño en manufactura aditiva [42]	55
Figura 36. a) Proceso de optimización topológica de piezas de mecanismo de movimiento de cadera, b) Ensamble con piezas optimizadas.....	55
Figura 37. Consolidación de piezas mecanismo telescópico, a) Vista explosionada de piezas a consolidar, b) Nueva pieza consolidada, c) Vista en sección de nueva pieza	56
Figura 38. Prototipos de PhenoAgro. a) Versión antigua, b) Versión modificada.....	58

Figura 39. Pruebas de implementación en mecanismo de cadera. a) Prototipo en su versión final, b) Configuración para prueba.....	58
Figura 40. Rendimiento de motorreductor 172:1 25D MP 12V [44].....	59
Figura 41. Pruebas de implementación de mecanismo telescópico. a) Configuración para prueba, b) Configuración de pesas	60
Figura 42. Rendimiento de motorreductor 131:1 37D 12 [34]	60

Índice de tablas

Tabla 1: Clasificación de estándar IP [22]	16
Tabla 2: Clasificación de estándar NEMA [22]	17
Tabla 3: Listado de variables medidas por las distintas plataformas	22
Tabla 4: Tamaño de elemento de malla máximo vs Esfuerzo de von Mises máximo	26
Tabla 5: Función, restricciones, objetivos y variables libres [31].....	28
Tabla 6: Análisis de los mecanismos iniciales del prototipo	31
Tabla 7: Coeficientes de fricción f de pares roscados [13]	41
Tabla 8: Requerimientos para mecanismos de PhenoAgro.....	43
Tabla 9: Materiales que podrían hacer el trabajo y sus propiedades [35]	45
Tabla 10: Calificación de materiales.....	46
Tabla 11: Propiedades e información del PETG.....	48
Tabla 12. Resultados ensayo de tensión para piezas impresas en 3D a diferentes densidades de relleno	49
Tabla 13: Resultados ensayo de flexión para piezas impresas en 3D a diferentes densidades de relleno	50
Tabla 14. Estimación de precios movimiento de cadera.....	52
Tabla 15. Estimación de precios movimiento telescópico	53
Tabla 16. Características ideales de las piezas en el mecanismo de movimiento de cadera.....	54
Tabla 17. Características ideales de las piezas en el mecanismo de movimiento telescópico	54
Tabla 18: Peso, costo y tiempo de impresión de piezas	56

Introducción

La población a nivel mundial tiene una tendencia creciente cada año, donde se prevé que para el 2050 aumente un 34% en relación con la actual, por lo que la producción de alimento deberá aumentar un 70% para abastecer las necesidades de esta nueva cantidad de personas, esto causando la necesidad de incrementar la productividad alimentaria [1]. Actualmente, existen distintos factores que afectan la sostenibilidad productiva de los cultivos, entre ellos se encuentran el cambio climático, el aumento de la producción de biocombustibles y la escasez de tierra y de agua [2].

Colombia posee una gran capacidad agrícola pero no una buena forma de aprovecharla. Según la revisión a la política agrícola colombiana realizada por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)[3], la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD) [4], [5] la evolución del sector cuenta con limitaciones críticas frente a producción, innovación e implementación de nuevas tecnologías; un ejemplo de esto es que a pesar de que Colombia es más rural, su economía cuenta con más hectáreas en minería que en producción de alimentos [3]. Además, siendo la agricultura la principal actividad económica de los territorios rurales, esta ha experimentado múltiples crisis y una disminución en su contribución al PIB, pasando del 16.5% al 7.4% entre 1990 y 2021 [6]. El Plan Estratégico Colombiano para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación del Sector Agropecuario (PECTIA) enfatiza entonces la necesidad de apostar por estrategias de mejora desde la investigación. En este contexto, la generación de nuevas variedades con mayor rendimiento y calidad es una estrategia necesaria y de alto impacto para la agricultura. Una revolución verde en Colombia debe generar variedades que incrementen la productividad y competitividad, mejoren la seguridad alimentaria y promuevan el desarrollo de sistemas ambientalmente sostenibles, además de esto las políticas y la investigación agrícolas deben continuar apoyando el aumento de la productividad de los alimentos base, prestando mayor atención a los alimentos con alto contenido nutricional y a la sostenibilidad de los sistemas de producción [4].

La fenotipificación de las plantas es la evaluación integral de los rasgos que se dan por la interacción del genoma con las condiciones ambientales cambiantes, midiendo distintos parámetros individuales que dan la base para caracterizar rasgos más complejos, como lo son la biomasa, características de las hojas, morfología de la raíz, respuesta al estrés, entre otros [7]. Actualmente existen técnicas innovadoras y tecnológicas enfocadas en la seguridad alimentaria, para mejorar la genotipificación y la fenotipificación, permitiendo seleccionar las plantas de alto rendimiento y tolerantes al estrés, de manera más rápida y eficiente.

Este trabajo tiene su desarrollo en el marco del programa OMIAS (Instituto de investigación Optimización Multiescala In-silico de Cultivos Agrícolas Sostenibles), el cual es ganador de la segunda convocatoria de Colombia Científica en el foco de Alimentos. El programa busca desarrollar e implementar estrategias científico-tecnológicas para aportar a la seguridad alimentaria y a la producción sostenible a nivel mundial, mejorando las variedades agrícolas, mediante 7 proyectos. Este trabajo tiene su desarrollo en el cuarto, el cual busca desarrollar una plataforma IoT distribuida para fenotipificación de alto rendimiento de cultivos. Esta plataforma tiene el nombre de PhenoAgro y su objetivo es aumentar la productividad agrícola, aumentando la disponibilidad y disminuyendo los costos de los alimentos, y los productos no alimenticios derivados de esta práctica. Para optimizar la adquisición de datos tomados de los cultivos, son necesarias las estrategias y las plataformas de alto rendimiento para fenotipificación (HTP). Estas permiten al agricultor tomar decisiones del manejo del cultivo y de la selección de la variedad de interés, pues le permiten acceder a la información en tiempo real del estado del cultivo, a un menor costo y con una mayor precisión. Esta información de los factores que influyen en la variación fenotípica cuantitativa debe unificarse, de manera que se pueda entender y manipular [8].

Basado en esto, este trabajo busca mejorar mecánicamente una plataforma de fenotipado existente que integra variables meteorológicas y un sistema telescópico que gradúa la altura del dispositivo, de tal forma que se pueda producir masivamente y a un bajo costo, garantizando que la fabricación genere prototipos replicables y asequibles.

Capítulo 1 Planteamiento del Problema

En la actualidad, se ha ido incrementado el interés por las plataformas de fenotipado, las cuales pueden ser suspendidas, multisensoriales y aéreas (mediante drones), debido a que éstas facilitan los procesos de evaluación y diagnóstico de los cultivos, reduciendo así al mínimo el trabajo manual planta por planta. De esta forma, una tarea que antes tomaba días enteros y necesitaba del trabajo de muchas personas, pasa a convertirse en una actividad realizada en un corto tiempo usando equipos de alta precisión [9].

En el mercado existen plataformas multisensoriales que pueden ser terrestres e integrar soluciones con IoT (Internet of things). Es decir, dispositivos con múltiples sensores conectados a internet y una plataforma web, lo que permite tomar decisiones adecuadas respecto a cómo se encuentre el cultivo. Generalmente, las plataformas existentes tienen un diseño sencillo, con fácil instalación: se componen de un poste con distintos sensores ubicado en la base de cultivos. Se pueden encontrar dispositivos que realicen caracterización fenotípica en base, que monitorean variables de temperatura y humedad del ambiente, cantidad de iluminación y temperatura del suelo. También, existen estaciones meteorológicas que aprovechan la energía solar y miden variables como la velocidad y dirección del viento [9]–[11]. No obstante, la mayoría de estas soluciones son costosas (1000 y 3000 USD por unidad [9]–[11]) y carecen de capacidad de transferibilidad entre cultivos [12]. Además, algunas de éstas están enfocadas en medir distintos rasgos del ambiente, como temperatura, humedad, iluminación, pero carecen herramientas para realizar un análisis más profundo de la planta como tal, pues tienen una altura fija, lo que no permite tener un registro acorde al crecimiento gradual de la planta, limitando saber con exactitud como está reaccionando el cultivo a estos estreses [11]. Por otro lado, las soluciones más completas requieren más estaciones y accesorios para realizar una caracterización fenotípica más robusta, lo cual genera un mayor impacto en el precio para el usuario final.

El programa OMICAS cuenta con un prototipo cercano al nivel de sistema operacional planificado, en una etapa donde se busca eliminar riesgos de ingeniería y de manufactura, y disminuir el costo. Por esta razón en este proyecto de grado se propone una mejora en el diseño mecánico del prototipo actual para la producción en masa y manufactura de estas plataformas. Desde el punto de vista de la ingeniería mecánica es importante tener en cuenta la posición y ubicación de los sensores para la correcta medición de las variables, así como las condiciones ambientales a las que se enfrentará el dispositivo, el o los movimientos que éste tiene y el fácil ensamblaje y mantenimiento. Todo esto con el objetivo de realizar una producción masiva de este dispositivo, de tal manera que sea accesible para las personas, por lo que es necesario reducir los costos de producción utilizando metodologías de diseño.

Capítulo 2 Marco Teórico

2.1 Fenotipado de alto rendimiento (HTP por sus siglas en inglés High-throughput phenotyping)

La fenotipificación de las plantas es algo que siempre ha existido, pues desde un principio los agricultores identificaban y seleccionaban las plantas que se veían mejor y soportaban mejor los estreses. Es decir, sin saberlo seleccionaban las plantas con una mejor variación genética, mejorando así la genética del cultivo en general, de acuerdo con sus rasgos fenotípicos. Con el paso de los años, se han ido desarrollando nuevas tecnologías, como microscopios y pruebas químicas en laboratorio que permiten un análisis del fenotipo más profundo, además de sistemas informáticos que permiten un análisis de imagen muy detallado. Tradicionalmente, el análisis de los rasgos fenotípicos de las plantas se realiza en laboratorios, pero esto viéndose únicamente como un complemento de la genómica. Sin embargo, en la actualidad ya se está empezando a considerar el fenotipado como un disciplina independiente, pues este es necesario para entender que variantes genómicas afectan los fenotipos, y descifrar las causas de fenómenos complejos, como la salud, el rendimiento de los cultivos y la aptitud evolutiva [10]. Lo que lleva al fenotipado de alto rendimiento, que se refiere a un aumento de la precisión en la recopilación y análisis de datos de las plantas, mediante diversas tecnologías no destructivas [11], lo que ya conduce a un análisis en el cultivo mismo y permite analizar una gran cantidad de plantas simultáneamente. Estos análisis deben combinarse con plataformas de hardware asequibles y de bajo costo que puedan albergar y procesar la cantidad de datos producidos,

en tiempo real. El análisis de imágenes es actualmente el eslabón más débil, debido a los principales desafíos en los instrumentos para captura de imágenes (lograr consistencias en colores, formas, etc., en entornos no estructurados) y para el procesamiento de éstas [12].

La computación está allanando el camino para desarrollar plataformas de fenotipado basadas en entorno controlado y plataformas basadas en campo. Estas diseñadas específicamente para la investigación y fenotipado a escala limitada de especies, que abarca pequeñas plantas de roseta y los cultivos de cereales primarios, y combinan robótica y análisis de imágenes con sistemas de ambiente controlado. Sin embargo, el uso de ambientes controlados para representar entornos de campo tiene limitaciones bien conocidas, como el límite del espacio del invernadero o de las cámaras, que a menudo no permiten que las plantas florezcan y produzcan semillas, por lo que es imposible evaluar los efectos del estrés durante el crecimiento reproductivo.

2.2 El diseño en ingeniería mecánica

El diseño en ingeniería mecánica involucra diversas áreas de esta disciplina. Se utiliza matemáticas, ciencia de los materiales y ciencias mecánicas aplicadas a la ingeniería para el diseño de piezas, mecanismos, máquinas y diversos dispositivos, teniendo en cuenta que los problemas reales requieren especialización [13].

2.3 Diseño para la manufactura y diseño para el ensamblaje

El diseño para la manufactura (DFM por sus siglas en inglés) es una mentalidad, donde se tiene en cuenta la manufactura desde las etapas tempranas del diseño, y a lo largo de todo el proceso, para diseñar partes y productos que se puedan producir de forma más fácil y económica. Algunas consideraciones en DFM son costos de herramientas o tiempo requerido, costos de procesamiento o capacidad de control, tiempo o costos de ensamblaje, consideraciones humanas durante la fabricación, como seguridad del trabajador o calidad del trabajo requerido, disponibilidad de materiales o equipos, entre otros [14].

El diseño para el ensamblaje (DFA por sus siglas en inglés) es un método iniciado por Boothroyd y Dewhurst en la universidad de Rhode Island, de evaluación del diseño, que permite reducir el número de piezas de un conjunto, diseñar un producto para facilitar el manejo del montaje, reducir la mano de obra y tiempo del ensamblaje. Esta es una herramienta que permite el ahorro de costo, minimizando el número de piezas y el número de operaciones necesarias para el montaje, haciendo que el ensamblaje sea más fácil y a prueba de fallas, haciendo un mejor diseño, con mayor calidad y reduciendo costos del producto [15].

2.4 Diseño para el ambiente (DPA)

Todo producto tendrá consecuencias en el ambiente, lo que lleva al DPA; un método para reducir afectaciones en el ambiente que permite crear una sociedad más sostenible. Al aplicar DPA, se ha concluido que, al hacerlo de modo eficiente, se conserva o mejora la calidad y el costo del producto, mientras se reducen los efectos negativos en el medio. Entre las problemáticas ambientales que puede generar un producto se encuentran la generación de residuos sólidos y descargas líquidas, consumo de energía, emisión de gases y agotamiento de recursos. Por lo general para enfrentar el problema de energía se desarrollan productos más eficientes que utilicen energía renovable. Por otra parte, disminuir el problema de los materiales es más complicado, por lo tanto, gran parte el DPA se enfoca en elegir materiales adecuados y reciclables para los productos [16].

El ciclo de vida es la base del DPA, el cual es un sistema cerrado que relaciona el ciclo de vida del producto, que incluye la producción y distribución, con su ciclo de vida natural, como se puede observar en la Figura 1.

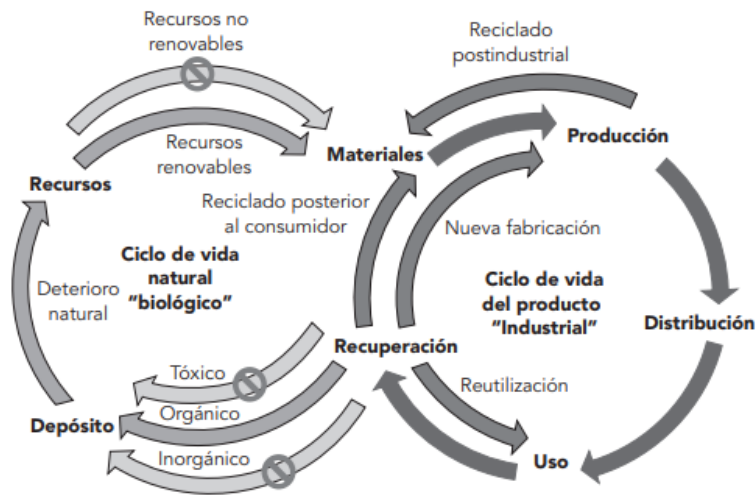


Figura 1. Ciclo de vida natural y ciclo de vida del producto [19].

2.5 Construcción de prototipos

Un prototipo es definido como “una aproximación al producto en una o más dimensiones de interés” [17], los cuales se pueden dividir en dos dimensiones. La primera es cuando el prototipo es físico o analítico, donde los primeros son tangibles y se asemejan al producto, mientras que los segundos representan el producto de forma matemática o visual. La segunda dimensión hace referencia a si el prototipo es integral o enfocado, donde los primeros realizan la mayor parte de las características del producto, mientras los segundos se enfocan en uno, o algunos de los atributos del producto. Comúnmente se realizan dos o más prototipos enfocados para probar el funcionamiento general, donde uno es un prototipo “se ve cómo”, y el otro “funciona como”, lo que permite hacer correcciones y responder preguntas antes de realizar un prototipo integrado [17].

2.5.1 Tecnologías de construcción de prototipos

El prototipado rápido es un procedimiento de creación de piezas u objetos con características que se asemejan a las que se desean en el producto final, donde el objetivo es probar los compuestos de la forma más sencilla y económica posible antes de la producción final y el lanzamiento al mercado. Esto evita errores y garantiza la calidad de los productos terminados, y hace posible realizar cambios al diseño antes de realizar una gran inversión. Existen diferentes tipos de prototipado rápido: prototipado rápido de diseño, para evaluar los aspectos estéticos y ergonómicos, prototipado rápido geométrico, para analizar los productos de forma espacial y geométrica, evaluando la forma, las proporciones y las tolerancias de las piezas, prototipado rápido funcional, que se centra en el comportamiento de distintos materiales, evaluando las funciones de cada elemento, y prototipado rápido técnico, donde se estudia el conjunto de los objetos de forma global, donde se evalúa la afinidad con otros productos y la limitación de las características técnicas. Para esto se utilizan diversos materiales como metales, plásticos o cerámicas.

Las principales técnicas para prototipado rápido son la manufactura aditiva, método más avanzado y rápido, además que permite realizar geometrías complejas de forma rápida y económica. Corte láser, método rápido, que permite cortar piezas en diversos materiales como plásticos, maderas, telas y metales y resulta especialmente útil para producción en masa. Prototipado rápido con CNC, muy común en la industria metalúrgica, que consiste en substraer de forma mecánica una muestra procedente de una pieza mayor [18].

2.6 Herramientas y recursos de diseño

Los softwares de diseño asistido por computadora (CAD) permite el desarrollar modelos tridimensionales, de los cuales se pueden producir vistas ortográficas bidimensionales convencionales. Estos cuentan con bases de datos que permiten realizar cálculos rápidos y exactos de algunas propiedades del diseño, como la masa, el centro de gravedad y los momentos de inercia de masa [13].

2.6.1. Aspectos económicos

En el proceso de diseño la consideración de los costos tiene una gran importancia, por lo que se exponen algunos conceptos y reglas generales [13].

- **Tamaños estándar:** un principio fundamental para reducir costos es estandarizar los tamaños y las piezas a usar, pues las piezas personalizadas son más difíciles de fabricar y conseguir y utilizar diferentes tamaños puede significar necesitar distintos proveedores lo que aumenta la complejidad.
- **Tolerancias amplias:** las tolerancias pueden ser las especificaciones de diseño que influyan más significativamente en los costos, si se especifican tolerancias muy estrictas es posible que se necesiten más pasos en el procesamiento lo que aumenta considerablemente el costo de la pieza.
- **Estimaciones de los costos:** existen diversas formas de obtener un estimado de los costos relativos para comparar un aproximado de distintos diseños, una de las cuales es comparar el número de partes, ya que el que tenga menos elementos podría resultar más económico.

2.7 Selección de materiales

La selección de materiales tiene en cuenta una variedad de factores mecánicos, físicos, eléctricos, térmicos y de fabricación. El diseñador debe identificar las propiedades más importantes para la aplicación en cuestión y utilizarlas como criterio para elegir el material adecuado. Existen tres métodos usados en la selección de materiales: el método tradicional, el método gráfico y el método con ayuda de bases de datos. El método tradicional, conocido también como materiales de ingeniería de partes similares, consiste en escoger materiales que ya se han usado con anterioridad y han dado buenos resultados en piezas con funciones similares. Con este método se contribuye a la estandarización y la caracterización, sin embargo, con este método no se hace un estudio real del ambiente de trabajo, lo que puede traer problemas. El método gráfico consiste en apoyarse en gráficas que relacionan diferentes propiedades de los materiales. Estas relacionan propiedades como módulo de elasticidad, resistencia, densidad, tenacidad, difusividad y expansión, conductividad térmica, costos, entre otros. Este método permite hacer una comparación de distintos materiales, relacionándolos con las propiedades deseadas. El método con ayuda de bases de datos consiste en apoyarse de una amplia gama de bases de datos sobre materiales, que son el resultado del resultado de investigaciones en ensayos. Entre las más importantes se encuentran el banco de datos de la ASTM, la SAE, la ASM, la AISI, la NASA, etc. En estas bases se digita el valor aproximado de las propiedades que se necesitan en el componente y el programa se encarga de sacar una lista de materiales que pueden ser utilizados [19].

2.8 Teoría general de análisis en el diseño de elementos de máquinas

Para diseñar una máquina es importante satisfacer las especificaciones técnicas del sistema como el peso, el tamaño, el funcionamiento, la velocidad, la vida útil, el material y el costo. Además, puede haber especificaciones más especializadas como el trabajo silencioso, la facilidad de mantenimiento y la facilidad de movilidad. Para tomar decisiones a lo largo del proceso de diseño se debe realizar un análisis de todos los factores que se involucran en el proyecto, sin embargo, se deben tomar como criterios principales los que son definitivos para el correcto

funcionamiento de la máquina. Por lo tanto, un criterio fundamental para tener en cuenta es la capacidad de carga de los elementos que transmiten fuerza. Las dimensiones, el material y la geometría deben cumplir con los requisitos de resistencia, rigidez y una característica dinámica adecuada, que son los que establecerán la capacidad de carga del elemento [20].

2.8.1 Consideraciones básicas para el análisis de elementos mecánicos

La solución de un problema de diseño parte de la definición de una problemática y su desarrollo se basa en la formulación y respuesta diversas preguntas. Un método para la solución de problemas es apoyarse en la experiencia: esta forma proporciona un punto de partida para realizar un nuevo diseño, ya que se toman ejemplos que han funcionado satisfactoriamente, sin embargo, esto puede bloquear los pensamientos creativos. Otro método se basa en cargas, dando al diseñador espacio completo para la creatividad. Esta forma permite determinar fuerzas y sus efectos, proporcionando información para determinar partes más eficientes. De acuerdo con esto, inicialmente se debe definir el trabajo que la máquina debe realizar, seguido de una fase de análisis. Cuando se obtenga suficiente información se describen las funciones de los principales componentes del sistema, creando tablas alternativas para subsistemas y trazando diagramas de secuencia de operación, a partir de lo cual se sintetizan diversas soluciones. Se identifican y evalúan funciones y cargas y se determinan condiciones de uso que pueden causar fatiga, sobrecargas de impacto o vibración. Definidas las condiciones de carga sobre elementos se selecciona el material que, de manera económica de mejor respuesta a los requisitos del diseño, para lo cual se necesita determinar valores de esfuerzo admisible [20].

2.8.2 Diseño por resistencia

Un diseño que se basa en resistencia exige, que se determinen las condiciones de funcionamiento y de transmisión de carga correctamente y se determinen los esfuerzos admisibles lo más exacto posible. En caso de no cumplir con lo anterior, se deben realizar ensayos para establecer el valor de las cargas reales durante el funcionamiento [13].

2.8.3 Diseño por rigidez

La rigidez es la capacidad que tiene un sistema de resistir la acción de cargas externas dentro de deformaciones admisibles sin modificar la capacidad de trabajo de una máquina. En algunos casos, diseños que se basan únicamente en resistencia van a producir secciones que favorecen la flexión excesiva del elemento. En estas ocasiones la sección debe de construirse más pesada para obtener la suficiente rigidez y resistencia [13].

2.8.4 Factor de carga en el diseño de un elemento

Al diseñar una pieza es de importancia saber el tipo de carga que esta va a experimentar, el método de su aplicación y el valor de esta, para asegurar el correcto funcionamiento de la máquina. La carga puede darse por peso muerto de los elementos, el trabajo que realiza la máquina o por la combinación de ambos. Los tipos de carga que pueden darse son: tracción, compresión, flexión, corte, torsión y carga combinada; y su aplicación puede ser estática, de impacto o variable [26].

2.8.5 Factor de seguridad

Para que una máquina tenga una resistencia suficiente, su esfuerzo unitario máximo debe de ser menor a la resistencia a la fluencia del material o a su resistencia última. Para asegurar esto es necesario incluir en los cálculos un factor de seguridad, que permita que el elemento soporte mayores fuerzas, que pueden ser causadas por irregularidades en el material, fallas en la fabricación, variaciones en cargas reales y errores en cálculos de diseño, etc. Es decir, el diseñador al incluir el factor de seguridad está considerando la incertidumbre que puede existir en los cálculos, asegurando de esta manera, que a pesar de que las condiciones externas sean variables, el elemento pueda funcionar correctamente y no aparezca ningún tipo de daño [13].

2.9 Estándares de protección IP y NEMA: para equipos electrónicos expuestos al ambiente

Los dispositivos electrónicos son muy susceptibles a daños o mal funcionamiento debido al entorno en el que se encuentran. Entre los factores más importantes que se deben tener en cuenta, para así mismo buscar controlarlos o buscar protección contra sus efectos son: elevadas temperaturas, que se pueden producir por poca ventilación y la transferencia de calor, lo que impide que los dispositivos disipen calor adecuadamente, lo que reduce su vida útil; el agua y la humedad, a la que son susceptibles principalmente equipos que trabajan en exteriores, y también se puede dar por la evaporación y condensación debido a cambios de temperatura, que deteriora las placas electrónicas y puede provocar cortocircuitos, además de corrosión en todas las partes metálicas; y vibraciones producidas por funcionamiento cercano de máquinas eléctricas o mecánicas, que provoca fallas en las conexiones [21].

Cuando los dispositivos van a trabajar en ambientes hostiles deben cumplir con algunos estándares que aseguren su robustez y den información de hasta dónde llega su utilización, donde las principales normas son IP y NEMA. IP (Ingress Protection) define el nivel de protección de una caja eléctrica contra elementos específicos, su nomenclatura consiste en las letras IP seguido de dos o tres dígitos que especifican el grado de protección, como se puede ver en la Tabla 1, y es un estándar reconocido en la mayoría de los países. NEMA (National Electrical Manufacturers Association), es un conjunto de estándares creado por la Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos en Estados Unidos, e indica la ubicación ambiental donde se puede usar adecuadamente y con seguridad equipos expuestos a líquidos, lluvia, corrosión y contaminante, como polvo, tal como se puede ver en la Tabla 2 [21], [22].

Tabla 1: Clasificación de estándar IP [22]

	Primer Número – Protección contra sólidos	Segundo Número – Protección contra líquidos	Tercer Número – Protección contra impactos mecánicos
0	Sin Protección	Sin Protección	Sin Protección
1	Protegido contra objetos sólidos de más de 50 mm	Protegido contra gotas de agua que caigan verticalmente	Protegido contra impactos de 0.225 Joules
2	Protegido contra objetos sólidos de más de 12 mm	Protegido contra rocíos directos a hasta 15° de la vertical	Protegido contra impactos de 0.375 Joules
3	Protegido contra objetos sólidos de más de 2.5 mm	Protegido contra rocíos directos de hasta 60° de la vertical	Protegido contra impactos de 0.5 Joules
4	Protegido contra objetos sólidos de más de 1 mm	Protegido contra rocíos directos de todas las direcciones – entrada limitada permitida	Protegido contra impactos de 2.0 Joules
5	Protegido contra polvo – entrada limitada permitida	Protegido contra chorros de agua a baja presión de todas las direcciones – entrada limitada permitida	Protegido contra impactos de 6.0 Joules
6	Totalmente protegido contra polvo	Protegido contra chorros de agua de todas las direcciones – entrada limitada permitida	Protegido contra impactos de 20.0 Joules
7		Protegido contra los efectos de la inmersión de 15 cm – 1m	
8		Protegido contra largos periodos de inmersión bajo presión	

Tabla 2: Clasificación de estándar NEMA [22]

Tipo 1	Para propósitos generales
Tipo 2	A prueba de goteos
Tipo 3	Resistente al clima
Tipo 3R	Sellado contra lluvia
Tipo 3S	Sellado contra lluvia, granizo y polvo
Tipo 5	Sellado contra polvo
Tipo 6	Sumergible
Tipo 6P	Contra entrada de agua durante sumersiones prolongadas a una profundidad limitada
Tipo 7 (A, B, C o D)	Locales peligrosos, Clase I – Equipo cuyas interrupciones ocurren en el aire
Tipo 8 (A, B, C o D)	Locales peligrosos, Clase I – Aparatos sumergidos en aceite
Tipo 9 (E, F o G)	Locales peligrosos, Clase II
Tipo 10	A prueba de explosiones (para minas de carbón con gases)
Tipo 11	Resistente al Acido o a gases corrosivos – sumergido en aceite
Tipo 13	A prueba de polvo

Capítulo 3. Estado del arte

El fenotipado aplica métodos y protocolos específicos para medir la estructura morfológica y la funcionalidad fisiológica de las plantas. Para hacer esto de forma tradicional se requería un gran recurso humano para tomar muestras de la gran población del cultivo. La limitación de la eficiencia de fenotipado era una restricción clave del progreso en genética aplicada, especialmente debido a los tiempos para adquirir rasgos en diferentes entornos. Además, los métodos de fenotipado convencionales dificultan la captura de fenotipos fisiológicos y biomecánicos a nivel de los mecanismos básicos de la planta que revelan patrones de biología genética.

Para aliviar este cuello de botella, desde el año 2000 se han desarrollado una variedad de plataformas de fenotipado que ahora son herramientas comunes en equipos comerciales o de investigación, algunas de estas se pueden observar en la Figura 2. Sin embargo, debido a que las grandes plataformas de fenotipado en su mayoría son desarrolladas por empresas comerciales, el hardware y el software subyacentes están protegidos por patentes, por lo que no pueden modificarse para satisfacer necesidades de investigación específicas. En consecuencia, está surgiendo continuamente una gama diversificada de plataformas comerciales de fenotipado, así como aquellas personalizadas o auto desarrolladas [23].

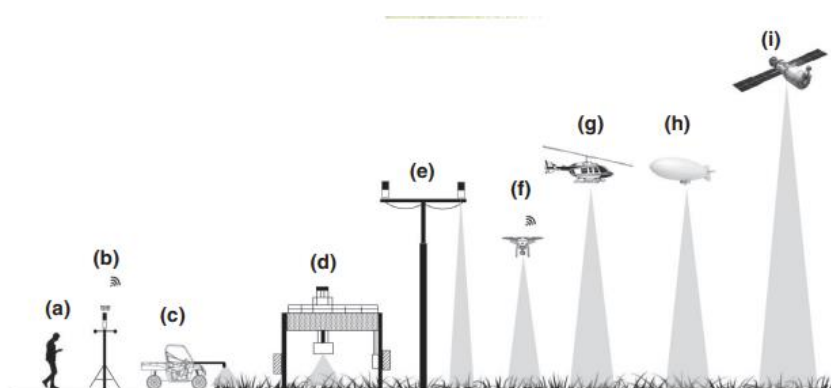


Figura 2. Escala de plataformas de fenotipado de alto rendimiento. a) Escaneo del terreno usando sensor portátil, b) Sensor ambiental fijo de tierra, c) vehículo de tierra para fenotipado, d) plataforma de escaneo de campo, e) torre de fenotipado, f) vehículo aéreo no tripulado, g) helicóptero de fenotipado de baja altitud, h) globo aerostático de fenotipado, i) plataforma satélite de detección remota [24].

Plataformas de fenotipado “Base de poste/ torre”

Las plataformas terrestres permiten fenotipado proximal, el cual proporciona datos de mayor resolución comparado la detección aérea. Es conveniente recopilar datos fenotípicos de series temporales y analizar la respuesta dinámica y la dependencia temporal de los fenotipos. Sin embargo, las plataformas basadas en tierra no son adecuadas para tareas de fenotipado a gran escala. Una plataforma de tipo base de poste/ torre se forma cuando los sensores se montan directamente sobre una torre de aluminio, acero o fibras plásticas, que puede ser estacionario o móvil. Son fáciles de construir y mantener y son de bajo costo. Sin embargo, el área de fenotipado está limitada por una sola unidad, y pruebas en múltiples sitios aumentan el costo para experimentos de campo de gran escala. Características clave para estas plataformas son: ser portable, escalable, giratoria, robusta y fácil de instalar y remover.

A continuación, se enfoca en el estado actual de la plataforma de fenotipado del programa OMICAS PhenoAgro y su comparación con las plataformas encontradas comercialmente.

3.1 Antecedentes PhenoAgro

PhenoAgro es una plataforma de dispositivos IoT interconectados georreferenciados enfocados en el análisis y caracterización que busca lograr una gestión eficiente de las actividades agrícolas a nivel de cultivo por medio de la medición de variables críticas. Gracias a la información recolectada por PhenoAgro es posible conocer el estado y la evolución de los cultivos en tiempo real con la posibilidad de ser visualizada de forma remota.

El monitoreo remoto de las variables críticas (Lluvia, velocidad de viento, radiación solar, humedad en aire y temperatura, humedad de suelos, emisión de gases de efecto invernadero, índices vegetativos y metabolitos) permite determinar el estado de un cultivo en tiempo real. Dentro de las posibilidades que se abren con PhenoAgro destacan el poder identificar estreses físicos o biológicos, rasgos fenotípicos, establecer condiciones de riego, nutrición y cosecha y finalmente mejorar la productividad de sus cultivos.

El sistema se compone de un equipo central (PhenoAgro Gateway) el cual procesa y consolida la información captada por sí misma y las otras estaciones satélites conectadas inalámbricamente (PhenoAgro Satélite y PhenoAgro Satélite Aéreo) para finalmente comunicarla a servidores en la nube en donde se podrá visualizar de forma clara la información colectada e incluso operar de manera sencilla el sistema.

El equipo de desarrollo de la Pontificia Universidad Javeriana junto al CIAT construyeron un primer prototipo cercano al nivel de sistema operacional planificado, con una base metálica, como se ve en la Figura 3. Con el propósito de disminuir costos se hizo un segundo prototipo, rediseñando este primero con una base de tubo PVC y reubicando un poco la posición de los sensores para mejorar así la medición de estos. Actualmente se está desarrollando el tercer prototipo, con base en PVC, donde se busca mejorar los mecanismos de movimiento del segundo prototipo, además también se busca diseñar en base a la facilidad para ensamble y producción. Este tercer prototipo es el que se continuará desarrollando en este trabajo.



Figura 3. Primer prototipo de PhenoAgro [8]

3.2 Instaweather e Instasoil

Instaweather e Instasoil son dos estaciones de fenotipado basado en tierra, producidas por la empresa InstaCrops, una empresa dedicada al desarrollo de Hardware IoT y Software para la agricultura, integrando distintas fuentes de información, utilizando algunas técnicas como la inteligencia artificial y la visión computacional, con el objetivo de recopilar datos e información sobre parámetros fundamentales de los cultivos en una misma plataforma [17].

Instaweather es una estación meteorológica que reúne todos los parámetros agroclimáticos esenciales para monitorear las condiciones ambientales. Los parámetros que mide y su estructura se pueden observar en la Figura 4.

¿QUÉ MIDE?		
Parámetros/Formato	Estándar (*)	Plus
Temperatura ambiente	X	X
Humedad relativa (HR)	X	X
Presión barométrica	X	X
DPV	X	X
Punto de rocío	X	X
Horas frío	X	X
Porciones de frío	X	X
Grados día	X	X
Radiación solar		X
Pluviometría		X
Dirección y velocidad de viento		X
Evapotranspiración		X

(*) No incluye pluviómetro, anemómetro y piranómetro.

Figura 4. Características Instaweather [17]

Por otro lado, Instasoil permite monitorear las condiciones del suelo de los cultivos, de esta forma permite gestionar el tiempo y la frecuencia de riego. Los parámetros que mide se pueden observar en la Figura 5.



Figura 5. Características Instasoil [17]

3.3 Arable Mark 2

La estación de Arable Mark 2, es una plataforma de fenotipado terrestre, producida por Arable, una empresa multinacional, dedicada al desarrollo de plataformas multisensoriales cuyas soluciones buscan digitalizar variables del campo para mejorar la salud humana, lograr la estabilidad económica, reducir la huella ambiental y mejorar las condiciones de trabajo en la agricultura. La estación es ubicada a los costados de los cultivos, esta plataforma cuenta con un sistema de ensamble fácil compuesto por tres partes principales: La cabeza (Panel solar), el cuerpo, que consta de una estructura simple a la que se le integra, una caja de componentes electrónicos y sensores, como se observa en la Figura 6, y la base que cuenta con un tornillo de tierra para poder realizar la fijación al terreno [25].



