



# BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE LAS CIENCIAS DE LA  
ELECTRÓNICA

**Diseño y Construcción de un sistema de  
Detección de Astro Partículas para Instalarse  
en Monumento Arqueológico - Muografía**

## TESIS

Para obtener el título de:

**Licenciado en Ingeniería en Mecatrónica**

### PRESENTA:

Rogelio Cruz León

### ASESORES:

Dra. Amparo Dora Palomino Merino (FCE - BUAP)  
Asesora

Dr Martín Rodolfo Palomino Merino (FCFM - BUAP)  
Co-Asesor

Lic. Roberto Álvarez Zavala (FCFM - BUAP)  
Co-Asesor

**Junio 2025**

## Agradecimientos

En primer lugar, quiero dedicar este proyecto a mis padres quienes me dieron el apoyo indispensable que me motivo a continuar con todo el proceso de esta investigación y quienes me han dado el sentido de seguir adelante con mis propósitos en la vida.

A mi querido papá quien me ha guiado en mi incursión en el área de las ciencias exactas y su orientación no solo me ayudo a encontrar una pasión por el entendimiento de los fenómenos del universo, sino que también fue clave integrar este interés en la concepción y desarrollo de este proyecto despertando en mí una continua fascinación por el rigor científico.

A mi querida mamá quien me ha involucrado en el ámbito de las humanidades y que me ha permitido entender la importancia del contexto del sentir humano. Gracias a ella logre encontrar un vínculo con la creatividad y la interpretación artística para este proyecto lo que me ha llevado a valorar profundamente la divulgación cultural y emocional.

Al Dr. Ricardo Agustín Serrano por su valiosa ayuda y asesoramiento en la impresión de las piezas en 3D realizadas en el laboratorio de impresión en 3D. Así mismo agradezco al Dr. Alberto Cordero Dávila por permitirme trabajar con el encargado, Noé Cuautle Tepox, dentro del Taller de óptica para la construcción en las piezas estructurales del sistema.

Extiendo mi gratitud al profesor Epifanio Ponce Lancho, cuyo asesoramiento fue fundamental en el desarrollo de la programación para el control de la montura altazimutal automatizada.

la Dra. Amparo Dora Palomino Merino, el Dr. Martín Rodolfo Palomino Merino y el Lic. Roberto Álvarez Zavala, les agradezco su apoyo y guía durante cada etapa del proyecto, desde la concepción de la idea hasta su ejecución final.

A mi familia y amigos quienes con su apoyo directo o indirecto me alentaron contantemente a la realización de este proyecto y hacer posible la culminación del mismo.

# Contenido

Agradecimientos .....	2
Resumen .....	1
Capítulo 1 Introducción .....	1
Capítulo 2 Planteamiento del problema .....	2
2.1 Antecedentes .....	3
2.2 Justificación .....	5
2.3 Objetivo general .....	5
2.4 Objetivos particulares .....	5
2.5 Hipótesis .....	6
Capítulo 3 Marco Teórico .....	6
3.1 Detección de partículas subatómicas .....	6
3.1.1 Imagenología muónica: el uso de rayos cósmicos para analizar pirámides y volcanes.....	6
3.1.2 Exploración arqueológica con rayos cósmicos.....	7
3.2 Detección de partículas subatómicas .....	8
3.2.1 Diseño de una montura altazimutal para una antena parabólica de 3 metros de diámetro utilizada en aplicaciones de radioastronomía.....	8
3.2.2 Usos en astronomía y observaciones de investigación .....	9
3.2.3 Diseños avanzados en telescopios de investigación .....	9
3.3 Fabricación mediante impresión en 3D en la arqueología.....	9
3.3.1 Creación de réplicas y restauración de artefactos .....	9
3.3.2 Escaneo de impresión en 3D para análisis detallado .....	10
3.3.3 Uso de herramientas personalizadas para excavaciones .....	10
3.3.4 Educación y accesibilidad mediante impresión 3D.....	11
3.4 Tecnologías y técnicas no invasivas para las expediciones arqueológicas .....	11
3.4.1 Tecnologías modernas de exploración .....	11
3.4.2 Tecnologías de sensoramiento remoto en la arqueología .....	12
3.4.3 Drones e inteligencia artificial.....	14
3.4.4 Tecnologías innovadoras en arqueología: drones y sensores avanzados .....	15
3.4.5 Espectroscopía Raman aplicada la arqueología.....	16
Capítulo 4 Metodología.....	16
4.1 Introducción al proceso de diseño y construcción .....	16
4.2 Materiales y componentes físicos.....	19

4.3 Componentes electrónicos .....	26
4.3.1 Motores paso a paso.....	26
4.3.2 Microcontrolador.....	40
4.4 Proceso de construcción .....	42
4.4.1 Diseño y fabricación de engranajes cónicos helicoidales para los movimientos de los ejes del azimut y altura (rueda y piñon).....	42
4.4.2 Diseño y fabricación de base giratoria para el acoplamiento del engrane conducido. ....	65
4.4.3 Diseño y fabricación de la base estructural para el montaje de los motores del sistema de transmisión .....	69
4.4.4 Diseño y fabricación de ejes de transmisión para los reductores .....	71
4.4.5 Diseño y fabricación de la estructura para la adaptación del mecanismo (Base cilíndrica).....	74
4.4.6 Diseño y fabricación de una base en forma de cono tumbado invertido .....	76
4.4.7 Diseño y fabricación de los brazos tipo dobsonianos para el movimiento de la altura y bases de empotramiento de los brazos.....	80
4.4.8 Diseño y fabricación de anillos de sujeción para el tubo detector de partículas .....	85
4.4.9 Montaje del tubo detector de partículas .....	91
4.4.10 Programación de la montura altazimutal .....	91
Capítulo 5 Resultados obtenidos y funcionalidad del diseño.....	94
5.1 Ensamblaje final de la montura altazimutal automatizada .....	94
Capítulo 6 Conclusiones.....	97
Capítulo 7 Referencias .....	98

## Resumen

La tesis presenta el diseño, construcción y automatización de un detector de partículas basado en una montura altazimutal inspirada en un telescopio newtoniano. El sistema utiliza plásticos centelladores para detectar partículas en lugar de espejos, permitiendo un análisis acústico para generar interpretaciones musicales. La montura, operada por motores NEMA 23 y NEMA 34 con reductores, ejecuta movimientos precisos mediante engranajes cónicos helicoidales impresos en 3D. El proyecto integra elementos de mecatrónica, análisis estructural y composición musical, destacando la innovación en el campo de la detección de partículas y su representación sonora.

## Capítulo 1 Introducción

La arqueología se enfoca en el estudio de los cambios que se producen en las sociedades por medio de los restos materiales. Las búsquedas y las exploraciones de nuevas zonas inexploradas constituyen el entendimiento y avance del conocimiento histórico, cultural y tecnológico de las civilizaciones pasadas. Por medio de la detección de partículas, como parte de la investigación del enfoque físico, propone que la posibilidad de aprovechar la propia detección de partículas para la búsqueda de estructuras enterradas o áreas de interés arqueológico. En este sentido, el desarrollo de un sistema automatizado que facilite la interacción y análisis de las partículas detectadas es crucial para la presente investigación.

Desde esta perspectiva el presente documento de tesis se enfoca en el diseño, desarrollo e implementación de una montura altazimutal automatizada para la detección de partículas en zonas arqueológicas. Es importante destacar los procesos convencionales de búsqueda que pueden ser más invasivas o manuales, una montura altazimutal automatizada ofrece ventajas en términos de la precisión, preservación, eficiencia y minimización de impacto dentro de la zona arqueología.

El objetivo del presente proyecto es implementar un sistema automatizado que permita la detección no invasiva de partículas dentro de un área por medio de un plástico centellador acoplado en una montura altazimutal. La ciencia aplicada, motivada por los principios de la detección de partículas dentro del enfoque de la física de partículas, es innovadoramente adaptable dentro de la ciencia arqueológica proponiendo una alternativa eficiente y no invasiva dentro de las exploraciones de los sitios arqueológicos.

La montura altazimutal automatizada se diseñará para realizar movimientos predefinidos dentro de los ejes del azimut y la longitud con el propósito de explorar áreas específicas de los terrenos arqueológicos. La detección de partículas mediante este sistema automatizado proporcionara información invaluable

sobre la presencia de estructuras o vestigios enterrados, coadyuvando a la identificación y delimitación de los terrenos o áreas de interés arqueológico para sus prontas investigaciones posteriores.

A lo largo de esta tesis se describirá el proceso de diseño construcción y pruebas de los prototipos realizados de la montura altazimutal automatizada, así también se analizarán los resultados obtenidos y se discutirán las implicaciones dentro del campo de la arqueología y la detección de partículas.

## Capítulo 2 Planteamiento del problema

Dentro de la exploración arqueológica tradicional puede enfrentar ciertos desafíos significativos debido a la naturaleza de las técnicas aplicadas invasivas en los métodos utilizados con el propósito de identificar las estructuras enterradas o áreas de interés. Los procedimientos como las excavaciones manuales o el uso de tecnologías de maquinaria pesada no solo pueden ser costosos y demandantes en términos de tiempo y recursos, sino que también pueden comprometer el patrimonio cultural de la integridad de los sitios arqueológicos, esto puede alterar o incluso destruir evidencias importantes de los acontecimientos del pasado histórico que se tratan de conservar.

Dentro de este contexto, las tecnologías y métodos no invasivos son primordiales para la preservación de estas estructuras. Dentro de la disciplina de la física se pretende aprovechar el análisis de las partículas para usarlas en favor de realizar una investigación no invasiva de las áreas de interés arqueológico, innovando en una tecnología no invasiva, una alternativa innovadora. Este desarrollo de técnica permite identificar las anomalías subterráneas mediante el análisis de las partículas subatómicas que puedan interactuar con los materiales del suelo. Sin embargo, realizar una investigación arqueológica de este estilo requiere la implementación de sistemas automatizados que combinen la precisión, durabilidad y facilidad de uso en el entorno arqueológico.

La detección de las partículas mediante los platicos centelladores representa un avance significativo en estos ámbitos. Para ellos se requiere un sistema que permita una orientación controlada y sistemática de los sensores den una semiesfera de captación. Esto implica el desarrollo de una montura altazimutal automatizada capaz de realizar los movimientos adecuados y predefinidos en los ejes del azimut y la altura.

En este contexto surge la necesidad del diseño y la construcción de una montura altazimutal automatizada que integre la tecnología de detección de las partículas con materiales accesibles y métodos de fabricación modernos, como lo es la impresión en 3D. Este sistema debe ser capaz de realizar las operaciones necesarias de manera precisa y eficiente en su entorno arqueológico con el

propósito de facilitar la exploración no invasiva y contribuyendo al avance de las investigaciones multidisciplinarias dentro de este campo.

## 2.1 Antecedentes

La detección de partículas en el contexto arqueológico ha despertado un creciente interés en las últimas décadas, ya que ofrece una alternativa no invasiva y eficiente para la exploración de sitios arqueológicos. En esta sección, se revisará la literatura relevante que aborda tanto la detección de partículas como el uso de monturas altazimutales automatizadas en investigaciones arqueológicas.

La investigación titulada "Sistema web para el control de inventario del área de gabinete en el proyecto del Museo de Sitio de Túcume-Lambayeque" (Purisaca & Zavaleta, 2019) se propone demostrar cómo la aplicación de tecnologías de desarrollo y metodologías ágiles puede mejorar y agilizar los procesos de control, registro y trazabilidad de materiales arqueológicos durante proyectos de excavación. Este estudio se basó en el proyecto de investigación arqueológica, conservación y restauración, difusión, sensibilización y fortalecimiento cultural del PIP "Recuperación de Huaca Los Gavilanes, Cementerio Los Gavilanes, Huaca Las Abejas y Huaca Facho del Sector Suroeste del Complejo Arqueológico de Túcume, Distrito de Túcume, Provincia y Departamento de Lambayeque", en su etapa 2018.