Figura 6. Arable Mark 2 [25]

3.4 Estación de planta Daimob

La estación de planta “Daimob”, es producida por Daimob, una empresa colombiana dedicada al diseño, desarrollo y fabricación de soluciones de monitores por medio de tecnologías IoT, que se encarga de la automatización de procesos de monitoreo de variables ambientales y cadenas de frío y la adquisición, procesamiento, almacenamiento y visualización de la información recolectada. La estación se encarga de monitorear variables ambientales y mide distintas variables como, temperatura ambiente, humedad ambiente, temperatura del suelo, cantidad de iluminación y punto de rocío. Esta estación tiene un diseño compacto que permite la fácil instalación [26].



Figura 7. Daimob [26]

3.5 Phenode

Phenode es una plataforma de fenotipado remota flexible, es considerada una “plataforma abierta” ya que fomenta la innovación al proporcionar libertad a los usuarios para crear soluciones personalizadas que se adaptan a sus necesidades [27].

En términos mecánicos esta plataforma tiene las siguientes características:

- Personalizable: Opciones de sensores y disposición de estos.
- Modular: Físicamente reconfigurable para ubicar en campo o en laboratorio. (Ver Figura 8)
- Físicamente robusto: Hecho de aluminio y otros materiales duraderos y reciclables.

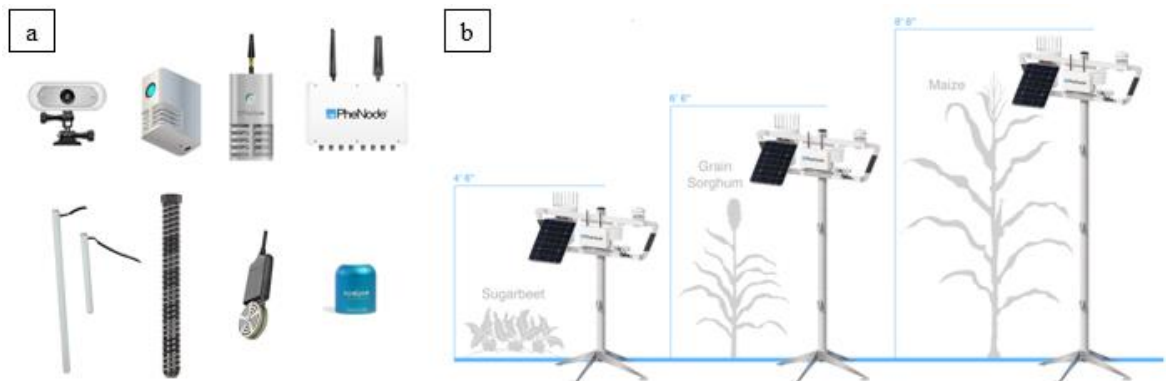


Figura 8. Phenode. a) Componentes y sensores Phenode, b) Módulos para modificar altura de dispositivo [27]

En la Tabla 3 se evidencian las distintas variables que mide cada una de las plataformas investigadas

Tabla 3: Listado de variables medidas por las distintas plataformas

Plataforma /Variable	Temp. del aire	Humedad del aire	Lluvia	Velocidad y dirección del viento	Radiación solar	Temp. de suelo	Índice de vegetación	Humedad del suelo	GEI
InstaWeather e InstaSoil	X	X				X		X	
Arable Mark 2	X	X	X	X	X	X	X	X	
Daimob	X	X				X			
Phenode	X	X	X	X		X	X	X	
PhenoAgro	X	X	X	X	X	X	X	X	X

A partir del estado del arte estudiado es posible evidenciar que las plataformas de fenotipado son de gran interés en la agricultura e investigación en los últimos años, ya que facilitan la obtención de datos suficientes para tomar decisiones inteligentes sobre los cultivos. En el caso de los dispositivos basados en tierra tipo poste/torre se tienen la ventaja de obtener mayor resolución de los datos. Al comparar algunos dispositivos basados en tierra con PhenoAgro se puede evidenciar que este permite la medición de diversas variables de interés, entre estas la posibilidad de detectar gases de efecto invernadero. En general, los dispositivos investigados suelen componerse de la base que los sostiene al suelo, un soporte que brinda cierta altura y que cuenta, en su exterior con una caja que integra la parte electrónica y en la parte superior con paneles solares, que se encargan de suministrar la energía necesaria para el funcionamiento del sistema. La mayoría de estos tienen una altura fija y no tienen ningún tipo de movilidad, a diferencia de PhenoAgro que cuenta con un movimiento telescópico, que permite que el dispositivo crezca junto con la planta para lograr mejores mediciones y movimiento de cadera y de hombro para que la cámara logre obtener imágenes de un amplio rango de espacio. Acerca de los materiales, los dispositivos suelen utilizar materiales reciclados y resistentes, generalmente aluminio, o algún polímero, aunque no se logra encontrar información más específica del polímero utilizado. El primer prototipo de PhenoAgro también estaba compuesto por aluminio, con algunas piezas hechas en polímeros como polietileno de alta densidad, pero en sus próximas versiones se busca reemplazar el metal por el polímero PVC para su construcción.

Capítulo 4. Objetivos

4.1 Objetivo general

Diseñar un prototipo del sistema mecánico de movimiento de la plataforma de fenotipado de cultivos apto para su producción masiva a partir de la plataforma multisensorial PhenoAgro.

4.2 Objetivos específicos

- Realizar la evaluación de las partes mecánicas del prototipo actual de PhenoAgro estableciendo las dimensiones y posibles fallos en su diseño mecánico.
- Desarrollar mejoras al prototipo actual mediante herramientas CAD teniendo en cuenta los principios de diseño mecánico para manufactura y ensamblaje.
- Evaluar los nuevos diseños de los mecanismos mediante el prototipado rápido, usando impresión 3D, corte láser y maquinado CNC, entre otros.
- Identificar los materiales y los costos de fabricación de acuerdo con las condiciones de uso, ambientales y de operación del nuevo prototipo.

Capítulo 5 Metodología

Para lograr el cumplimiento de los objetivos planteados en este trabajo, se usó la siguiente metodología.

5. 1. Análisis de prototipo actual

Se consultó y seleccionó información a partir de trabajos previos, bibliografía, revistas, tesis, internet y conversaciones personales con expertos, para:

- Obtener consideraciones generales del diseño
- Tener una comprensión detallada de los componentes, y los procesos de producción y ensamble utilizados.
- Comprender el funcionamiento del prototipo.
- Obtener dimensiones de piezas que componen el prototipo actual.

Se desmontó la plataforma anterior con el objetivo de analizar sus mecanismos y funciones, además se realizó un modelo del prototipo en el software SolidWorks. Esto con el fin de identificar problemáticas, limitaciones, consideraciones y oportunidades de mejora.

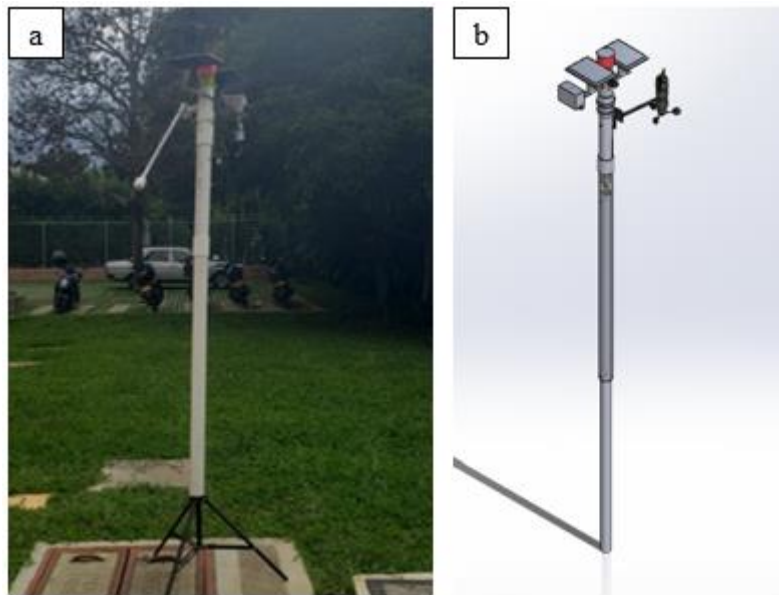


Figura 9. PhenoAgro actual. a) Prototipo físico, b) Prototipo virtual

5.2 Diseño CAD de mejoras mecánicas

Para el diseño, se utilizó el software SolidWorks. Teniendo en cuenta las problemáticas y limitaciones del prototipo anterior se plantearon los mecanismos a mejorar o diseñar. Primeramente, se definió el trabajo que debe realizar cada mecanismo. En cada uno de estos se describieron las funciones principales de los componentes del sistema, usando diagramas que incluyen todas las piezas. A partir de estos diagramas se identificaron y evaluaron funciones y cargas del sistema. Con esta información al diseñar nuevas piezas se tuvo en cuenta el estudio de las cargas estáticas y en movimiento que pueden llegar a estar durante el funcionamiento, a partir de esto y con ayuda del software se obtuvieron ensambles con las mejoras propuestas.

El proceso de diseño completo se observa en la Figura 10:

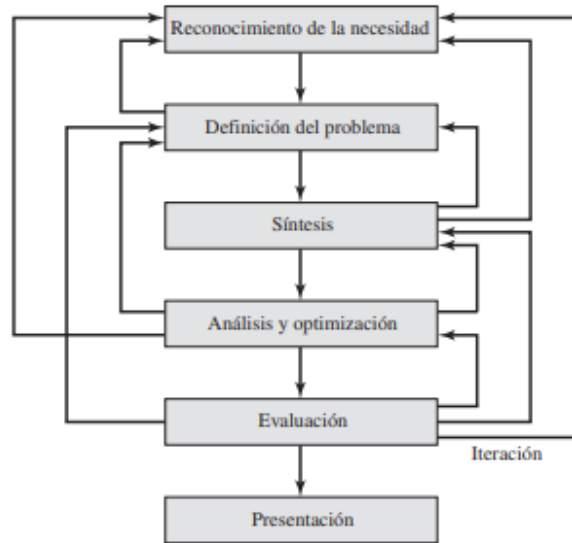


Figura 10. Fases del proceso de diseño con múltiples retroalimentaciones e iteraciones [13]

La selección de diseño se realizará tomando en cuenta:

Diseño para manufactura (*Design For Manufacturing-DFM*)

Para el DFM fue necesario tener una comprensión detallada de los procesos de producción y ensamble y se realizaron estimaciones de costos de manufactura y volúmenes de producción. Para esto se utilizó el método de diseño para manufactura propuesto por Ulrich y Eppinger que se muestra en la Figura 11.

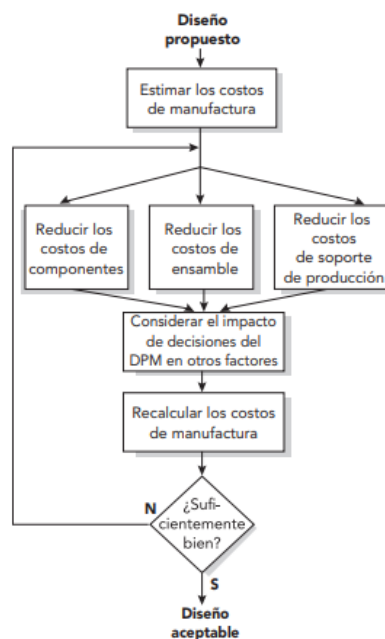


Figura 11. Método de diseño para manufactura [16]

Diseño para ensamble (*Design For Assembly-DFA*)

Este trabajo se utilizó el diseño para ensamblaje propuesto por Boothroyd y Dewhurst quienes proponen el concepto de eficiencia del ensamblaje, que se mide como un índice DFA donde se ve la relación entre el tiempo mínimo teórico del ensamblaje, siendo el tiempo teórico de ensamble por pieza 3 segundos y una estimación real de ensamblaje.

$$\text{Indice DFA} = \frac{\text{Número mínimo teórico de piezas} \times 3 \text{ s}}{\text{Tiempo total estimado del ensamble}}$$

Esta fórmula fue utilizada para determinar el nivel de cercanía a pieza ideal de las piezas diseñadas en el proyecto.

Las piezas integradas en ocasiones pueden ser menos costosas que piezas separadas especialmente con métodos como moldeado, troquelado y fundición pues se necesitan menos moldes, además que permiten una relación entre geometrías críticas controlada. Sin embargo, es importante tener en cuenta que en ocasiones la desintegración de piezas termina siendo una mejor opción.

Para evaluar los diseños se tuvieron en cuenta las características ideales de una pieza para un ensamblaje, según [16] adaptado de Boothroyd y Dewhurst, 1989, que son:

- La pieza se inserta desde arriba del conjunto (ensamble en eje z): El conjunto no tiene que invertirse y la gravedad ayuda a estabilizar el ensamble parcial.
- La pieza tiene alineamiento propio: de esta forma el ensamblador no tiene que aplicar un estricto control motriz. La característica de alineamiento propio más común es el bisel.
- No es necesario orientar la pieza: las piezas que no necesitan una orientación específica, como esferas son más rápidas de ensamblar.
- La pieza requiere de sólo una mano para su ensamble
- La pieza no requiere de herramientas
- La pieza se ensambla en un solo movimiento lineal
- La pieza se asegura inmediatamente al insertarla

Es importante que al reducir los costos de manufactura no se comprometa la calidad del producto. Aunque el trabajo de diseño para manufactura en ocasiones también resulta en una mejor facilidad del servicio, facilidad del desensamble y del reciclado, también la reducción de costos de manufactura puede traer efectos negativos en la calidad del producto, por lo que es un factor importante para tener en cuenta a la hora de la toma de decisiones. Además, existen factores de complejidad que se debe buscar disminuir como lo son el número de piezas, personas, productos y procesos involucrados, piezas personalizadas, herramientas mayores involucradas en el sistema de manufactura, entre otros [28]. A la hora de tener varias opciones, estos impulsores de complejidad son una forma de comparar cual opción es más económica.

5.3 Parámetros para simulación en SolidWorks

Se realizó una simulación por elementos finitos en SolidWorks de los componentes que estarían sometidos a mayores esfuerzos, es decir, componentes críticos. Para ello se determinó un tamaño de malla adecuado para reducir los gastos computacionales obteniendo valores cercanos a la realidad. Se tomaron 5 tamaños de elementos de malla y los resultados de sus esfuerzos de von Mises máximos como se muestra en la Tabla 4 y se observa gráficamente en la Figura 12.

Tabla 4: Tamaño de elemento de malla máximo vs Esfuerzo de von Mises máximo

Tamaño de elemento de malla máximo (mm)	Esfuerzo de von Mises máximo (MPa)
2.25	12.79
1.88	12.96
1.18	13.6
0.85	15.76
0.56	18.55

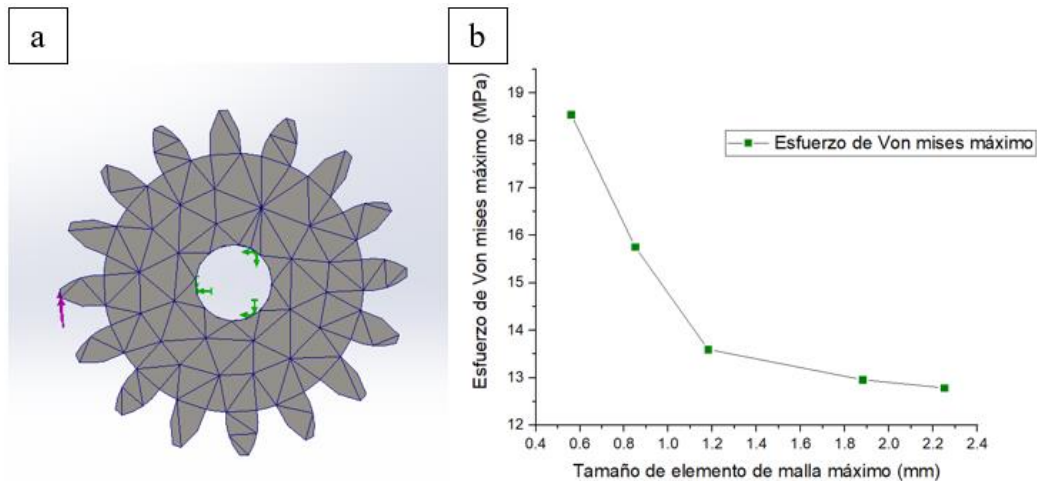


Figura 12. Tamaño de malla para análisis en SolidWorks. a) Malla de la pieza, b) Tamaño de elementos de malla vs Esfuerzo de Von Mises máximo.

Lo anterior nos permite evidenciar que no hay un alto cambio en los resultados a partir de elementos de malla de entre 2.25 mm y 1.18 mm, aun así, el valor a tamaño de malla mínimo tiene un cambio significativo comparada con los anteriores. Este estudio no requiere de gran esfuerzo computacional por lo cual se escogió un tamaño de elemento de malla mínimo, es decir de 0.56 mm, para las simulaciones estáticas en SolidWorks.

5.4 Fabricación de prototipos

Una vez realizados los nuevos diseños se utilizaron procesos de manufactura, como la impresión 3D, el corte láser y el maquinado CNC para fabricar piezas y corroborar la facilidad de ensamble de los prototipos, su tamaño, geometría, y su funcionalidad. Por lo tanto, se usó principalmente prototipado rápido, específicamente prototipos funcionales, para evaluar el correcto funcionamiento.

Para la impresión de las piezas se utilizó la impresora 3D Dremel 3D40 mostrada en la Figura 13a. Este equipo solo puede imprimir filamento de Ácido Poliláctico (PLA) con un volumen de trabajo máximo de 255x155x170mm, por lo que las piezas deberán limitarse a este material y dimensiones [29]. Para el corte de piezas como madera y acrílico se usó la cortadora láser Mastercnc laser 1390, que se muestra en la Figura 13b, con capacidad de velocidades de corte entre 25-60000 mm/min y una potencia de láser de hasta 180W [30]. El espacio de trabajo disponible es de 1300 x 900 mm y las láminas de corte varían entre los 2 a 8 mm de espesor. Para la fabricación mediante mecanizado, se utilizó un centro de mecanizado CNC de 3 ejes mostrado en la Figura 13c. Al ser una máquina de 3 ejes, las geometrías que se puede mecanizar son limitadas únicamente a estos tres grados de libertad, por lo que no se pueden realizar ángulos diferentes a 90°, ni redondeos y se dificultan las geometrías complejas.

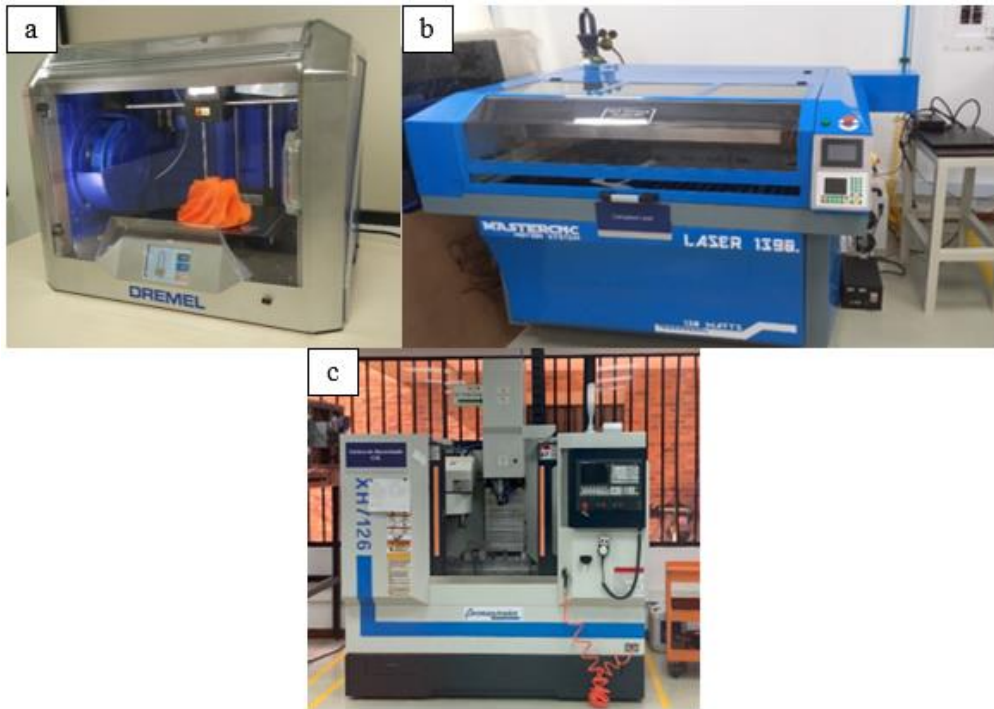


Figura 13. Máquinas para prototipado. a) Impresora 3D Dremel 3D40, b) Cortadora láser Mastercnc laser 1390, c) Centro de mecanizado CNC

5.5 Selección de materiales y costos de fabricación

Para una selección imparcial de materiales se utilizó la metodología de Ashby, donde es importante considerar todos los materiales e ir descartando y seleccionando como se muestra en la Figura 14. Primero se definieron la función, las restricciones, los objetivos y variables libres, como se observa en la Tabla 5. Con base en esto descartaron los materiales que no cumplen las restricciones o requerimientos del diseño, como podrían ser la resistencia al sol, al agua, resistencia a ciertas cargas, elasticidad, transparencia, etc. Luego se calificó identificando cuales realizan mejor los requerimientos u objetivos, combinando diversas propiedades de los materiales, y calificando cuales son las combinaciones más deseables. Finalmente, teniendo en cuenta los materiales más calificados, se buscó información de apoyo, más descriptiva, incluyendo estudios anteriores sobre el material, su comportamiento, precios, diferentes experiencias con ellos en distintos ambientes, etc. Sin embargo, para la elección final se consideró la disponibilidad local [31].



Figura 14. Proceso de selección de materiales [31]

Tabla 5: Función, restricciones, objetivos y variables libres [31]

Función	¿Qué hace el componente?
Restricciones	¿Cuáles son las condiciones no negociables que debe tener? ¿Cuáles son las condiciones negociables pero deseables del componente?
Objetivo	¿Qué debe ser maximizado o minimizado?
VARIABLES LIBRES	¿Cuáles son parámetros del problema los cuales el diseñador es libre de cambiar?

Se seleccionarán los materiales adecuados con ayuda de bases de datos, teniendo en cuenta las características necesarias para que resistan los esfuerzos y sean adecuados para el ambiente en el que serán utilizados. En la Figura 15 se observa la gráfica clásica del método Ashby que nos permite observar el límite elástico de los materiales vs la densidad, y se muestran todas las familias de materiales existentes.

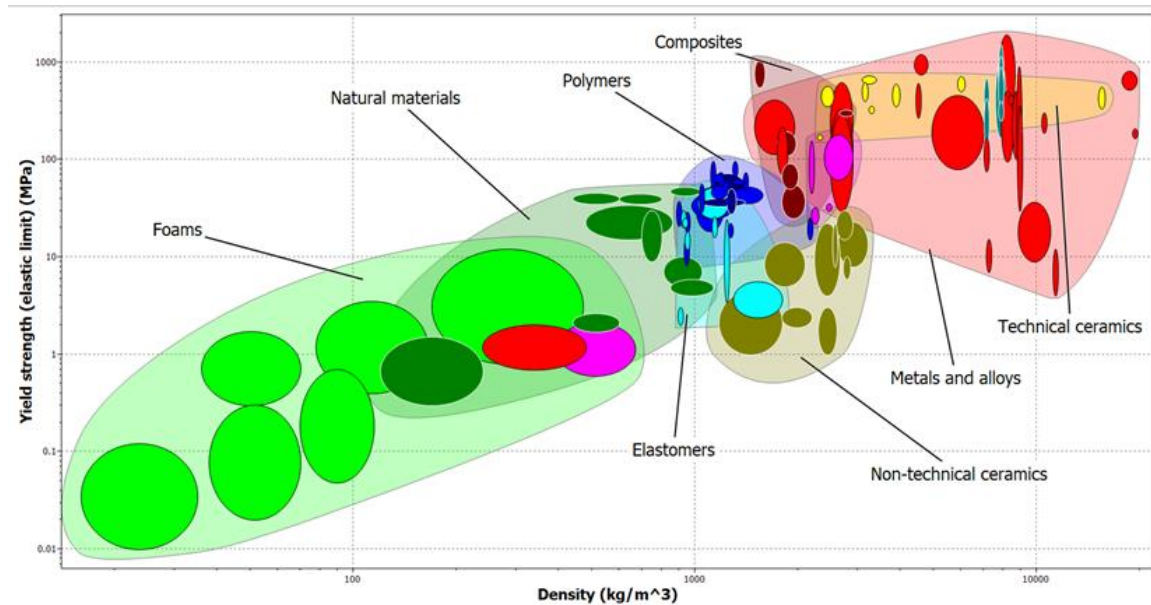


Figura 15. Diagrama de Ashby donde muestra el Limite elástico vs densidad materiales. [32]

5.5.1 Verificación de propiedades

Para comprobar las propiedades del material producido mediante el proceso de manufactura seleccionado se realizaron ensayos de tensión y flexión. Las probetas se fabricaron usando una impresora Ultimaker 3 extended y filamento de PETG de 2,85 mm de diámetro. Debido a la disponibilidad del material se prepararon 18 probetas en total, 9 probetas para ensayo de tensión y 9 para flexión, 3 con densidad de relleno de 50%, 3 a 75% y 3 a 100%. Teniendo en cuenta que no existen normas exactas para piezas producidas mediante impresión 3D se siguió la metodología de Letcher y Waytashek, donde prueban las propiedades de especímenes de PLA impresos en 3D [33].

5.5.1.1 Ensayos de tensión

La geometría de estas probetas se observa en la Figura 16a. Cada probeta fue impresa con una altura de capa de 0.2 mm, un ancho de línea de 0.4 mm, grosor de pared de 0.8 mm y un patrón de relleno de giroide, parámetros que se establecieron en el software UltiMaker Cura. El ensayo se realizó a una velocidad de 5 mm/min según la norma, y se aplicó una carga constante con límite de 9.5 kN. En la Figura 16b se muestra la ubicación de la pieza en la máquina de ensayos universal.

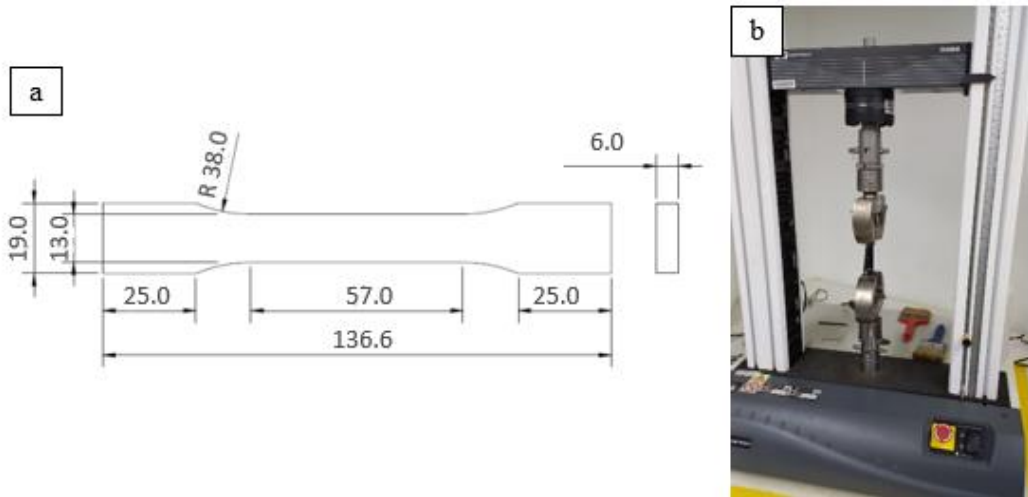


Figura 16. Ensayo a tensión. a) Dimensiones para probeta, las medidas están en mm con tolerancia de $\pm 0.2\text{mm}$, b) Ensayo

5.5.1.2 Ensayos de flexión

La geometría de estas probetas se observa en la Figura 17a, cada probeta fue impresa con los mismos parámetros establecidos en las probetas de tensión. El ensayo se realizó a una velocidad de 10 mm/min y se aplicó un límite de carga de 9.5 kN. En la Figura 17b se muestra la ubicación de la pieza en la máquina de ensayos universal.

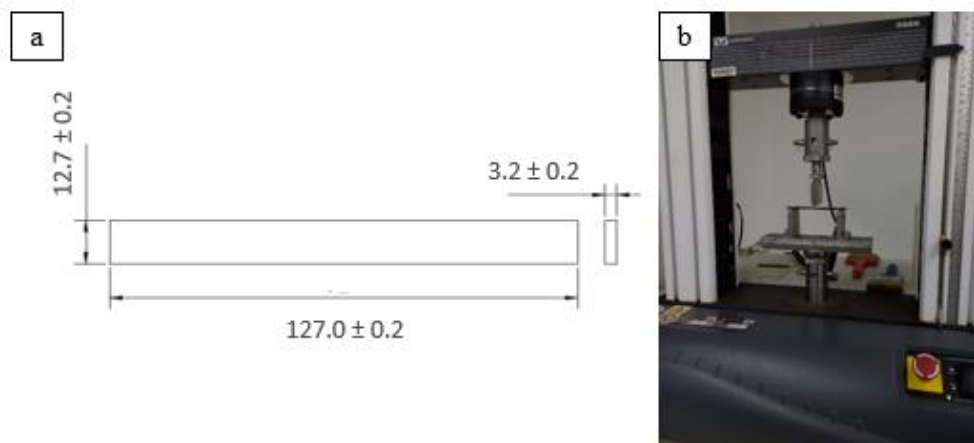


Figura 17. Ensayo a flexión. a) Dimensiones para probeta, las medidas están en mm, b) Ensayo

5.6. Levantamiento de planos y propuesta del proceso/ medios de fabricación

Se propusieron procesos de manufactura donde se utilizó la estrategia de DFM se busca que la geometría final de las piezas sea fabricada con la menor cantidad de pasos. De acuerdo con los prototipos y la elección de la solución final, se realizaron las mejoras necesarias y se diseñaron los planos a detalle. Además, teniendo en cuenta el material seleccionado y el método de manufactura, se propusieron posibles mejoras para las piezas.

Capítulo 6. Resultados

6.1 Análisis de prototipo actual

En la Figura 18 se presenta de manera general el prototipo junto a sus componentes. A partir de observar el prototipo se identificaron dos mecanismos principales: el mecanismo para el movimiento de cadera y el mecanismo para el movimiento telescópico. Para ambos mecanismos se determinó su funcionamiento y se realizaron observaciones que se presentan en la Tabla 6.

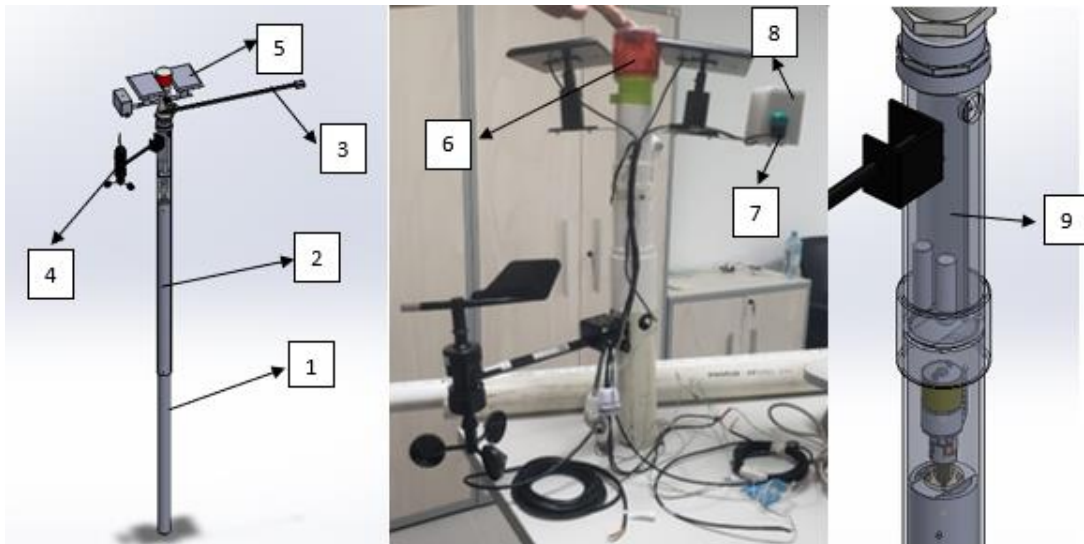

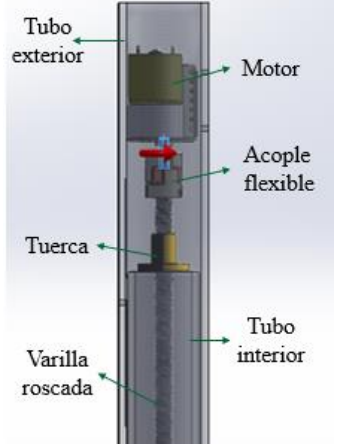


Figura 18. Esquema de partes, sistema PhenoAgro

1. Tubo de PVC interior
2. Tubo de PVC exterior
3. Brazo de cámara y cámara
4. Sensor de velocidad y dirección de viento
5. Paneles solares
6. Luz de emergencia
7. Piranómetro
8. Pluviómetro
9. Tarjeta de control

Tabla 6: Análisis de los mecanismos iniciales del prototipo

Mecanismo	Figura	Funcionamiento	Observaciones
Movimiento de Cadera		Consiste en un motorreductor de 12V con un acople donde se introduce un tornillo que entra en una unión de PVC, que es el encargado de transmitir el movimiento del motor al sistema.	-El eje del motor esta descentrado, lo que hace que el tornillo interfiera con la unión ocasionalmente. Además, el desacoplamiento del tornillo ocurre con facilidad durante ciertos movimientos y su inserción resulta complicada. - La geometría cilíndrica del tubo, dificulta el acople del motor.

<p>Movimiento telescópico</p>	 <p>Diagrama de un mecanismo de movimiento telescópico. Muestra un tubo exterior que rodea a un tubo interior. En el centro, hay un motor conectado a un acople flexible, el cual está unido a una varilla roscada que pasa a través de una tuerca. El tubo interior está montado sobre la varilla roscada.</p>	<p>Consiste en un motorreductor de 12V con un acople flexible que se ajusta a una varilla roscada que permite el movimiento hacia abajo y hacia arriba del tubo de PVC exterior, mientras una tuerca, que es la que permite el movimiento lineal del tubo, está sobre al tubo de PVC interior.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - El motor presenta dificultades al momento de ser ensamblado al tubo interno, debido a la geometría cilíndrica del tubo. - No hay un correcto acople entre el eje del motor y el acople flexible, por lo que el movimiento no se logra transmitir correctamente. - La tuerca no se encuentra fija al tubo interior, por lo que es susceptible a desacoplarse. - Aunque el movimiento del tubo exterior se espera que sea únicamente lineal, este llega a rotar debido al movimiento del tornillo.
--------------------------------------	--	--	---

6.1.1 Requerimientos generales de plataforma PhenoAgro

El objetivo general del instituto Ómicas para el proyecto número cuatro es el desarrollar e implementar una plataforma multimodal de bajo costo, distribuida geográficamente, para fenotipado de cultivos. Para ello se establecieron los siguientes requerimientos generales:

- El dispositivo debe tener un costo inferior a USD\$500
- Los equipos deben soportar condiciones ambientales difíciles (Altas temperaturas, humedad y altitud) y agentes biológicos
- Los equipos deben ser livianos, de fácil instalación y mantenimiento

De acuerdo con lo anterior, las mejoras a los mecanismos se realizarán usando elementos previos que ayudan a cumplir con los requerimientos generales, como los tubos y uniones de PVC.

6.2 Diseño CAD de mejoras mecánicas

Teniendo en cuenta las problemáticas, limitaciones y los requerimientos mencionados anteriormente se realizó un rediseño de los mecanismos de movimiento. La funcionalidad y viabilidad de estos diseños se evaluaron mediante prototipado rápido.

6.2.1 Movimiento de cadera

Teniendo en cuenta las problemáticas encontradas en el mecanismo de cadera inicial y lo que se espera de su correcto funcionamiento, se establecieron los siguientes requerimientos de diseño:

- El mecanismo debe permitir un giro de 360 grados.
- El mecanismo debe facilitar el acople del motor seleccionado.
- El mecanismo debe adaptarse a la forma de los tubos para facilitar el ensamble.
- El mecanismo debe permitir la implementación de diversos elementos de control.
- El mecanismo debe soportar las condiciones de ambiente operacional.

6.2.1.1 Versión 1

Se usó un motor de 37 mm con el eje centrado en el mecanismo. El mecanismo cuenta con tres piezas: la pieza superior que se acopla a la unión y al eje del motor, un anillo antifricción en el medio y una tapa fija acoplada al tubo, mediante aletas ver figura 19. El mecanismo está pensado para mantener fijo el eje con la tapa inferior, y de esta forma permitir el giro del motor junto a la tapa superior y la unión del tubo de 63.5 mm (2.5 pulgadas), de esta forma permitiendo el giro de los tubos que se conectan a este. Como parte del prototipado se usó acrílico para el anillo antifricción y PLA para las otras dos piezas. Con esta primera versión se observó que:

- Las piezas no se unen a los tubos, solo se encajan mediante aletas, por lo que si se cae o si alguien lo quiere desmontar se puede desarmar fácilmente.
- Al usar PLA como material para el prototipo se presentaron problemas de deformación en donde se encaja el eje del motor a la pieza superior, por lo que este se terminó rodando después de realizar algunas pruebas.
- No se permite el paso de cables.



Figura 19. Movimiento de cadera versión 1

6.2.1.2 Versión 2

Para esta versión se utiliza un motor de 25 mm de diámetro, con un eje de 4 mm, el cual se coloca descentrado, con el objetivo de dejar espacio para que pasen los cables por el medio. En la base del eje se ubica un piñón de 16 dientes, ángulo de presión de 20°, anchura de 8 mm y modulo 1, el cual permite el giro del motor junto a la placa superior debido a su interacción con un engranaje interno de 54 dientes ubicado en la pieza inferior. El mecanismo cuenta con un anillo interno antifricción. En esta segunda versión se observó que:

- Se logra solucionar el paso de cables, pero no el posible enredo de estos.
- No hay una solución para la unión a los tubos que permiten el movimiento, por lo que se podría provocar fallos al aplicar esfuerzos externos, causando la separación de las piezas del mecanismo.

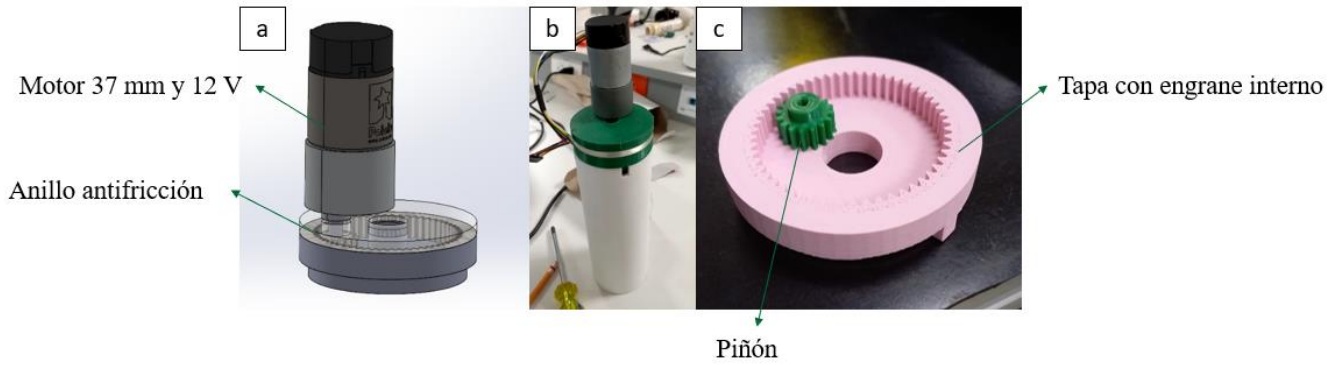


Figura 20. Movimiento de cadera versión 2, a) Ensamble versión 2 en SolidWorks, b) Prototipo para pruebas versión 2, c) Piñón y corona impresos en PLA

6.2.1.3 Versión 3

Se usó el mismo motor de 25 mm, pero en este caso el motor es ubicado hacía abajo y se mantiene fijo. Mediante la interacción del piñón y el engrane interno definido, se mueve la placa superior la cual cuenta con un canal en el centro para permitir el paso de cables, esta parte superior cuenta con perforaciones para realizar la fijación de las piezas a los tubos y uniones, usando tuercas y tornillos M3, debido a la disponibilidad de tornillería para trabajar. Además, cuenta con un tope mecánico que permite el control de giro (Ver figura 21), permitiendo girar 360° en ambos sentidos. El mecanismo funciona correctamente, facilita el paso de los cables a través del tubo, cuenta con fijación a los tubos, lo cual es favorable para que no se desarmen las piezas si se aplican fuerzas externas. Todo esto soluciona los problemas encontrados en las versiones anteriores dando como resultado un prototipo más robusto, que cumple con los requerimientos de diseño.

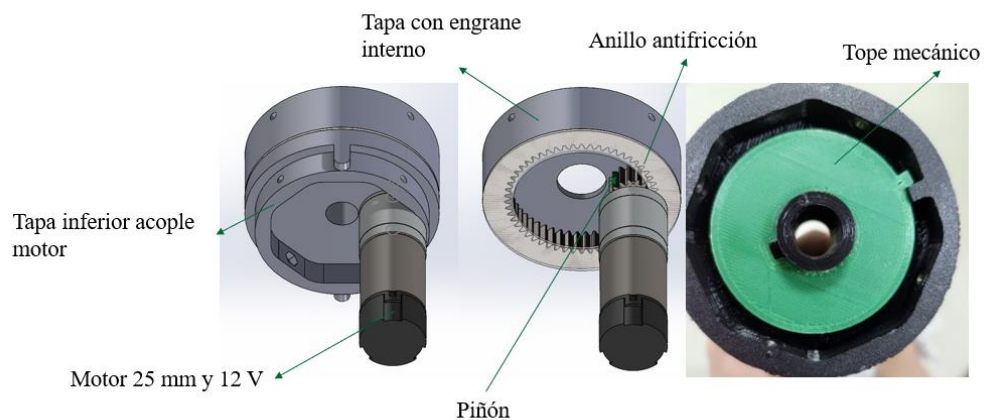


Figura 21. Movimiento de cadera versión 3

6.2.2 Movimiento telescópico

A partir de las problemáticas identificadas y lo que se espera de su correcto funcionamiento, se establecieron los siguientes requerimientos para el segundo mecanismo a trabajar:

- El mecanismo debe permitir subir y bajar el peso de la plataforma.
- El mecanismo debe proporcionar estabilidad en su movimiento.
- El mecanismo debe facilitar el acople del motor seleccionado.
- El mecanismo debe adaptarse a la forma de los tubos para facilitar su ubicación y ensamble.
- El mecanismo debe soportar las condiciones de ambiente operacional.

6.2.2.1 Versión 1

El mecanismo diseñado cuenta con tres partes para su funcionamiento, en este caso las llamaremos parte superior, parte media y parte inferior. Para comprender su funcionamiento a continuación se puede observar cada una de sus partes:

Parte superior

En esta parte se ubica un motor de 37 mm de diámetro y 12 V, una balinera y un acople para la varilla roscada, como se muestra en la Figura 22.

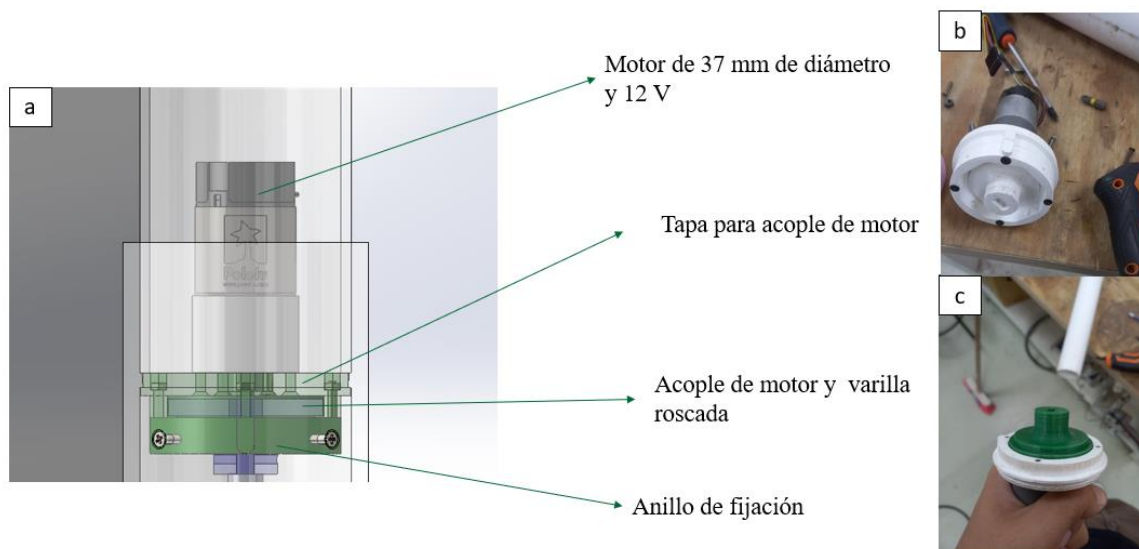
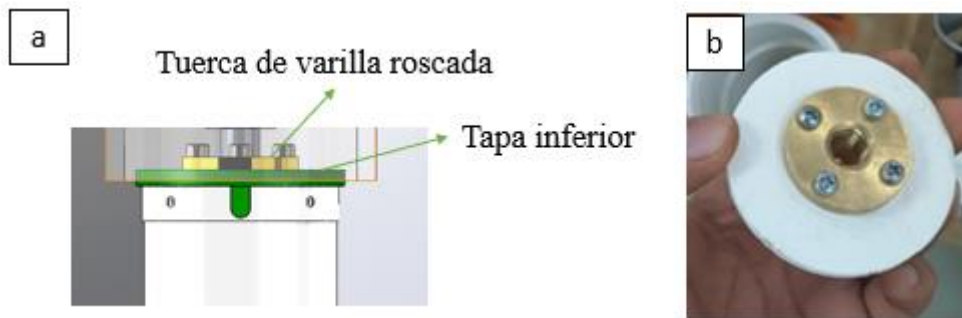


Figura 22. Parte superior mecanismo telescópico, a) Ensamble en SolidWorks parte superior mecanismo telescópico, b) Prototipo ensamblado parte superior, c) Prototipo de acople para motor y varilla roscada

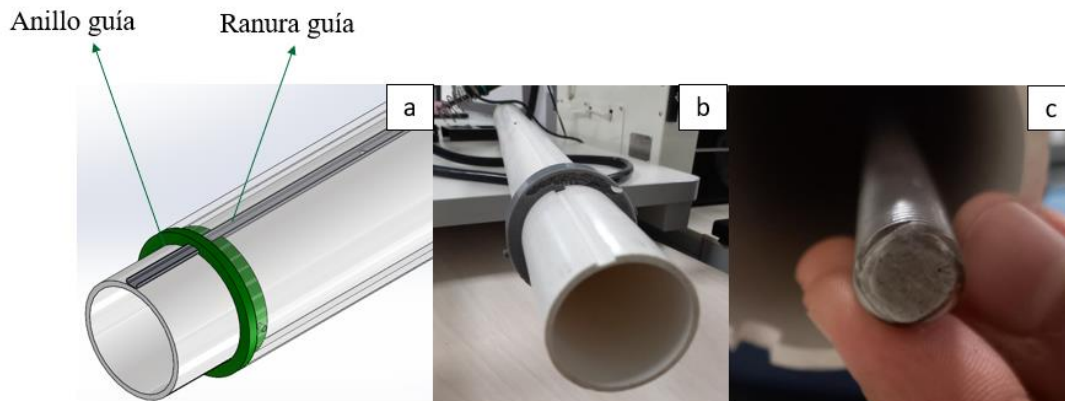
Parte media

La parte media de este mecanismo cuenta con una tapa unida al tubo interno de 50.8 mm (2 pulgadas), que sostiene la tuerca de la varilla roscada, como se observa en la Figura 23.



Parte inferior

La parte inferior del mecanismo cuenta con un anillo y ranura guía, esto con el fin de evitar la rotación a medida que suba o baje la plataforma, como se observa en la Figura 24.



Este mecanismo cuenta con un tubo externo de 63.5 mm y uno interno de 50.8 mm. El acople de motor y varilla hace girar la varilla de 1200 mm, la cual va roscándose en la tuerca que está fijada con una tapa al tubo interno. La parte superior de la balinera esta fija al tubo externo de 63.5 mm y a una unión de este mismo diámetro. Debido a la rosca de la varilla, este tubo va subiendo o bajando, dependiendo de la polaridad del motor. En la parte inferior del tubo externo hay un anillo de guía el cual tiene una pestaña interna que encaja con una ranura realizada con una fresa de 6 mm sobre la superficie del tubo interno. Ver Figura 25.

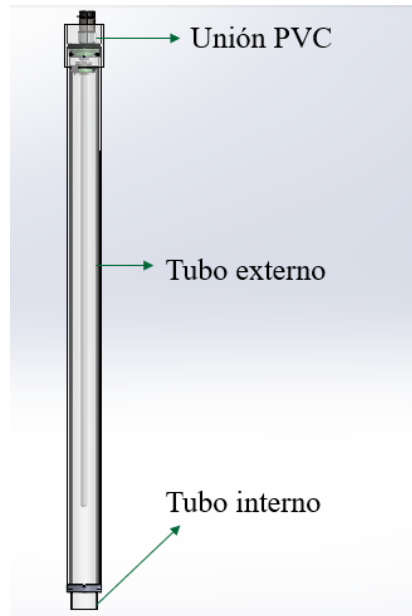


Figura 25. Mecanismo telescópico completo

Esta versión funcionó correctamente ya que se implementó el aprendizaje obtenido de las iteraciones realizadas en el mecanismo cadera, por lo tanto, no se realizaron más versiones del mecanismo telescópico.

6.3 Cálculos de mecanismos diseñados

En los sistemas estudiados se lograron identificar dos elementos de máquinas principales a evaluar. Estos son la interacción entre piñón y corona interna del mecanismo de movimiento de cadera, y el tornillo de potencia del mecanismo telescópico. Los cálculos relacionados a los mecanismos diseñados fueron realizados tomando en cuenta por lo establecido por Shigley [13].

6.3.1 Piñón y corona

El mecanismo de cadera debe ser capaz de rotar un peso a cierta velocidad, siendo este la parte superior de la plataforma de PhenoAgro. Para iniciar, se decidió calcular el torque τ_0 necesario para hacer girar una masa M , medida de manera experimental de 3.118 kg, que corresponde a la parte superior de PhenoAgro. Además, se decidió establecer una velocidad angular de giro ω_0 de 5 rpm, valor obtenido a partir de pruebas de funcionamiento en el laboratorio, donde se observó un movimiento a una velocidad deseable.

El torque está definido por la ecuación (1), donde I , es la inercia y α , la aceleración angular.

$$\tau_0 = I * \alpha \quad (1)$$

La inercia de un cilindro está dada por:

$$I = M * R^2 = 3.1 * (3.17 * 10^{-2})^2 = 3.115 * 10^{-3} \text{ kg/m} \quad (2)$$

Donde R es el radio externo del tubo a rotar, en este caso el de 63.5 mm.

En el caso de la aceleración angular se decidió que se iba a alcanzar la velocidad de 5 rpm en un tiempo de 1 segundo, que está dada en la ecuación (3).

$$\alpha = \frac{\omega_0}{\Delta t} = 0.52105 \text{ rad/s}^2 \quad (3)$$

Reemplazando estos valores en (1) se obtiene

$$\tau_o = 3.115 * 10^{-3} * 0.52105 = 1.623 * 10^{-3} \text{ Nm (4)}$$

La relación de engranes fue diseñada con una limitación en la ubicación del motor y el tamaño interno del tubo, a partir de esto se estableció el piñón de 16 dientes ($z_{\text{piñon}}$), 16 mm de diámetro, es decir 8 mm de radio ($R_{\text{piñon}}$), con ángulo de presión de 20 grados (θ), un ancho de cara de 8 mm ($F_{\text{piñon}}$) y el diámetro del eje nominal de 4 mm (eje de motor). Para la corona interna se estableció igualmente un módulo de 1, 54 dientes (z_{corona}), un ángulo de presión de 20 grados (θ), una anchura de cara de 9 mm (F_{corona}) y diámetro externo de 72.5 mm (diámetro externo de tubo).

Luego, teniendo en cuenta la relación del sistema de engranes se calculó el torque de salida del anillo con engrane interno, de acuerdo con el torque de máxima eficiencia de las especificaciones del motor, que se observa en la ecuación (5).

$$\tau_{\text{piñon}} = 2.7 \text{ kg} * \text{cm} = 0.264 \text{ Nm (5)}$$

$$\tau_{\text{corona}} = \tau_{\text{piñon}} * \frac{z_{\text{corona}}}{z_{\text{piñon}}} = 0.264 * \frac{54}{16} = 0.891 \text{ Nm (6)}$$

Este resultado logra garantizar la eficiencia del motor usado y el sistema de engranes en términos de torque necesario para hacer girar un peso.

Ahora bien, se debe analizar la posible falla del sistema de engranajes. Según Shigley un engranaje recto podría fallar por flexión o por fatiga. A continuación, se analizarán cada una de estas posibles fallas.

6.3.1.1 Falla por flexión

Ocurre la falla por flexión cuando el esfuerzo significativo del diente es igual o mayor a la resistencia a la fluencia o límite de resistencia a la fatiga por flexión del material.

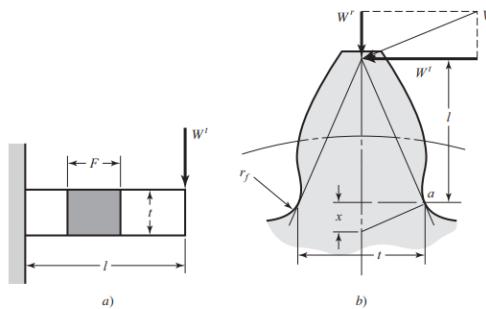


Figura 26. Diagrama de fuerzas en diente de engrane [13]

Para calcular el esfuerzo significativo en el diente del engrane se utiliza la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{Kv * W^t}{F * m * Y} \text{ (7)}$$

Donde: Kv = Factor dinámico, W^t = Fuerza tangencial, F = ancho de piñón, m = modulo y Y = Factor de Lewis.

El factor dinámico se definió como 1 ya que se decidió analizar un caso crítico, en el cual la corona permanece estática. De esta manera obtendremos el esfuerzo de flexión máximo que podría sufrir el diente.

La fuerza tangencial fue obtenida a partir del torque de máxima eficiencia del motor (5) y el radio del piñón:

$$W^t = \frac{\tau_{\text{piñon}}}{R_{\text{piñon}}} = 33 \text{ N} \quad (8)$$

Para un piñón con 16 dientes se establece un factor de Lewis de 0.296. Reemplazando estos valores en la ecuación (7) se obtiene:

$$\sigma = \frac{33 \text{ N}}{8 \text{ mm} * 1 * 0.296} = 13.9 \text{ MPa} \quad (9)$$

Para comprobar este resultado y ampliarlo, se decidió utilizar la herramienta de análisis por elementos finitos de SolidWorks para el análisis estático. Se estableció el PET como material, ya que es un plástico similar al PLA en cuanto a propiedades mecánicas con módulo de elasticidad de 56.5 MPa y 48 MPa respectivamente según la base de datos de MatWeb [34], ya que este último no se encuentra disponible en la librería del software. Para obtener resultados cercanos a la realidad se analizó el piñón en una situación crítica, en la cual se mantiene fijo el eje y se aplica el torque a eficiencia máxima del motor, como se puede observar en la Figura 27.

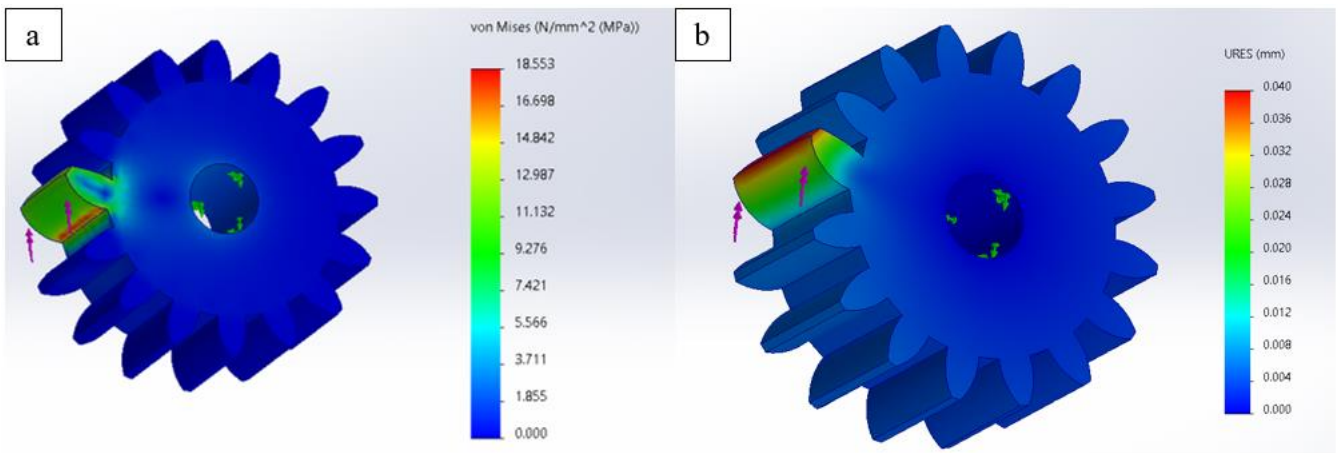


Figura 27. Estudio de elementos finitos en SolidWorks. a) Esfuerzos de von Mises, b) Desplazamiento

Los resultados obtenidos del estudio observado en la Figura 27 permiten evidenciar el esfuerzo máximo en la raíz del diente, ésta siendo una concentración de esfuerzo común según la literatura [35]. El estudio permite evidenciar la manera que fallaría el diente, y muestra el esfuerzo de von Mises máximo que sufriría el diente con el torque aplicado, que en este caso es de 18.55 MPa. Teniendo en cuenta el máximo límite a la fluencia del material, en este caso 48 MPa tomando el PLA, se obtiene un factor de seguridad para la flexión del diente de 2.58 para este valor simulado. Por otro lado, las deformaciones serán mayores en la punta del diente, siendo estas igualmente bajas con un valor máximo de 0.04 mm.

6.3.1.2 Falla por fatiga

Para evaluar la durabilidad de la superficie, es decir, el desgaste por fatiga en engranajes, se utiliza la ecuación (10) que representa el esfuerzo de contacto σ_c . La falla por fatiga ocurre cuando el esfuerzo de contacto es igual o mayor al límite de resistencia a la fatiga de la superficie.

$$\sigma_c = -Cp \left[\frac{K_v W^t}{F \cos \theta} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \right]^{1/2} \quad (10)$$

C_p es el coeficiente elástico que se obtiene como se muestra en la ecuación (11), K_v el factor dinámico, que nuevamente se toma como 1, W^t la fuerza tangencial, hallada en la ecuación (8), F el ancho de piñón, θ el ángulo de presión, r_1 el radio de curvatura de piñón y r_2 el radio de curvatura de corona.

$$C_p = \left[\frac{1}{\pi \left(\frac{1-v_p^2}{E_p} + \frac{1-v_G^2}{E_G} \right)} \right]^{1/2} \quad (11)$$

v_p es el módulo de Poisson del piñón, v_G el coeficiente de Poisson de corona, E_p el módulo de Young de piñón y E_G el coeficiente de Young de corona.

r_1 y r_2 están dados por las siguientes ecuaciones:

$$r_1 = \frac{d_p \operatorname{sen} \theta}{2} \quad (12) \quad \text{y} \quad r_2 = \frac{d_G \operatorname{sen} \theta}{2} \quad (13)$$

Donde d_p es el diámetro de paso del piñón y d_G el diámetro de paso de corona.

Al usar las ecuaciones (12) y (13), se obtiene que $r_1 = 2.73 \text{ mm}$ y $r_2 = 9.23 \text{ mm}$. Teniendo en cuenta la base de datos proporcionada por MatWeb, el coeficiente de Poisson y el módulo de Young para el PLA son 0.38 y 3.45 GPa, respectivamente. Sustituyendo estos valores en la ecuación (11) se obtiene que C_p es 641.75, y reemplazando este valor en la ecuación (10) se obtiene un esfuerzo de contacto de 36.56 MPa.

Para traducir el esfuerzo de las piezas impresas en PLA a ciclos de vida se utilizó la ecuación (14) sacada experimentalmente por [33] utilizando una orientación de impresión de 0° .

$$\sigma = -4.5949 * \log(N) + 66.4654 \quad (14)$$

Al reemplazar el valor de esfuerzo de contacto calculado, se obtiene un N de 4326787.61 ciclos, lo cual da evidencia de vida infinita para la aplicación. Con esta misma ecuación se obtiene que el máximo esfuerzo admisible para conservar la vida infinita para el PLA es de 38 N aproximadamente.

6.3.2 Tornillo de potencia

Para el movimiento telescópico se utiliza un tornillo de potencia, que es el encargado de elevar el sistema. Por lo tanto, este debe levantar la masa m de la parte superior del dispositivo, que, al incluir algunos componentes adicionales a los de parte superior del movimiento de cadera, será más pesada, por lo que se tomará de 4 kg. De acuerdo con esto, la fuerza F que actúa en el tornillo como se ve en la Figura 28 corresponde a:

$$F = mg = 4 \times 9.81 = 39.24 \text{ N} \quad (15)$$

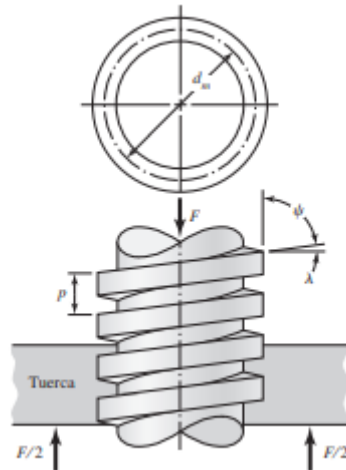


Figura 28. Fuerzas en un tornillo de potencia [13]

El tornillo utilizado para esta aplicación tiene una rosca trapezoidal, de 4 hilos, con un paso p de 2 mm y un diámetro mayor d de 12 mm. Se puede observar a que corresponde cada medida en la Figura 20. Además, el diámetro medio d_m , que se utiliza en los cálculos es:

$$d_m = d - \frac{p}{2} = 11 \text{ mm} \quad (16)$$

El diámetro menor d_r esta dado por:

$$d_r = d - p = 10 \text{ mm} \quad (17)$$

Y el avance l es el producto del paso y los hilos, es decir,

$$l = np = 8 \text{ mm} \quad (18)$$

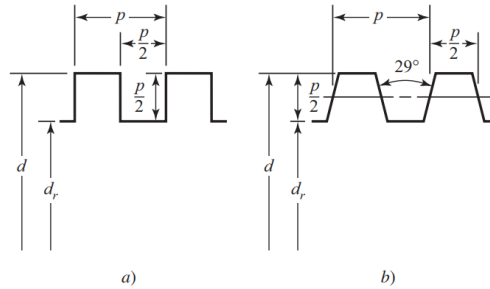


Figura 29. Rosca cuadrada y rosca ASME

Además, para roscas trapezoidales el ángulo de la rosca α es de 15° , y la fricción f se puede obtener de la Tabla 7, donde el material del tornillo es de acero, y la tuerca es de bronce. Sin embargo, como la tabla da un rango de datos y no un valor fijo se realizarán los cálculos con dos valores de f : 0.23, tomando la fricción máxima de acero seco y bronce, y 0.15, que podría ser el valor mínimo con acero seco y bronce o podría estar incluido en acero con aceite para máquina.

Tabla 7: Coeficientes de fricción f de pares roscados [13]

Material del tornillo	Material de la tuerca			
	Acero	Bronce	Latón	Hierro fundido
Acero, seco	0.15-0.25	0.15-0.23	0.15-0.19	0.15-0.25
Acero, aceite para máquina	0.11-0.17	0.10-0.16	0.10-0.15	0.11-0.17
Bronce	0.08-0.12	0.04-0.06	-	0.06-0.09

El par torsión T_R para elevar la carga está dado por la siguiente ecuación:

$$T_R = \frac{Fd_m}{2} \left(\frac{l + \pi f d_m \sec \alpha}{\pi d_m - f l \sec \alpha} \right) \quad (19)$$

Que al usar una fricción de 0.15 da 0.0866 Nm , y al usar una fricción de 0.23 da 0.107 Nm . Teniendo en cuenta que el motor funciona bien hasta un torque de 0.981 Nm según sus especificaciones [36], se tiene un factor de seguridad de 10.98 y 8.89 respectivamente.

Si el avance es muy grande o la fricción muy baja se puede dar el caso que el tornillo baje sin ningún esfuerzo externo, esto se determina con la siguiente ecuación, que al cumplirse asegura el autobloqueo, es decir, que el tornillo no baje sin esfuerzos externos.

$$\pi f d_m > l \quad (20)$$

Al tomar la fricción de 0.15, se obtiene que para que haya autobloqueo el avance debe ser menor a 4.95, mientras que para una fricción de 0.23 el avance debe ser menor a 7.59. Sin embargo, en esta ecuación solo se tiene en cuenta la fricción entre el tornillo y la tuerca, pero no toma en cuenta otro tipo de fricciones, como la fricción interna del motor que va acoplado, que es el que hace mover el tornillo. Teniendo en cuenta esto y pruebas experimentales realizadas, cuando se acopla el motor el tornillo se bloquea y no desciende sin ningún esfuerzo externo como sugieren los cálculos realizados.

El esfuerzo axial σ del tornillo esta dado por

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{4F}{\pi d_r^2} \quad (21)$$

El esfuerzo cortante esta dado por:

$$\tau = \frac{16T}{\pi d_r^3} \quad (22)$$

Utilizando estas ecuaciones se obtiene que $\sigma = 0.499 \text{ MPa}$, y en la ecuación (22) al utilizar el valor de T obtenido con la fricción de 0.23, ya que esta es la más crítica, se obtiene que $\tau = 5.46 \text{ MPa}$. Siendo ambos esfuerzos bajos, que la mayoría de los materiales pueden soportar, sobre todo el acero, por lo que no representan ningún problema.

Además, los movimientos tanto de cadera como el telescópico son lentos. El primero es con el objetivo de que la cámara tome las imágenes pertinentes para ser analizadas no superará los 5 rpm. El segundo será aún más lento, pues el sistema deberá crecer junto a la planta, por lo que los desplazamientos serán pequeños. Con los cálculos realizados se sacarán los requerimientos de resistencia que ayudarán a la selección el material adecuado para estos mecanismos y a definir los parámetros a los que trabajará el motor.

6.4 Selección de materiales y costos de fabricación

En esta sección se trabajó siguiendo la metodología Ashby para la selección de materiales. Para realizar este análisis se debe considerar que, según las condiciones de trabajo y el estudio de los mecanismos, los movimientos de la plataforma no van a requerir grandes esfuerzos mecánicos, por ende, los factores más determinantes para la selección serán los relacionados con las condiciones de campo y los costos de material para la producción de las piezas.

6.4.1 Traducir los requerimientos de diseño

En este primer paso se realizó un análisis de los requerimientos de diseño, donde se expresan los componentes de los mecanismos, su funcionalidad, seguido de las restricciones existentes para los materiales y los objetivos, evidenciando lo que se espera minimizar y maximizar. Esto se puede observar en la Tabla 8, donde inicialmente se expresan las restricciones y objetivos generales que deben cumplir todas las piezas de ambos mecanismos, posteriormente se plasman funciones, restricciones y objetivos que tienen determinadas piezas con requerimientos adicionales.

Tabla 8: Requerimientos para mecanismos de PhenoAgro

Componentes	Mecanismos de movimiento de cadera y movimiento telescópico en general	Mecanismo de cadera: Sistema de piñón acoplado a un motor eléctrico y una corona de dientes internos	Mecanismo telescópico: Sistema de acople entre un motor eléctrico de 6V y una varilla roscada. Este acople gira en el interior de dos piezas, encargadas de unir el mecanismo a los tubos, por lo que hay un movimiento relativo entre estas piezas	Anillo exterior de movimiento telescópico: anillo expuesto al ambiente y es encargado de interactuar con una ranura en el tubo interno.
Función	Soportar, rotar, subir y bajar la plataforma.	Producir la rotación de hasta 360° de la plataforma PhenoAgro, mediante la interacción de los engranes.	Subir y bajar la plataforma PhenoAgro, soportando el peso y los diversos componentes.	Guiar el movimiento de subida y bajada de la plataforma para evitar rotación.
Restricciones	<p>No- Negociable:</p> <ul style="list-style-type: none"> Resistencia a la corrosión. Baja densidad valores entre 900 y 2500 kg/m^3 <p>Deseable:</p> <ul style="list-style-type: none"> Impresión 3D (Anexo 3) Polímero termoplástico Bajo costo Resistencia a la humedad y UV 	<p>No- Negociable:</p> <ul style="list-style-type: none"> Buen acabado superficial. Límite elástico mínimo de 20 MPa <p>Deseable:</p> <p>Reducir la Fricción</p>	<p>No- Negociable:</p> <ul style="list-style-type: none"> Buen acabado superficial. <p>Deseable:</p> <p>Reducir la Fricción</p>	<p>No- Negociable:</p> <ul style="list-style-type: none"> Resistencia a la humedad y UV (con opción de utilizar un tratamiento superficial)
Objetivo	<p>Reducir costos de fabricación (Anexo 3)</p> <p>Maximizar vida útil</p>	<p>Reducir costos de fabricación y fricción.</p> <p>Maximizar vida útil</p>	<p>Reducir costos de fabricación y fricción.</p> <p>Maximizar vida útil</p>	<p>Reducir costos de fabricación</p> <p>Maximizar vida útil</p>

6.4.2 Seleccionar usando restricciones

En esta fase se busca encontrar una lista general de materiales que cumplan con las restricciones establecidas. Inicialmente, se generó la Figura 30, una gráfica Módulo de elasticidad vs Densidad donde se realizó una restricción de densidad entre 900 y 2500 kg/m^3 , ya que en este rango se encuentran los materiales más comunes y apropiados para la aplicación según los antecedentes, cuyo procesamiento es más económico siendo suficientemente robustos, descartando así las espumas y metales pesados. Una de las familias de materiales que dejó intacta la restricción fueron los polímeros, principalmente termoplásticos. Estos son más fáciles de manufacturar, lo que representa un menor costo de procesamiento. De acuerdo con esto y las restricciones especificadas anteriormente, se considera que una familia de materiales elegibles, preferibles para nuestra aplicación podría ser los polímeros. Esto debido a que por lo general son de bajo costo, y tienen una buena maquinabilidad, reduciendo así los costos de manufactura.