Durante el desarrollo del estudio, se analizó la cadena de procesos que componen e interactúan con el área de gabinete, con el objetivo de sistematizar dichos procesos y lograr un control más automatizado de la cantidad de material arqueológico hallado diariamente. Para ello, se emplearon técnicas para el desarrollo de software, como tarjetas CRC, y se aplicó la metodología SCRUM para la gestión del proyecto.

Las actividades clave en las que se enfocó el proyecto fueron el control eficiente del ingreso de materiales, la realización de consultas de forma fácil y transparente, y la elaboración inmediata de reportes durante el análisis de los vestigios arqueológicos. Como resultado, se logró mejorar diversos procesos en el área de gabinete, tal como se planteó en los objetivos de la tesis. Esto permitirá a futuros proyectos arqueológicos avanzar significativamente en el procesamiento de la información recolectada en campo y en la gestión eficiente de los materiales, dependiendo del enfoque que los jefes de proyecto decidan darle a esta herramienta desarrollada.

Dentro de la investigación titulada "Uso de rayos cósmicos para estudiar la Pirámide del Sol de Teotihuacán" (Dávalos, Molina, Moreno, Rocha, Yntriago y Naim, 2004), se aborda el papel de las partículas cósmicas como mensajeros que atraviesan la Tierra, interactuando con la materia y proporcionando resultados de desviación y absorción que revelan información sobre la densidad y

composición de la misma. En el caso específico de la Pirámide del Sol, se obtuvieron "radiografías" generadas por estas partículas, las cuales no causan ningún daño estructural y permiten obtener detalles de la estructura interna, contribuyendo así a una mejor comprensión del diseño arquitectónico de la pirámide.

La interacción de las partículas cósmicas con la materia facilita la detección de cambios en la densidad, lo que a su vez permite inferir la presencia de posibles cuartos, pasajes u otras estructuras desconocidas dentro de la pirámide. Esta información resulta de gran importancia para los arqueólogos, quienes pueden utilizarla para llevar a cabo investigaciones más precisas y modelos de excavación que minimicen el riesgo de daños a la estructura durante los trabajos arqueológicos.

En la investigación titulada "El radar de penetración terrestre como herramienta de geofísica somera aplicado a la exploración arqueológica" (García, 2017), se exploran los resultados del uso de un radar como una herramienta versátil para agilizar las excavaciones arqueológicas y obtener resultados empíricos. Sin embargo, es importante tener en cuenta que los resultados obtenidos mediante esta herramienta no son triviales y el procesamiento adecuado de la información puede ser complejo.

Para llegar a conclusiones cualitativas sólidas, es necesario implementar procesos adicionales que permitan obtener resultados que revelen características no visibles en un análisis individual. En este sentido, el manejo del radar implica el estudio de las frecuencias y detalles de interés, especialmente en lo que respecta a los comportamientos del ancho de banda proporcionados por la antena utilizada en zonas arqueológicas. Esto se logra mediante la implementación de espectrogramas, los cuales ayudan a analizar y visualizar la información de manera más completa y detallada.

En el proyecto titulado "Diseño de una montura altazimutal para una antena parabólica de 3 metros de diámetro utilizada en aplicaciones de radioastronomía" (Becerra & Torres, 2022), se llevó a cabo el diseño de una montura altazimutal con el propósito de integrarla como parte de un radio interferómetro capaz de soportar una antena parabólica de 3 metros de diámetro. El diseño de este proyecto se fundamenta en las capacidades mecánicas necesarias para realizar movimientos precisos, considerando los esfuerzos provocados por las cargas máximas de viento y las estimaciones de velocidades.

El proyecto incluyó un análisis de elementos finitos para calcular los campos de desplazamiento, esfuerzos y factor de seguridad, con el fin de desarrollar un programa que pudiera soportar las cargas máximas en condiciones de alta velocidad del viento. La antena cuenta con capacidad de seguimiento y apuntamiento de objetos celestes bajo condiciones ambientales específicas.

## 2.2 Justificación

Destaquemos que los procesos convencionales de búsqueda pueden ser más invasivos o manuales. La importancia de implementar un nuevo método de investigación arqueológica innovador ofrece ventajas en términos de la precisión, preservación, eficiencia y minimización de impacto. Pretende buscar una alternativa que permita preservar las estructuras arquitectónicas, su cosmovisión del funcionamiento de las antiguas sociedades y el entendimiento del comportamiento de las técnicas antiguas utilizadas para la construcción de las mismas estructuras, pero, con el propósito de hacer una exhaustiva investigación en zonas de interés de difícil acceso que nos permita hacer una exploración detallada de los yacimientos que no habían sido considerados dentro de una exploración previa.

Este proyecto pretende realizar una optimización de los métodos de exploración convencionales del área de la arqueología, mejorando la precisión y eficiencia en la identificación de las estructuras enterradas y minimizando el impacto ambiental en las áreas de estudio.

## 2.3 Objetivo general

Desarrollar una montura altazimutal automatizada que permita la detección de partículas en zonas arqueológicas, integrando tecnología de detección no invasiva mediante plásticos centelladores.

## 2.4 Objetivos particulares

- Diseñar y construir una montura altazimutal capaz de realizar movimientos predefinidos en los ejes del Azimut y la altura para que pueda abarcar la mayor área de detección posible dentro de una semiesfera.
- Implementar plásticos centelladores en el sistema de detección, asegurando su correcta integración y funcionalidad para identificar las partículas estelares de interés arqueológico
- Realizar un análisis teórico y experimental de los componentes mecánicos, electrónicos y de detección para que se pueda validar el desempeño de estas piezas en las condiciones reales de la operación.
- Optimizar los materiales y los recursos disponibles para garantizar la construcción económica y sostenible del sistema, sin comprometer la calidad ni la precisión del prototipo.
- Evaluar la efectividad del sistema en la detección de las partículas, analizando su aplicabilidad y relevancia en los estudios arqueológicos, con miras a futuras investigaciones multidisciplinarias.

- Diseñar y fabricar, mediante la impresión en 3D, componentes clave de la estructura para optimizar la geometría y resistencia con el propósito de garantizar un funcionamiento preciso y eficiente en el sistema de la detección de partículas.

## 2.5 Hipótesis

La construcción e implementación de una montura altazimutal automatizada equipada con un sistema de detección de partículas basado en los plásticos centelladores permitirá identificar de manera no invasiva las estructuras enterradas en las zonas arqueológicas. Esto será posible mediante un diseño mecánico eficiente, con movimientos precisos en los ejes del azimut y la altura, usando las tecnologías accesibles como lo es la impresión en 3D, lo que garantizará un funcionamiento económico, sostenible y adaptable a las condiciones del entorno.

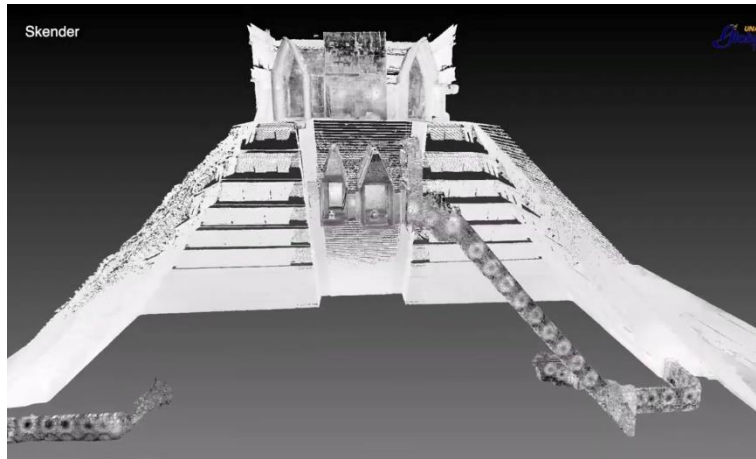
## Capítulo 3 Marco Teórico

### 3.1 Detección de partículas subatómicas

El uso de plásticos centelladores, que emiten luz al interactuar con partículas subatómicas, permite construir sistemas de detección compactos y eficientes. Estas tecnologías no invasivas minimizan el impacto en el entorno arqueológico y proporcionan una herramienta poderosa para la identificación de estructuras internas sin la necesidad de excavaciones directas.

#### 3.1.1 Imagenología muónica: el uso de rayos cósmicos para analizar pirámides y volcanes

La detección de partículas subatómicas, como los muones y otras partículas generadas por rayos cósmicos, ha revolucionado campos como la física de partículas, la geología y la arqueología. Estas partículas, al interactuar con diferentes materiales, pueden proporcionar información crucial sobre la densidad y la estructura interna de objetos o terrenos. En el contexto arqueológico, la detección de partículas se ha utilizado para explorar estructuras enterradas, como en el caso de las radiografías cósmicas aplicadas a la Pirámide del Sol en Teotihuacán. En la Figura 1 se presenta un esquema del proyecto de detección de partículas subatómicas aplicado a la Pirámide del Sol en Teotihuacán (Dávalos et al., 2004).



*Figura 1 Radiografías del proyecto de detección de partículas subatómicas aplicado a la pirámide de Chichen Itzá en Yucatán. Adaptado de Uso de rayos cósmicos para estudiar el templo de Kukulcán.*

### 3.1.2 Exploración arqueológica con rayos cósmicos

Las técnicas no invasivas como lo es la imagenología muónica han sido utilizadas dentro de la exploración de varias estructuras antiguas, como las pirámides de Egipto. Este tipo de tecnologías han permitido realizar análisis detallados de las cavidades y de los patrones internos de las pirámides lo cual ha contribuido a la conservación del patrimonio cultural. En la figura dos se muestra un ejemplo del comportamiento de esta investigación. (Revista UNAM, 2004).



*Figura 2 Imagenología muónica de una pirámide mediante dos detectores.*

### 3.2 Detección de partículas subatómicas

Las monturas altazimutales son mecanismos que permiten el movimiento controlado de dispositivos en dos ejes perpendiculares: azimut (rotación horizontal) y altitud (rotación vertical). Estas monturas son ampliamente utilizadas en sistemas astronómicos y de observación 10 terrestre por su simplicidad y versatilidad. En el presente proyecto, la montura altazimutal se adapta al contexto arqueológico, automatizándose para realizar movimientos precisos que maximicen el área de exploración de partículas detectadas. En la figura 3 se muestra un ejemplo de una montura altazimutal con sus respectivas funcionalidades en cada eje de movimiento Roy, A. E., & Clarke, D. (2003)..

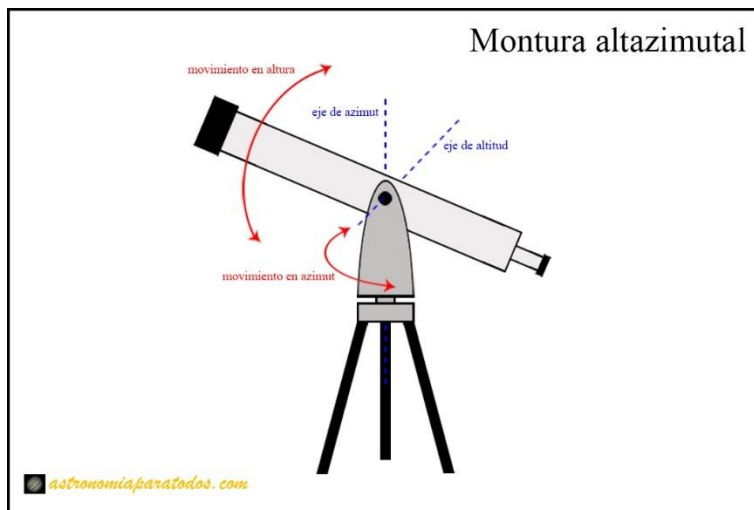


Figura 3 Esquema del funcionamiento de una montura altazimutal. Adaptado de Astronomy: Principles and Practice

#### 3.2.1 Diseño de una montura altazimutal para una antena parabólica de 3 metros de diámetro utilizada en aplicaciones de radioastronomía

Dentro de este proyecto se abarca la idea de utilizar una montura altazimutal con el propósito del montaje de una antena parabólica de tres metros de diámetro destinada para aplicaciones de radioastronomía. Este tipo de monturas permite el movimiento en dos ejes, la altura y el azimut, lo que hace que sea una estructura ideal para el seguimiento de objetos celestes. Para este proyecto, el diseño incluyó la estimación de las cargas aerodinámicas con velocidades de seguimiento por medio de simulaciones en software de búsqueda astronómica como stellarium y análisis de elementos finitos en Matlab. El control de la

montura se basa en el sistema de programación por Arduino y drivers HSS86-V2, lo cual implementan algoritmos para los movimientos de rastreo y de reposicionamiento rápido. Este enfoque asegura un rendimiento estable bajo las condiciones de viento de hasta 108 km/h con un factor de seguridad de mínimo 2. El proyecto ha mostrado su aplicabilidad en proyectos de radioastronomía y otras áreas científicas que requieren precisión (Becerra y Torres, 2022).

### 3.2.2 Usos en astronomía y observaciones de investigación

Las monturas altazimutales manuales han sido ideales para la observación básica dentro del área de la astronomía básica, mientras que las versiones actualizadas computarizadas han permitido movimientos precisos y de seguimiento automatizado. Este tipo de monturas también pueden ser adaptables para realizar astrofotografía mediante las cuñas ecuatoriales lo que ha mejorado en términos de su versatilidad (Astrofotografía.com, n.d.).

### 3.2.3 Diseños avanzados en telescopios de investigación

Dentro de los diseños a gran escala, como lo es el telescopio Magellan Telescope, las monturas altazimutales son capaces de soportar instrumentos pesados, asegurando la estabilidad y la precisión en condiciones extremas lo cual demuestra la capacidad para que estas monturas puedan adaptarse a proyectos científicos de alta exigencia (Universo Blog, n.d.).

## 3.3 Fabricación mediante impresión en 3D en la arqueología

La técnica de la impresión en 3D, también conocida como manufactura aditiva, ha revolucionado diversas disciplinas, incluyendo la arqueología y la preservación del patrimonio cultural (Balletti, Ballarin, & Guerra, 2017). La capacidad de la impresión en 3D para transformar modelos digitales en modelos físicos permite que las investigaciones aborden desafíos relacionados con la restauración, documentación y análisis de artefactos históricos (Koehl & Roussel, 2019). Esta tecnología no solo facilita el acceso a réplicas precisas de piezas frágiles, sino que también mejora la comprensión y conservación de estructuras y artefactos (Reilly, 2015; Rodríguez-González, Muñoz-Nieto, & Gómez-Lahoz, 2017).

### 3.3.1 Creación de réplicas y restauración de artefactos

La impresión 3D ha permitido a los arqueólogos generar réplicas exactas de artefactos antiguos para su estudio y exhibición. Esto es especialmente útil cuando se trata de objetos frágiles o únicos, ya que las réplicas reducen el riesgo de daño a los originales. Además,

esta tecnología se utiliza para restaurar piezas incompletas, fabricando componentes faltantes que se integran cuidadosamente con las partes originales, como sucede con esculturas antiguas o elementos arquitectónicos (Creafab3D, n.d.).

### 3.3.2 Escaneo de impresión en 3D para análisis detallado

El uso de tecnologías de escaneo 3D y posterior impresión ha revolucionado el análisis arqueológico. Los arqueólogos pueden manipular copias impresas de objetos en 12 laboratorios para estudiar su estructura y detalles. Este enfoque es valioso para comprender mejor las técnicas y materiales utilizados por civilizaciones pasadas sin manipular directamente los artefactos originales (Fundación Wiese, n.d.).

### 3.3.3 Uso de herramientas personalizadas para excavaciones

La impresión 3D también ha sido clave para diseñar herramientas específicas adaptadas a las necesidades del trabajo arqueológico, como soportes para manipular objetos delicados o equipos personalizados para excavaciones. Estas herramientas permiten a los arqueólogos realizar su trabajo con mayor precisión y eficiencia, minimizando los riesgos de daño a los hallazgos (Mundo Ingenieril, n.d.). Además, la impresión 3D ha revolucionado la forma en que se documentan y preservan los artefactos históricos, permitiendo la creación de réplicas exactas de piezas frágiles. Por ejemplo, en la Figura 4 se muestra una réplica impresa en 3D de una vasija antigua, la cual permite a los investigadores estudiar y manipular el objeto sin riesgo de dañar el original.



*Figura 4 Réplica impresa en 3D de una vasija antigua, utilizada para estudio y preservación. Adaptado de Réplicas 3D en arqueología.*

### 3.3.4 Educación y accesibilidad mediante impresión 3D

Los museos y centros culturales han adoptado la impresión 3D para crear exposiciones interactivas y réplicas que el público puede explorar de cerca. Esto no solo aumenta la accesibilidad a la historia, sino que también fomenta la conservación de los originales al mantenerlos en condiciones protegidas mientras sus réplicas viajan en exposiciones itinerantes (Fundación Wiese, n.d.). En la Figura 5 se muestra un ejemplo de una réplica impresa en 3D utilizada en una exposición interactiva, permitiendo a los visitantes interactuar con la pieza sin riesgo de dañar el artefacto original.



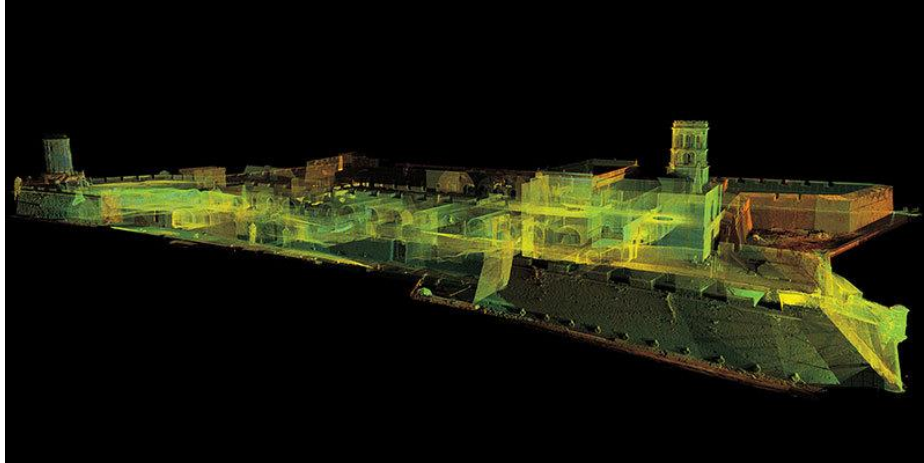
*Figura 5 Réplica impresa en 3D utilizada en una exposición interactiva, permitiendo la interacción del público sin riesgo para el artefacto original.*

## 3.4 Tecnologías y técnicas no invasivas para las expediciones arqueológicas

### 3.4.1 Tecnologías modernas de exploración

Dentro de las tecnologías que se están desarrollando se pretende dar mejores enfoques por medio de la implementación de técnicas innovadoras. Entre las técnicas más destacadas se encuentran la fotogrametría y el uso de láser escáner 3D, que permiten crear modelos tridimensionales detallados de sitios arqueológicos. Estas tecnologías facilitan la documentación y el análisis de estructuras, reduciendo la necesidad de excavaciones. Otra técnica revolucionaria es la espectroscopia infrarroja, que emplea luz para analizar la composición química de los materiales arqueológicos. Esta herramienta ha sido utilizada para identificar pigmentos en pinturas rupestres y analizar sustancias orgánicas en cerámicas, preservando los artefactos al evitar la extracción de muestras. Un método más que se suele utilizar es el georradar y otros métodos de prospección geofísica, que permiten mapear el subsuelo y detectar anomalías que indican la presencia de estructuras

enterradas (Prehistoriaviva.es, n.d.). En la Figura 6 se muestra un ejemplo de la aplicación de estas tecnologías en un sitio arqueológico, destacando el uso del láser escáner 3D y el georradar para la documentación no invasiva



*Figura 6 Aplicación de tecnologías innovadoras en arqueología, incluyendo el uso de láser escáner 3D y georradar para la documentación no invasiva de sitios arqueológicos.*

### 3.4.2 Tecnologías de sensoramiento remoto en la arqueología

El sensoramiento remoto es una de las técnicas de búsqueda arqueológica que ha aportado un gran cambio dentro de esta área, permitiendo una exploración de grandes áreas sin excavar lo que ha ayudado a reducir el impacto dentro de los sitios arqueológicos y que ha ayudado a optimizar el tiempo y los recursos necesarios para estas expediciones.

#### 3.4.2.1 Aereofotogrametría

Esta técnica utiliza fotografías aéreas para obtener información de la superficie terrestre. El mapeo detallado de estas superficies en zonas arqueológicas es uno de los usos más comunes que se le da a esta técnica, permitiendo obtener información detallada sobre la topografía y la ubicación de las estructuras, incluyendo características ocultas como estructuras enterradas y otros elementos no visibles desde el suelo. Esta técnica es utilizada dentro del área cultural de JIA, la cual la emplea para la identificación de sitios arqueológicos, las características topográficas y el mapeo de la distribución de los objetos dentro del área de la superficie terrestre en la que se encuentran (Revista Ecociencias, 2023). En la Figura 7 se muestra un ejemplo de un mapeo detallado realizado mediante

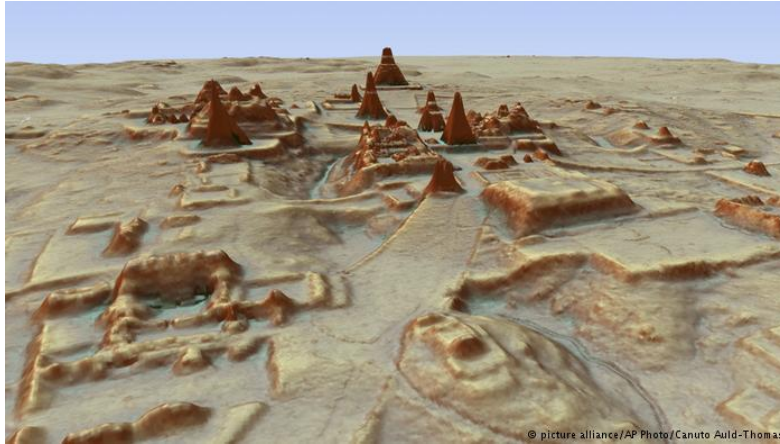
fotografías aéreas, destacando la identificación de estructuras arqueológicas ocultas



*Figura 7 Mapeo detallado de una zona arqueológica utilizando fotografías aéreas, destacando la identificación de estructuras ocultas.*

### 3.4.2.2 Sensores LiDAR (Detección y teledetección por láser)

La tecnología LiDAR ha revolucionado la arqueología en selvas densas, como las regiones ocupadas por la civilización Maya. Este sistema, que emite pulsos láser para mapear superficies cubiertas de vegetación, ha permitido a los arqueólogos descubrir redes de caminos y asentamientos ocultos durante siglos. Además, los modelos tridimensionales generados a partir de estos datos son herramientas valiosas para analizar y documentar la distribución de los sitios arqueológicos (Revista Ecociencias, 2023; IDC, n.d.). En la Figura 8 se muestra un ejemplo de un modelo tridimensional generado mediante LiDAR, destacando la detección de estructuras ocultas bajo la vegetación en una región maya.