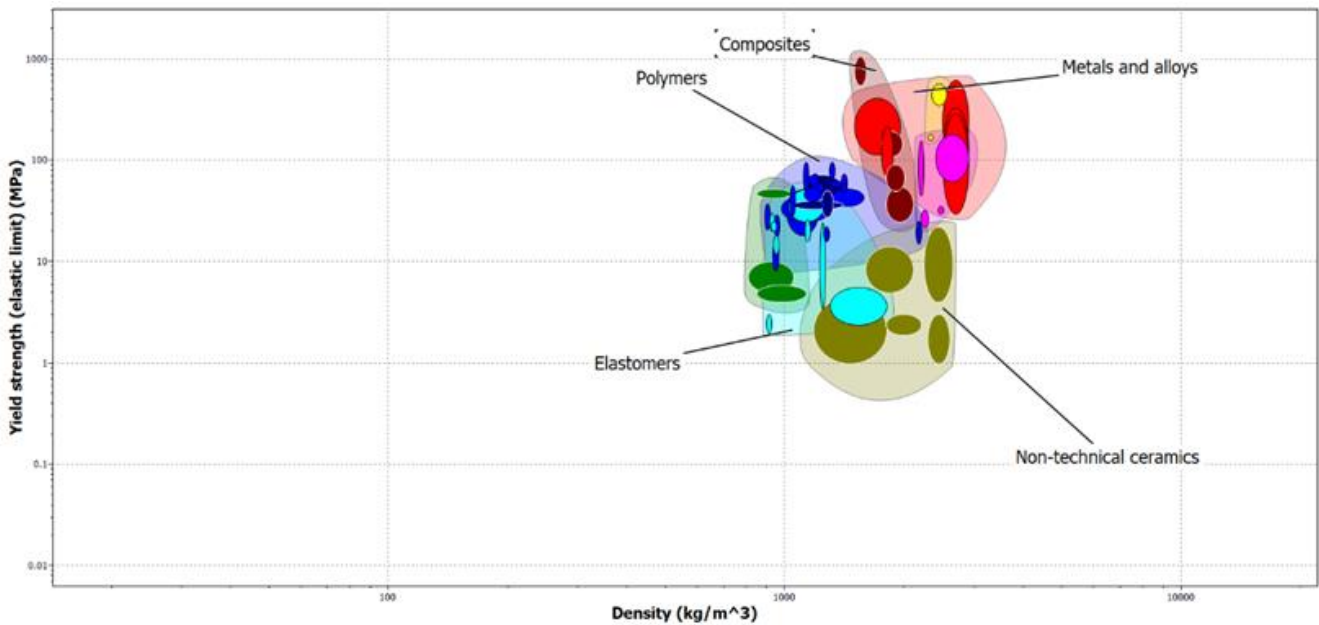


Figura 30. Límite elástico vs densidad materiales CES-Edupack con restricción de densidad [37]

En una segunda gráfica Módulo de elasticidad vs Densidad se acotó la lista únicamente a polímeros termoplásticos con la restricción inicial de densidad. Se aplicó un límite elástico entre 20 y 100 MPa, ya que, según los cálculos, el sistema de engranes del movimiento de cadera, las piezas sometidas a mayores esfuerzos, debe soportar un esfuerzo de 13.9 MPa, y teniendo en cuenta que es importante tener un factor de seguridad, y que este esfuerzo no es muy elevado se estableció un valor mínimo de 20 MPa para todas las piezas. Igualmente, no es necesario que estas piezas sean muy resistentes, pues esto dificulta el maquinado, lo que repercute en los costos, por lo tanto, se estableció un valor máximo de 100 MPa. También se establecieron restricciones en la temperatura de moldeo de 30 a 80°C, esto debido a que materiales con temperaturas de moldeo muy elevadas requieren más energía para su manufactura, lo que eleva el costo. Se decidió que el material debe estar calificado por el software con una resistencia al agua excelente o aceptable, y una resistencia a la radiación UV buena o excelente y que no tuviera ningún tipo de relleno o fibra, pues esto incrementa los precios, hace que el material sea más difícil de manufacturar, y para esta aplicación no se requieren este tipo de refuerzos. Finalmente, la lista se acotó a materiales que pudieran procesarse mediante maquinado o prototipado rápido, ya que estas son las tecnologías a las que se tiene un mayor acceso local. Como resultado a estas condiciones se obtuvo la Figura 31, donde se pueden observar la lista de materiales que podrían cumplir la función adecuadamente.

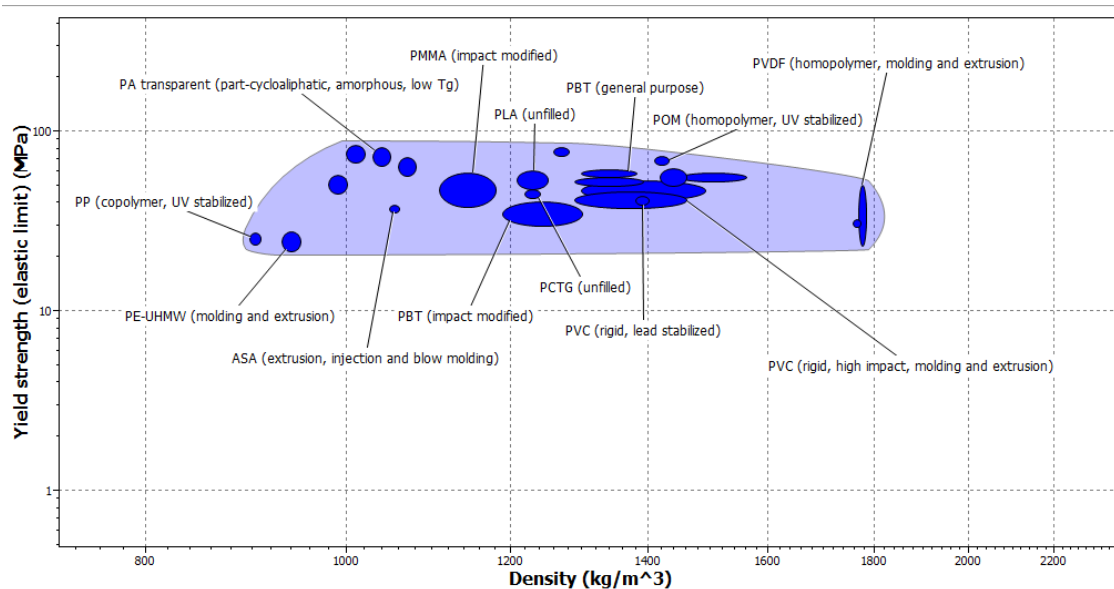


Figura 31. Limite elástico vs densidad termoplásticos CES-Edupack con restricciones [37]

Los materiales obtenidos se organizaron en la Tabla 9 donde se muestran las diferentes propiedades relevantes en las restricciones.

Tabla 9: Materiales que podrían hacer el trabajo y sus propiedades [37]

Material	Abreviación	Densidad (kg/m^3)	Limite elástico (MPa)	Temp. de moldeo ($^{\circ}C$)	Resistencia UV	Resistencia al agua
Polietileno de ultra alto peso molecular	PE-UHMW	931-949	21.4-27.6	30-50	Buena	Excelente
Polipropileno	PP	899-909	23.6-26.9	26.6-49.5	Buena	Excelente
Fluoruro de polivinilideno	PVDF	1760-1780	29.3-32.3	80-90	Excelente	Excelente
Tereftalato de polibutileno	PBT	1190-1460	30-40	70-90	Buena	Excelente
Acrilonitrilo de estireno acrilato	ASA	1050-1060	35.9-38.6	50-70	Buena	Excelente
Polimetilmetacrilato	PMMA	1110-1180	37.9-58.4	50-65	Buena	Excelente
Cloruro de polivinilo	PVC	1290-1490	39.4-43.4	20-40	Buena	Excelente
Politereftalato de ciclohexilendimetileno glicol modificado	PCTG	1220-1240	42.7-47.1	15-30	Buena	Excelente
Ácido poliláctico	PLA	1210-1250	48-60	10-38	Buena	Aceptable
Tereftalato de polietileno	PET	1290-1460	50-55	20-30	Buena	Excelente
Poliamida / Nylon	PA	1030-1080	56.7-70.8	15-90	Buena	Aceptable
Polioximetileno	POM	1410-1430	65.7-72.4	80-100	Buena	Excelente
Poliéterimida	PEI	1260-1280	73.5-81.1	70-170	Excelente	Excelente

6.4.3 Calificar usando el objetivo

Para seleccionar los materiales más apropiados para la aplicación se realizó una investigación de los 13 materiales proporcionados por el software, donde se obtuvieron las ventajas, las desventajas y las aplicaciones comunes de cada uno como se observa en la Tabla 10.

Tabla 10: Calificación de materiales seleccionados usando restricciones

Material	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones	Comentarios
PET [37]	Alta resistencia y durabilidad, bueno para soporte de condiciones ambientales (Humedad y UV), producción por FDM, económico	No es biodegradable, por lo que si a sus residuos no se les da buen manejo puede ser contaminante	Prototipado rápido, Envases, dispositivos médicos	Cumple bien los objetivos
PLA [37]	Biodegradable, fácil de imprimir usando FDM, límite elástico mayor a 48 MPa.	Descomposición más rápida que plásticos tradicionales usado en aplicaciones de baja resistencia y durabilidad.	Aplicaciones biomédicas, prototipado rápido, industria de alimentos.	Cumple bien los objetivos, sin embargo, hay que tener en cuenta su disminución de propiedades debido al ambiente.
PA [37]	Alto límite elástico, auto lubricante, resistencia mecánica, fácil mecanizado, resistencia al impacto, ligero y fácil de manejar.	Puede ser sensible a la degradación por rayos UV y a la temperatura elevada. Puede degradarse con el tiempo cuando se expone a la humedad.	Engranajes, ruedas, bujes, poleas, piñones, partes de válvulas, etc.	Podría utilizarse en piezas que no tengan contacto con humedad ni con rayos UV, y sobre todo en las piezas internas que requieren poca fricción.
ASA [37]	Excelente resistencia al agua y buena resistencia a rayos UV, no cambia sus propiedades después de mucho tiempo a la intemperie, alta resistencia al impacto, alta dureza y rigidez, puede manufacturarse por FDM.	Tóxico cuando se quema.	Componentes aeroespaciales, partes de automóviles, juguetes, paneles exteriores.	Puede ser buena opción sobre todo para piezas que se ubiquen en el exterior. Es más costoso que el PET y el PLA.
PP [37]	Baja densidad, muy resistente al agua, a ácidos y buena resistencia a rayos UV, más duro y resistente al calor que el polietileno, se pueden obtener piezas por manufactura aditiva.	Límite elástico bajo (menos de 30MPa).	Partes automotrices, componentes de aparatos, contenedores, partes mecánicas generales.	Tiene buenas propiedades y se usa para aplicaciones similares.

PE-UHMW [37], [38]	Baja densidad, muy resistente al agua, a ácidos y buena resistencia a rayos UV, económico, alta tenacidad y ductilidad.	Límite elástico bajo (menos de 30MPa).	Partes de máquinas, cojinetes, engranes, articulaciones artificiales.	Tiene buenas propiedades y se usa para aplicaciones similares, sin embargo, su manufactura, para las piezas deseadas, con geometrías complejas puede ser complicada.
PBT [39]	Limite elástico mayor a 50 MPa, excelente resistencia al agua y buena resistencia a rayos UV, rígido y resistente a la deformación térmica, buena propiedad de fricción y resistente al desgaste, resistente al impacto.	Es necesario adicionar la protección a UV.	Conectores eléctricos, engranajes, paneles resistentes al calor, partes exteriores de carros, suiches, bobinas.	El PBT es más difícil de manufacturar para esta aplicación. Para manufactura aditiva se puede encontrar filamento de PC-PBT, pero en Colombia no es muy común.
PVC [37]	Resistente al ambiente (Agua, químicos y UV), bajo costo, disponibilidad nacional.	Baja resistencia al impacto, mal desempeño en altas temperaturas y no es biodegradable.	Tuberías, fibras, cables.	Sus propiedades son buenas (aunque hay materiales más aptos), pero su manufactura para esta aplicación es complicada.
PMMA [37] [40]	Excelente resistencia al agua y buena resistencia a rayos UV, reciclable, alta dureza, buenas propiedades mecánicas.	No muy resistente al impacto sin modificaciones, elevado costo (\$49/kg).	Luminarias, letreros, embalajes, gafas de seguridad.	Buenas propiedades, pero no son tan necesarias y es costoso.
POM [37], [41]	Alto límite elástico, baja absorción de agua, alta rigidez, menor desgaste.	La radiación UV puede llevar a la degradación del material. Relativamente costoso en comparación con otros plásticos. No resistente a los ácidos fuertes y los álcalis.	Engranajes, resortes, cadenas, tornillos, bombas de combustible, inhaladores, palancas del mobiliario.	No cumple completamente con los objetivos porque es poco costoso y no es resistente a UV.
PVDF [37],[42]	Excelente resistencia al agua, a ácidos y a rayos UV.	Temperatura de moldeo alta (mayor de 80°C), costoso (\$190/kg).	Industria de procesos químicos.	Se descarta por el precio y no se necesita que sea tan resistente al agua y a componentes químicos.
PCTG [37], [43], [44]	Alta resistencia al impacto, resistencia química y transparencia y disponibilidad de producción por FDM.	Alto costo (\$40/kg), alta tasa de deformación, no biodegradable.	Envases de alimentos, dispositivos médicos, componentes electrónicos.	Se descarta por el precio y porque sus propiedades no son completamente adecuadas para la aplicación.
PEI [37], [45]	Alto límite elástico, excelente resistencia a UV y agua	Costoso (\$125/kg)	Componentes eléctricos	Se descarta porque se desea que el material sea económico

Con esto se pudieron descartar inmediatamente materiales como el PVDF, PCTG y PEI, siendo los más costosos de la lista, con propiedades muy específicas, como excelente resistencia al agua, rayos UV y químicos, que, aunque en esta aplicación eran relevantes, el precio es algo que prima sobre ellas. Además, debido a la complejidad de las piezas se consideró que la manufactura aditiva podría ser una buena opción, disminuyendo los costos de procesado y reduciendo residuos, por lo tanto, se favorecieron a los materiales que tuvieran esta posibilidad de manufactura. En la columna de comentarios de la tabla se especifica por qué se descartaron la mayoría de los materiales, quedando únicamente los primeros 5, que son los que mejor cumplen con los requerimientos y los objetivos, de los cuales se buscará la información soporte para elegir el material más apto de todos.

6.4.4 Información de soporte

Para completar esta sección se investigó información de soporte de los 5 materiales que cumplieron mejor los objetivos, según lo investigado y analizado anteriormente. En esta fase se busca tener más información de cada material, para así seleccionar el o los materiales a usar. Principalmente se buscó información del material para FDM, pues este es un método de manufactura que permite realizar geometrías complejas, tiene una disponibilidad local y además permite ahorrar material, utilizando solo el necesario, y tal vez algunos soportes reduciendo el costo del material utilizado.

Teniendo en cuenta la investigación de los materiales y enfocándonos en las restricciones y objetivos planteados en la Tabla 8 se decidió que el material a implementar en esta aplicación será el PETG, utilizando el método de manufactura FDM y sus especificaciones se pueden observar en la Tabla 11. Este material fue elegido, debido a que tiene buenas propiedades para la aplicación, es de los más económicos y es fácil de conseguir y manufacturar de manera local. Se seguirán las recomendaciones encontradas en la literatura y registradas en la tabla para producir las piezas con los parámetros apropiados para una mayor durabilidad y que cumplan adecuadamente las funciones. La información de los otros 4 materiales se puede ver en el Anexo 1.

Tabla 11: Propiedades e información del PETG

PETG para FDM [46], [47]	
Propiedades generales Densidad: 1290-1390 kg/m^3 Precio: 1kg de filamento por \$ 80 000	Propiedades térmicas Conductividad térmica: 0.138-0.151 W/m°C Expansión térmica: 115-119 $\mu strain/^\circ C$ Temperatura de servicio máximo: 55- 65 °C
Propiedades mecánicas Módulo de Young: 2.8- 3GPa Dureza Vickers: 2- 5 HV Resistencia a la compresión: 50-60 MPa Tenacidad a la fractura: 4.75-5.25 $MPa \cdot \sqrt{m}$	Propiedades eléctricas Resistividad: $3.3 \times 10^{20} - 3 \times 10^{21} \mu ohm \cdot cm$ Constante dieléctrica: 3.5-3.7
Propiedades del PETG para FDM: tiene una excelente adhesión de capas y la impresión tiene menos deformaciones y encogimientos que el PLA. Tiene buena resistencia y baja contracción.	
Especificaciones técnicas: Diámetro: 1,75 mm Tolerancia: +/- 0.03 mm Velocidad de impresión: 20-70 mm/s Recomendar temperatura de impresión: 230-250 °C Temperatura de la plataforma: 80-100 °C El espesor de capa y la densidad de relleno tienen un gran impacto en la resistencia a la tracción. La rugosidad de la superficie es inversa a la densidad de relleno	
Usos: es ideal para objetos que experimenten estrés repentino y prolongado, como piezas mecánicas y componentes de protección	

6.4.5 Ensayos filamento PETG

Para comprobar el funcionamiento del material seleccionado a través del método de Ashby y el método de manufactura propuesto se decidió realizar ensayos mecánicos de flexión y tensión con PETG impreso mediante FDM a distintas densidades de relleno.

Los resultados de este ensayo se registraron en la Tabla 12 y en la Figura 32. Se evidenció que a medida que aumentamos la densidad de relleno en las probetas, sus propiedades mecánicas aumentan. Se observó que los resultados son menores a los reportados en literatura para PETG manufacturado de manera tradicional, teniendo un límite elástico de 47.9 MPa, siendo el más cercano al real las probetas con 100% de relleno. Por otro lado, el módulo de elasticidad obtenido se acerca más al valor de literatura, que se encuentra entre 2.01 y 2.11 GPa. En la tabla 12 igualmente se registra el coeficiente de variación de los datos, donde se evidencian en la mayoría de los casos valores menores a 20%. Con este ensayo igualmente se puede analizar que el material y el método de manufactura por FDM, serán aptos para las condiciones mecánicas a las que se someten las piezas.

Tabla 12. Resultados ensayo de tensión para piezas impresas en 3D a diferentes densidades de relleno

Densidad de relleno (%)	50		75		100	
	Promedio	Coefficiente de variación (%)	Promedio	Coefficiente de variación (%)	Promedio	Coefficiente de variación (%)
Límite de fluencia (MPa)	14.63 (± 0.68)	4.68	20.81 (± 1.11)	5.37	29.21 (± 1.52)	5.24
Esfuerzo último (MPa)	20.67 (± 0.06)	0.28	24.84 (± 0.07)	0.31	32.57 (± 2.74)	8.42
Elongación a rotura (%)	3 (± 0.46)	15.28	2.79 (± 0.26)	9.34	2.33 (± 0.75)	32.17
Módulo de elasticidad (GPa)	1.17 (± 0.13)	10.92	1.38 (± 0.09)	6.64	2.063 (± 0.02)	1.01

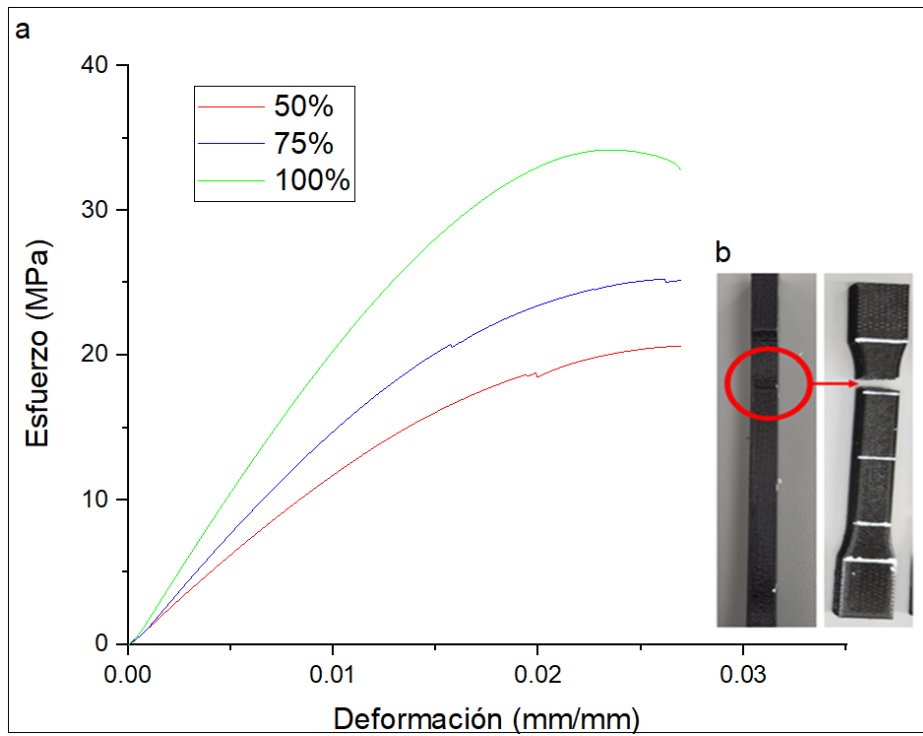


Figura 32. a) Esfuerzo de tensión vs deformación de probetas a 3 densidades de relleno, b) Falla en prueba de tensión

Al realizar las pruebas se evidenció en algunos casos que las probetas fallaban en un mismo punto y fuera del área esperada de fallo. Al analizar las probetas detalladamente se observó que este punto era donde se unía el final de la impresión y quedaba un pequeño concentrador de esfuerzo por el cual iniciaría la falla, este se ve con mayor claridad en la Figura 31b. Por lo tanto, es probable que esta adhesión ocasione una falla prematura de la pieza.

Los resultados del ensayo a flexión se registraron en la Tabla 13 y en la Figura 33. Se evidenció que a medida que aumentamos la densidad de relleno en las probetas, su esfuerzo ultimo también aumenta. En este segundo ensayo se obtuvieron valores de coeficiente de variación bajos, lo cual nos dice de la poca variabilidad de los resultados obtenidos por cada probeta. En este caso se evidencia que el material y su manufactura proporcionan piezas con un alto grado de flexibilidad, lo cual es positivo para piezas impresas como el piñón y la corona en el mecanismo de cadera. Estos altos esfuerzos permiten a las piezas aguantar altos esfuerzos de flexión sin deformarse permanentemente.

Tabla 13: Resultados ensayo de flexión para piezas impresas en 3D a diferentes densidades de relleno

Densidad de relleno (%)	50		75		100	
	Promedio	Coefficiente de variación (%)	Promedio	Coefficiente de variación (%)	Promedio	Coefficiente de variación (%)
Esfuerzo último (MPa)	47.15 (±1.32)	2.79	49.45 (±2.32)	4.69	52.77 (±1.33)	2.52
Elongación máxima (%)	3.8 (±0.46)	12.11	3.96 (±0.02)	0.44	4.19 (±0.15)	3.47
Módulo de flexión (GPa)	1.81 (±0.15)	8.47	1.86 (±0.07)	3.77	1.84 (±0.02)	0.94

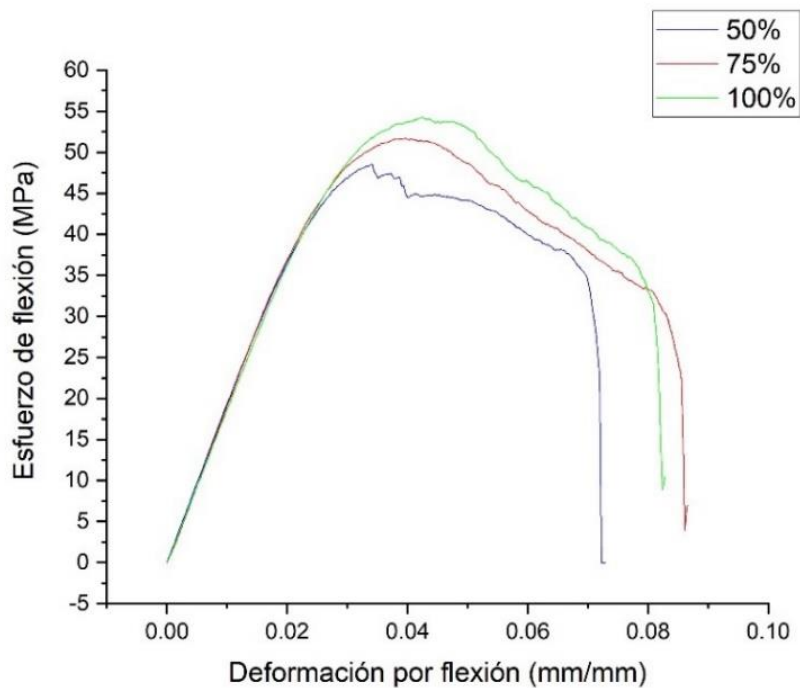


Figura 33. Esfuerzo de flexión vs deformación de probetas a 3 densidades de relleno

6.5. Diseño para manufactura y ensamble

El diseño para la manufactura y el ensamble es algo que se tiene en cuenta a lo largo de todo el proceso de diseño. Desde que se realizan los diseños CAD, sus mejoras y su evaluación con prototipado rápido, se tiene en cuenta que las piezas deben ser fáciles de manufacturar y ensamblar, sin embargo, en esa etapa del proceso primaba la funcionalidad. En este capítulo se seguirá el proceso del diseño para la manufactura y ensamble, donde se realiza la estimación de costos y luego se buscan diferentes formas de reducirlos.

6.5.1 Estimar los costos de manufactura y ensamble

Para estimar los costos de manufactura se identificaron todas las piezas necesarias para ensamblar cada uno de los mecanismos como se observa en la Figura 34. A partir de estas se realizó una cotización de las piezas necesarias con proveedores de la Pontificia Universidad Javeriana Cali y los valores identificados se registraron en las Anexo 1. Los costos estimados de las piezas se dividen entre piezas estándares y piezas personalizadas, las primeras hacen referencia a motores, tornillos, tuercas y tuberías, y las segundas son las piezas diseñadas por los autores. En las Tablas 14 y 15 se observan todas las piezas necesarias para ensamblar los mecanismos de cadera y telescópico junto con la estimación total de precio por mecanismo. Esta estimación se realizó haciendo cotizaciones de las piezas al por mayor, comprando los componentes para las 100 plataformas, y con esto se obtuvo el precio estimado por plataforma que es el mostrado en las tablas.

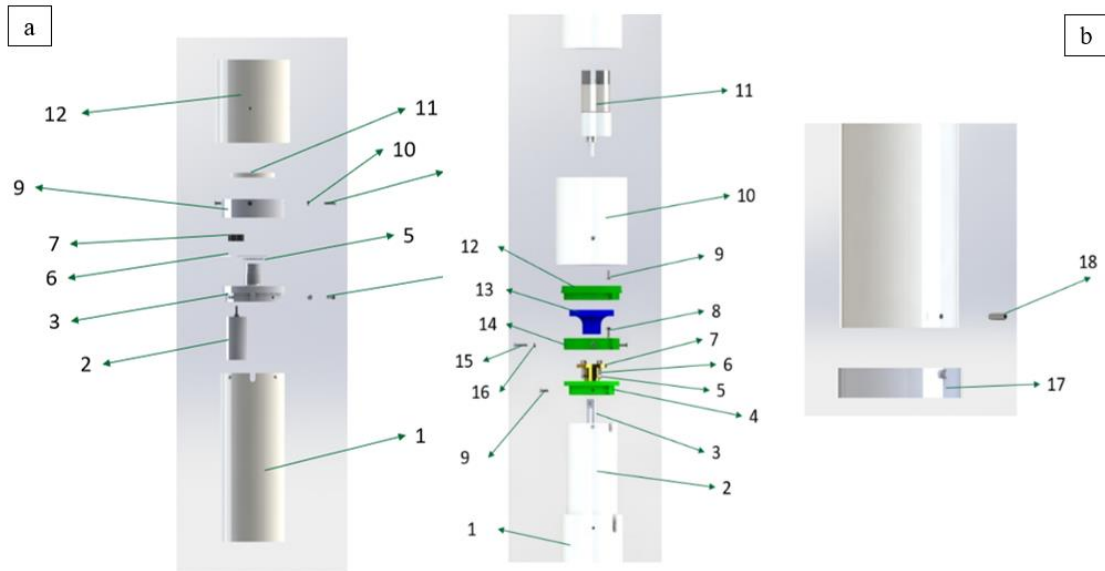


Figura 34. a) Piezas movimiento de cadera, b) Piezas movimiento telescópico

Tabla 14. Piezas movimiento de cadera

ID	Elementos	Material	Cantidad
1	Tubo PVC	PVC	0.2 m
2	Motor de cadera	N/A	1
3	Tapa inferior acople motor 25	PETG	1
4	Tornillo en acero 304 cabeza plana M3 x 10mm	Acero inoxidable 304	4
5	Anillo de retención	Acero inoxidable 304	1
6	Anillo antifricción	Acrílico	1
7	Piñón	PETG	1
8	Tornillo en acero 304 cabeza plana M3 x 13mm-12mm	Acero inoxidable 304	4
9	Tapa con corona interna	PETG	1
10	Tuerca hexagonal M3	Acero inoxidable 304	8
11	Tope	PETG	1
12	Unión tubo	PVC	1
Estimación de precio	\$ 479,841.95		

Tabla 15. Piezas movimiento telescópico

ID	Elementos	Material	Cantidad
1	Tubo PVC 2.5 in	PVC	1 m
2	Tubo PVC 2 in	PVC	1.2 m
3	Varilla roscada T12*1200	Acero	1
4	Tapa soporte de tuerca para varilla	PETG	1
5	Tuerca M4	Acero inoxidable 304	4
6	Tornillo M4 x 10	Acero inoxidable 304	4
7	Tuerca para varilla roscada	Cobre	1
8	Tornillo M3 x 25 cabeza avellanada	Acero inoxidable 304	4
9	Tornillo M3 x10 cabeza avellanada	Acero inoxidable 304	10
10	Unión de 2.5 In	PVC	1
11	Motor 37 mm	N/A	1
12	Tapa motor	PETG	1
13	Acople motor	PETG	1
14	Anillo de fijación	PETG	1
15	Tornillo M3 x 16 cabeza avellanada	Acero inoxidable 304	4
16	Tuerca M3	Acero inoxidable 304	12
17	Anillo guía	PETG	1
18	Prisionero M3 x 10	Acero inoxidable 304	2
Estimación de precio	\$ 1,032,084.36		

Como se mencionó en el capítulo anterior, las piezas personalizadas se producirán mediante manufactura aditiva, lo que reduce los costos para las piezas complejas, además que hay piezas que no se pueden hacer mediante otros métodos como se ve en el Anexo 3.

Además de los costos de manufactura es necesario tener en cuenta los costos del ensamblaje, ya que entre mayor sea el tiempo de procesamiento aumentan las horas que debe trabajar el encargado en esto, incrementando así los costos asociados a esta persona y al espacio de operación. Inicialmente se hizo un análisis de cada pieza para ver en qué medida estas tenían las características de una pieza ideal, como se puede ver en las Tablas 16 y 17. Para ver la eficiencia de ensamblaje se calcula el índice DFA, que es la relación entre el tiempo mínimo teórico del ensamblaje y una estimación real del ensamblaje. Realizando una estimación real cronometrando el tiempo experimentalmente se obtuvo un índice DFA para el movimiento de cadera de 0.079 y para el movimiento telescópico de 0.049 siendo lo ideal 1.

Tabla 16. Características ideales de las piezas en el mecanismo de movimiento de cadera

Características ideales de una pieza	3	4	7	10	11	12	13	14	17
La pieza se inserta desde arriba	si	si	si	si	si	si	si	no	no
La pieza tiene alineamiento propio	si	si	si	no	no	si	si	si	si
No es necesario orientar la pieza	necesita	necesita	necesita	necesita	necesita	necesita	necesita	necesita	necesita
Requiere solo una mano para el ensamble	no	no (tornillos)	si	no (tornillos)	no	no (tornillos)	si	no (tornillos)	no (tornillos)
No requiere de herramientas	no requiere	Para asegurar	Para asegurar	Para asegurar	Si requiere	Para asegurar	no requiere	Para asegurar	Para asegurar
Se ensambla en un solo movimiento lineal	no	tornillos no	tornillos no	tornillos no	no	tornillos no	si	tornillos no	tornillos no
Se asegura inmediatamente al insertarla	no	no	no	no	no	no	no	no	no

Tabla 17. Características ideales de las piezas en el mecanismo de movimiento telescópico

Características ideales de una pieza	2	3	7	6	9	11	12
La pieza se inserta desde arriba	si	si	si	si	si	si	si
La pieza tiene alineamiento propio	no	si	si	no	si	si	no
No es necesario orientar la pieza	necesita	necesita	necesita	cumple	necesita	necesita	necesita
Requiere solo una mano para el ensamble	no	no (tornillos)	si	si	si	si	no (tornillos)
No requiere de herramientas	Si requiere	Para asegurar	cumple	cumple	cumple	cumple	Para asegurar
Se ensambla en un solo movimiento lineal	no	tornillos no	si	si	no	si	tornillos no
Se asegura inmediatamente al insertarla	no	no	si	no	si	no	no

Como se puede observar en las Tablas 16 y 17 lo que más distancia a las piezas de ser ideales es el aseguramiento mediante tornillos, que hace que requieran herramientas, movimientos no lineales y que sea necesario utilizar más de una mano. Además, por lo general es necesario orientar la pieza, y aunque es intuitivo y algunas tienen alineamiento propio, esto es un factor que todavía puede mejorar.

6.5.2 Reducir costos de manufactura y ensamble

Al realizar la estimación de costos se evidenció que los componentes que más aumentan el precio son los motores, los tubos, la varilla en el caso del mecanismo telescópico y las piezas personalizadas impresas en 3D, de los cuales, estas últimas son a las que se les puede realizar modificaciones para disminuir su costo. Para ello se utilizaron diferentes estrategias para el diseño o rediseño para manufactura aditiva que se muestran en la Figura 35.

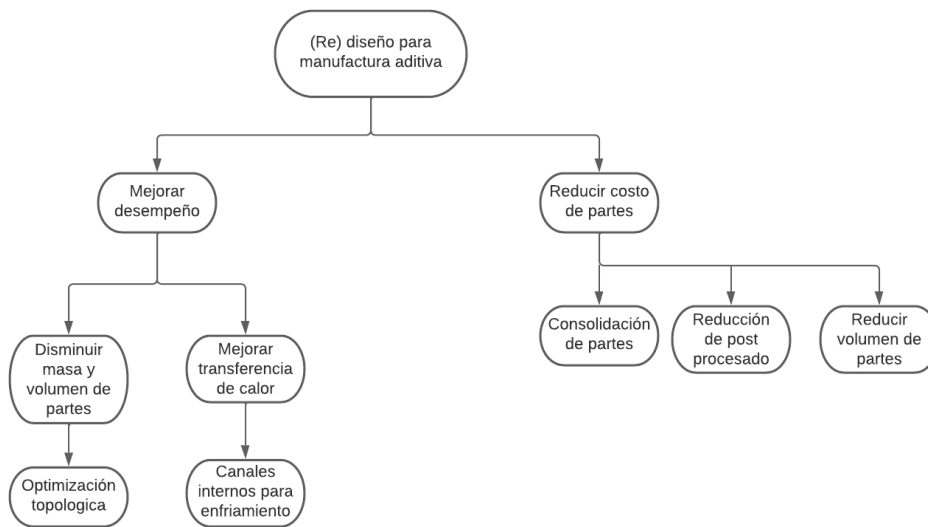


Figura 35. Diagrama (re) diseño en manufactura aditiva [48]

Teniendo en cuenta lo anterior se tomó la decisión de enfocarse en la modificación de las piezas con mayor volumen que son las que más aumentan los costos de producción. Para esto se utilizaron técnicas de reducción de precios y mejora de desempeño, como la optimización topológica y la consolidación de piezas, aplicadas en la corona con engrane interno y la tapa soporte del motor para el mecanismo de cadera y las tres piezas superiores para el acople de la varilla y el motor para el mecanismo telescópico.

6.5.2.1 Optimización topológica

Para realizar la optimización topológica se utilizó la herramienta de simulación en la opción de estudio topológico del software SolidWorks. Para ello se estableció como material el PET, se fijaron los lugares donde se ubican tornillos, se aplicó una carga que simula el peso de la parte superior de la plataforma y se busca reducir el peso en un 50%. Al aplicar todo esto da como resultado la pieza con zonas amarillas, que son las que se deben conservar, y zonas azules, que son las que pueden removerse sin afectar el correcto funcionamiento, como se muestra en la Figura 36. Con este resultado se puede generar una malla, la cual sirve como guía para quitar el material innecesario de las piezas originales, finalmente obteniendo piezas con menos material y con mismas capacidades mecánicas.