*Figura 8 Modelo tridimensional generado mediante tecnología LiDAR, mostrando la detección de estructuras ocultas bajo la vegetación en una región maya.*

*Adaptado de Aplicación de LiDAR en arqueología.*

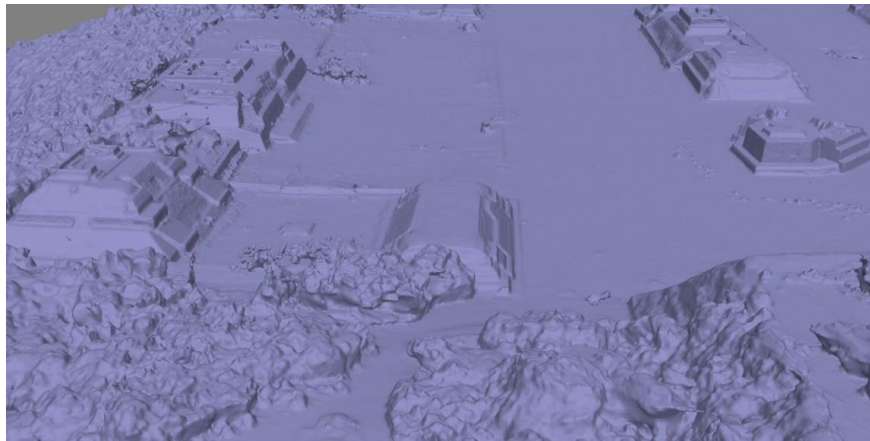
### 3.4.2.3 Realidad aumentada

Esta técnica ha revolucionado la forma en la que podemos entender y presentar la arqueología la cual nos permite realizar visualizaciones inmersivas superponiendo modelos en 3D de los objetos y de las estructuras arqueológicas dentro del área de su ubicación original o dentro de los entornos virtuales lo que crea experiencias más realistas y comprensibles para el público. Con estas características no puede dar un contexto histórico que nos ayude a comprender como se veían los objetos y las estructuras relacionadas dentro de su entorno original lo que ha ayudado a facilitar la interpretación arqueológica. Además de ello esta tecnología a aportado una comunicación efectiva que sirve como una herramienta importante para la transmisión de información arqueológica al público en general lo cual aporta mayor conciencia y aprecio por el patrimonio cultural (Revista ecociencias, 2023)

### 3.4.3 Drones e inteligencia artificial

El uso de los drones y las tecnologías basadas en la inteligencia artificial ha revolucionado la forma en la que los arqueólogos pueden explorar y documentar los sitios históricos. Estas herramientas no tripuladas permiten el acceso a áreas remotas y de difícil acceso, como selvas densas o regiones montañosas, donde los métodos tradicionales resultan ineficientes o peligrosos. Los drones están equipados con sensores avanzados, como radares de penetración terrestre (GPR), cámaras multispectrales y tecnologías LiDAR, lo que les permite detectar estructuras enterradas. Un ejemplo destacado de su aplicación fue en

Egipto, donde los drones identificaron tumbas y cámaras funerarias bajo la arena del desierto al analizar datos de anomalías, reduciendo significativamente el tiempo y los costos asociados a los procesos convencionales de excavación. Además, los drones tienen la capacidad de generar modelos tridimensionales detallados de los sitios arqueológicos, lo que ayuda a analizar las estructuras desde diferentes perspectivas, planificar futuras excavaciones y preservar digitalmente el patrimonio para las generaciones futuras (Metaverso, n.d.; IDC, n.d.). En la Figura 9 se muestra un ejemplo de un modelo tridimensional generado por drones, destacando la detección de estructuras enterradas en un sitio arqueológico.



*Figura 9 Modelo tridimensional generado por drones, mostrando la detección de estructuras enterradas en un sitio arqueológico. Adaptado de Aplicación de drones en arqueología.*

#### 3.4.4 Tecnologías innovadoras en arqueología: drones y sensores avanzados

Equipados con cámaras de alta resolución, sensores multiespectrales y LiDAR, los drones han facilitado la identificación de estructuras enterradas y patrones arqueológicos que no serían visibles desde el suelo. Además, los sensores de infrarrojos y multiespectrales montados en los drones pueden detectar características y cambios sutiles en la vegetación o el suelo, lo que facilita la localización de yacimientos ocultos. Adicionalmente, la combinación de estas herramientas con inteligencia artificial ha mejorado la eficiencia de las investigaciones. Algoritmos avanzados pueden procesar los datos capturados por los drones para identificar patrones y anomalías de manera automática (Ciencia Sin Límites, n.d.).

### 3.4.5 Espectroscopía Raman aplicada la arqueología

Esta es una de las técnicas fundamentales dentro de la investigación arqueológica debido a su capacidad de análisis no destructivo. Este método ha permitido identificar la composición química de artefactos y estructuras directamente en el lugar de su descubrimiento, sin la necesidad de la extracción de muestras ni la alteración del entorno de la zona arqueológica. Esta técnica es utilizada para analizar pigmentos, tintes y materiales inorgánicos en piezas arqueológicas. Como ejemplo, esta técnica ayudó para identificar pigmentos como hematita y compuestos de yeso mediante un espectrómetro Raman portátil en pinturas rupestres en el Abrigo de los Chaparros, España. la espectroscopía Raman ha sido utilizada en la Alhambra para caracterizar las decoraciones de yeserías policromadas en las bóvedas de la Sala de los Reyes. Este análisis permitió identificar pigmentos como lazurita, cinabrio y óxidos de estaño, además de estudiar procesos de degradación, lo que contribuye a esfuerzos de restauración y conservación de este importante patrimonio cultural. Esta técnica es una herramienta esencial para la preservación de la integridad de los sitios arqueológicos mientras que se obtienen los datos detallados sobre los materiales y las técnicas empleadas en su construcción. (Metrohm, n.d.).

## Capítulo 4 Metodología

### 4.1 Introducción al proceso de diseño y construcción

El diseño y construcción de la montura altazimutal automatizada para la detección de partículas en zonas arqueológicas siguió un proceso sistemático que incluyó la selección de materiales, componentes electrónicos, y la fabricación de piezas específicas mediante técnicas modernas como la impresión 3D. El objetivo principal fue desarrollar un sistema que permitiera la detección no invasiva de partículas subatómicas, utilizando plásticos centelladores como sensores, y que fuera capaz de realizar movimientos precisos en los ejes de azimut y altitud.

El proceso comenzó con la selección de materiales adecuados para garantizar la resistencia, durabilidad y funcionalidad de la estructura. Posteriormente, se eligieron los componentes electrónicos necesarios para controlar los movimientos de la montura, incluyendo motores paso a paso, microcontroladores y controladores de motor. Finalmente, se diseñaron y fabricaron piezas clave, como engranajes cónicos helicoidales, utilizando impresión 3D, y se integraron todos los componentes en una estructura robusta y funcional.

La montura altazimutal debe contener los siguientes elementos básicos para su correcto funcionamiento:

1. **Base estructural:** Proporciona soporte y estabilidad a la montura. Incluye una base cilíndrica y un cono truncado invertido para distribuir las cargas de manera uniforme.
2. **Engranajes cónicos helicoidales:** Permiten la transmisión de movimiento entre los ejes de azimut y altitud, asegurando movimientos suaves y precisos.
3. **Motores paso a paso y reductores:** Controlan los movimientos en los ejes de azimut y altitud, proporcionando el torque necesario para mover la estructura.
4. **Tubo detector de partículas:** Fabricado con plástico centellador, es el componente central del sistema de detección, capaz de identificar partículas subatómicas.
5. **Brazos dobsonianos:** Sostienen el tubo detector y permiten su movimiento en el eje de altitud.
6. **Anillos de sujeción:** Fijan el tubo detector a los brazos dobsonianos, permitiendo su giro controlado.
7. **Sistema de control electrónico:** Incluye microcontroladores y controladores de motor para gestionar los movimientos de la montura.

A continuación en la figura 10, se presenta un diseño básico de la montura altazimutal, donde se indican los elementos principales que la componen:

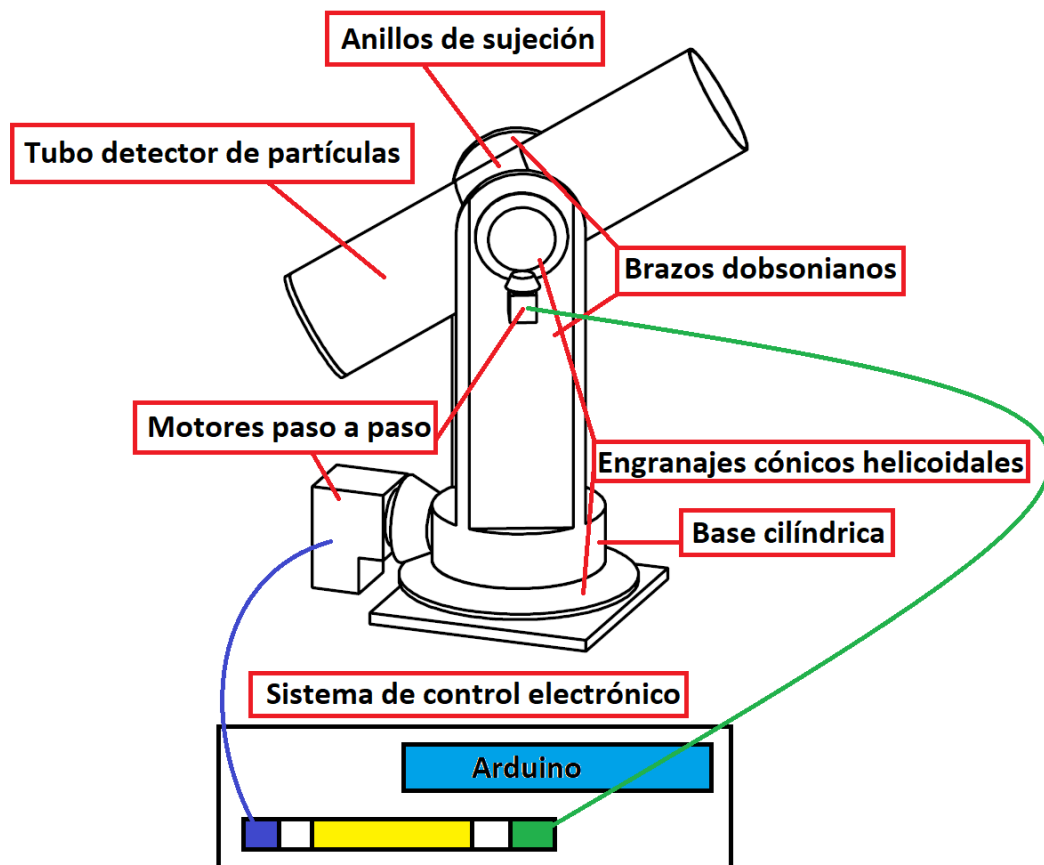


Figura 10 Diseño básico de la montura altazimutal

La imagen muestra un esquema dibujado de la montura altazimutal automatizada, diseñada para la detección de partículas en zonas arqueológicas. En el esquema se destacan los siguientes elementos principales:

**1. Base cilíndrica:**

- Ubicada en la parte inferior de la estructura, proporciona soporte y estabilidad a la montura.

**2. Engranajes cónicos helicoidales:**

- Ubicados en la parte central de la base cilíndrica, estos engranajes permiten la transmisión de movimiento entre los ejes de azimut y altitud.

- El engranaje impulsor (piñón) está conectado al motor paso a paso, mientras que el engranaje conducido transmite el movimiento al eje de azimut y la altura.

### 3. **Motores paso a paso y reductores:**

- Los motores están conectados a los engranajes y controlan los movimientos en los ejes de azimut y altitud.

### 4. **Brazos dobsonianos:**

- Ubicados en la parte superior de la estructura, sostienen el tubo detector de partículas.
- Permiten el movimiento en el eje de altitud, ajustando la posición del tubo detector para cubrir el área de detección.

### 5. **Tubo detector de partículas:**

- Ubicado en la parte superior de los brazos dobsonianos, es el componente central del sistema de detección.

### 6. **Anillos de sujeción:**

- Fijan el tubo detector a los brazos dobsonianos, permitiendo su giro controlado en el eje de altitud.

### 7. **Sistema de control electrónico:**

- Representado como una caja conectada a los motores, gestiona los movimientos de la montura.
- Incluye un microcontrolador (como Arduino) y controladores de motor (como DRV8825) para ejecutar los movimientos predefinidos en los ejes de azimut y altitud.