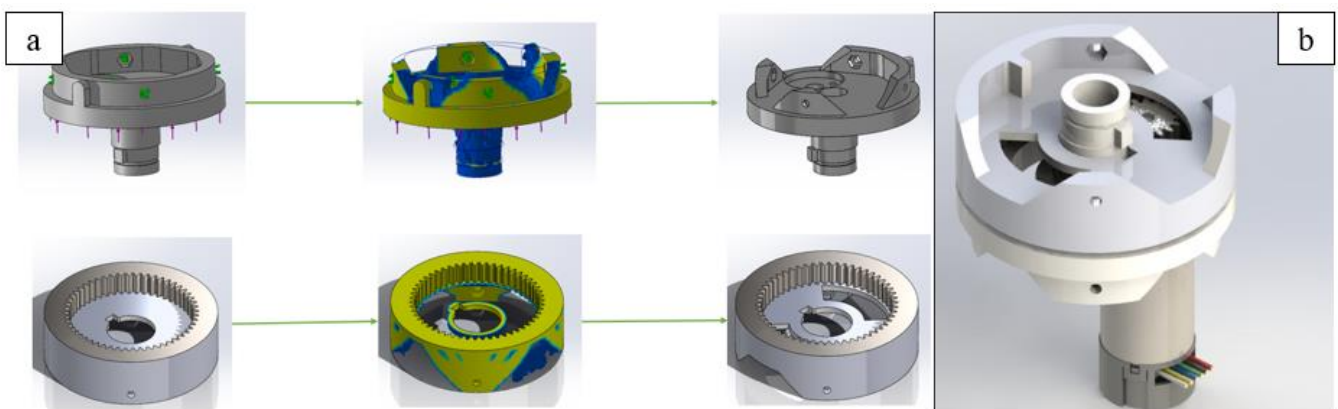


Figura 36. a) Proceso de optimización topológica de piezas de mecanismo de movimiento de cadera, b) Ensamble con piezas optimizadas

Posteriormente cada una de las piezas se prepararon usando el software UltiMakerCura, el cual permite identificar cuanto material es utilizado y cuál sería el precio de este. El resultado se registró en la Tabla 18.

Tabla 18: Peso, costo y tiempo de impresión de piezas

Pieza	Peso (g)	Costo de material (COP)	Tiempo de impresión (min)
Tapa con corona interna	35	2426	255
Tapa con corona interna optimizada	30	2078	228
Tapa inferior acople motor 25	38	2637	279
Tapa inferior acople motor 25 optimizada	33	2280	251

En ambos casos se logra reducir el peso de las piezas en 5 gramos, el costo del material en aproximadamente 400 pesos y el tiempo de impresión se reduce en 55 minutos. A la hora de producir 100 dispositivos estos cambios permiten disminuir 1000 g de materia prima y 5500 minutos, es decir, más de 90 horas. Teniendo en cuenta la producción masiva de piezas, esto ayudaría considerablemente al ahorro de material, de dinero y mejoraría los tiempos de producción, todo esto manteniendo la calidad de las piezas para su aplicación.

6.5.2.2 Consolidación de piezas

Aprovechando las ventajas de la impresión 3D se consolidaron 3 piezas como se observa en la Figura 37. Inicialmente estas partes se habían dividido en tres, debido a que la del medio tendría movimiento y la inferior serviría para asegurar esta. Sin embargo, el método de manufactura por FDM permite imprimir piezas con piezas internas que puedan tener movimiento, esto mediante soportes que posteriormente serán retirados. Este proceso además de reducir piezas y facilitar el ensamble, también reduce la cantidad de tornillos, especialmente para esta unión se usarían 4 tornillos de 25 mm de largo, siendo estos diferentes a todo el resto, los cuales mediante esta técnica podrán ser eliminados. Igualmente, en el diseño anterior el motor iría unido a la pieza mediante 6 tornillos, sin embargo, al notar que el motor entraba a presión y no se desacoplaría fácilmente, se decidió eliminar estos tornillos, realizando un hundimiento con la forma del motor, para así evitar su rotación. Todo esto permitió eliminar 10 tornillos y 4 tuercas, lo que permite ahorrar 137 000 pesos aproximadamente en la producción de 100 unidades de este mecanismo. Además de disminuir componentes, esto acerca las piezas a ser más ideales y disminuir considerablemente el tiempo de ensamblaje.

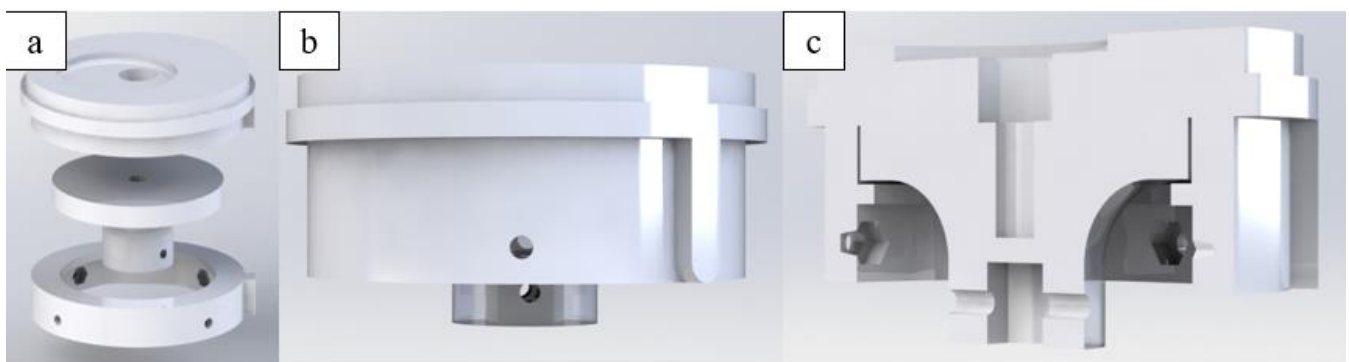


Figura 37. Consolidación de piezas mecanismo telescópico, a) Vista explosionada de piezas a consolidar, b) Nueva pieza consolidada, c) Vista en sección de nueva pieza

En esta fase del proceso de diseño igualmente se ajustaron las tolerancias de diferentes piezas para evitar hacer un postprocesado y facilitar más el ensamble. Por otra parte, se decidió mantener la mayoría de los tornillos, pues estos evitan un desacople de las piezas debido a esfuerzos inesperados y mantiene el ensamble robusto y funcional.

6.5.2.3 Sostenibilidad de producción

Al escoger manufactura aditiva como método de fabricación de las piezas personalizadas, además de reducir precios y facilitar la construcción de piezas complejas, se realiza una producción sostenible. Estas tecnologías son consideradas ambientalmente sostenibles, pues producen menos emisiones de CO_2 . Además, en comparación con métodos de manufactura convencionales, la manufactura aditiva utiliza menos productos químicos peligrosos, como lo pueden ser lubricantes y fluidos de corte y especialmente el FDM utiliza materiales no tóxicos con bajos puntos de fusión y bajos niveles de ruido, lo que reduce la contaminación [49]. Sin embargo, la manufactura aditiva puede llegar a producir emisiones de partículas ultrafinas, por lo que no es recomendado realizar este proceso en recintos cerrados sin circulación de aire.

La mayor ventaja de la manufactura aditiva en comparación con los otros métodos convencionales es que esta puede llegar a disminuir los desperdicios inclusive por encima del 90% en comparación con los otros [49]. Esto debido a que únicamente se emplea la cantidad de material necesaria, además de unos pocos soportes, además los materiales usados para ello, como el PETG pueden ser reciclados y es posible convertir los desechos en filamento nuevamente para ser usado para FDM. Esto permite minimizar la masa del ciclo de vida del material y la energía gastada para la sustracción y transporte de este, se necesitan menos insumos de materiales y menos manipulación, además de redes de suministro más cortas. Además, debido a que los componentes fabricados por este método son más ligeros, se minimiza el uso de energía durante la fase de uso de los productos [49].

En resumen, la manufactura aditiva permite crear piezas complejas con mejor desempeño funcional y operativo, disminuye el uso de energía intensiva y contaminante durante la producción, disminuye la cadena de suministro de las materias primas, lo que a su vez ocasiona que disminuyan las emisiones provocadas por el transporte de este y permite producción local [49]. Además, en un futuro se realicen estudios para mejorar su eficiencia, estandarizar parámetros para obtener las propiedades deseadas y disminuir emisiones de partículas ultrafinas.

6.6 Validación e implementación

A partir del trabajo realizado se logró obtener un nuevo prototipo con los mecanismos integrados y mejorados. En esta nueva versión se simplificó la manufactura y el ensamble, estandarizando las formas de las piezas (adaptadas a la forma de los tubos), el material (PETG y PVC), los métodos de manufactura utilizados (FDM y maquinado CNC) y la tornillería utilizada (en su mayoría tornillos avellanados M3 y tuercas hexagonales M3). En la Figura 38 se evidencia igualmente una mejora en el aspecto visual la plataforma. En el anexo 4 se encuentran los planos a detalle de cada uno de estos prototipos.

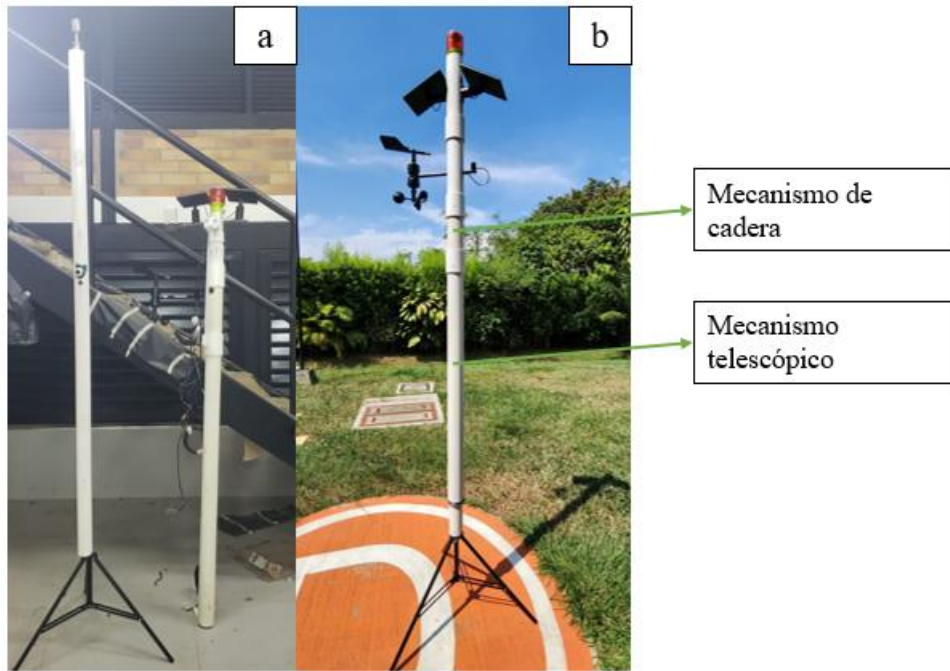


Figura 38. Prototipos de PhenoAgro. a) Versión antigua, b) Versión modificada

6.6.1 Mecanismo de cadera

Para probar el mecanismo de cadera en su versión final, se construyeron dos prototipos observados en la Figura 39a. El de la izquierda tiene las piezas diseñadas sin ningún tipo de modificación y el de la derecha tiene la implementación de las piezas con optimización topológica. Ambos prototipos se pusieron a prueba conectando el motor a una fuente de poder, donde se estableció como límite 5 voltios y 0.290 amperios y ubicando los módulos que debe de girar sobre los mecanismos construidos, como se observa en la Figura 39b.

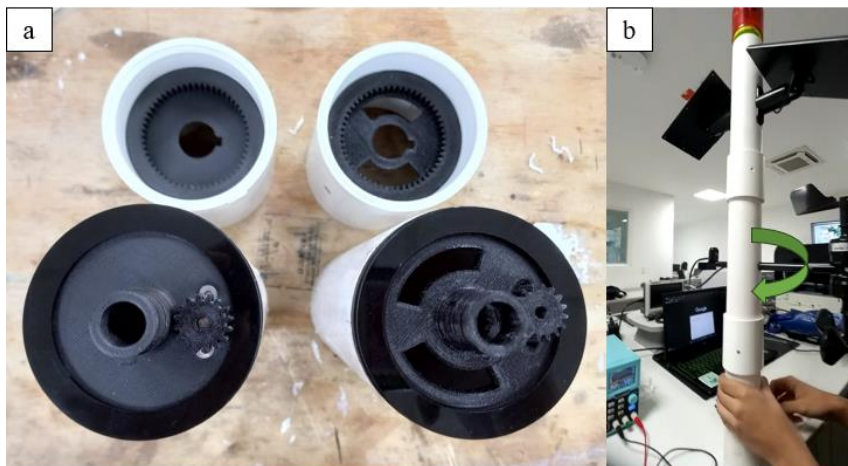


Figura 39. Pruebas de implementación en mecanismo de cadera. a) Prototipo en su versión final, b) Configuración para prueba

Existe una relación directa entre la corriente y el torque generado por el motor, a partir de la información del motor utilizado [50] se estableció la ecuación 23:

$$\tau = 1.14524I - 0.06736 \quad (23)$$

Donde τ es el torque en Nm que es equivalente al torque del piñón y I es la corriente en Amperios.

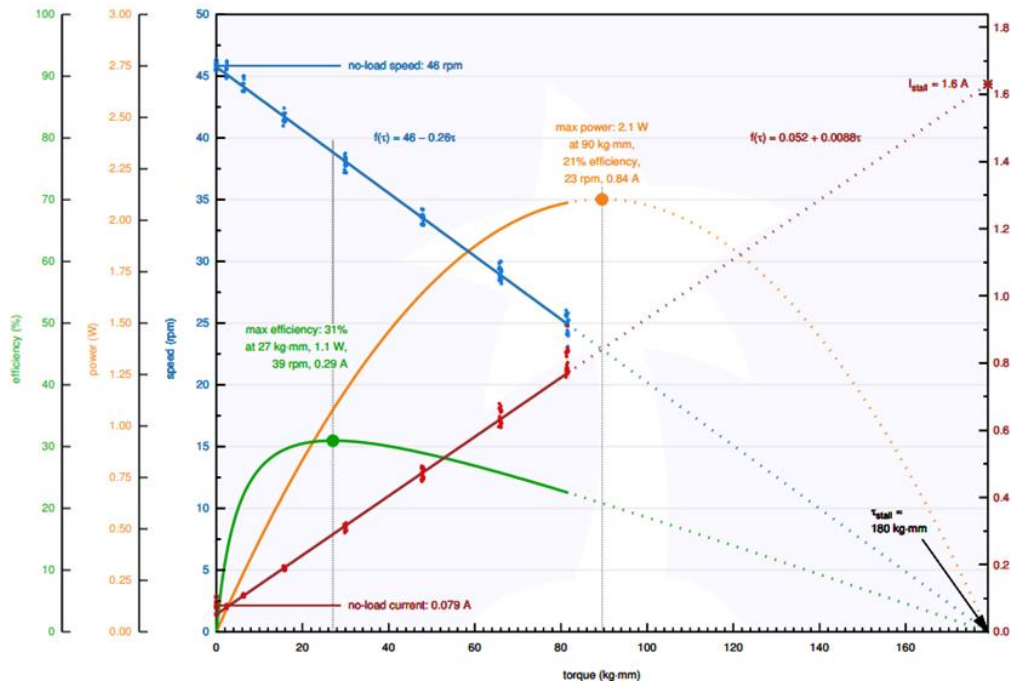


Figura 40. Rendimiento de motorreductor 172:1 25D MP 12V [50]

En la Figura 40 se observa la gráfica de rendimiento del motor utilizado, en esta se puede observar la relación lineal que existe entre la corriente (A, eje y a la derecha) y el torque (kg*mm). La gráfica también nos permite visualizar la región a la cual el motor funcionaría sin problemas, soportando un torque máximo de aproximadamente 80 kg*mm que equivalen a 0.784 Nm cuando se consume una corriente 0.750 A.

Antes de realizar las pruebas se pesaron nuevamente los módulos que se ubican en la parte superior del mecanismo, obteniendo un peso de: 2.18 kg

Al realizar las pruebas con la fuente de poder para el prototipo sin piezas modificadas se observó que el motor consume 0.090 A. Al reemplazar en la ecuación 23 obtenemos un torque del piñón será de 0.0357 Nm. Valor que al reemplazar en las ecuaciones 8 y 9 se obtiene una fuerza tangencial de 4.4 N y un esfuerzo en el diente del piñón de 1.88 MPa. Posteriormente se probaron las piezas optimizadas topológicamente, con estas pruebas se observó que la corriente consumida ahora es de 0,12 A, lo cual equivale a un torque de 0.070 Nm, esto equivale a una fuerza tangencial en el diente de 8.7 N y un esfuerzo en el diente de 3.69 MPa. Como se esperaba este en ambos casos los esfuerzos tienen valores bajos que están por debajo del límite de fluencia calculado experimentalmente para las piezas en PETG a 50 % de relleno. Los resultados también se encuentran dentro del rango permisible para el correcto funcionamiento del motor.

6.6.2 Mecanismo telescópico

Para probar este mecanismo se realizó un prototipo final, donde, debido a que la parte electrónica no se encontraba completamente desarrollada y los módulos superiores impedían conectar los cables a la fuente, se ubicaron cinco pesas junto a un tubo y una unión, como se ve en la Figura 41, con un peso similar al que se midió para los módulos, es decir: 2.8 kg. Este prototipo se puso a prueba conectando el motor a una fuente de poder, donde se estableció como límite 4.5 voltios y 0.74 amperios.

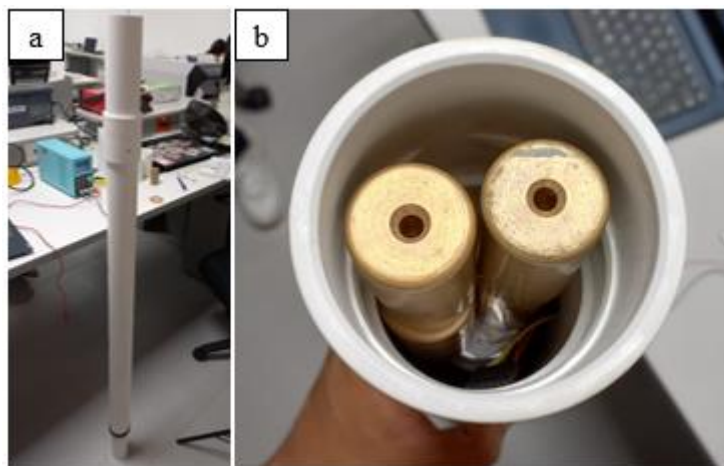


Figura 41. Pruebas de implementación de mecanismo telescópico. a) Configuración para prueba, b) Configuración de pesas

Sabiendo que existe una relación directa entre la corriente y el torque generado por el motor, a partir de la información del motor utilizado [36] se estableció la ecuación 24:

$$\tau = 0.94203I - 0.10866 \quad (24)$$

Donde τ es el torque en Nm que es equivalente al torque de la varilla y I es la corriente en Amperios.

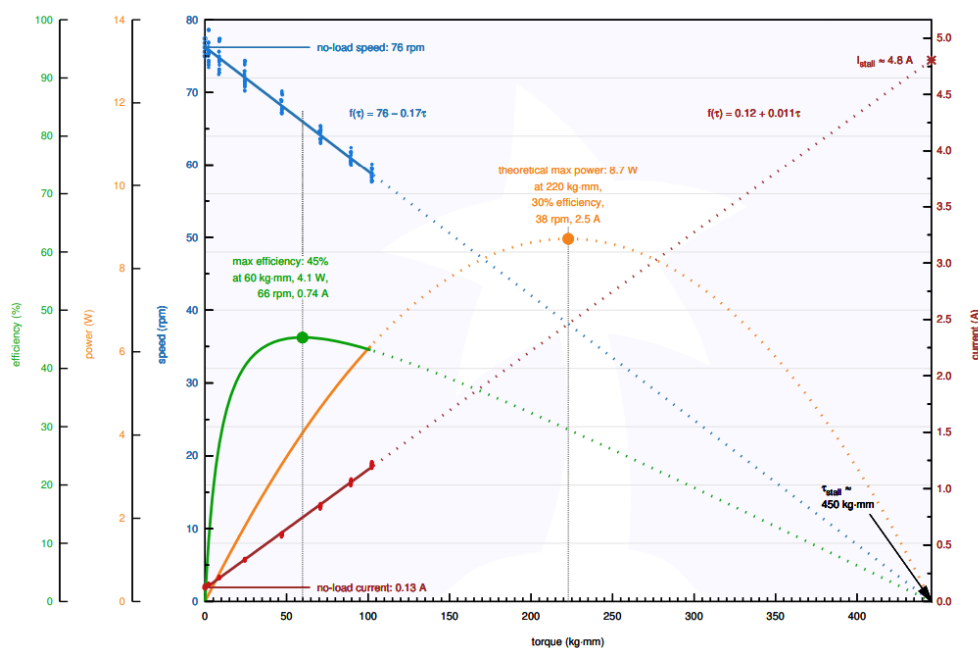


Figura 42. Rendimiento de motorreductor 131:1 37D 12 [36]

En la Figura 42 se observa la gráfica de rendimiento del motor utilizado para el mecanismo telescópico, en esta se puede observar la relación lineal que existe entre la corriente (A, eje y a la derecha) y el torque (kg*mm). La gráfica también nos permite visualizar la región a la cual el motor funcionaría sin problemas, soportando un torque máximo de aproximadamente 100 kg*mm que equivalen a 0.91 Nm cuando se consume una corriente 1.22 A.

Al realizar las pruebas con la fuente de poder se observó que el mecanismo logra subir y bajar el peso satisfactoriamente. El motor al realizar la subida consume 0.540 A aproximadamente, y al realizar la bajada 0.280 A aproximadamente. Al remplazar los valores en la ecuación (24) se obtuvo un torque para la subida de 0.400 Nm, y para el de bajada 0.155 Nm, y al tener en cuenta que el motor tiene un buen funcionamiento hasta un torque de 0.981Nm se tienen factor de seguridad de 2.45 y 6.33 respectivamente, lo que evidencia que el mecanismo es capaz de trabajar con más peso sin problema.

Capítulo 7. Conclusiones

En este trabajo se logró identificar las problemáticas que presentaba el segundo prototipo de PhenoAgro respecto a sus dos movimientos principales, como lo eran el acople de los motores y las interferencias que ocurrían durante el movimiento, lo que provocaba dificultad en el ensamble, aumentaba la necesidad de mantenimiento y presentaba un funcionamiento deficiente que podría afectar la vida útil de los motores y de las piezas de la plataforma en general. De esto se identificó la importancia de estandarizar geometrías que se acomoden a la forma de las tuberías, facilitando así la maquinabilidad y el ensamble de las piezas.

Siguiendo el proceso de diseño de ingeniería, mediante evaluación e iteración constante utilizando prototipado rápido, se rediseñaron los mecanismos de movimiento de cadera y movimiento telescópico. Además, se comprobó la viabilidad de los nuevos diseños y del uso de los motores disponibles en el instituto OMICAS, mediante el estudio de dos elementos de máquinas: piñón con corona interna y tornillo de potencia.

Mediante la metodología de selección de materiales de Ashby se propuso el uso del material PETG en manufactura aditiva para la fabricación de piezas, debido a que este material logra suplir las necesidades mecánicas y ambientales a las cuales se verá sometida la plataforma. Con esto se logra reducir costos, tanto de la materia prima, como de su proceso de manufactura, y transporte debido a su disponibilidad local, disminuyendo igualmente la contaminación asociada. Además, mediante este método de manufactura se logró obtener geometrías complejas adaptables a los tubos, permitiendo un ensamble más sencillo, disminuyendo así los costos asociados a esto.

Se estimaron costos de fabricación de los nuevos prototipos, al aprovechar las capacidades de la manufactura aditiva, se obtuvieron resultados positivos como la disminución de material en algunas piezas de movimiento de cadera mediante optimización topológica y una mejora en la facilidad de ensamble para el mecanismo telescópico mediante la consolidación de piezas. De esta manera se reducen costos de manufactura y de ensamble disminuyendo 1000 g de material, más de 90 horas, 1000 tornillos y 400 tuercas en los 100 dispositivos.

Se realizaron experimentos que permitieron evidenciar los valores reales de corriente, torque y esfuerzos que sufrirían las piezas diseñadas, comprobando que el material utilizado y los motores disponibles, cumplen de manera efectiva la aplicación.

Adicionalmente los resultados de los ensayos mecánicos lograron mostrar como la forma de impresión puede llegar a ocasionar fallas mecánicas en las piezas. En este caso el final del cordón de impresión generó un concentrador de esfuerzo que generó fallas en las pruebas de tensión, lo que podría abrir futuros estudios, donde se modifiquen estos puntos en partes de piezas que no soporten grandes esfuerzos mecánicos. Estos resultados también permiten identificar parámetros óptimos para la producción de piezas, como lo es el uso de una densidad de relleno de 50% y un patrón de relleno de giroide.

PhenoAgro tiene un valor agregado, que no muchas de las plataformas comerciales tienen, que es su movilidad. El movimiento de cadera permite tomar mediciones a distintos ángulos del cultivo, necesitando menos plataformas para cubrir el área deseada, y el movimiento telescópico permite su crecimiento, sin intervención humana, para así lograr tomar medidas validas, como la medición del viento, sin importar el crecimiento de las plantas. Además, mide una gran cantidad de variables como la presencia de gases de efecto invernadero, que representa una gran importancia especialmente para la reforestación. Teniendo en cuenta esto, PhenoAgro actualmente tiene un precio similar e inclusive menor a las plataformas existentes que miden una menor cantidad de variables y que son completamente estáticas, lo que hace que quede muy bien posicionado en el mercado de este tipo de dispositivos.

Bibliografía

- [1] “How to Feed the World in 2050”.
- [2] “HealthY people depend on HealthY food systems Sustainable Food Systems for Food Security and Nutrition,” 2013, Accessed: Aug. 23, 2022. [Online]. Available: www.fao.org
- [3] “Colombia rural Razones para la esperanza Razones para la esperanza,” 2011.
- [4] “THE STATE OF FOOD AND AGRICULTURE THE STATE OF FOOD AND AGRICULTURE 2013 2013 FOOD SYSTEMS FOR BETTER NUTRITION 2013 I3300E/1,” 2013, Accessed: Aug. 23, 2022. [Online]. Available: www.fao.org/publications
- [5] “Estudios económicos de la OCDE COLOMBIA ENERO 2015 VISIÓN GENERAL,” 2015, Accessed: Aug. 24, 2022. [Online]. Available: https://www.oecd.org/economy/surveys/Overview_Colombia_ESP.pdf
- [6] “Agricultura, valor agregado (% del PIB) - Colombia | Data.” https://datos.bancomundial.org/indicador/NV.AGR.TOTL.ZS?name_desc=false&locations=CO (accessed Aug. 24, 2022).
- [7] L. Li, Q. Zhang, and D. Huang, “A review of imaging techniques for plant phenotyping,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 14, no. 11. MDPI AG, pp. 20078–20111, Oct. 24, 2014. doi: 10.3390/s141120078.
- [8] Reddi, “EM Phenoagro,” 2022, [Online]. Available: <https://reddicolombia.com/>
- [9] “Plataforma de Fenómica del CIAT | CIAT.” <https://ciat.cgiar.org/lo-que-hacemos/mejoramiento-de-cultivos/plataforma-de-fenomica-del-ciat/?lang=es> (accessed Sep. 02, 2022).
- [10] D. Houle, D. R. Govindaraju, and S. Omholt, “Phenomix: The next challenge,” *Nature Reviews Genetics*, vol. 11, no. 12. pp. 855–866, Dec. 2010. doi: 10.1038/nrg2897.
- [11] “Cómo maximizar el rendimiento de los cultivos con el fenotipado de alto | Artec3D Aplicación.” <https://www.artec3d.com/es/cases/high-throughput-phenotyping> (accessed Sep. 02, 2022).
- [12] D. Houle, D. R. Govindaraju, and S. Omholt, “Phenomix: The next challenge,” *Nature Reviews Genetics*, vol. 11, no. 12. pp. 855–866, Dec. 2010. doi: 10.1038/nrg2897.
- [13] R. G. Budynas and J. Keith Nisbett, “Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, 9na Edición.”
- [14] Corrado Poli, “Design for manufacturing (A structured approach),” 2001. [Online]. Available: <https://www-sciencedirect-com.bdbib.javerianacali.edu.co/book/9780750673419/design-for-manufacturing#book-info>
- [15] “Design for Assembly - an overview | ScienceDirect Topics.” <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/design-for-assembly> (accessed Sep. 06, 2022).
- [16] K. T. Ulrich and S. D. Eppinger, “Diseño y desarrollo de productos.”
- [17] “Instacrops | Internet of plants.” <https://www.instacrops.com/en/home/> (accessed Sep. 27, 2022).
- [18] “▷ Prototipado rápido ¿Qué es y para qué se usa? | Infinitia.” <https://www.infinitiaresearch.com/noticias/prototipado-rapido-que-es-y-cual-es-su-uso/> (accessed Oct. 21, 2022).
- [19] H. Á. González and D. H. Mesa, “LA IMPORTANCIA DEL METODO EN LA SELECCIÓN DE MATERIALES,” 2004.
- [20] G. García P, “Una teoría general de análisis en el diseño de elementos de máquinas.”

- [21] L. Plúas Andrade, "Protección de Sistemas Eléctricos contra agentes ambientales," 2001.
- [22] "Estándares de protección 'IP' y 'NEMA' | Base de Conocimiento." <https://soporte.syscom.mx/es/articles/3603835-estandares-de-proteccion-ip-y-nema> (accessed Oct. 21, 2022).
- [23] D. Li *et al.*, "High-Throughput Plant Phenotyping Platform (HT3P) as a Novel Tool for Estimating Agronomic Traits From the Lab to the Field," *Front Bioeng Biotechnol*, vol. 8, Jan. 2021, doi: 10.3389/fbioe.2020.623705.
- [24] C. Jayasinghe, P. Badenhorst, J. Jacobs, G. Spangenberg, and K. Smith, "Image-based high-throughput phenotyping for the estimation of persistence of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.)—A review," *Grass and Forage Science*, vol. 76, no. 3. John Wiley and Sons Inc, pp. 321–339, Sep. 01, 2021. doi: 10.1111/gfs.12520.
- [25] "Mark 2 - Arable." <https://www.arable.com/products/sensing/> (accessed Oct. 21, 2022).
- [26] "Daimob Technologies - Internet de las cosas." <https://daimob.co/#next> (accessed Oct. 21, 2022).
- [27] "PheNode | agrela." <https://www.agrelaeco.com/> (accessed Jan. 22, 2023).
- [28] "Design for Assembly Design quality management Design for assembly."
- [29] "Dremel 3d40 impresora dremel compra directa y segura." <https://www.3dmarket.mx/p/dremel-3d40/> (accessed Oct. 23, 2022).
- [30] "Máquina de corte láser cnc 1390, máquina de grabado láser, cortador para torno de plástico de madera y piedra acrílica | Soldadoras láser | - AliExpress." <https://es.aliexpress.com/item/33003136251.html> (accessed Oct. 23, 2022).
- [31] M. F. Ashby *et al.*, "Materials Selection in Mechanical Design." [Online]. Available: <http://books.elsevier.com>
- [32] ANSYS, "y-strength-vs-density-chart-," 2021.
- [33] T. Letcher and M. Waytashek, "Material property testing of 3D-printed specimen in pla on an entry-level 3D printer," in *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)*, American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2014. doi: 10.1115/IMECE2014-39379.
- [34] "Overview of materials for Polylactic Acid (PLA) Biopolymer." <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=ab96a4c0655c4018a8785ac4031b9278&cck=1> (accessed Jul. 23, 2023).
- [35] J. E. Pinochet, "ANÁLISIS DE FALLA DE FATIGA POR FLEXIÓN EN LA RAIZ DE UN DIENTE DE ENGRANAJE RECTO CON PRO/ENGINEER," 2007.
- [36] Pololu, "3D Metal Gearmotors." [Online]. Available: www.pololu.com
- [37] Cambridge: Granta., "CES EduPack 2013. ."
- [38] "Polietileno | Propiedades, precio y aplicación | Propiedades materiales." <https://material-properties.org/es/polietileno-tabla-de-materiales-aplicaciones-precio/> (accessed May 29, 2023).
- [39] "Plástico PBT - TECADUR | Ensinger." <https://www.ensingerplastics.com/es-br/semielaborados/plasticos-de-ingenieria/material-pbt> (accessed May 29, 2023).
- [40] "The Best PMMA Filaments for Printing | All3DP." <https://all3dp.com/2/pmma-filament-basics-best-brands/> (accessed Jul. 23, 2023).

- [41] "POM | Tipos de polímeros - Resinex." <https://www.resinex.es/tipos-de-polimeros/pom.html> (accessed May 29, 2023).
- [42] "PVDF - 3DXTECH." <https://www.3dxttech.com/products/pvdf/> (accessed Jul. 23, 2023).
- [43] "PCT-G plastic | Ensinger." <https://www.ensingerplastics.com/en/thermoplastic-materials/pct-g-material> (accessed May 29, 2023).
- [44] "Essentium PCTG | Filament2Print." <https://filament2print.com/es/copoliesteres-pet/1638-essentium-pctg.html> (accessed Jul. 23, 2023).
- [45] "PEI (Ultem™) Family - 3DXTECH." <https://www.3dxttech.com/products/pei-ultem-family/> (accessed Jul. 23, 2023).
- [46] "FILAMENTO PET-G (1 KG) – 4dlabcolombia." <https://4dlab.co/products/pet-g> (accessed Apr. 20, 2023).
- [47] R. Srinivasan, W. Ruban, A. Deepanraj, R. Bhuvanesh, and T. Bhuvanesh, "Effect on infill density on mechanical properties of PETG part fabricated by fused deposition modelling," in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, Jan. 2020, pp. 1838–1842. doi: 10.1016/j.matpr.2020.03.797.
- [48] S. Hällgren, L. Pejryd, and J. Ekengren, "(Re)Design for Additive Manufacturing," in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2016, pp. 246–251. doi: 10.1016/j.procir.2016.04.150.
- [49] H. Hegab, N. Khanna, N. Monib, and A. Salem, "Design for sustainable additive manufacturing: A review," *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 35, p. e00576, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.susmat.2023.e00576.
- [50] Pololu, "25D Metal Gearmotors." [Online]. Available: www.pololu.com
- [51] "FILAMENTO PLA (1 KG) – 4dlabcolombia." <https://4dlab.co/products/pla> (accessed Apr. 23, 2023).
- [52] L. Bergonzi, M. Vettori, L. Stefanini, and L. D'Alcamo, "Different infill geometry influence on mechanical properties of FDM produced PLA," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 1038, no. 1, p. 012071, Feb. 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1038/1/012071.
- [53] Z. Guo, X. Peng, and L. Sang, "Enhancement of Mechanical Properties of PA6 Blending with Talcum for Fused Deposition Modeling," *Macromol Mater Eng*, vol. 305, no. 9, Sep. 2020, doi: 10.1002/MAME.202000355.
- [54] "Filamento Nylon | MercadoLibre." <https://listado.mercadolibre.com.co/filamento-nylon> (accessed Apr. 23, 2023).
- [55] "White PRO Series Nylon Filament - 1.75mm (0.75kg) | MatterHackers." <https://www.matterhackers.com/store/l/pro-series-nylon/sk/MJPLF4EL> (accessed Apr. 23, 2023).
- [56] "FILAMENTO PP (1 KG) – 4dlabcolombia." <https://4dlab.co/products/pp> (accessed Apr. 23, 2023).
- [57] L. Wang, J. E. Sanders, D. J. Gardner, and Y. Han, "Effect of fused deposition modeling process parameters on the mechanical properties of a filled polypropylene," *Progress in Additive Manufacturing*, vol. 3, no. 4, pp. 205–214, Dec. 2018, doi: 10.1007/s40964-018-0053-3.
- [58] S. Guessasma, S. Belhabib, and H. Nouri, "Microstructure, Thermal and Mechanical Behavior of 3D Printed Acrylonitrile Styrene Acrylate," *Macromol Mater Eng*, vol. 304, no. 7, Jul. 2019, doi: 10.1002/mame.201800793.
- [59] "¿Cómo imprimir en 3D con filamento ASA? La alternativa al ABS - Bitfab." <https://bitfab.io/es/blog/imprimir-filamento-asa/> (accessed Apr. 23, 2023).

[60] "Filamento Asa | MercadoLibre ." <https://listado.mercadolibre.com.co/filamento-asa> (accessed Apr. 23, 2023).