## 4.2 Materiales y componentes físicos

El proceso de diseño y construcción de la montura altazimutal se basó en la selección cuidadosa de materiales accesibles y económicos para garantizar la funcionalidad y resistencia de la estructura. A continuación, se describen los materiales utilizados en cada componente clave:

- Filamento PLA:

El filamento PLA (ácido poliláctico) fue seleccionado para la impresión 3D de los engranajes cónicos helicoidales y otras piezas específicas que requieren precisión y resistencia. El PLA es un material biodegradable derivado de recursos renovables como el almidón de maíz, y es ampliamente utilizado en aplicaciones de prototipado funcional debido a sus propiedades mecánicas y facilidad de impresión. La tabla 1 muestra las características específicas del filamento PLA.

*Tabla 1 características del filamento PLA para la impresión en 3D*

<b>Propiedades técnicas del PLA:</b>	
<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
Resistencia a la tracción	50 - 70 MPa
Resistencia a la compresión	70 - 90 MPa
Módulo elástico	2.7 - 3.2 GPa
Densidad	1.24 g/cm <sup>3</sup>
Temperatura de fusión	150 - 160 °C
Temperatura de deflexión térmica (HDT)	50 - 60 °C

Justificación:

- **Durabilidad y rigidez:** El PLA proporciona la rigidez necesaria para garantizar un funcionamiento suave de los movimientos en los ejes de azimut y altitud, especialmente en los engranajes cónicos helicoidales.
- **Facilidad de impresión:** El PLA es fácil de imprimir en 3D, lo que permite la fabricación de piezas con alta precisión y acabado superficial adecuado.
- **Resistencia mecánica:** Aunque el PLA tiene una resistencia moderada, es suficiente para las cargas y esfuerzos esperados en este proyecto.

- Madera:

La madera fue utilizada para la construcción de la base y los soportes principales de la montura. Este material fue seleccionado por su disponibilidad, bajo costo y propiedades estructurales que proporcionan estabilidad y resistencia a la estructura PVC. En la tabla 2 se muestra las características de la madera usada para este proyecto.

*Tabla 2 características técnicas de la madera.*

<b>Propiedades técnicas de la madera (pino):</b>	
<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
Densidad	0.5 - 0.6 g/cm <sup>3</sup>
Resistencia a la tracción	70 - 100 MPa
Resistencia a la compresión	40 - 60 MPa
Módulo elástico	8 - 12 GPa
Conductividad térmica	0.12 W/m·K

Justificación:

- **Estabilidad y resistencia:** La madera proporciona una base sólida y estable para la montura, capaz de soportar las cargas estáticas y dinámicas del sistema.
- **Facilidad de manipulación:** La madera es fácil de cortar y ensamblar, lo que permite la construcción rápida y económica de la estructura.
- **Bajo costo:** En comparación con otros materiales como el metal o el plástico de ingeniería, la madera es una opción económica y accesible.

- PVC (policloruro de vinilo):

El PVC fue utilizado para la fabricación del tubo detector de partículas y otros componentes estructurales. Este material fue seleccionado por su resistencia, durabilidad y facilidad de manipulación. En la tabla 3 se muestran las características del PVC.

*Tabla 3 Especificaciones técnicas del PVC*

<b>Propiedades técnicas de PVC:</b>	
<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
Densidad	1.38 g/cm <sup>3</sup>
Resistencia a la tracción	50 - 60 MPa
Resistencia a la compresión	70 - 80 MPa
Módulo elástico	2.4 - 4.1 GPa
Temperatura de fusión	100 - 260 °C
Conductividad térmica	0.19 W/m·K

Justificación:

- Resistencia y durabilidad: El PVC es un material resistente a la corrosión y a los impactos, lo que lo hace ideal para el tubo detector de partículas.
  - **Facilidad de montaje:** El PVC es fácil de cortar y ensamblar, lo que permite la construcción rápida de componentes estructurales.
  - **Bajo costo:** El PVC es un material económico y ampliamente disponible, lo que reduce los costos de fabricación.
- Plástico Centellador:

El plástico centellador es un material clave en el sistema de detección de partículas, ya que permite identificar la presencia de partículas subatómicas, como muones, electrones o fotones, mediante la emisión de destellos de luz cuando estas partículas interactúan con él. Este material se seleccionó por sus propiedades únicas, que lo hacen ideal para aplicaciones en física de partículas y exploración arqueológica no invasiva.

## Características del plástico centellador:

### 1. Composición química:

- El plástico centellador está compuesto principalmente por polímeros orgánicos, como poliestireno o poliviniltolueno, dopados con sustancias fluorescentes (centelladores) que emiten luz cuando son excitados por partículas cargadas.
- Estos materiales son altamente transparentes, lo que permite una eficiente transmisión de la luz emitida.

### 2. Mecanismo de detección:

- Cuando una partícula cargada atraviesa el plástico centellador, deposita energía en el material, excitando las moléculas del centellador.
- Estas moléculas, al volver a su estado base, emiten fotones de luz visible (generalmente en el espectro azul o ultravioleta), que pueden ser detectados por fotomultiplicadores o fotodiodos.

### 3. Ventajas:

- **Alta eficiencia de detección:** El plástico centellador es capaz de detectar partículas con una alta eficiencia, incluso en condiciones de baja energía.
- **Bajo costo:** En comparación con otros detectores de partículas, como los cristales de centelleo inorgánicos, el plástico centellador es más económico y fácil de fabricar.
- **Resistencia y durabilidad:** Es un material robusto que puede soportar condiciones ambientales adversas, como cambios de temperatura y humedad, lo que lo hace ideal para su uso en entornos arqueológicos.

### 4. Aplicaciones:

- El plástico centellador se utiliza ampliamente en física de partículas, medicina nuclear y exploración geofísica. En este proyecto, su función principal es detectar partículas cósmicas (muones) que atraviesan la estructura arqueológica, permitiendo identificar cambios en la densidad del material y, por tanto, la presencia de cavidades o estructuras enterradas

- **Rodamientos:**

Los rodamientos son componentes esenciales en la montura altazimutal, ya que permiten el movimiento suave y preciso de los engranajes y los ejes de azimut y altitud. Su selección se basó en las necesidades específicas del proyecto, considerando factores como la carga, la velocidad de rotación y la precisión requerida.

**Justificación de la selección de rodamientos:**

**1. Tipo de rodamiento seleccionado:**

- Se utilizaron **rodamientos de bolas**, que son ideales para aplicaciones que requieren movimientos suaves y de baja fricción. Estos rodamientos están diseñados para soportar cargas radiales y axiales moderadas, lo que los hace adecuados para los movimientos de la montura.

**2. Materiales:**

- Los rodamientos están fabricados con **acero de alta resistencia** (como acero al cromo), que proporciona durabilidad y resistencia al desgaste.
- Las bolas internas están hechas de acero endurecido, lo que garantiza una larga vida útil incluso bajo cargas continuas.

**3. Características técnicas:**

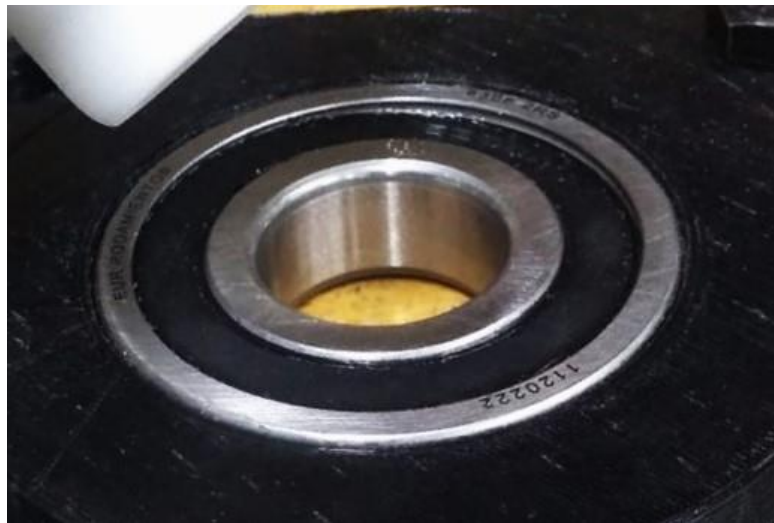
- **Diámetro interno y externo:** Los rodamientos seleccionados tienen un diámetro interno de 40 mm y un diámetro externo de 80 mm, lo que permite un ajuste perfecto en los ejes de la montura.
- **Capacidad de carga:** Estos rodamientos pueden soportar cargas de hasta 500 N, lo que es más que suficiente para el peso de la estructura y el tubo detector.
- **Baja fricción:** Gracias a su diseño y lubricación, los rodamientos minimizan la fricción, lo que es crucial para garantizar movimientos suaves y precisos.

#### 4. Ventajas:

- **Precisión:** Los rodamientos de bolas permiten movimientos altamente precisos, lo que es esencial para la correcta alineación del tubo detector en los ejes de azimut y altitud.
- **Durabilidad:** Su construcción robusta garantiza que puedan operar durante largos periodos sin necesidad de mantenimiento frecuente.
- **Versatilidad:** Son compatibles con una amplia gama de aplicaciones mecánicas, lo que los hace ideales para su uso en sistemas automatizados como la montura altazimutal.

En la **Figura 11**, se presenta una fotografía del rodamiento seleccionado para el proyecto.

El rodamiento utilizado es un **Rodamiento de Balero Radial Sellado**, con las especificaciones señaladas anteriormente. Este rodamiento fue elegido por sus características de sellado, que le proporcionan mayor protección contra contaminantes y reducen la necesidad de mantenimiento.



*Figura 11 Rodamiento seleccionado para el propósito del proyecto.*

## 4.3 Componentes electrónicos

En esta sección se describen los componentes electrónicos utilizados en la montura altazimutal automatizada. Estos componentes son esenciales para controlar los movimientos en los ejes de azimut y altitud, así como para gestionar la detección de partículas. La selección de los componentes se basó en criterios de precisión, eficiencia y compatibilidad con los requisitos del sistema.

### 4.3.1 Motores paso a paso

Los motores utilizados en la montura altazimutal son responsables de controlar los movimientos en los ejes de azimut y altitud. Estos motores permiten realizar desplazamientos precisos y suaves, lo que es fundamental para la correcta detección de partículas en el proyecto. Para asegurar un funcionamiento óptimo, se seleccionaron motores paso a paso, los cuales ofrecen un alto grado de control y repetibilidad.

#### 4.3.1.1 Funcionamiento general de un motor paso a paso

Un motor paso a paso convierte impulsos eléctricos en movimiento mecánico mediante el control secuencial de bobinas que generan campos magnéticos. Estos motores se caracterizan por moverse en pequeños incrementos denominados "pasos", lo que permite posicionamientos muy precisos. Su funcionamiento está basado en la activación de fases de manera controlada a través de un driver, lo que les permite realizar movimientos escalonados sin la necesidad de un sistema de retroalimentación.

#### 4.3.1.2 Motores y reductores utilizados en el proyecto

Para la montura altazimutal se utilizaron los siguientes motores paso a paso y reductores 10:1 con sus especificaciones técnicas de cada componente:

- Tabla 4 Motor NEMA 23 para el eje de altitud 34HS30-6004S.

*Tabla 4 Especificaciones técnicas del motor NEMA 23*

NEMA 34	
Tipo de motor	Bipolar
Torque nominal	4.8 Nm
Pasos/revolución	800 pasos/rev
Ángulo por paso	1.8°
Corriente nominal	6.0 A
Voltaje nominal	36-60 V DC
Reducción	10:01
Torque final	39 Nm
Resistencia fase	1.0 ohm
Inductancia	380mH

- Tabla 5 Motor NEMA 34 para el eje de azimut OK57H18112A.

*Tabla 5 Especificaciones técnicas del motor NEMA 34*

NEMA 23	
Tipo de motor	Bipolar
Torque nominal	3 Nm
Pasos/revolución	800 pasos/rev
Ángulo por paso	1.8°
Corriente nominal	4.2 A
Voltaje nominal	12-24 V DC
Reducción	10:01
Torque final	15 Nm
Resistencia fase	0.42 ohm
Inductancia	5mH

- Tabla 6 Reductor MG23-G10-D8 para el eje de la altura.

*Tabla 6 Especificaciones técnicas del Reductor MG23-G10-D8*

REDUCTOR MG23-G10-D8	
Par máximo permitido	15 Nm
Relación de engranajes	10:1
Eficiencia	90%
Reacción de carga	$\leq 30$ arcmin
Tamaño del marco	57 x 57 mm
Eje de salida	14 mm de diámetro
Eje de entrada	8 mm de diámetro

- Tabla 7 Reductor EG34-G10 para eje de azimut.

*Tabla 7 Especificaciones técnicas del Reductor EG34-G10*

REDUCTOR EG34-G10	
Par máximo permitido	39 Nm
Relación de engranajes	10:1
Eficiencia	96%
Reacción de carga	$\leq 15$ arcmin
Tamaño del marco	90 x 90 mm
Eje de salida	40 mm de diámetro
Eje de entrada	14 mm de diámetro

#### 4.3.1.3 Justificación e instalación de los motores para el Movimiento en los ejes del azimut y la altura

Para asegurar un movimiento preciso y controlado de la estructura, se seleccionaron dos motores NEMA 23 y un NEMA 34 con unos reductores de relación 10:1 que aumentarían su torque. El motor nema 34 será utilizado para el eje del azimut mientras que el Nema 23 será utilizado para el eje de la altitud para garantizar el movimiento adecuado del tubo detector.

## Cálculo del Torque de Salida de los Motores con Reductores

Se realizó el cálculo del torque de salida teórico de cada motor considerando la relación de reducción de 10:1. Este valor es fundamental para determinar si los motores pueden manejar el peso total de la montura y el tubo de PVC.

### Torque de salida de nema 23 con reductor de relación 10:1

- **Torque nominal del motor OK57H18112A NEMA 23:** 3 Nm.
- **Relación de reducción del reductor MG23-G10-D8:** 10:1.
- **Eficiencia del reductor:** 90%.

El torque efectivo se calculó considerando la eficiencia del reductor ( $\eta$ ) mediante la ecuación (1):

$$T_{efectivo} = (T_{motor})(Relación\ de\ reducción)(\eta) \dots \dots (1)$$

### Cálculo del torque de salida

#### Motor NEMA 23 (OK57H18112A):

- Torque nominal ( $T_{motor}$ ): 3 Nm
- Relación de reducción: 10:1
- Eficiencia ( $\eta$ ): 90% (0.90)

#### Aplicando la Ecuación 1:

$$T_{efectivo} = (3Nm)(10)(0.90) = 27Nm$$

### Estimación de la fuerza teórica aplicable

Para contextualizar el torque, se calculó la fuerza máxima teórica que podría ejercerse en el extremo de una palanca, sin considerar pérdidas mecánicas, fricción o inercia.

Esto lo calculamos usando la formula de la fuerza teórica en un radio r, ecuación (2):

$$F = \frac{T_{efectivo}}{r} \dots \dots (2)$$

Y usando la formula del peso equivalente (m), ecuación 3:

$$m = \frac{F}{g} \dots \dots (3)$$

Donde  $g = 9.81 \frac{m}{s^2}$

Aplicando la ecuación 2 y 3, se utilizaron dos radios de aplicación como referencia para calcular la fuerza máxima teórica y el peso equivalente del motor de la siguiente manera:

- Radio de 1 cm (0.01 m):

$$F = \frac{3 Nm}{0.01 m} = 300 N$$

Fuerza máxima teórica que se podría aplicar:

$$\frac{300 N}{9.81 \frac{m}{s^2}} \approx 30.6 kg$$

- Radio de 10 cm (0.1 m):

$$F = \frac{3 Nm}{0.1 m} = 30 N$$

Fuerza máxima teórica que se podría aplicar:

$$\frac{30 N}{9.81 \frac{m}{s^2}} \approx 3.06 kg$$

Entonces, un motor con un torque de 3 Nm puede generar una fuerza máxima teórica que se puede aplicar en el extremo de una palanca de 3.06 kg y 30.6 kg, dependiendo del radio de aplicación. Ahora calcularemos el torque generado con la instalación de un reductor de relación 10:1. Conociendo el torque efectivo mediante la eficiencia del reductor calculado previamente con la ecuación 1.

$$T_{efectivo} = (3Nm)(10)(0.90) = 27Nm$$

Usando nuevamente las ecuaciones 2 y 3 calculamos la fuerza máxima teórica que se podría aplicar en el extremo de una palanca, y el peso equivalente usando los mismos radios de aplicación (1 cm y 10 cm) como ejemplos:

- Radio de 1 cm (0.01 m):

$$F = \frac{27 \text{ Nm}}{0.01 \text{ m}} = 2700 \text{ N}$$

Fuerza máxima teórica que se podría aplicar:

$$\frac{2700 \text{ N}}{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \approx 275 \text{ kg}$$

- Radio de 10 cm (0.1m):

$$F = \frac{27 \text{ Nm}}{0.1 \text{ m}} = 270 \text{ N}$$

Fuerza máxima teórica que se podría aplicar:

$$\frac{270 \text{ N}}{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \approx 27.5 \text{ kg}$$

Con el reductor 1:10, el motor podría generar una fuerza máxima teórica de **275 kg** con un radio de 1 cm y **27.5 kg** con un radio de 10 cm.

### **Compatibilidad del motor NEMA 23 con el reductor de relación 10:1**

Determinaremos la compatibilidad del nema 23 con usando las especificaciones físicas del motor con las especificaciones físicas del reductor escogido. Tenemos las siguientes características:

- Par de torsión del motor: 3 Nm
- Torque de salida con reductor: ~27 Nm
- Par máximo permitido por el reductor: 15 Nm

Existe una incompatibilidad técnica: el torque de salida supera el límite del reductor. Para evitar daños durante las pruebas, se limitará la corriente del motor mediante el controlador, con el fin de no exceder el torque máximo permitido. Esta estrategia permite operar el sistema dentro de márgenes seguros y funcionales para pruebas controladas.

### **Torque de salida de nema 34 con reductor de relación 10:1**

De acuerdo con los cálculos, el peso total estimado que debe soportar el motor NEMA 34, con su reductor, en el eje de azimut se encuentra en un rango aproximado de 10 a 15 kg, lo cual es manejable gracias a la combinación de motor y reductor seleccionados.

### **Torque de salida de nema 34 con reductor de relación 10:1**

- Torque nominal del motor 34HS30-6004S NEMA 34: 4.8 Nm.
- Relación de reducción del reductor EG34-G10: 10:1.
- Eficiencia del reductor: 96%.

Nuevamente usaremos al formula de torque efectivo considerando la eficiencia del reductor ( $\eta$ ):

$$T_{efectivo} = (T_{motor})(Relación\ de\ reducción)(\eta) \dots \dots (1)$$

### Cálculo del torque de salida

#### Motor NEMA 34 (OK57H18112A):

- Torque nominal ( $T_{motor}$ ): 4.8 Nm
- Relación de reducción: 10:1
- Eficiencia ( $\eta$ ): 96% (0.96)

#### Aplicando la Ecuación 1:

$$T_{efectivo} = (4.8Nm)(10)(0.96) = 46.08Nm$$

### Estimación de la fuerza teórica aplicable

Para contextualizar el torque, se calculó la fuerza máxima teórica que podría ejercerse en el extremo de una palanca, sin considerar pérdidas mecánicas, fricción o inercia.

Aplicando la ecuación 2 y 3, se utilizaron los mismos radios de aplicación como referencia:

- Radio de 1 cm (0.01 m):

$$F = \frac{4.8 Nm}{0.01 m} = 480 N$$

Fuerza máxima teórica que se podría aplicar:

$$\frac{480 N}{9.81 \frac{m}{s^2}} \approx 48.9 kg$$

- Radio de 10 cm (0.1 m):

$$F = \frac{4.8 Nm}{0.1m} = 48 N$$

Fuerza máxima teórica que se podría aplicar:

$$\frac{48 N}{9.81 \frac{m}{s^2}} \approx 4.9 kg$$

Entonces, un motor con un torque de 4.8 Nm puede generar una fuerza máxima teórica que se puede aplicar en el extremo de una palanca de 4.9 kg y 48.9 kg, dependiendo del radio de aplicación. Ahora calcularemos el torque generado con la instalación de un reductor de relación 10:1. Conociendo el torque efectivo mediante la eficiencia del reductor calculado previamente con la ecuación 1.

$$T_{efectivo} = (4.8Nm)(10)(0.96) = 46.08Nm$$

Usando las ecuaciones 2 y 3 calculamos la fuerza máxima teórica que se podría aplicar en el extremo de una palanca, y el peso equivalente usando los mismos radios de aplicación (1 cm y 10 cm) como ejemplos:

- Radio de 1 cm (0.01 m):

$$F = \frac{46.08 Nm}{0.01 m} = 4608 N$$

Fuerza máxima teórica que se podría aplicar:

$$\frac{4608 Nm}{9.81 \frac{m}{s^2}} \approx 470 kg$$

- Radio de 10 cm (0.1 m):

$$F = \frac{46.08 Nm}{0.1 m} = 460.8 N$$

Fuerza máxima teórica que se podría aplicar:

$$\frac{460.8 N}{9.81 \frac{m}{s^2}} \approx 47 kg$$

Con el reductor 1:10, el motor podría mover aproximadamente 470 kg con un radio de 1 cm y 47 kg con un radio de 10 cm.

### **Compatibilidad del Motor NEMA 34 con el Reductor EG34-G10**

Determinaremos la compatibilidad del nema 34 con usando las especificaciones físicas del motor con las especificaciones físicas del reductor escogido. Tenemos las siguientes características:

- Par de torsión del motor: 4.8 Nm
- Torque de salida con reductor: ~46.08 Nm
- Par máximo permitido por el reductor: 39 Nm

Este valor también supera el límite recomendado del reductor, lo que representa una incompatibilidad. Para mitigar este riesgo, se aplicará una estrategia de control de corriente y aceleración desde el controlador del motor, limitando el torque dentro de los márgenes seguros de operación ( $\leq 39$  Nm).

#### 4.3.1.5 Caracterización de los motores

Para garantizar que los motores seleccionados sean adecuados para la montura, se realizó una caracterización basada en cálculos teóricos y pruebas experimentales.

La caracterización de los motores es un paso fundamental en el diseño de sistemas automatizados, ya que permite determinar si los motores seleccionados son capaces de cumplir con los requisitos de torque, velocidad y precisión necesarios para el correcto funcionamiento del sistema. En el caso de la montura altazimutal automatizada, los motores paso a paso NEMA 23 y NEMA 34, junto con sus respectivos reductores, son responsables de controlar los movimientos en los ejes de azimut y altitud. Este apartado tiene como objetivo presentar los cálculos y pruebas realizadas para caracterizar estos motores, asegurando que puedan mover la montura con la precisión y fuerza necesarias para la detección de partículas en zonas arqueológicas.

Además de los cálculos teóricos, se realizaron gráficas para visualizar el comportamiento de los motores en términos de torque, velocidad, precisión angular y error de posicionamiento. Estas gráficas permiten validar que los motores operan dentro de los parámetros esperados y cumplen con los requisitos del sistema.

- Cálculo de pasos por grado.

Para garantizar que la montura se mueva con la precisión requerida, es necesario calcular cuántos pasos debe dar el motor para mover la montura un grado en cada eje. Este cálculo depende de los pasos por revolución del motor, la relación de reducción del reductor y la relación de transmisión entre los engranajes.