Anexos

Anexo 1. Información soporte del PLA, PP, PA y ASA

Tabla 1: Propiedades e información del PLA

PLA [51], [52]	
Propiedades generales Densidad: 1210-1250 kg/m^3 Precio: 1kg de filamento a \$78 000	Propiedades térmicas Conductividad térmica: 0.12-0.13W/m°C Expansión térmica: 126-145 $\mu strain/^\circ C$ Temperatura de servicio máximo: 45-55°C
Propiedades mecánicas Módulo de Young: 3.45-3.82GPa Dureza Vickers: 14-18 HV Resistencia a la compresión: 48-60MPa Tenacidad a la fractura: 0.7-1.1 $MPa \cdot \sqrt{m}$	Propiedades eléctricas Resistividad: $1 \times 10^{17} - 1 \times 10^{19} \mu ohm \cdot cm$ Constante dieléctrica: 3.5-5
Propiedades: Es biodegradable y es el filamento más respetuoso con el medio ambiente al no ser derivado del petróleo, pero debe ser tratado adecuadamente sus desechos, pues abandonado a la intemperie puede demorar 80 años en degradarse. Tiene una vida útil de por lo menos 12 meses a temperaturas entre 15 y 25°.	
Especificaciones técnicas: Diámetro: 1,75 mm Tolerancia: +/- 0.03 mm Velocidad de impresión: 20-70 mm/s Recomendar temperatura de impresión: 200-235 °C Temperatura de la plataforma: 60-80 °C La temperatura afecta la resistencia mecánica y la precisión dimensional, con temperaturas mayores la resistencia última a tracción y la rigidez aumentan	
Usos: similares al PET, se usa en la industria alimentaria, para bandejas, tapas, también se usa para algunos adornos finales de automóviles y en electrodomésticos. Por su facilidad de impresión es el más empleado para prototipos	

Tabla 2: Propiedades e información del PA

PA [53]-[55]	
Propiedades generales Densidad: 1030-1080 kg/m^3 Precio: 1 kg de filamento a \$415 900	Propiedades térmicas Conductividad térmica: 0.0991-0.107 W/m°C Expansión térmica: 79-81 $\mu strain/^\circ C$ Temperatura de servicio máximo: 80-100°C
Propiedades mecánicas Módulo de Young: 1.74-2.16GPa Dureza Vickers: 10.-7-22.8 HV Resistencia a la compresión: 63.8 – 70.6 MPa Tenacidad a la fractura: 3.5-3.87 $MPa \cdot \sqrt{m}$	Propiedades eléctricas Resistividad: $2 \times 10^{18} - 5 \times 10^{19} \mu ohm \cdot cm$ Constante dieléctrica: 3.91-5.51
Propiedades: se puede conseguir en filamento para FDM o en polvo para SLS. Es flexible, resistente al impacto, robusto mecánicamente y duradero. Tiene bajo coeficiente de fricción y resistencia térmica (hasta 120°). Para FDM por lo general se usa PA6.	
Especificaciones técnicas: Diámetro: 1,75 mm Tolerancia: +/- 0.05 mm Velocidad de impresión: 30-150 mm/s Recomendar temperatura de impresión: 240-260 °C Temperatura de la plataforma: 65 °C Requiera una cama caliente	
Usos típicos: industria automotriz en piezas resistentes a la fricción y deformación. Engranajes, bisagras, prótesis. Piezas que requieren alta resistencia a la fatiga	

Tabla 3: Propiedades e información del PP

PP [56], [57]	
Propiedades generales Densidad: 899-909 kg/m^3 Precio: 1kg de filamento a \$80 000	Propiedades térmicas Conductividad térmica: 0.197-0.205 W/m°C Expansión térmica: 118-121 $\mu strain/^\circ C$ Temperatura de servicio máximo: 64.6-81.7°C
Propiedades mecánicas Módulo de Young: 1.23-1.26GPa Dureza Vickers: 7.37-7.74 HV Resistencia a la compresión: 29.5-31MPa Tenacidad a la fractura: 1.5-1.58 $MPa \cdot \sqrt{m}$	Propiedades eléctricas Resistividad: $7.42 \times 10^{22} - 2.47 \times 10^{24} \mu ohm * cm$ Constante dieléctrica: 2.16-2.24
Propiedades: resistente mecánicamente, flexible, duradero y resistente al impacto, ligero e impermeable. Sin embargo, es difícil la adherencia entre capas, pero existen filamentos con aditivos para mejorar la adherencia. No produce casi residuos y se puede reciclar múltiples veces. No tiene muy buena resistencia a altas temperaturas. La orientación de deposición, los grados de relleno y el grosor de capa, son determinantes para las propiedades mecánicas. Las muestras son más fuertes y rígidas cuando todos los filamentos se imprimen a lo largo del eje largo de la muestra. Las propiedades de tracción aumentan a medida que la densidad de relleno. El grosor de capa afecta de manera insignificante las propiedades mecánicas de las muestras.	
Especificaciones técnicas: Diámetro: 1,75 mm Tolerancia: +/- 0.03 mm Velocidad de impresión: 20-700 mm/s Recomendar temperatura de impresión: 235 °C Temperatura de la plataforma: 0 °C	
Usos típicos: muy usado en aplicaciones industriales debido a su flexibilidad y resistencia al impacto. Tuberías, embaces, piezas en ambientes químicamente agresivos e industria automotriz.	

Tabla 4: Propiedades e información del ASA

ASA [58]-[60]	
Propiedades generales Densidad: 1050-1060 kg/m^3 Precio: 1kg de filamento \$139 000	Propiedades térmicas Conductividad térmica: 0.236-0.246 W/m°C Expansión térmica: 104-108 $\mu strain/^\circ C$ Temperatura de servicio máximo: 53-67°C
Propiedades mecánicas Módulo de Young: 1.51-2.34GPa Dureza Vickers: 10.8-11.6 HV Resistencia a la compresión: 43.1-46.3 MPa Tenacidad a la fractura: 1.52-4.57 $MPa \cdot \sqrt{m}$	Propiedades eléctricas Resistividad: $1 \times 10^{19} - 1 \times 10^{20} \mu ohm * cm$ Constante dieléctrica: 3.2-3.5
Propiedades: robusto mecánicamente, resistente a rayos UV y al agua, tienen buen acabado y estabilidad dimensional, buena resistencia química y térmica (temperaturas hasta 95°). Excelente adhesión entre capas, lo que lo hace resistente al impacto y duradero.	
Especificaciones técnicas: Diámetro: 1,75 mm Tolerancia: +/- 0.05 mm Velocidad de impresión: 35 mm/s Recomendar temperatura de impresión: 230-260 °C Temperatura de la plataforma: 100-120 °C Es importante tener una buena técnica en la impresión para que la pieza salga bien: tener bien calibrada la impresora, imprimir con cama caliente, requiere temperaturas altas, por lo que hay que tener el termistor bien ajustado, pues se podrían carbonizar materiales internos. Es recomendable que la temperatura de impresión sea por encima de 240°, se sugiere 250°	
Usos típicos: Industria automovilística, piezas domesticas expuestas a la intemperie.	

Anexo 2. Precio unitario y total de las piezas de los mecanismos

Tabla 1: Cotización piezas movimiento de cadera

ID	Elementos	Cantidad	Comentarios	Enlace	Precio		
					Valor Unitario	COP	USD
1	Tubo PVC	0,2	Tubo de 2,5 pulgadas de diametro, largo de 20 cm aprox	Ferretería suministros industriales SAS	\$ 161.245,00	\$ 32.249,00	\$ 6,70
2	Motor de cadera	1	Ref. 172:1 Metal Gearmotor 25Dx71L mm MP 12V with 48 CPR Encoder	https://www.pololu.com/product/4868	\$ 221.308,99	\$ 221.308,99	\$ 45,95
3	Tapa inferior acople motor 25	1	Impresa en PETG, masa de: 62.33 g		\$ 63.305,00	\$ 63.305,00	\$ 13,14
4	Tornillo en acero 304 cabeza plana M3 x 10mm	4	Ref. T-MET-F-M3X10	Ferretería suministros industriales SAS	\$ 133,28	\$ 533,12	\$ 0,11
5	Anillo de retención	1	Ref. DSH-18	https://www.rotorclip.com/base_part_search.php	\$ 221,00	\$ 221,00	\$ 0,05
6	Anillo antifricción	1	Anillo cortado en laser, en acrilico negro de 2 mm de grosor		\$ -	\$ -	\$ -
7	Piñón	1	Impreso en PETG, masa de: 2.034 g		\$ 41.033,00	\$ 41.033,00	\$ 8,52
8	Tornillo en acero 304 cabeza plana M3 x 13mm-12mm	4		Ferretería suministros industriales SAS	\$ 117,81	\$ 471,24	\$ 0,10
9	Tapa con corona interna	1	Impreso en PETG, masa de: 52.04 g		\$ 59.647,00	\$ 59.647,00	\$ 12,38
10	Tuerca hexagonal M3	8	Ref. TUERCA-M3	ornillos-y-separadores/tuercas/tuerca-met%C3%	\$ 35,70	\$ 285,60	\$ 0,06
11	Tope	1	Impreso en PETG, masa de: 13.25 g		\$ 44.247,00	\$ 44.247,00	\$ 9,19
12	Unión tubo	1	Unión de 2,5 pulgadas de diametro		\$ 16.541,00	\$ 16.541,00	\$ 3,43
TOTAL						\$ 479.841,95	\$ 99,63

Tabla 2: Cotización piezas movimiento telescópico

ID	Elementos	Cantidad	Comentarios	Enlace	Precio		Total	
					Valor Unitario	COP	USD	
1	Tubo PVC 2.5 in	1	Tubo de 2,5 pulgadas de diametro, largo de 1m	Ferreteria suministros industriales SAS	\$ 161.245,00	\$ 161.245,00	\$ 33,4790192	
2	Tubo PVC 2 in	1,2	Tubo de 2 pulgadas de diametro, largo de 2 m	Ferreteria suministros industriales SAS	\$ 99.484,00	\$ 119.380,80	\$ 24,79	
3	Varilla roscada T12*1200	1	Rosca trapezoidal de 4 hilos, con paso p de 2 mm y diametro mayor de 12 mm	Exportación	\$ 280.000,00	\$ 280.000,00	\$ 58,14	
4	Tapa soporte de tuerca para varilla	1			\$ 51.562,00	\$ 51.562,00	\$ 10,71	
5	Tuerca M4	4			\$ 35,74	\$ 142,96	\$ 0,03	
6	Tornillo M4 x 10	4			\$ 226,10	\$ 904,40	\$ 0,19	
7	Tuerca para varilla roscada	1	Rosca trapezoidal de 4 hilos, con paso p de 2 mm y diametro mayor de 12 mm (Viene con varilla)	Exportación	\$ -	\$ -	\$ -	
8	Tornillo M3 x 25 cabeza avellanda	4			\$ 107,10	\$ 428,40	\$ 0,09	
9	Tornillo M3 x10 cabeza avellanada	10		Ferreteria suministros industriales SAS	\$ 133,28	\$ 1.332,80	\$ 0,28	
10	Unión de 2.5 In	1		Ferreteria suministros industriales SAS	\$ 16.541,00	\$ 16.541,00	\$ 3,43	
11	Motor 37 mm	1		https://www.pololu.com/product/4756	\$ 250.191,00	\$ 250.191,00	\$ 51,95	
12	Tapa motor	1			\$ 54.290,00	\$ 54.290,00	\$ 11,27	
13	Acople motor	1			\$ 48.418,00	\$ 48.418,00	\$ 10,05	
14	Anillo de fijación	1			\$ 47.648,00	\$ 47.648,00	\$ 9,89	
15	Tornillo M3 x 16 cabeza avellanada	4		Ferreteria suministros industriales SAS	\$ 124,95	\$ 499,80	\$ 0,10	
16	Tuerca M3	12		Ferreteria suministros industriales SAS	\$ 35,70	\$ 428,40	\$ 0,09	
17	Anillo guía	1			\$ 50.632,00	\$ 50.632,00	\$ 10,51	
18	Prisionero M3 x 10	2			\$ 133,28	\$ 266,56	\$ 0,06	
TOTAL						\$ 1.032.084,36	\$ 214,29	

Anexo 3: Cotización de otros métodos de mecanizado

Para tener diferentes opciones de manufactura para las piezas personalizadas se cotizó mecanizado CNC en la empresa KinTec. Para esto se envió la corona con engranes internos, está siendo de las piezas más complicadas de manufacturar, debido a los dientes internos y a la geometría adaptada para adaptar las tuercas internamente. Esta empresa cotizó un valor unitario de la pieza por encima de los 16 dólares además de enviar la Figura 1, donde expresan que el engrane no se puede realizar mediante mecanizado CNC por lo que lo que lo imprimirían en 3D.

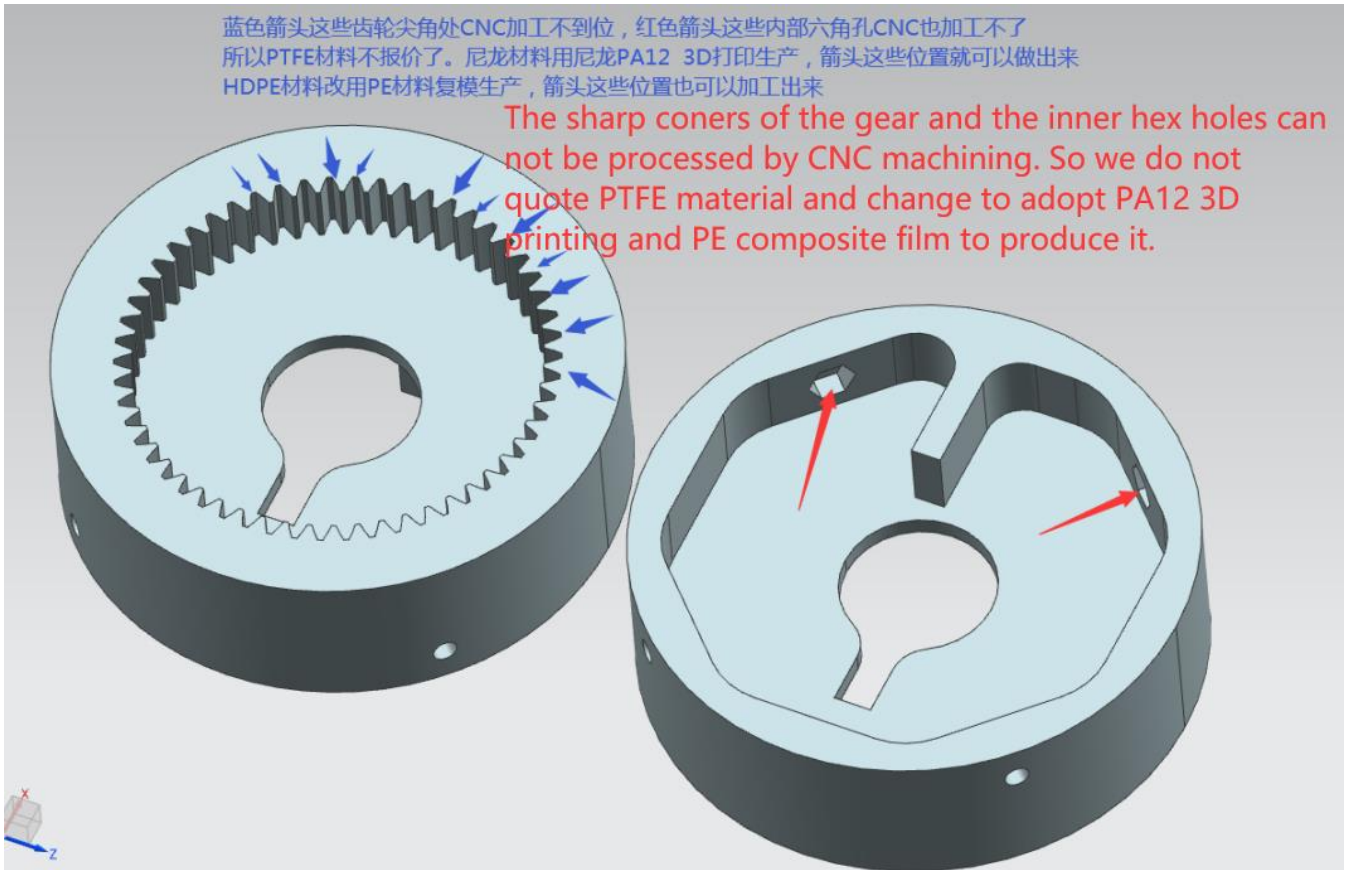
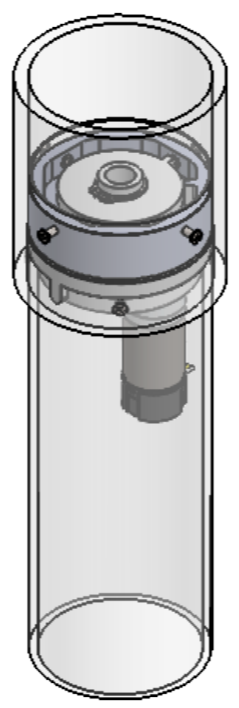
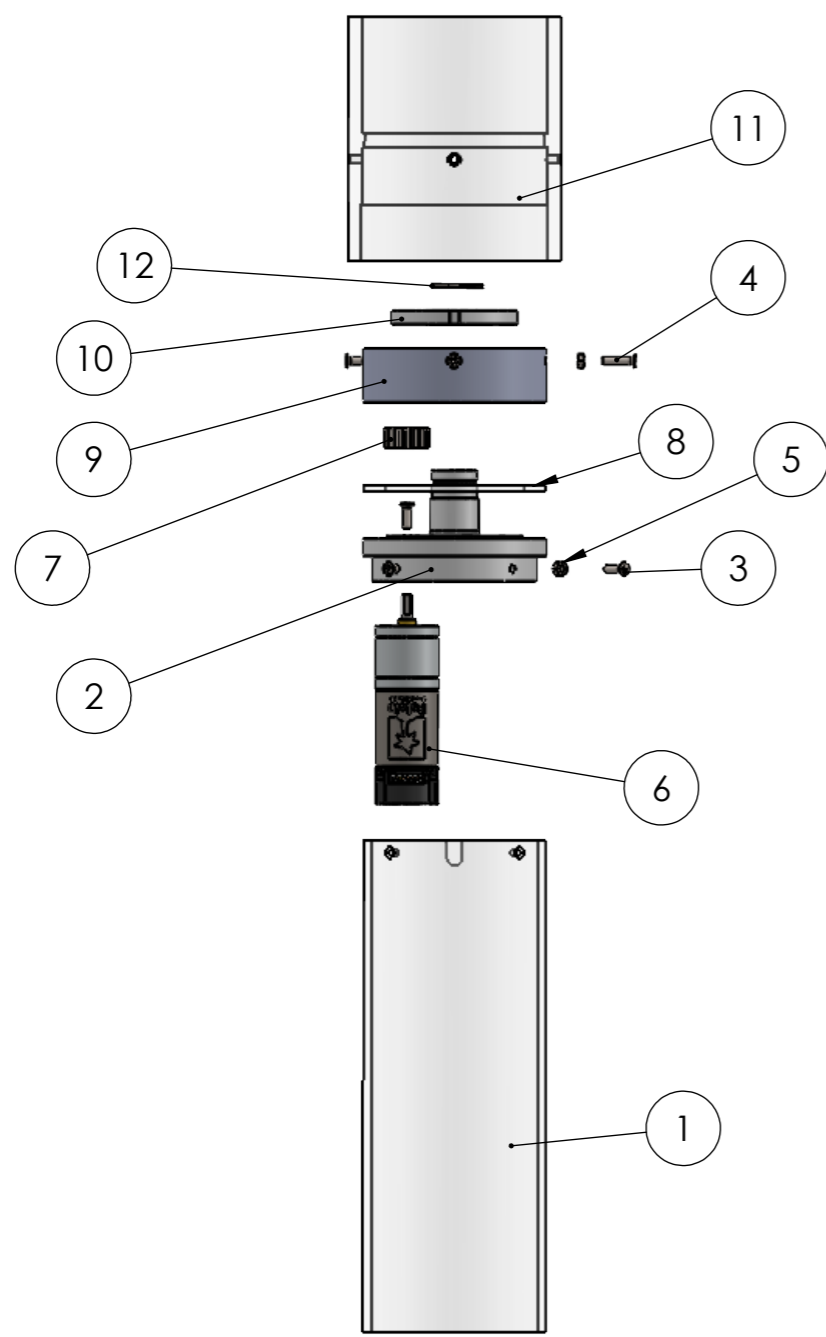


Figura 1. Sugerencia para manufactura de la pieza

Anexo 4: Planos de fabricación

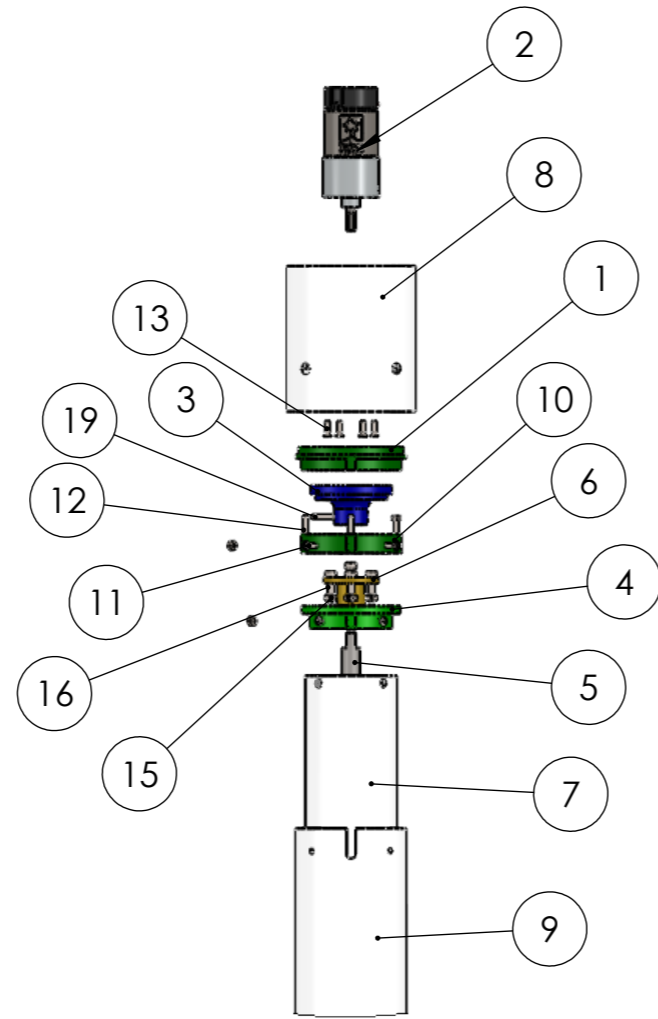
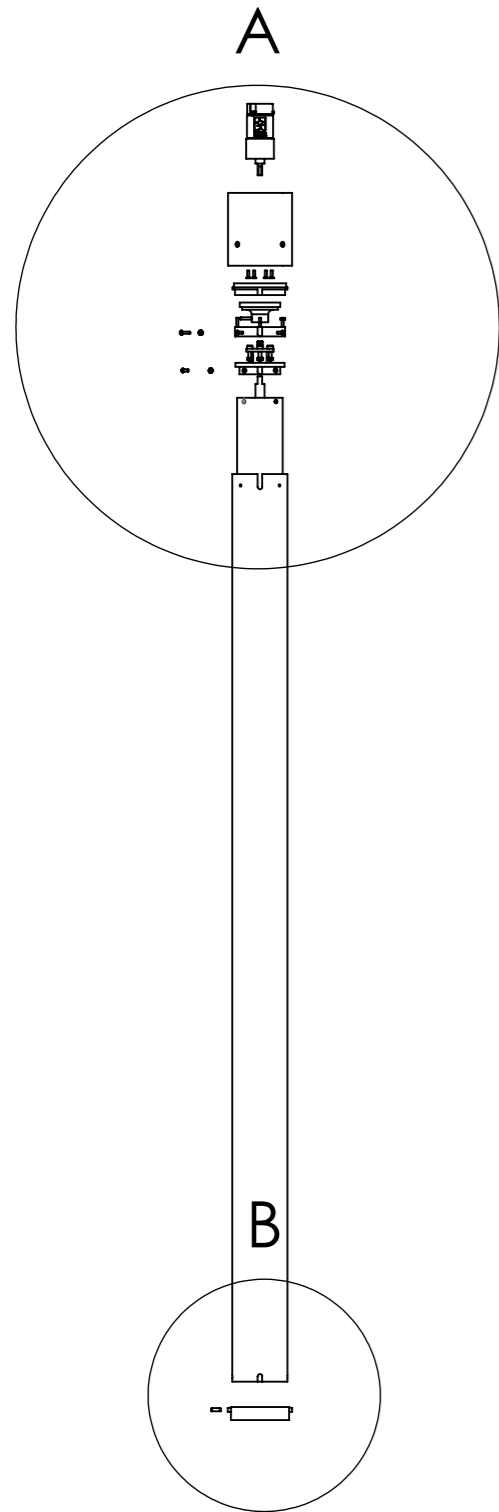
8 7 6 5 4 3 2 1

F
E
D
C
B
A

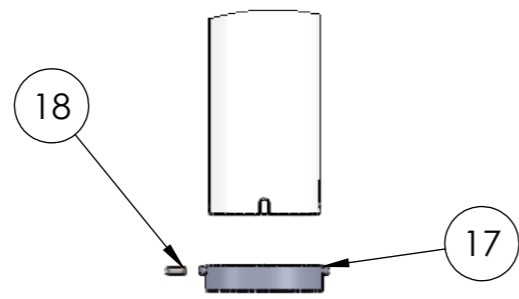


N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Tubo PVC 2,5 in cadera	Soporte cadera	1
2	Tapa inferior acople motor	Sostiene motor	1
3	Tornillo en acero 304 cabeza plana M3 x 10 mm	Asegura tapa inferior	6
4	Tornillo en acero 304 cabeza plana M3 x 13 mm	Asegura tapa con corona	4
5	Tuerca hexagonal M3	Rosca para tornillos	8
6	Motor de cadera	Efectua movimiento	1
7	Piñón de cadera	Transmite movimiento	1
8	Anillo antifricción	Facilita movimiento	1
9	Tapa con corona interna	Interactua con piñón	1
10	Tope mecánico	Limita el movimiento	1
11	Unión 2.5 cadera	Acople con el resto del dispositivo	1
12	Anillo de retención DSH-18	Evita desacople	1

8 7 6 5 4 3 2 1

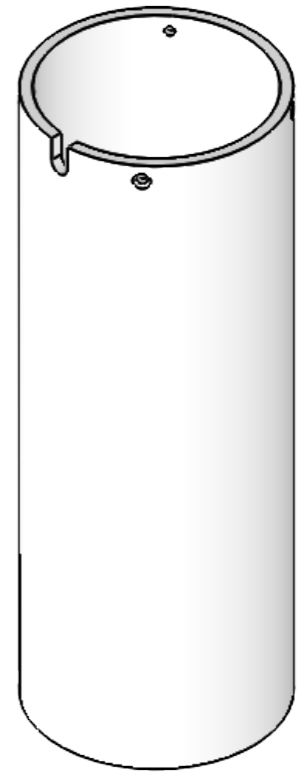
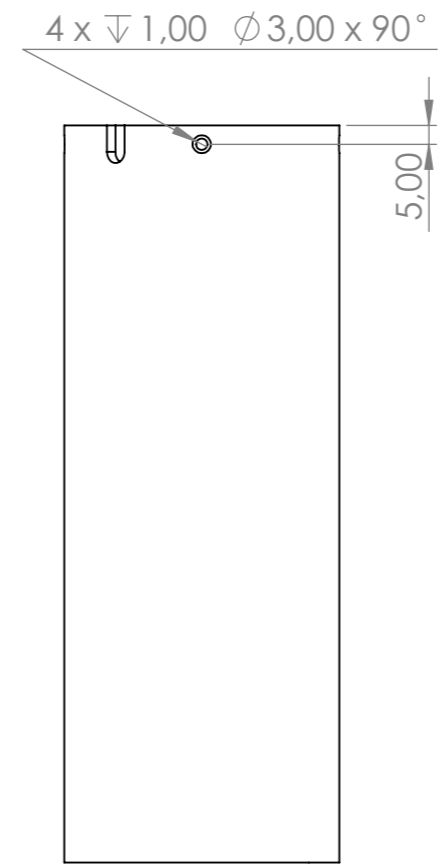
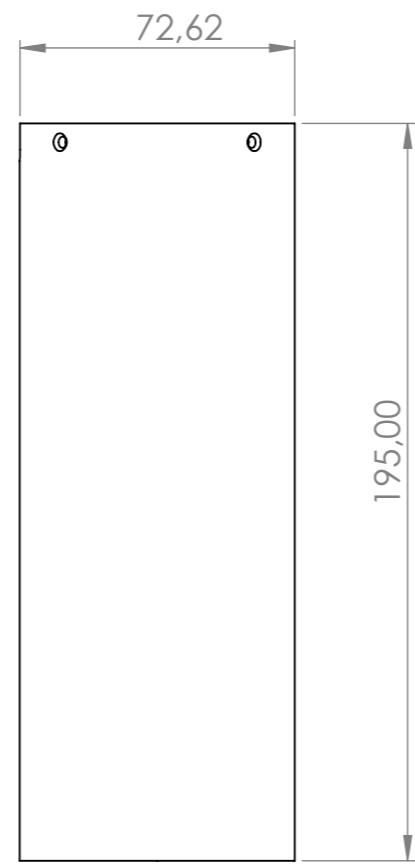
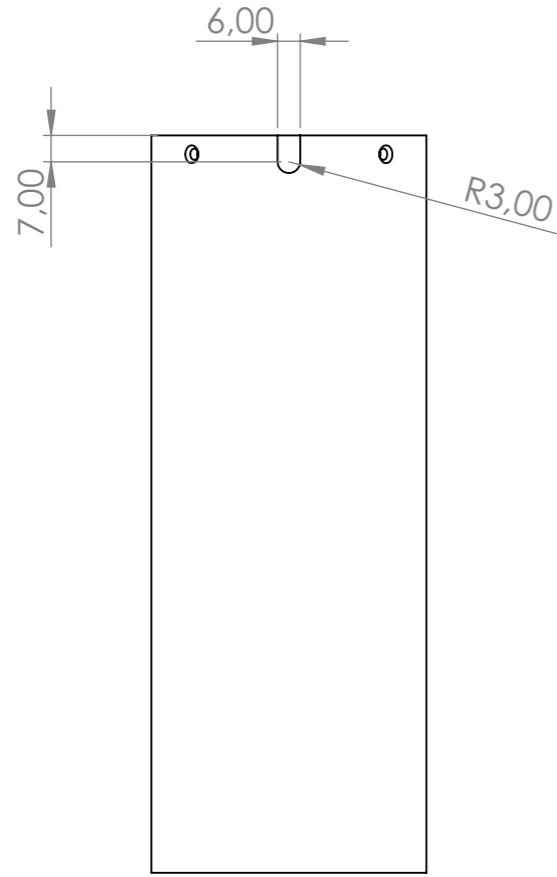
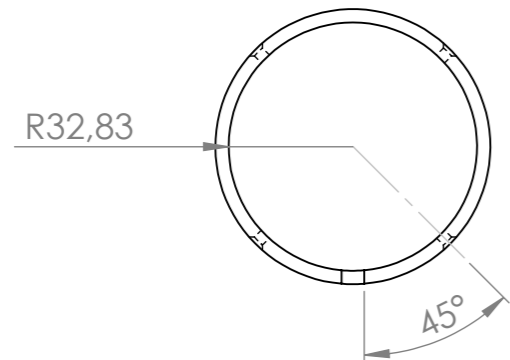


DETALLE A
ESCALA 1 : 5

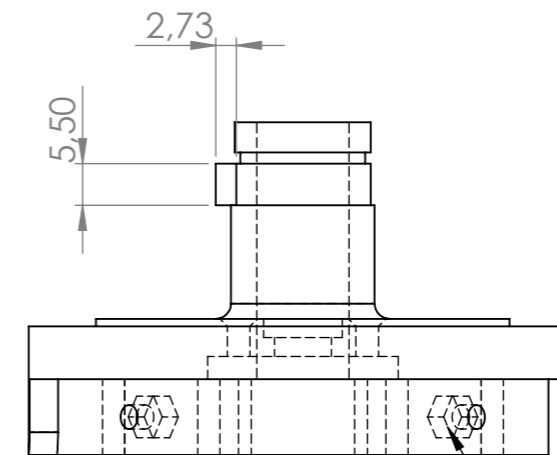
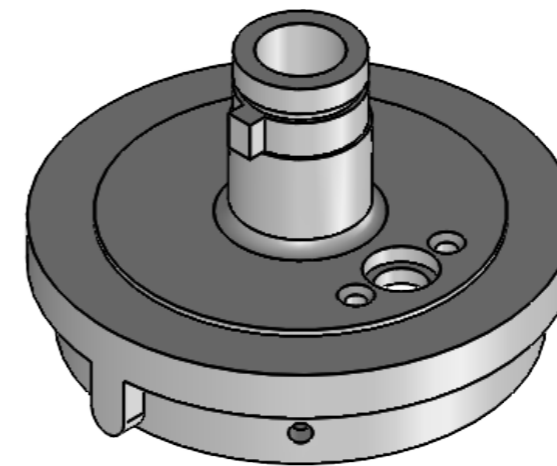
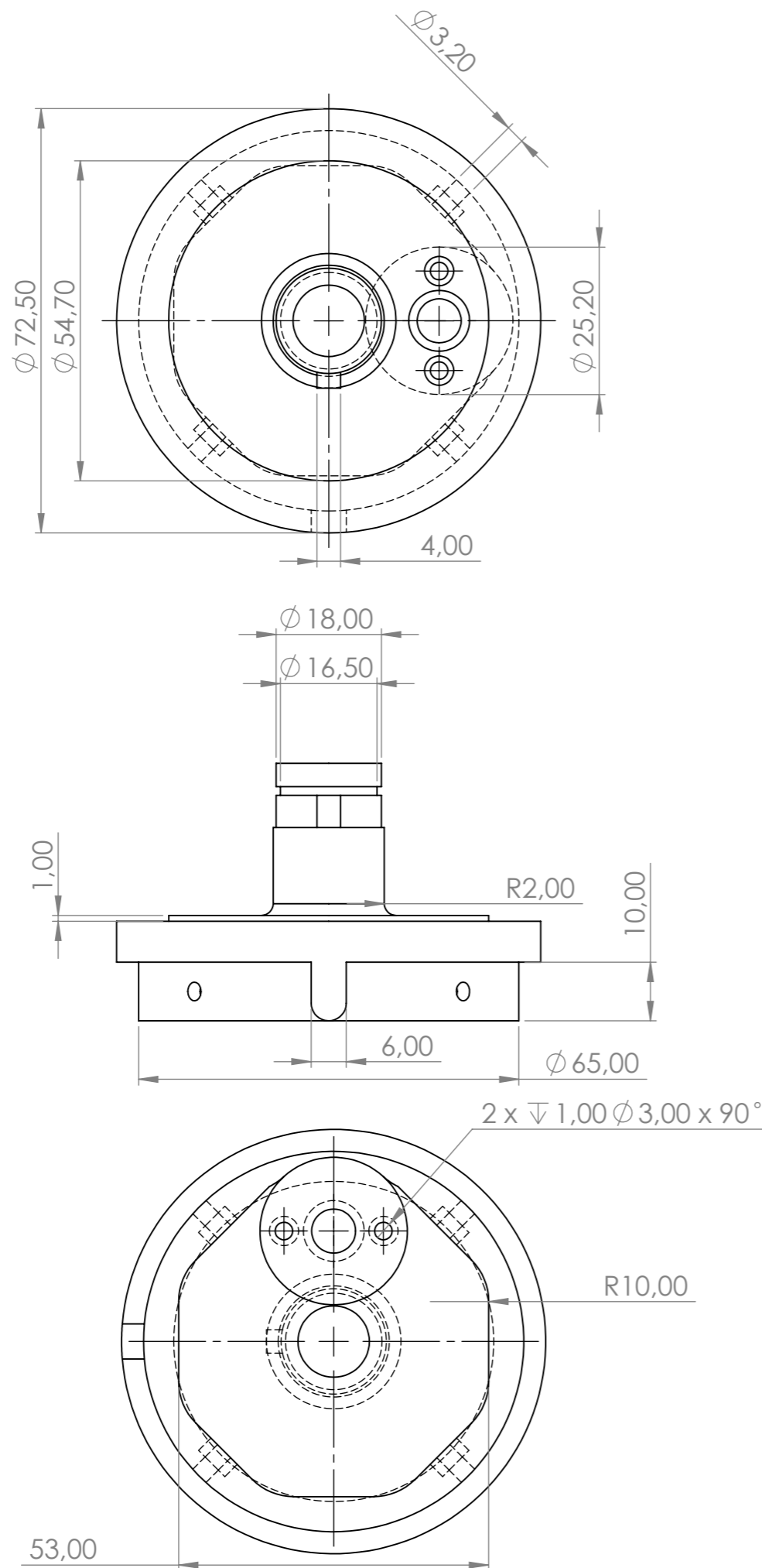