La Ecuación (4) es la Formula general para calcular los pasos por grado:

$$Pasos\ por\ grado = \frac{(Pasos\ por\ revolución)(Relación\ de\ reducción)}{(Relación\ de\ transmisión)(360^\circ)} \dots \dots (4)$$

Para el eje del azimut (Motor nema 34):

- Pasos por revolución: 800.
- Relación de reducción: 10:1.
- Relación de transmisión: (Piñón a engrane conducido):  $\frac{55\ dientes}{17\ dientes} \approx 3.24$ .

$$Pasos\ por\ grado = \frac{(800)(10)}{(3.24)(360^\circ)} \approx 6.86\ pasos/grado$$

Para el eje de la altura (Motor nema 23):

- Pasos por revolución: 800.
- Relación de reducción: 10:1.
- Relación de transmisión: (Piñón a engrane conducido):  $\frac{55\ dientes}{17\ dientes} \approx 3.24$ .

$$Pasos\ por\ grado = \frac{(800)(10)}{(3.24)(360^\circ)} \approx 6.86\ pasos/grado$$

Esto significa que, para mover la montura 1 grado en cualquier de los dos ejes el motor debe girar aproximadamente 6.86 pasos.

- Velocidad y torque requerido.

El torque requerido para mover la montura depende del peso total de la estructura y del radio de aplicación de la fuerza. Para este proyecto, el peso total de la montura se estima en 10-15 kg. Suponiendo un radio de aplicación de 10 cm (0.1 m), el torque requerido se calcula usando la Ecuación (5) de la siguiente manera:

$$Torque\ requerido = (Fuerza)(Radio) = (Masa)(Aceleración\ debida\ a\ la\ gravedad)(Radio) \dots \dots (5)$$

$$Torque\ requerido = (15kg)(9.81m/s^2)(0.1m) \approx 14.715Nm$$

El torque disponible con los motores y reductores es:

- **Motor NEMA 34 con reductor:** 48 Nm (teórico), pero limitado a 39 Nm por el reductor.
- **Motor NEMA 23 con reductor:** 30 Nm (teórico), pero limitado a 15 Nm por el reductor.

Dado que el torque requerido (14.715 Nm) es menor que el torque disponible, los motores son capaces de mover la montura sin problemas.

La gráfica de torque vs. velocidad (Figura 12) muestra cómo el torque disminuye a medida que aumenta la velocidad, lo cual es típico en motores paso a paso. Esta curva confirma que los motores operan dentro de sus límites de torque y velocidad, incluso bajo carga

- Precisión de movimiento

La precisión del movimiento de la montura se refiere a la capacidad del sistema para moverse de manera controlada y repetible a una posición específica en los ejes de azimut y altitud. En este proyecto, la precisión está determinada por la resolución de los motores paso a paso, la relación de reducción del reductor y la relación de transmisión entre los engranajes.

Con la configuración de 1/4 de paso en los controladores TB6600 y DM860H, los motores NEMA 23 y NEMA 34 operan con 800 pasos por revolución. Esto, combinado con el reductor de 10:1 y la relación de transmisión de 3.24, resulta en una resolución angular final de aproximadamente **0.014° por paso**. Esto significa que la montura puede moverse con una precisión de **0.014 grados** por paso.

Sin embargo, es importante destacar que esta alta precisión en el movimiento no es un requisito crítico para la detección de partículas, ya que el plástico centellador utilizado como detector es omnidireccional y puede captar partículas que provienen de todas las direcciones. No obstante, la precisión del movimiento es útil para optimizar el escaneo del

área de interés, garantizar movimientos controlados y repetibles, y minimizar el tiempo de exploración.

La gráfica de precisión angular (Figura 13) muestra que el sistema puede moverse con una resolución de **0.014° por paso**, lo que permite movimientos pequeños y controlados de la montura.

- Graficas de caracterización de motores

- Precisión angular.

La Figura 13 muestra que el sistema puede moverse con una resolución de 0.014° por paso, lo que permite movimientos pequeños y controlados de la montura. Con la configuración de 1/4 de paso (800 pasos/rev), el reductor de 10:1 y la relación de transmisión de 3.24, el sistema puede moverse con una precisión de **0.014 grados por paso**. Esta alta precisión es útil para optimizar el escaneo del área de interés, aunque no es un requisito crítico para la detección de partículas, ya que el plástico centellador es omnidireccional.

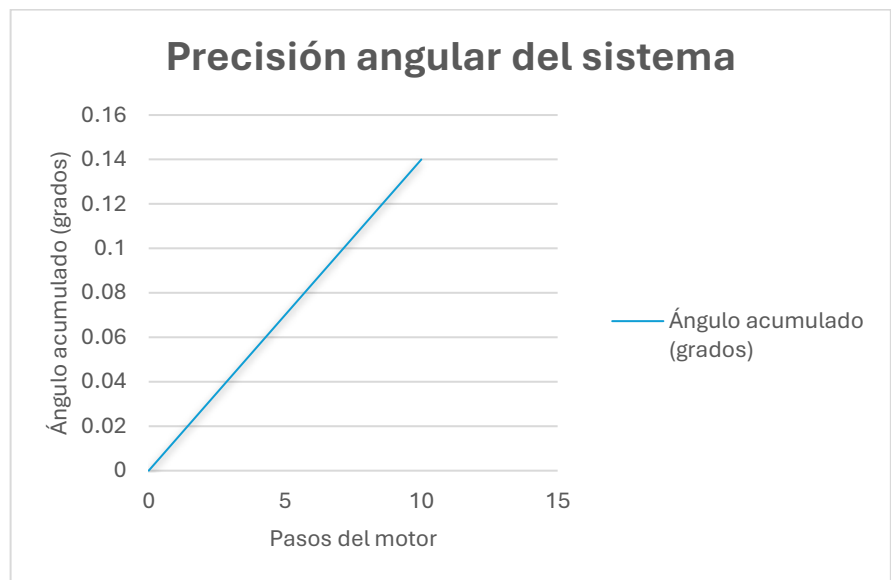


Figura 12 Gráfica de precisión angular para los motores NEMA 23 y NEMA 34.

- Pasos por grado.

La gráfica de pasos por grado muestra la relación entre los pasos del motor y el movimiento angular de la montura. Con la configuración de 1/4 de paso (800 pasos/rev) y la relación de transmisión de 3.24, en la figura 14 muestra que los motores requieren aproximadamente 6.86 pasos para mover la montura 1 grado. Esta gráfica es útil para entender cómo los pasos del motor se traducen en movimientos precisos de la montura, lo que es fundamental para la exploración controlada de áreas arqueológicas.

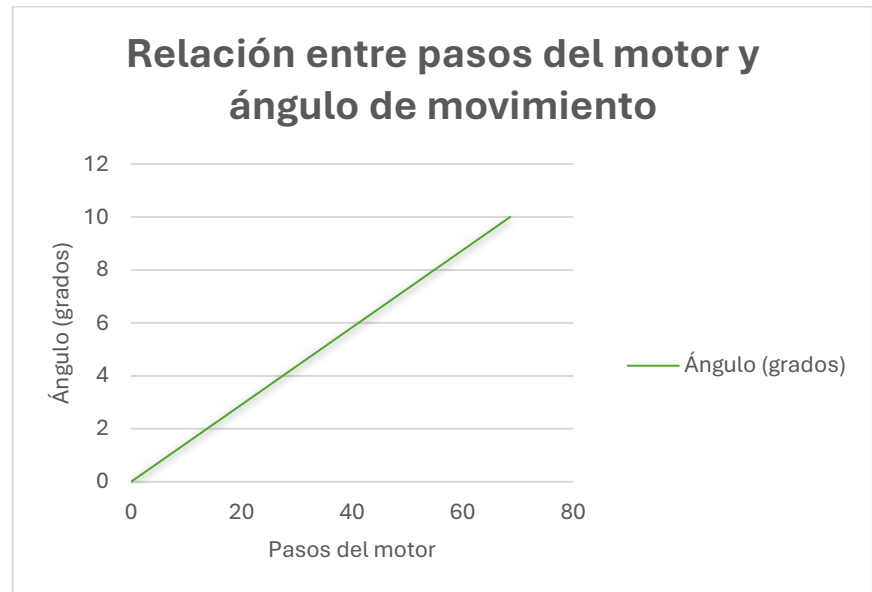


Figura 13 Gráfica de pasos por grado para los motores NEMA 23 y NEMA 34.

- Error de posicionamiento acumulado.

La gráfica de error de posicionamiento muestra cómo el error en la posición de la montura puede acumularse después de varios movimientos. Aunque no se realizaron pruebas específicas para medir este error, se simuló un escenario en el que el error aumenta linealmente con el número de movimientos. La Figura 15 muestra que el error acumulado es pequeño ( $0.01^\circ$  por movimiento), lo que indica que el sistema es capaz de mantener una alta precisión incluso después de múltiples movimientos.

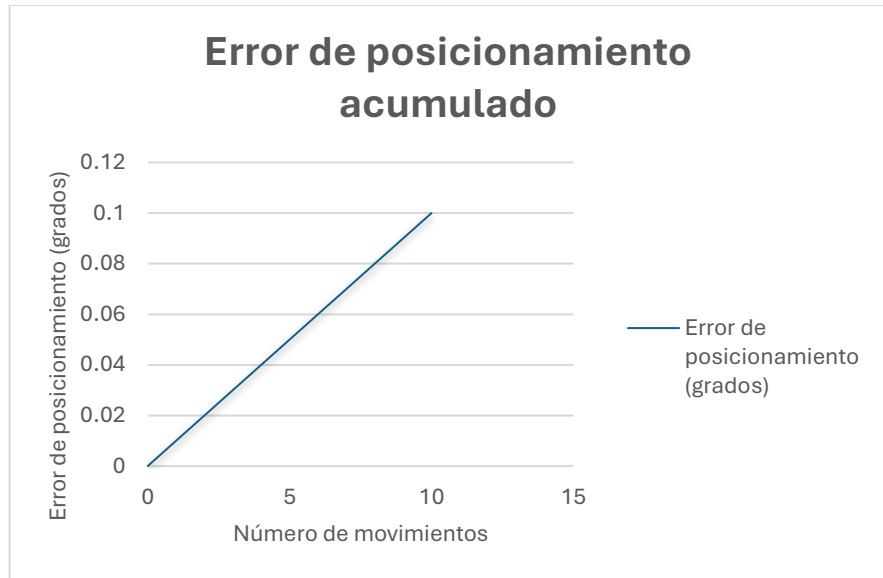


Figura 14 Gráfica de error de posicionamiento para los motores NEMA 23 y NEMA 34.

- Corriente vs torque

La gráfica de corriente vs. torque muestra cómo el torque de los motores NEMA 23 y NEMA 34 varía con la corriente aplicada. Esta curva es útil para entender el rendimiento de los motores bajo diferentes condiciones de operación. La Figura 16 muestra cómo el torque aumenta linealmente con la corriente aplicada, lo que es típico en motores paso a paso. El motor NEMA 34, al tener un torque nominal más alto, requiere una corriente mayor para alcanzar torques más altos en comparación con el motor NEMA 23.

Es importante destacar que, durante las pruebas, se observó que los cables comenzaron a quemarse al superar los **6 A**, por lo que se estableció este valor como el límite máximo de corriente para el motor NEMA 34. Este límite garantiza la seguridad y durabilidad del sistema.

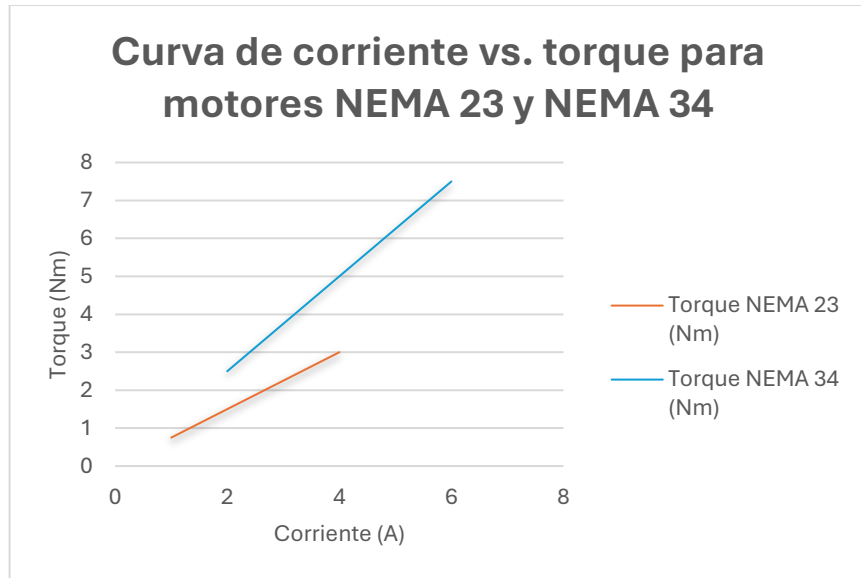


Figura 15 Gráfica de corriente vs. torque para los motores NEMA 23 y NEMA 34

#### 4.3.1.6 Ubicación de los motores en la montura

El motor NEMA 34 se colocó en la base de la montura para controlar el eje de azimut, permitiendo la rotación horizontal del sistema. El motor NEMA 23 se ubicó en la parte lateral de la estructura para controlar el eje de altitud, permitiendo el movimiento vertical del detector de partículas. Ambos motores se acoplaron a sus respectivos engranajes mediante reductores 10:1 para garantizar movimientos suaves y precisos.