DETALLE B
ESCALA 1 : 5

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Tapa motor telescópico	Tapa donde se acopla motor para movimiento telescópico	1
2	37d-gearmotor-100-131-150-encoder.step	Motor electrico de 37 mm de diametro y reducción de 131:1	1
3	Acople motor-varilla telescópico	Pieza que transmite el movimiento del eje del motor a la varilla roscada	1
4	Tapa tubo de 2 in telescópico	Tapa con tuerca para varilla roscada	1
5	Varilla roscada T12*1200	Es roscada para subir o bajar plataforma	1
6	Tuerca varilla	Tuerca donde se rosca la varilla	1
7	Tubo PVC 2 in telescópico	Tubo interno de mecanismo telescópico	1
8	Unión 2.5 telescópico	Unión entre modulos phenoagro	1
9	Tubo PVC 2.5 in telescópico	Tubo externo de mecanismo telescópico	1
10	Anillo Fijación	Fija las piezas a la unión	1
11	B18.6.7M - M3 x 0.5 x 16 Type I Cross Recessed FHMS --16N		4
12	B18.6.7M - M3 x 0.5 x 25 Type I Cross Recessed FHMS --25N	M3x25_CS_PH	4
13	B18.6.7M - M3 x 0.5 x 10 Type I Cross Recessed FHMS --10N		10
14	B18.2.4.1M - Hex nut, Style 1, M3 x 0.5 --D-N		12
15	B18.2.4.1M - Hex nut, Style 1, M4 x 0.7 --D-N		4
16	B18.3.1M - 4 x 0.7 x 16 Hex SHCS -- 16NHX		4
17	Anillo guía telescópico	Evita giro de tubo	1
18	Prisionero M3 x 10		2
19	Prisionero M3 x 15		1

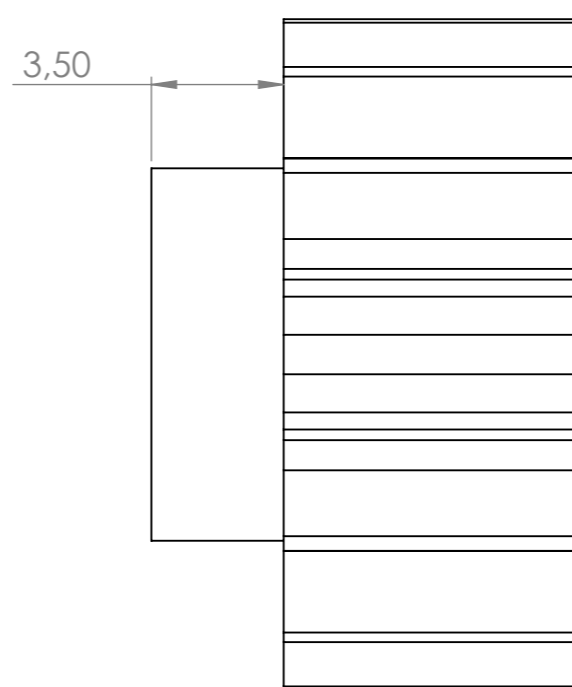
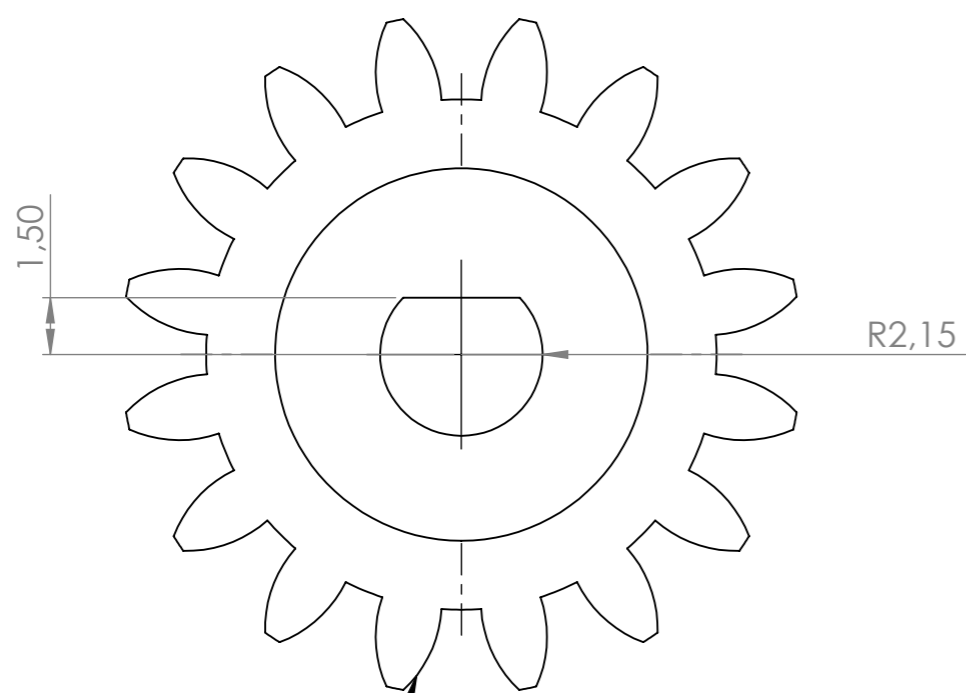
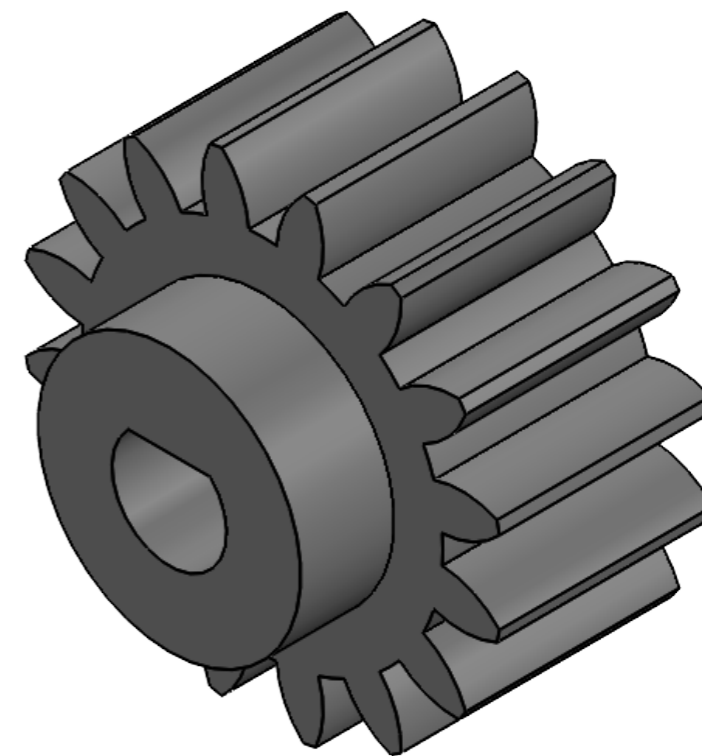
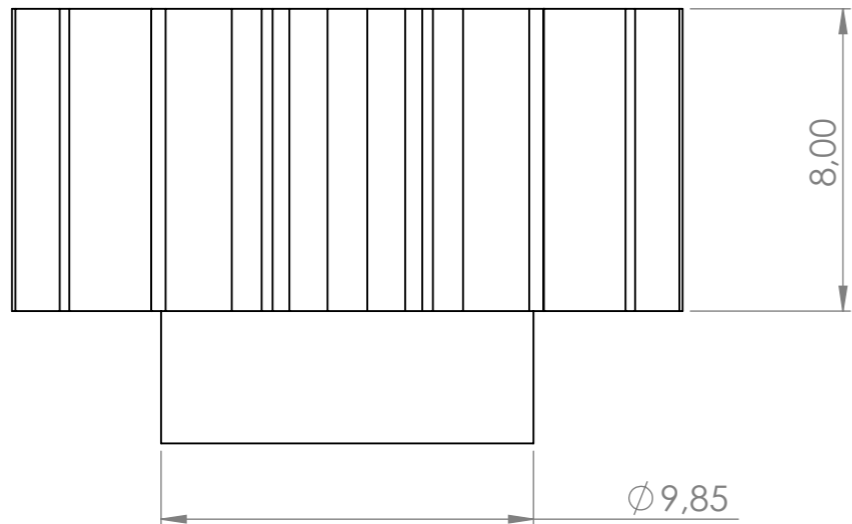


Ref.	Descripción	Material	Especificaciones	Observaciones
1-C	Soporte cadera	PVC	Tolerancia: +-0.5mm	Todas las dimensiones estan en mm
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS ÓMICAS				
 			Tubo PVC 2.5 in cadera	
Diseño: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga		Dibujo: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga		Escala: 1:2 Fecha: 30/05/2023
Fabricación: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga		Revisado: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga		P.I. No 1



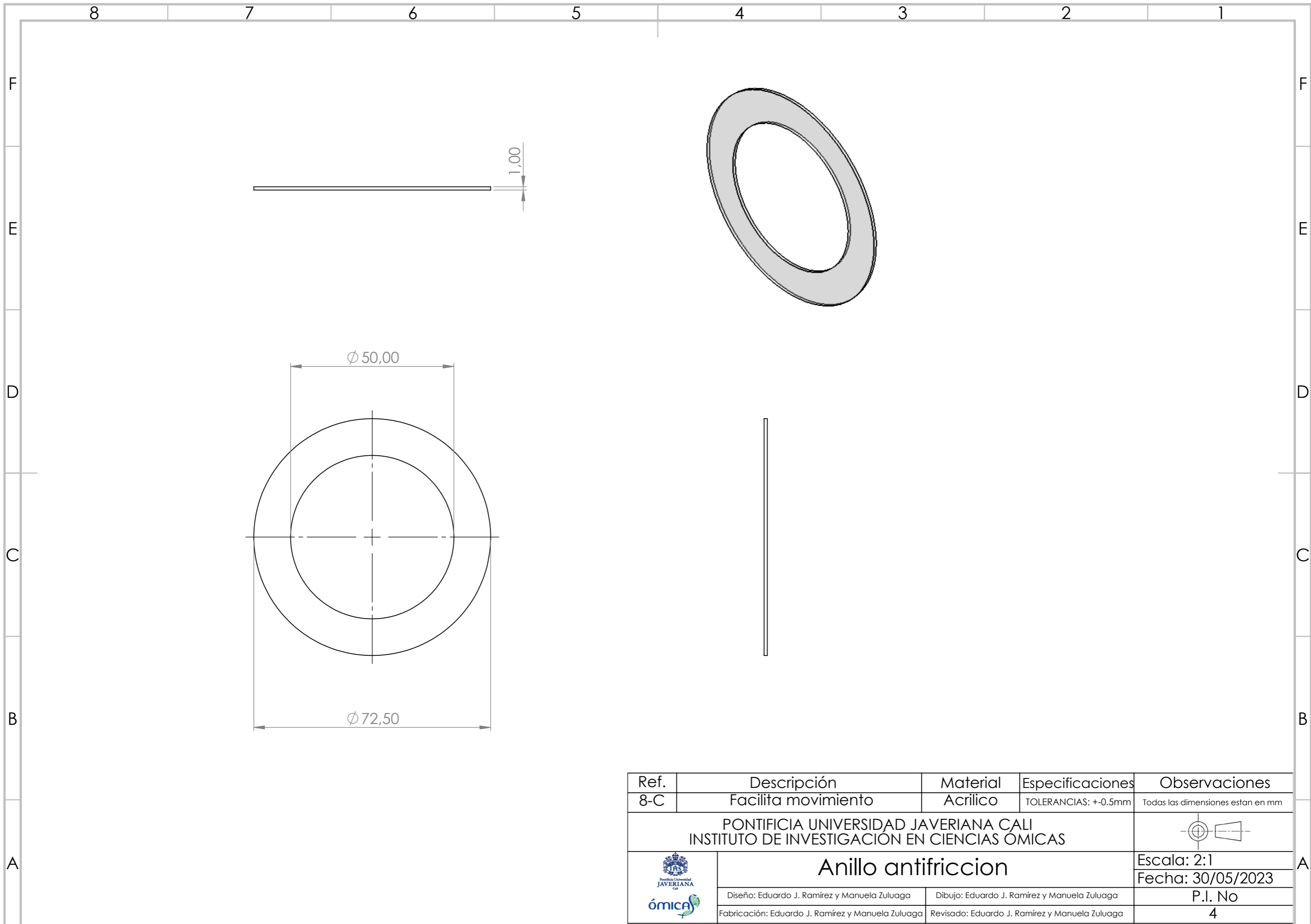
Hueco para tuerca hexagonal M3 x4

Ref.	Descripción	Material	Especificaciones	Observaciones
2-C	Sostiene motor	PETG	TOLERANCIAS: $\pm 0,5\text{mm}$	Todas las dimensiones estan en mm
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI INSTITUTO DE INVESTIGACION EN CIENCIAS ÓMICAS				
Tapa inferior acople motor				Escala: 1:1 Fecha: 30/05/2023
Diseño: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga		Dibujo: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga		P.I. No
Fabricación: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga		Revisado: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga		2

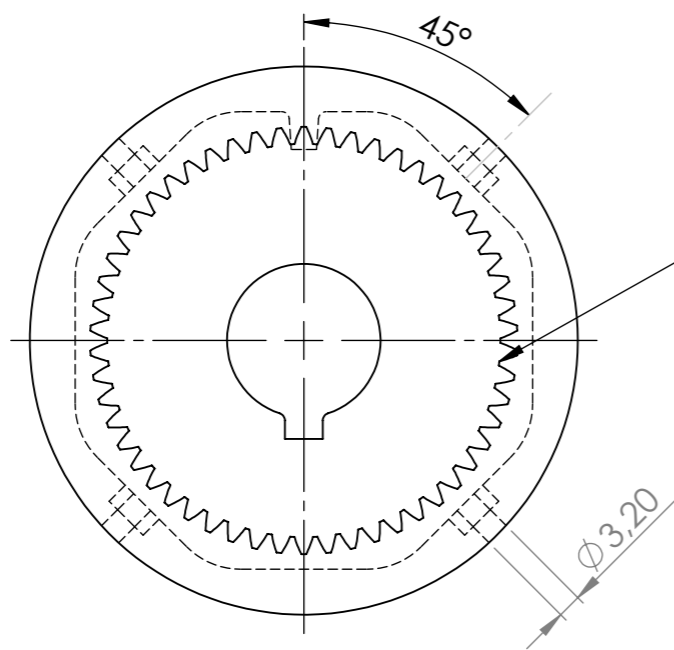


Modulo: 1
 Número de dientes: 16
 Ángulo de presión: 20

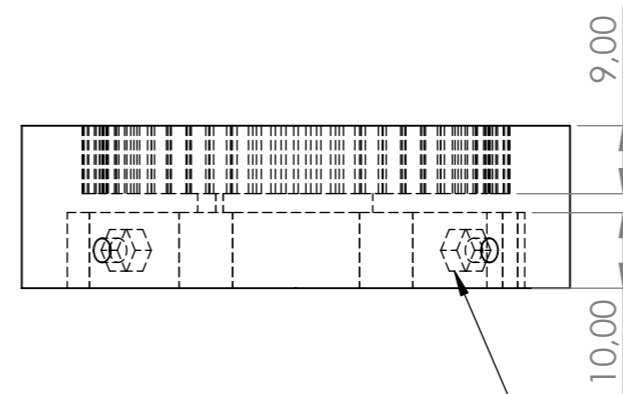
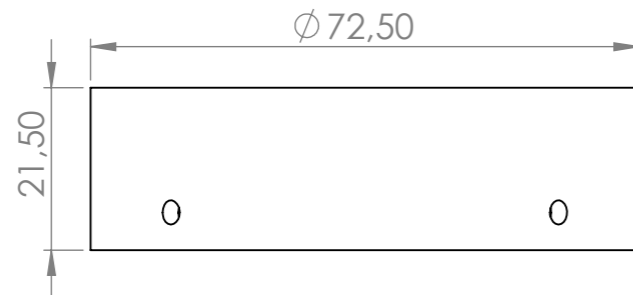
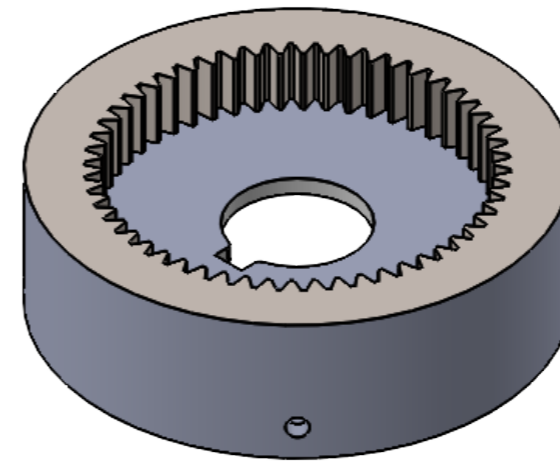
Ref.	Descripción	Material	Especificaciones	Observaciones
7-C	Transmite movimiento	PETG	TOLERANCIAS: $\pm 0.5\text{mm}$	Todas las dimensiones estan en mm
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS ÓMICAS				
			Piñón cadera Escala: 5:1 Fecha: 30/05/2023	
Diseño: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga		Dibujo: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga		P.I. No
Fabricación: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga		Revisado: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga		3



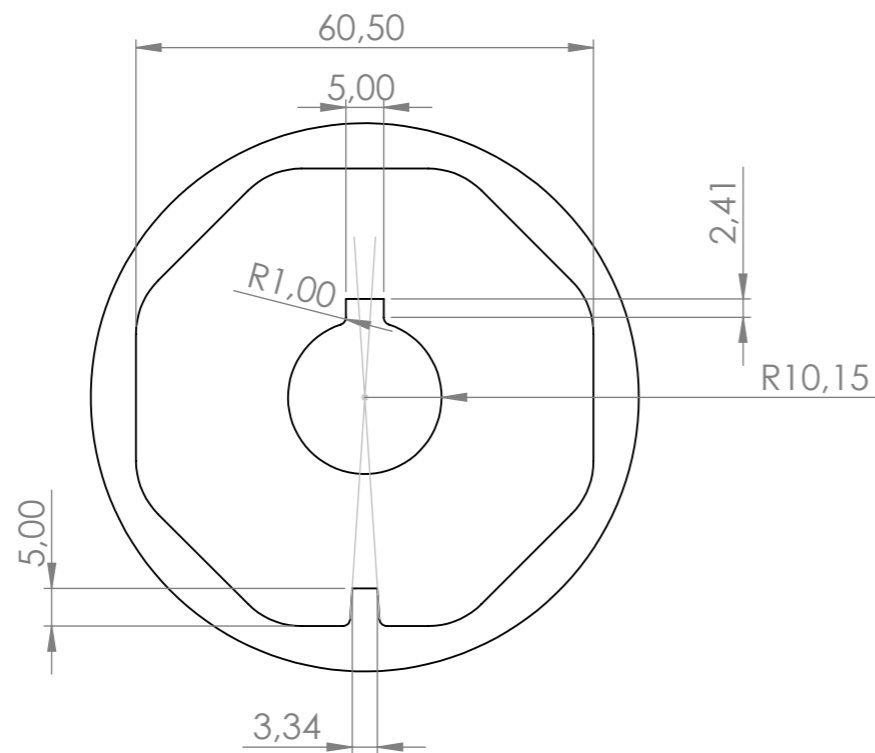
Ref.	Descripción	Material	Especificaciones	Observaciones
8-C	Facilita movimiento	Acrílico	TOLERANCIAS: +/-0.5mm	Todas las dimensiones estan en mm
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS ÓMICAS				
 ómica		Anillo antifriccion		Escala: 2:1 Fecha: 30/05/2023
		Diseño: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga Fabricación: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga	Dibujo: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga Revisado: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga	P.I. No 4



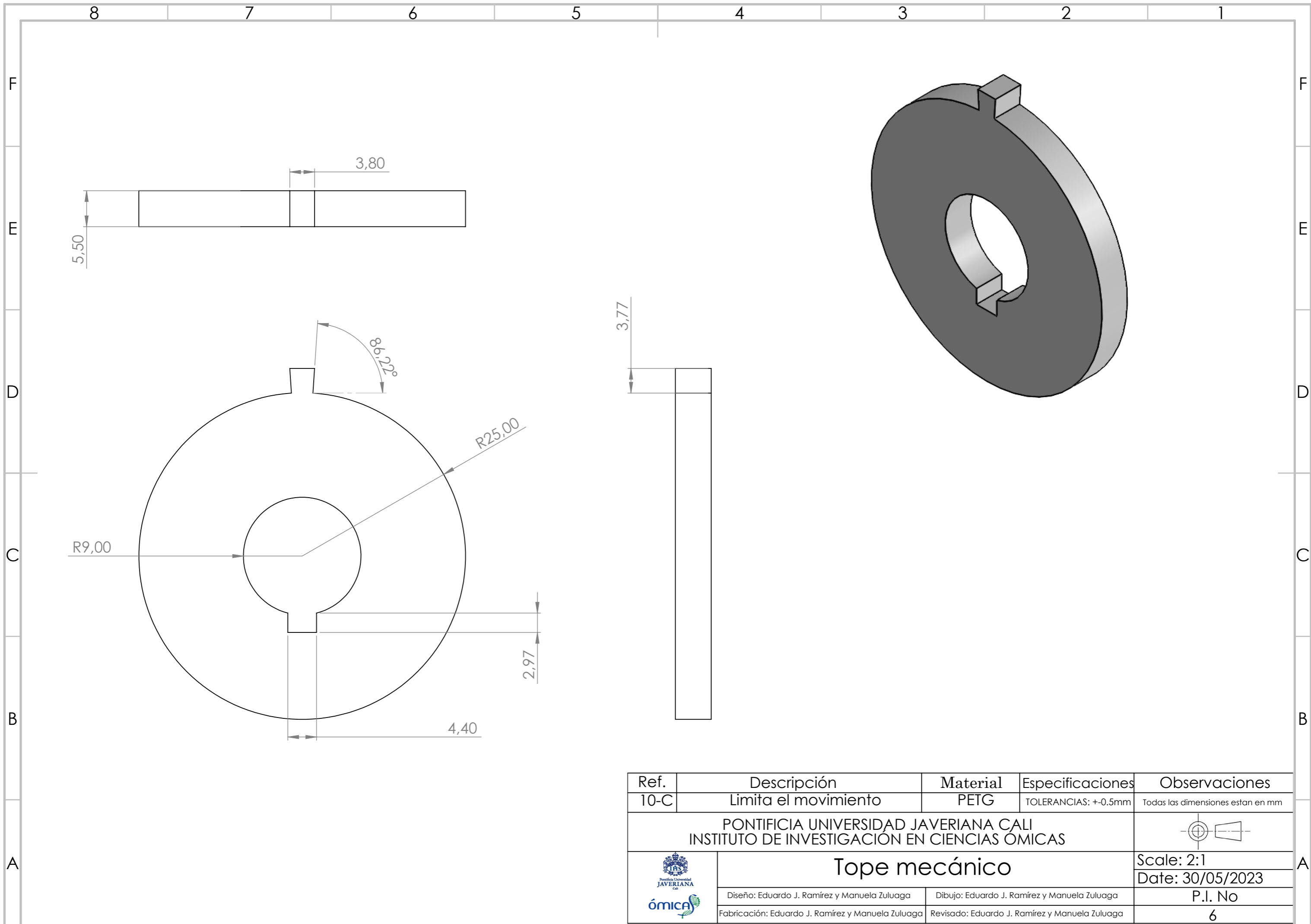
Módulo: 1
 Número de dientes: 54
 Ángulo de presión: 9

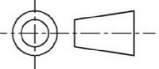




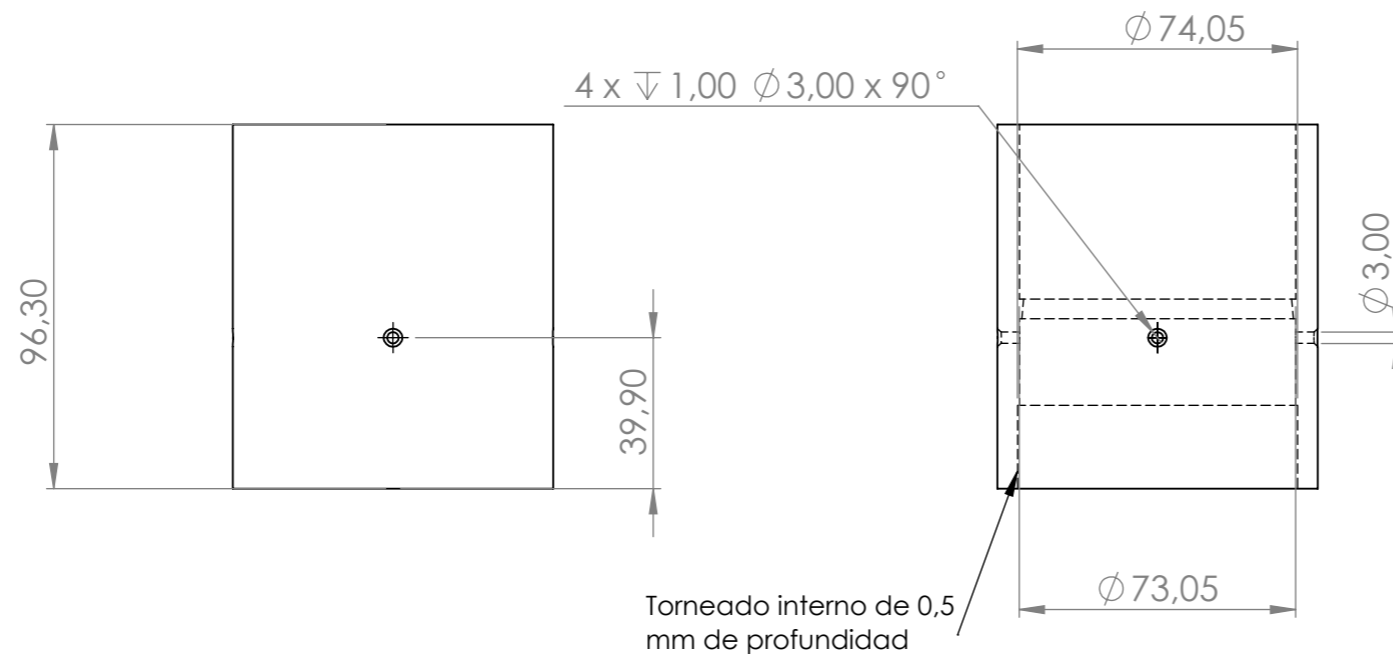
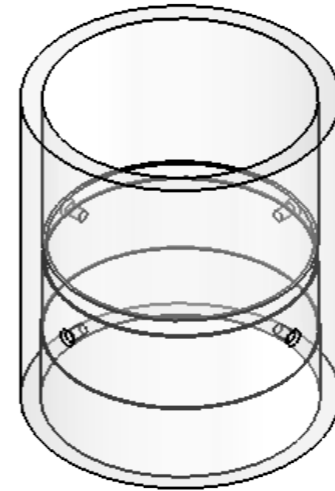
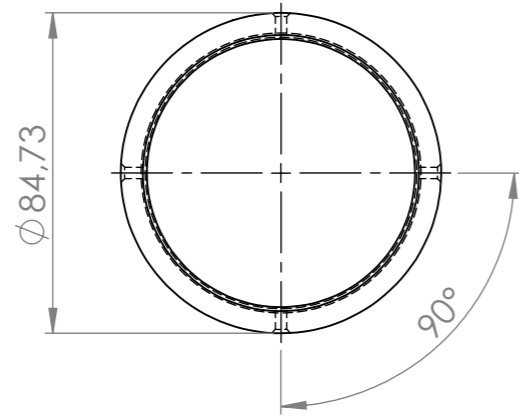
Hueco para tuerca hexagonal M3 x 4



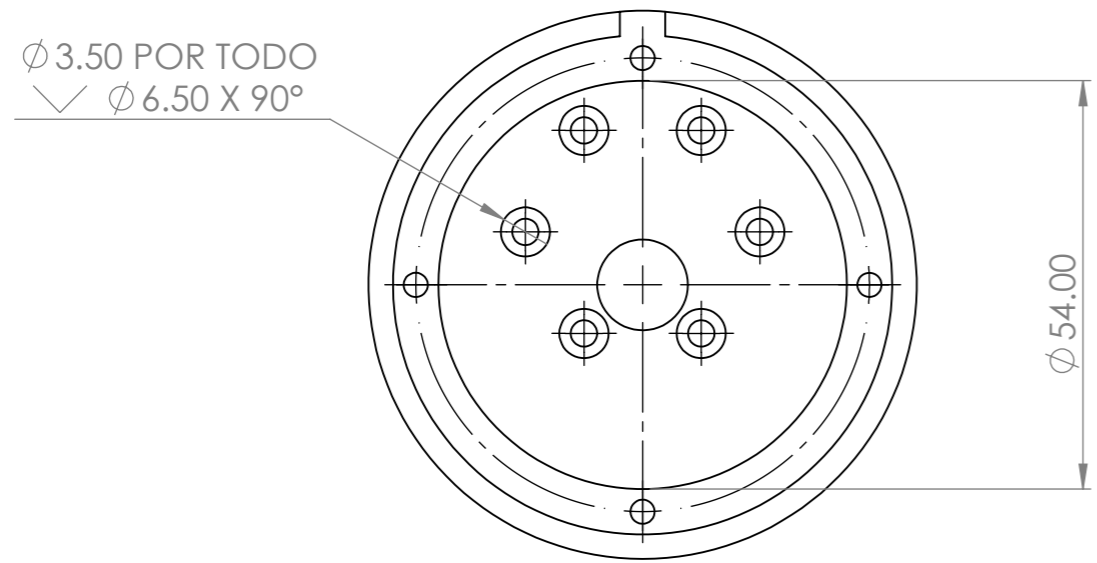
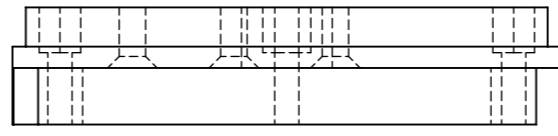
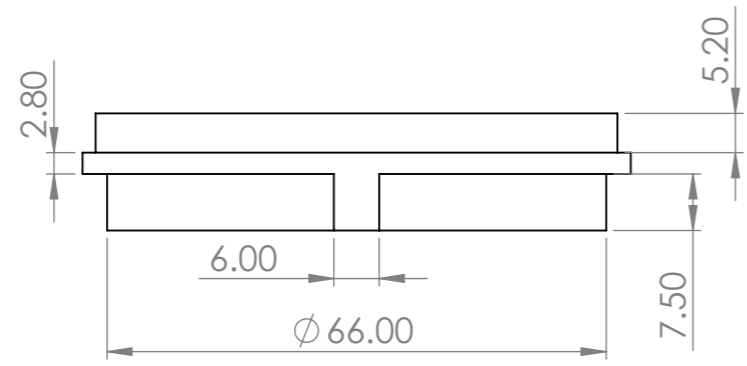
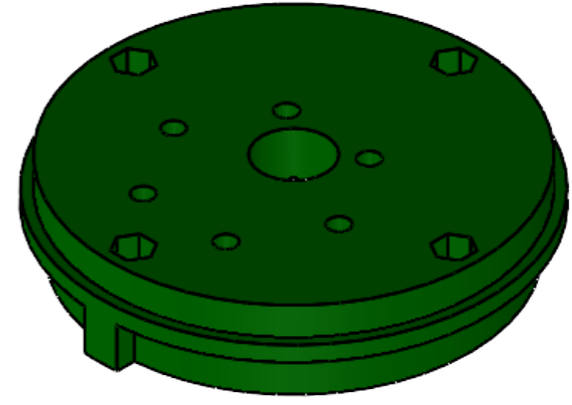
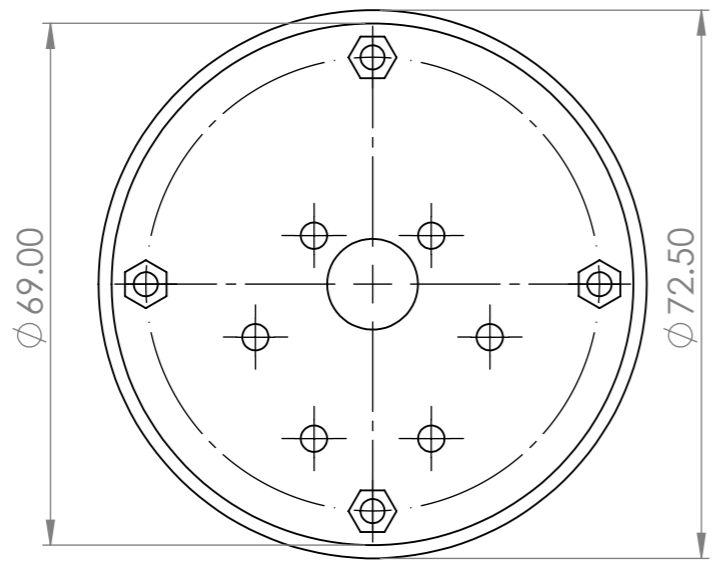
Ref.	Descripción	Material	Especificaciones	Observaciones
9-C	Interactiva con piñón	PETG	TOLERANCIAS: $\pm 0.5\text{mm}$	Todas las dimensiones están en mm
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS ÓMICAS				
 ómica		Tapa con corona interna		Escala: 1:1 Fecha: 30/05/2023
		Diseño: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga Fabricación: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga	Dibujo: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga Revisado: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga	P.I. No 5



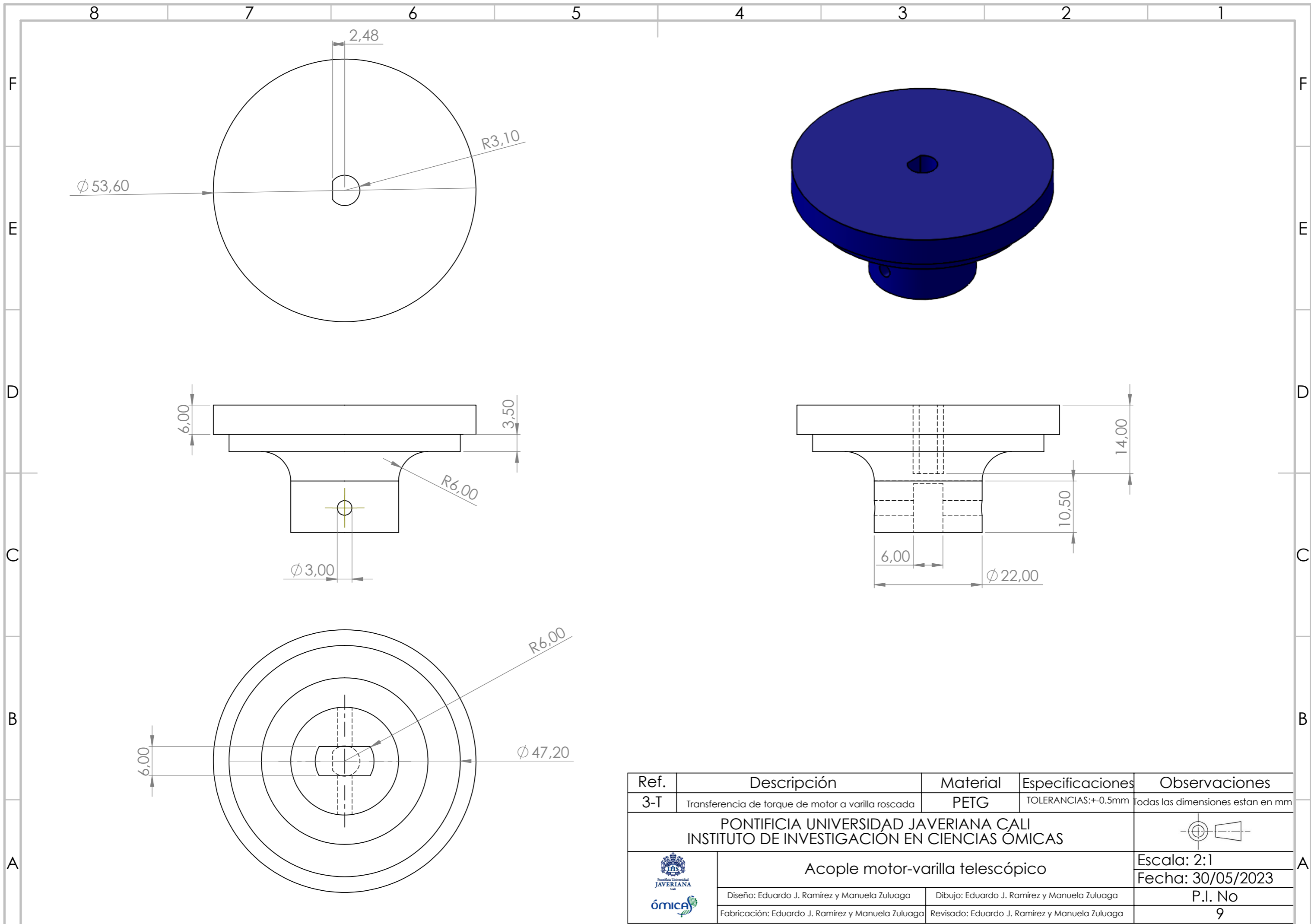
Ref.	Descripción	Material	Especificaciones	Observaciones
10-C	Limita el movimiento	PETG	TOLERANCIAS: $\pm 0,5\text{mm}$	Todas las dimensiones estan en mm
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS ÓMICAS				
 		<h2>Tope mecánico</h2>		Scale: 2:1 Date: 30/05/2023
Diseño: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga		Dibujo: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga		P.I. No
Fabricación: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga		Revisado: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga		6



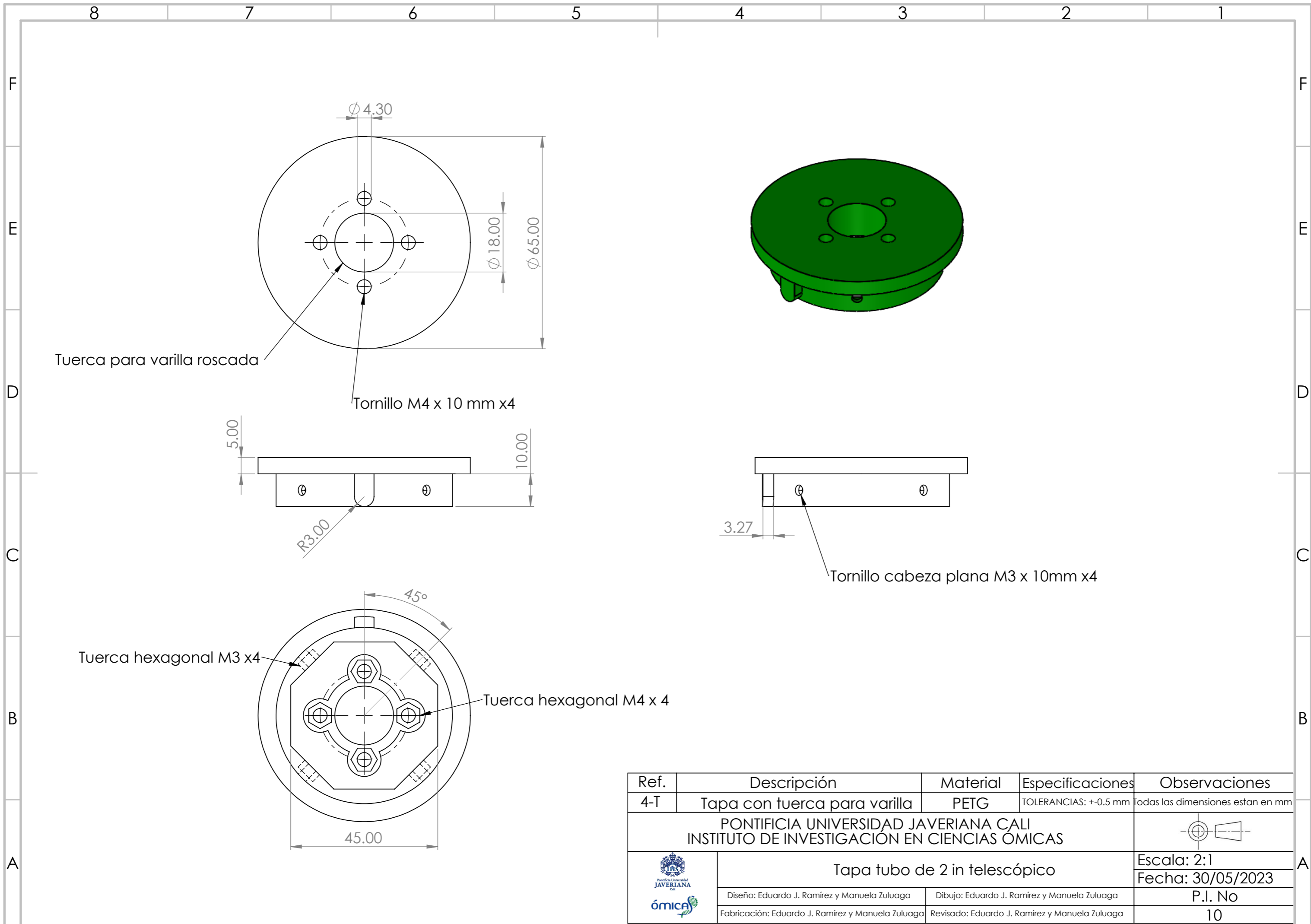
Ref.	Descripción	Material	Especificaciones	Observaciones
11-C	Acople con dispositivo	PVC	TOLERANCIAS: $\pm 0.5\text{mm}$	Todas las dimensiones estan en mm
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI INSTITUTO DE INVESTIGACION EN CIENCIAS ÓMICAS				
 			Unión 2.5 cadera	
Diseño: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga		Dibujo: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga		Escala: 1:2 Fecha: 30/05/2023
Fabricación: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga		Revisado: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga		P.I. No 7



Ref.	Descripción	Material	Especificaciones	Observaciones
1-T	Tapa donde se atronilla motor telsc.	PETG	TOLERANCIAS: +-0.5mm	Todas las dimensiones estan en mm
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS ÓMICAS				
Tapa motor telescópico				Escala: 1:1 Fecha: 30/05/2023
 ómica		Diseño: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga Dibujo: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga Fabricación: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga	Revisado: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga	P.I. No 8



Ref.	Descripción	Material	Especificaciones	Observaciones
3-T	Transferencia de torque de motor a varilla roscada	PETG	TOLERANCIAS:±0.5mm	Todas las dimensiones estan en mm
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS ÓMICAS				
Acople motor-varilla telescópico				Escala: 2:1 Fecha: 30/05/2023
Diseño: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga		Dibujo: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga		P.I. No
Fabricación: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga		Revisado: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga		9



Tuerca para varilla roscada

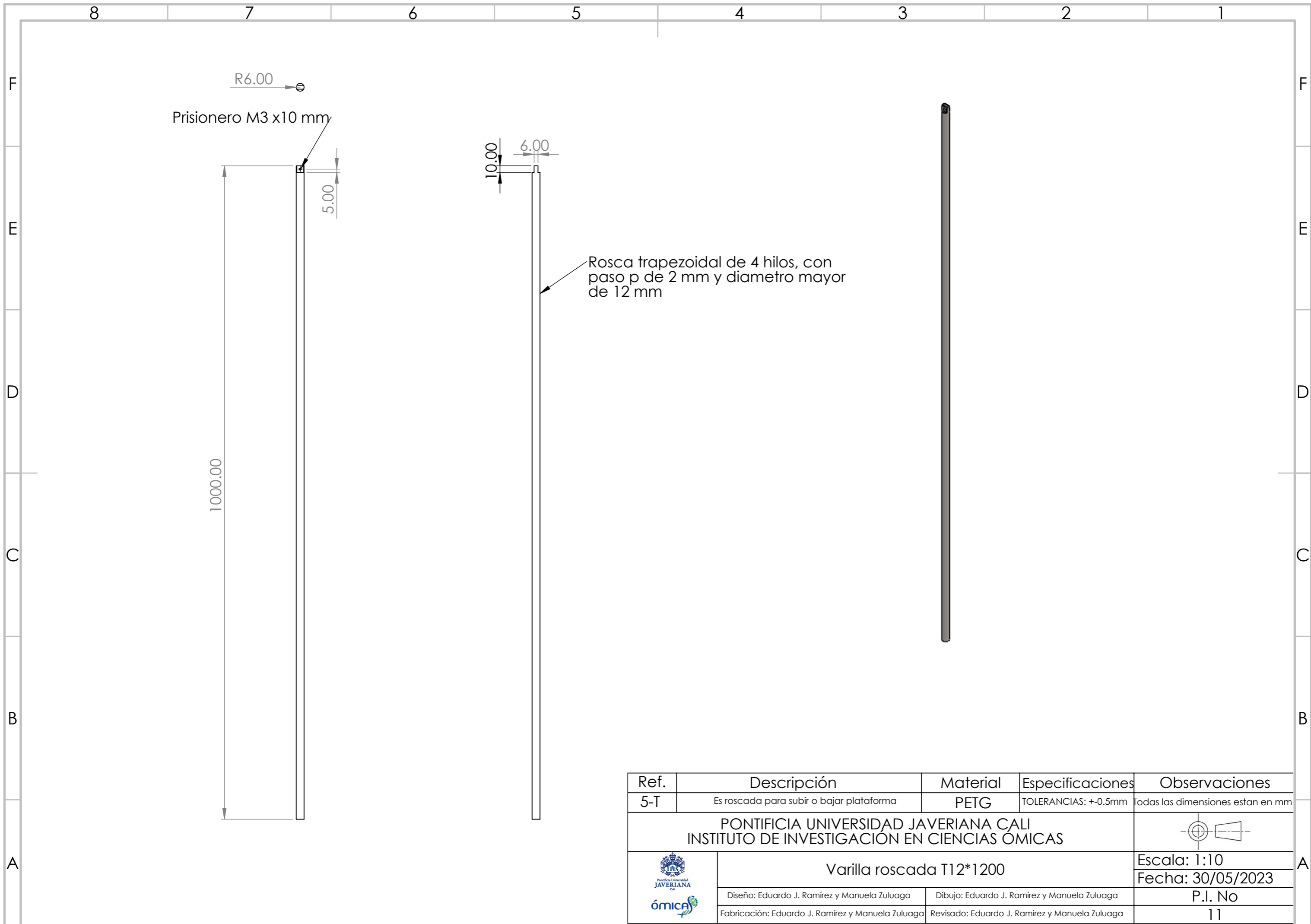
Tornillo M4 x 10 mm x4

Tornillo cabeza plana M3 x 10mm x4

Tuerca hexagonal M3 x4

Tuerca hexagonal M4 x 4

Ref.	Descripción	Material	Especificaciones	Observaciones
4-T	Tapa con tuerca para varilla	PETG	TOLERANCIAS: +-0.5 mm	Todas las dimensiones estan en mm
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS ÓMICAS				
Tapa tubo de 2 in telescópico				Escala: 2:1 Fecha: 30/05/2023
Diseño: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga		Dibujo: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga		P.I. No
Fabricación: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga		Revisado: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga		10



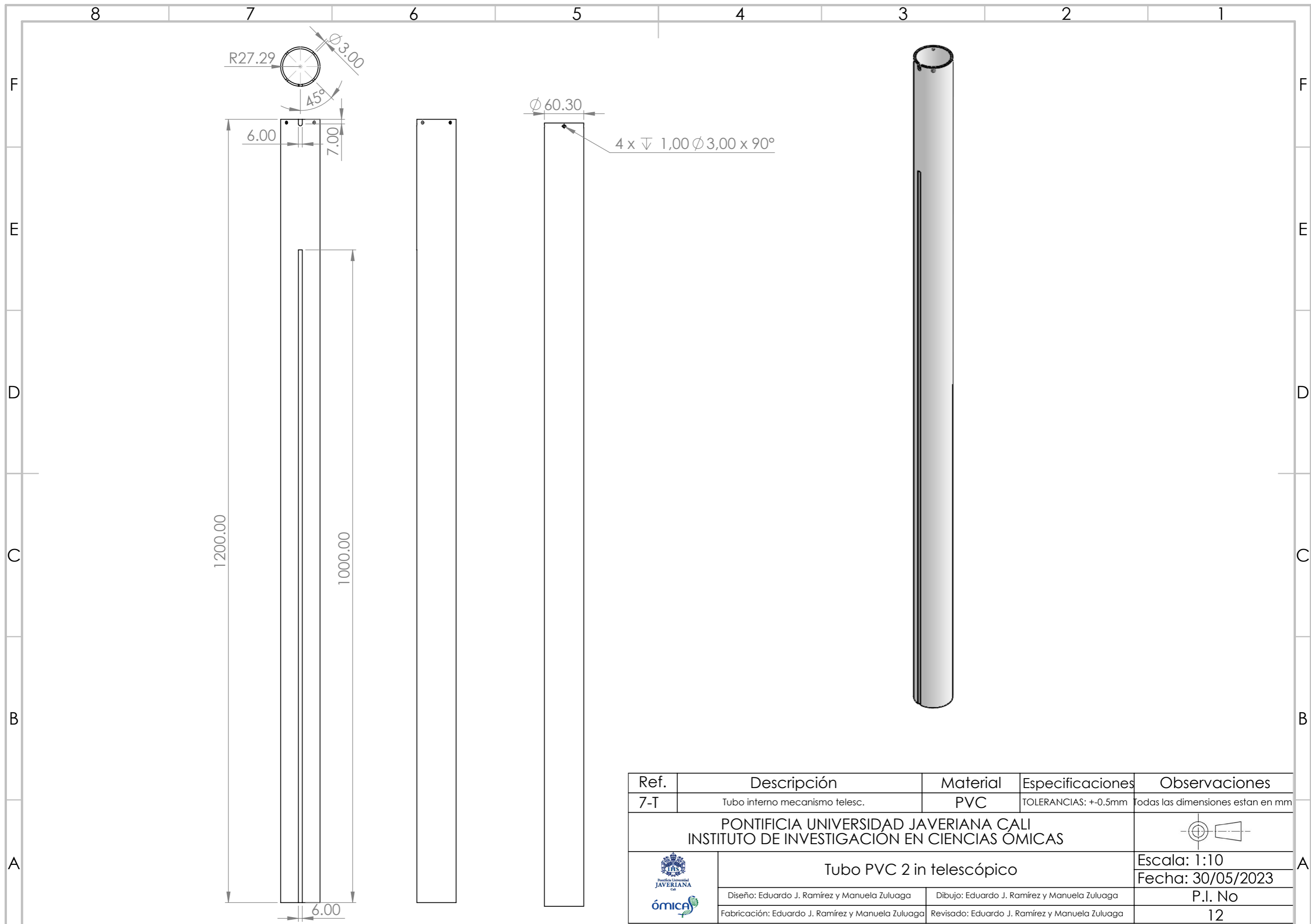
R6.00
Prisionero M3 x10 mm

1000.00

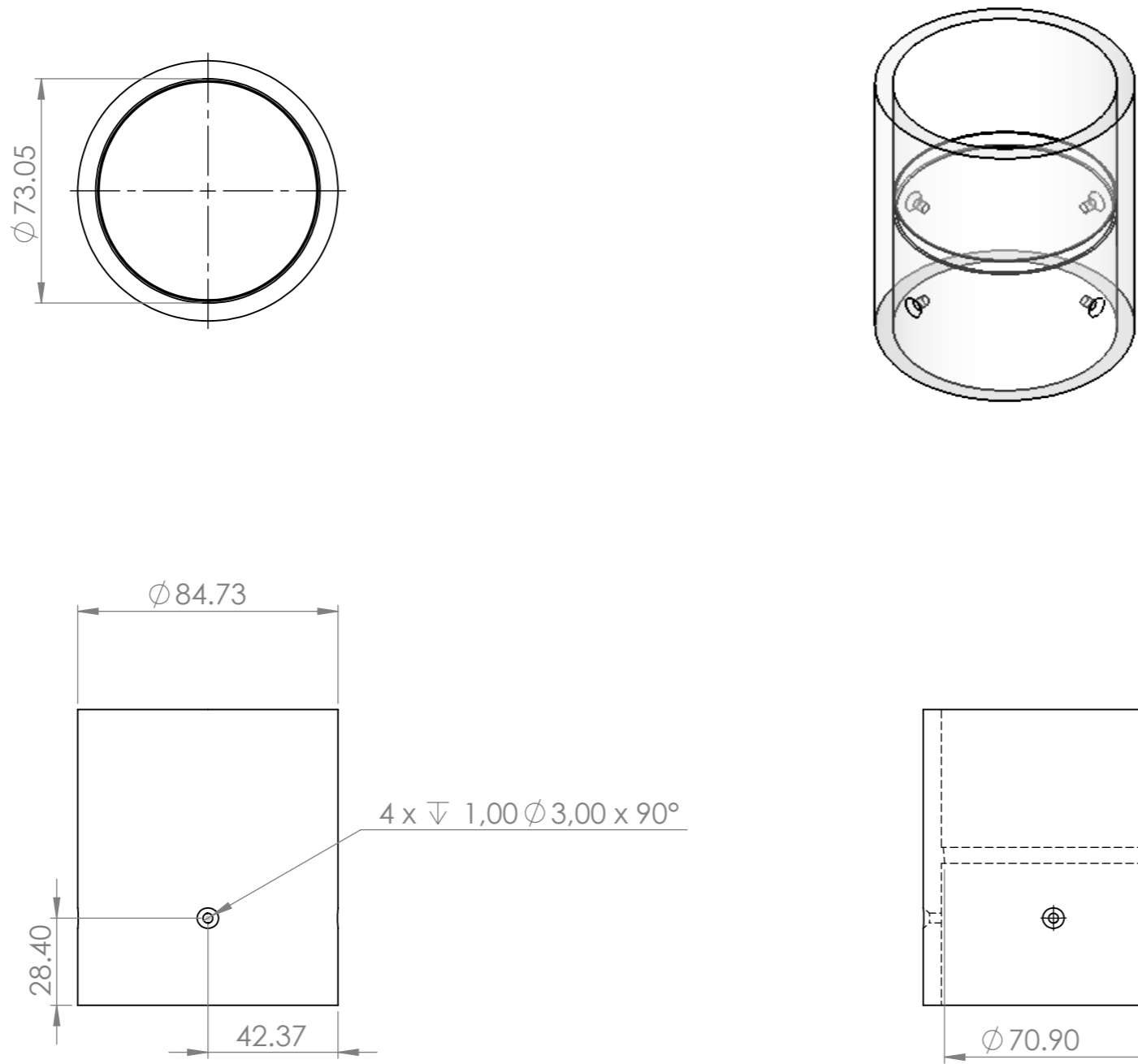
10.00 6.00

Rosca trapezoidal de 4 hilos, con paso p de 2 mm y diametro mayor de 12 mm

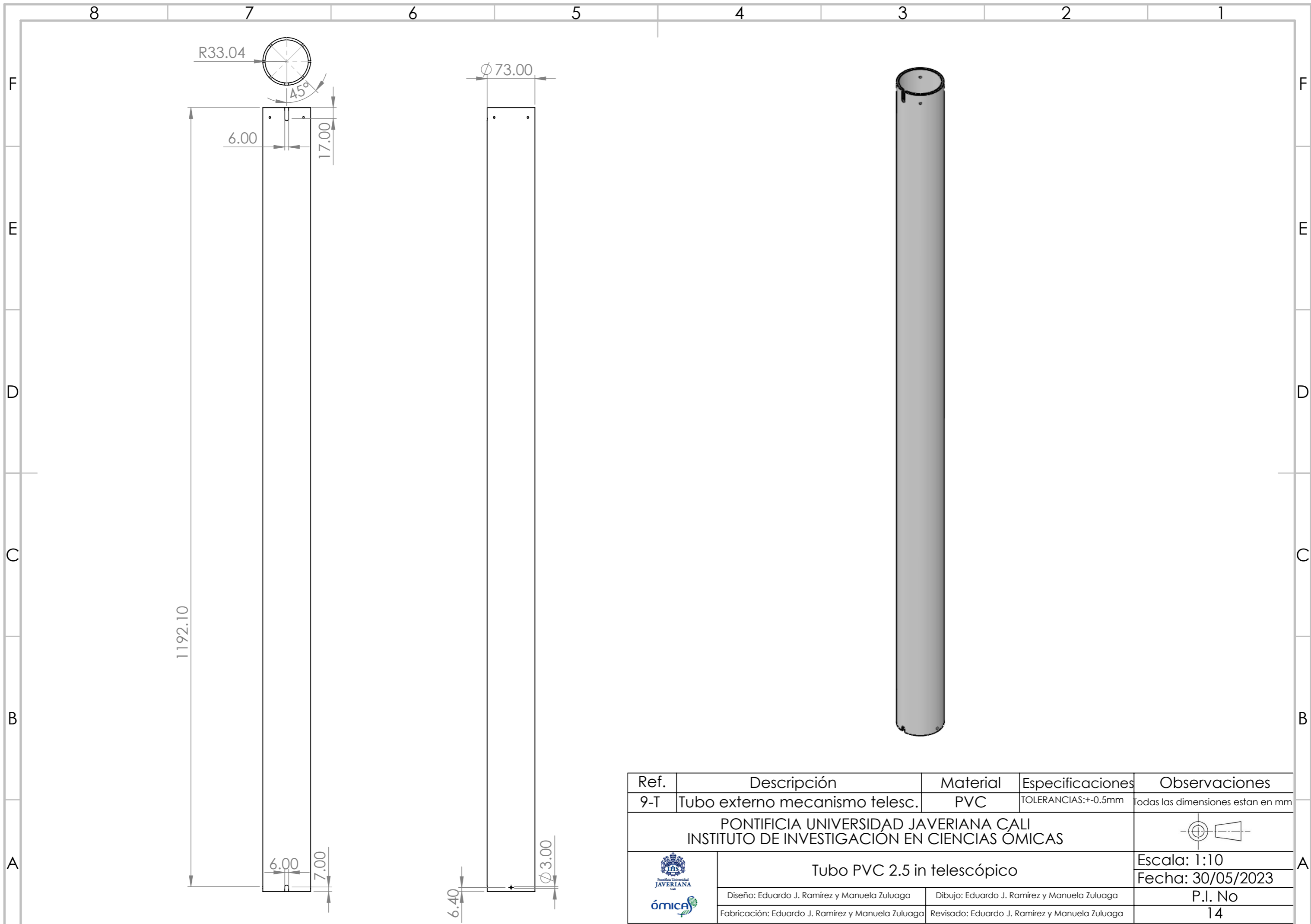
Ref.	Descripción	Material	Especificaciones	Observaciones
5-T	Es roscada para subir o bajar plataforma	PETG	TOLERANCIAS: +-0.5mm	Todas las dimensiones estan en mm
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS ÓMICAS				
 	Varilla roscada T12*1200		Escala: 1:10 Fecha: 30/05/2023	A
	Diseño: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga	Dibujo: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga	P.I. No	
	Fabricación: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga	Revisado: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga	11	



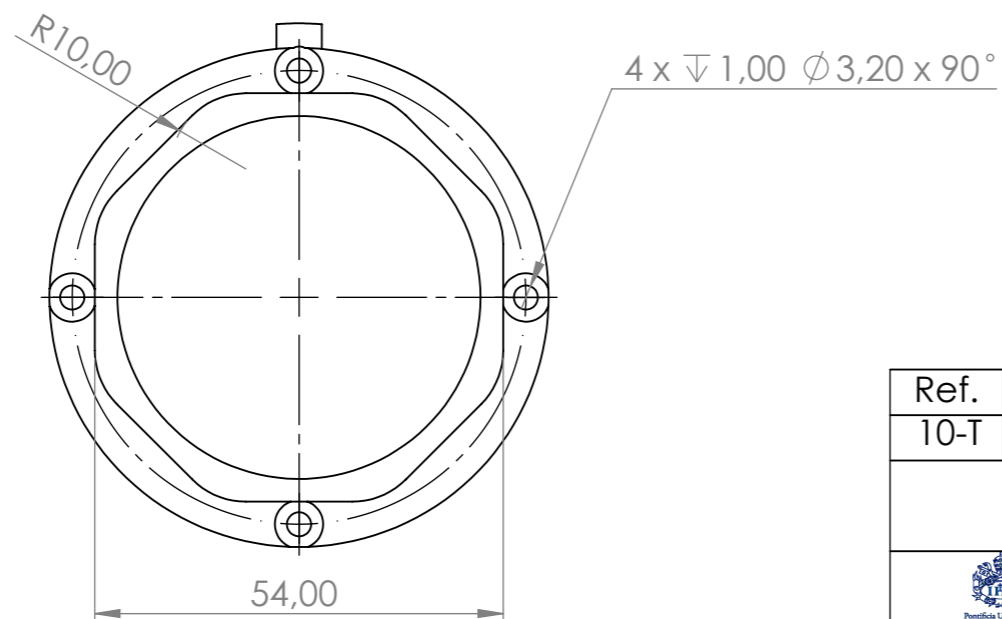
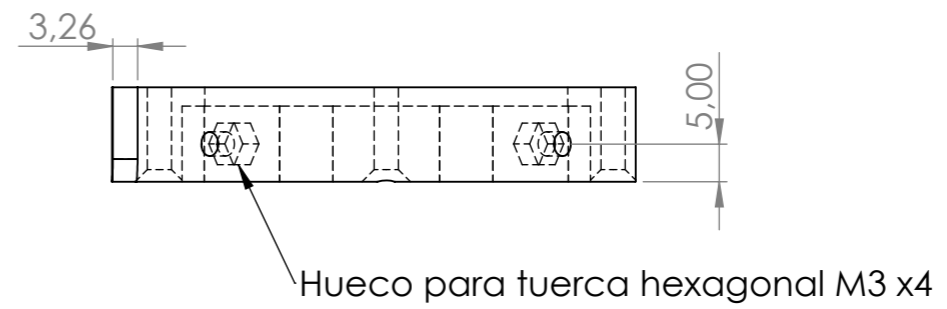
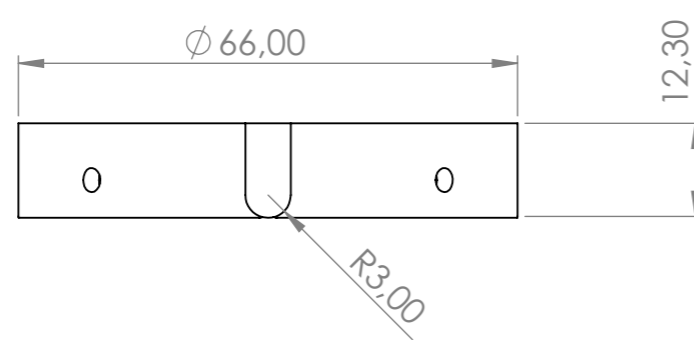
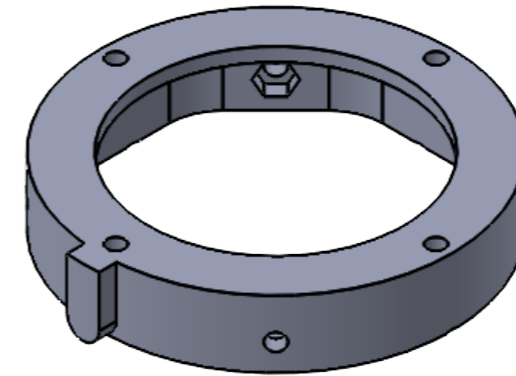
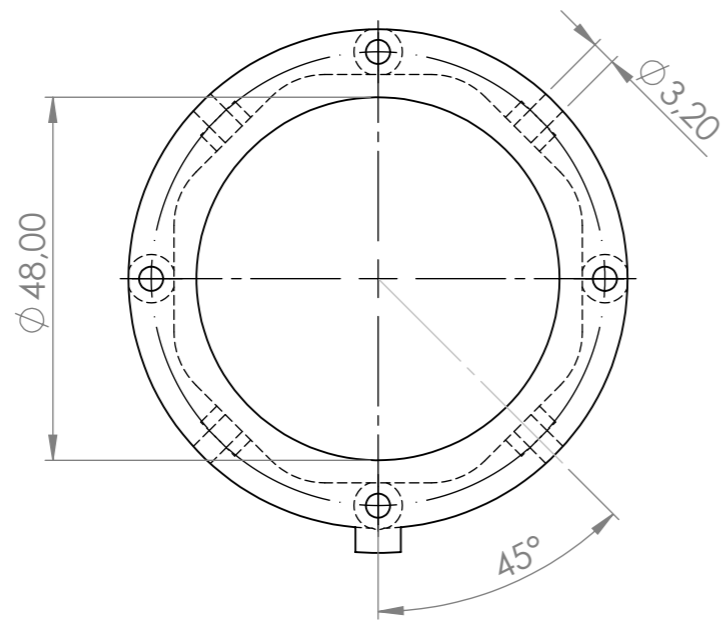
Ref.	Descripción	Material	Especificaciones	Observaciones
7-T	Tubo interno mecanismo telesc.	PVC	TOLERANCIAS: +-0.5mm	Todas las dimensiones estan en mm
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS ÓMICAS				
	Tubo PVC 2 in telescópico			Escala: 1:10 Fecha: 30/05/2023
	Diseño: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga		Dibujo: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga	
	Fabricación: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga		Revisado: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga	
				P.I. No 12



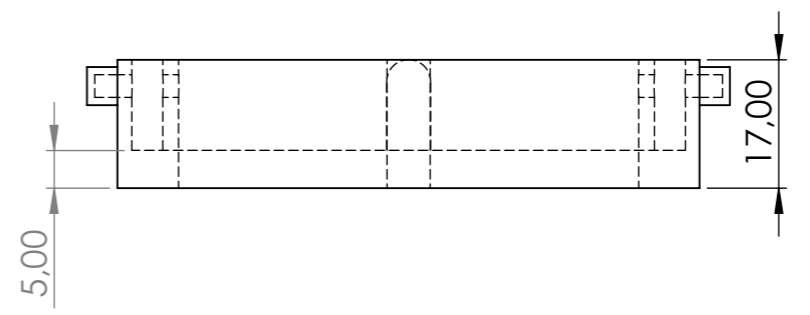
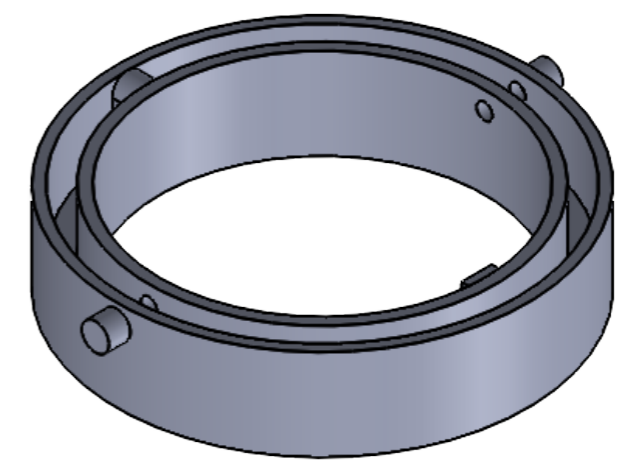
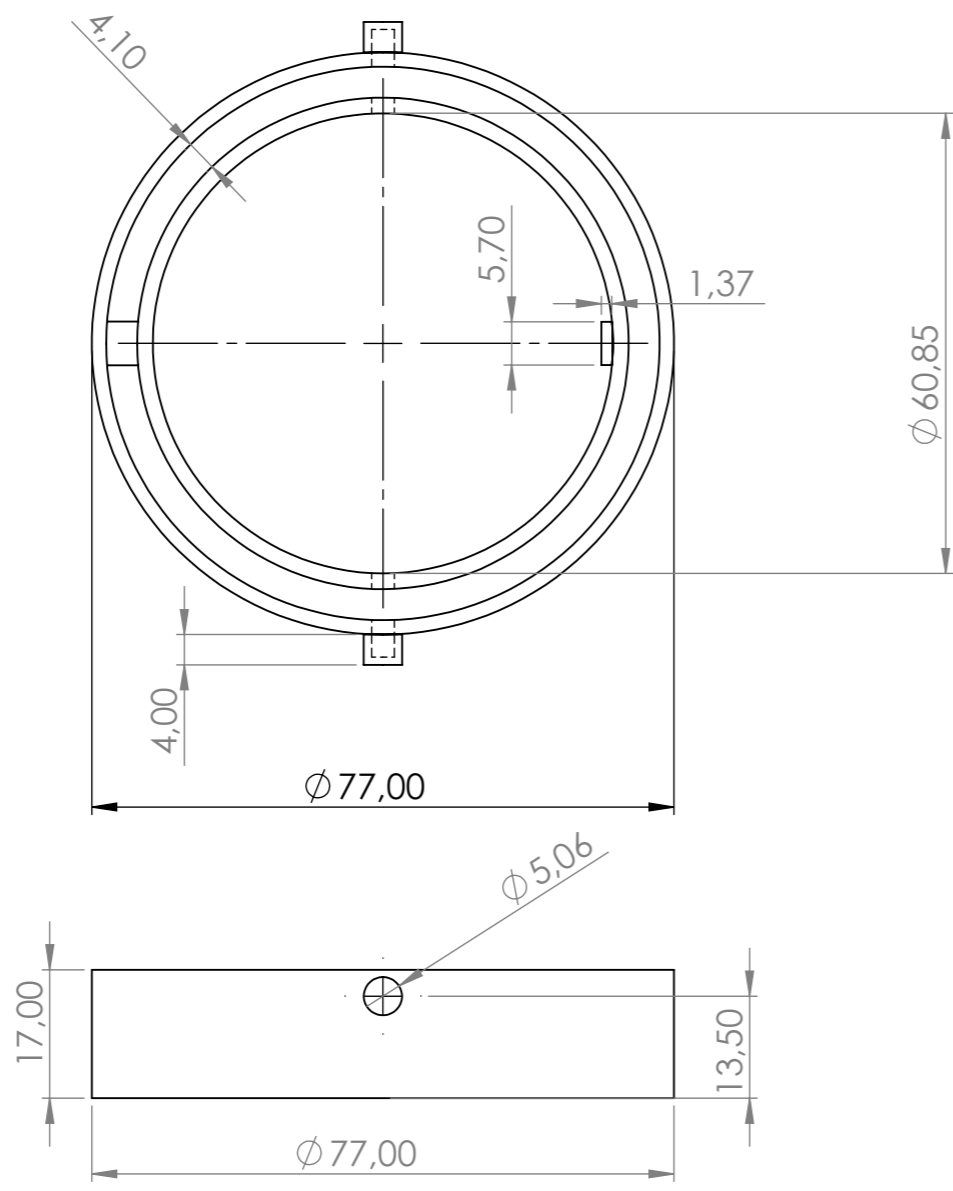
Ref.	Descripción	Material	Especificaciones	Observaciones
8-T	Unión entre módulos de phenoagro	PVC	TOLERANCIAS: $\pm 0.5\text{mm}$	Todas las dimensiones estan en mm
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS ÓMICAS				
	Unión 2.5 in telescópico			Escala: 1:2 Date: 30/05/2023
	Diseño: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga		Dibujo: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga	
	Fabricación: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga		Revisado: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga	
				P.I. No 13



Ref.	Descripción	Material	Especificaciones	Observaciones	
9-T	Tubo externo mecanismo telesc.	PVC	TOLERANCIAS:±0.5mm	Todas las dimensiones estan en mm	
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS ÓMICAS					
 	Tubo PVC 2.5 in telescópico			Escala: 1:10 Fecha: 30/05/2023	
	Diseño: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga		Dibujo: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga		P.I. No
	Fabricación: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga		Revisado: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga		14



Ref.	Descripción	Material	Especificaciones	Observaciones
10-T	Fija las piezas a la unión	PETG	TOLERANCIAS: +/-0.5mm	Todas las dimensiones estan en mm
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS ÓMICAS				
Anillo de fijación				Escala: 1:1 Fecha: 30/05/2023
 ómica		Diseño: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga Dibujo: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga	Fabricación: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga Revisado: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga	P.I. No 15



Ref.	Descripción	Material	Especificaciones	Observaciones
17-T	Evita que gire el tubo	PETG	TOLERANCIAS: +-0.5mm	Todas las dimensiones estan en mm
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS ÓMICAS				
 			Anillo guía telescópico	
Diseño: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga		Dibujo: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga		Escala: 1:1 Fecha: 30/05/2023
Fabricación: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga		Revisado: Eduardo J. Ramírez y Manuela Zuluaga		P.I. No 16