Se incluyen diagramas e imágenes de la instalación de los motores en la montura para ilustrar su ubicación y conexión con el sistema mecánico.

#### 4.3.2 Microcontrolador

El microcontrolador es el elemento clave que gestiona la lógica de control en la montura altazimutal. Su función principal es coordinar los movimientos de los motores paso a paso en los ejes de azimut y altitud, asegurando que la montura siga los patrones de exploración requeridos para la detección de partículas. Además, se encarga de recibir y procesar datos de sensores y ejecutar las instrucciones necesarias para el correcto funcionamiento del sistema.

#### 4.3.2.1 Funcionamiento general de un microcontrolador

Un microcontrolador es un circuito integrado programable que ejecuta instrucciones almacenadas en su memoria interna. Funciona procesando señales de entrada (como sensores) y generando señales de salida (como el control de motores). En el caso de la montura, el microcontrolador recibe comandos predefinidos y los traduce en secuencias de pulsos que permiten el control preciso de los motores paso a paso.

#### 4.3.2.2 Características del Arduino UNO

El microcontrolador seleccionado para este proyecto es el **Arduino UNO**, cuyas especificaciones se presentan en la tabla 6:

*Tabla 8 Especificaciones técnicas de Arduino UNO*

Arduino UNO	
Microprocesador	ATmega328P
Voltaje de operación	5V
Voltaje de entrada	7-12V
Pines digitales	14 (6 PWM)
Pines analógicos	6
Memoria Flash	32 KB
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Frecuencia de reloj	16 MHz

#### 4.3.2.3 Justificación del uso del Arduino UNO

Se seleccionó el **Arduino UNO** en lugar de otros microcontroladores debido a varias razones:

1. **Facilidad de programación:** Arduino UNO cuenta con un entorno de desarrollo (Arduino IDE) intuitivo y una gran comunidad de soporte.
2. **Suficientes pines de entrada/salida:** Sus 14 pines digitales y 6 pines analógicos son adecuados para controlar los motores y recibir señales de sensores.

3. **Compatibilidad con controladores de motores:** Puede trabajar sin problemas con drivers como el A4988 o el TB6600, empleados en este proyecto.
4. **Bajo consumo de energía:** Opera con un voltaje de 5V, lo que facilita su integración con el sistema eléctrico de la montura.
5. **Disponibilidad y costo accesible:** Es un microcontrolador ampliamente disponible y económico en comparación con otras opciones más avanzadas.

La implementación del Arduino UNO permite un control eficiente de los motores y facilita la integración con futuros sensores o mejoras en la montura altazimutal.

#### 4.4 Proceso de construcción

El proceso de construcción de la montura altazimutal se llevó a cabo siguiendo un enfoque de diseño en ingeniería meticuloso y económico, que incluyó tanto la investigación previa como la fabricación de los componentes clave. A continuación, se detallan los pasos más importantes del proceso de construcción.

##### 4.4.1 Diseño y fabricación de engranajes cónicos helicoidales para los movimientos de los ejes del azimut y altura (rueda y piñon)

Los engranajes helicoidales cónicos son componentes fundamentales en sistemas mecánicos que requieren una transmisión precisa de movimiento y torque entre ejes perpendiculares. En la Figura 17 se presenta un ejemplo general de un engranaje cónico helicoidal, ilustrando su geometría y funcionamiento.



*Figura 16 Juego de engranajes cónicos helicoidales cuyos ejes de rotación se cruzan y acoplan entre sí*

En el presente proyecto, estos engranajes se diseñaron para controlar el movimiento del eje de azimut en la montura altazimutal automatizada. El diseño y fabricación se llevaron a cabo mediante modelado 3D en SolidWorks 2021 y la impresión 3D utilizando filamento PLA como material. La impresión de los engranajes se realizó en una impresora Creality1001020242 3D Ender, ubicada en el Laboratorio de Materiales de la universidad. En la Figura 18 se muestra una imagen de la impresora utilizada.



*Figura 17 Impresora Creality1001020242 3D Ender*

## **Justificación de las dimensiones de la rueda y del piñón**

### **Requerimientos del proyecto**

El diseño de la rueda (engrane conducido) y del piñón (engrane conductor) se realizaron considerando las siguientes condiciones y restricciones del proyecto:

- **Restricciones físicas:**

La impresora 3D utilizada cuenta con una placa de impresión de 30 cm X 30 cm. Por ello, el engranaje conducido se diseñó con un radio de 28 cm, permitiendo aprovechar al máximo el espacio disponible. Aunque en las simulaciones finales

se observó una ligera variación (diámetro de 27.9), esta diferencia de 1 mm no afecta el desempeño del sistema.

- **Carga esperada:**

El engranaje debe soportar el movimiento de una carga de **12 kg**, correspondiente al peso total de la montura altazimutal. Se considera un margen de  $\pm 1$  kg debido a variaciones en la estructura y dispositivos adicionales, como sensores y cableado. Este peso fue determinado tras el ensamblaje final de la montura.

- **Torque de transmisión:**

El engranaje debe manejar un torque de 48 Nm, generado por el motor NEMA 34 acoplado a un reductor de relación 10:1.

- **Condiciones operativas:**

Se buscó diseñar un engranaje con alta rigidez y resistencia a la flexión, adecuadas para las exigencias del sistema mecánico. Estos factores se logran mediante:

- Material utilizado: El filamento PLA ofrece buena rigidez y estabilidad dimensional.
- Diseño geométrico: Se optimizó el grosor de los dientes y el ancho de cara para evitar deformaciones.
- Orientación de impresión: Se imprimieron con una orientación que reduce esfuerzos de flexión.
- Densidad de relleno: Se empleó un relleno del 80% con patrón giroide, distribuyendo mejor los esfuerzos internos.

#### 4.4.1.1 Dimensiones de la rueda (engrane conducido)

El diseño de la rueda se realizó principalmente considerando las limitaciones prácticas del equipo de impresión disponible y las necesidades mecánicas del proyecto. Se seleccionaron medidas aceptables dentro de los parámetros más comunes dentro del modelado de engranajes cónicos helicoidales. Las dimensiones finales cumplen con las condiciones necesarias para su funcionalidad. En la Figura 19 se presenta una imagen de la rueda con su piñón con las dimensiones principales señaladas.

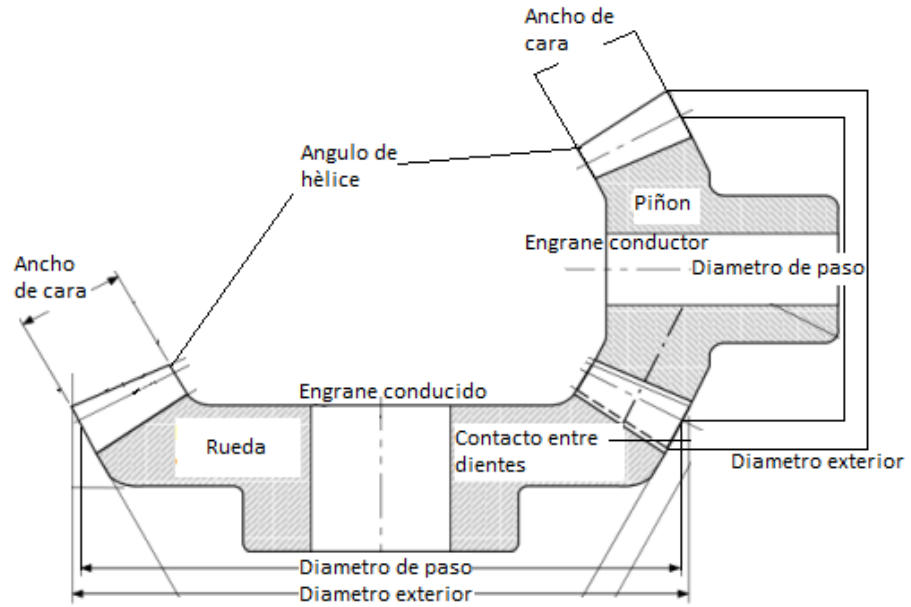


Figura 18 Nomenclatura de engranajes cónicos helicoidales.

### Tabla de dimensiones clave de la rueda

Para facilitar la comprensión de los parámetros diseñados, se presenta la tabla 7 con sus definiciones y valores:

Tabla 9 características de las dimensiones de la rueda

Parámetro	Símbolo	Descripción
Diámetro exterior	$d_e$	Distancia total del engranaje
Diámetro de paso	$d_p$	Diámetro donde engranan los dientes
Ancho de cara	$b$	Superficie del diente de contacto
Angulo de hélice	$\beta$	Ángulo de inclinación de los dientes
Número de dientes	$Z$	Cantidad total de dientes

### Justificación del módulo ( $m$ ) y cálculo del diámetro de paso ( $d_p$ ):

El módulo es un parámetro que se elige con base en estándares de diseño de engranajes. En este caso, la selección se realizó considerando la relación de transmisión y las limitaciones de impresión 3D. Según normas de diseño de engranajes, el módulo se obtiene con la Ecuación (6):

$$m = \frac{d_p}{Z} \dots \dots (6)$$

Donde:

- $d_p$ =Diámetro de paso
- $Z$ =Numero de dientes

En este proyecto, el diámetro de paso se estableció con base en el espacio disponible en la impresora y la relación de transmisión con el piñón, dando como resultado:

$$d_p = 27\text{cm}$$

Sustituyendo:

$$m = \frac{27\text{ cm}}{55\text{ dientes}} \approx 0.4909\text{extcm}$$

**Diámetro exterior ( $d_e$ ):**

La rueda fue diseñada contemplando un diámetro exterior de **28 cm**, aprovechando el área máxima de impresión 3D disponible en la placa de 30 cm×30 cm. Esta dimensión permitió fabricar el engranaje en una sola pieza sin comprometer su integridad estructural.

Una vez definido el módulo, el diámetro exterior  $d_e$  se calcula con la Ecuación (7):

$$d_e = d_p + 2m \dots \dots (7)$$

Sustituyendo:

$$d_e = 27 + 2(0.4909)$$

$$d_e = 27.98\text{extcm}$$

**Número de dientes ( $Z$ ):**

La rueda cuenta con 55 dientes, definidos durante el modelado para garantizar una transmisión suave y precisa del torque. Se seleccionó esta cantidad considerando:

1. Relación de transmisión:

- La cantidad de dientes se eligió para asegurar una relación de transmisión adecuada con el piñón. Con 55 dientes en el engranaje conducido y 17 dientes en el piñón, la Ecuación (8) se usa para calcular la relación de transmisión siguiente:

$$i = \frac{Z \text{ conducido}}{Z \text{ piñón}} \dots \dots (8)$$

- Sustituyendo:

$$i = \frac{Z \text{ conducido}}{Z \text{ piñón}} = \frac{55}{17} \approx 3.24$$

- Este valor se seleccionó para garantizar un control preciso del movimiento en el eje de azimut.

## 2. Distribución de carga y reducción de desgaste

- Un mayor número de dientes distribuye mejor la carga sobre los dientes del engranaje, reduciendo el desgaste localizado y aumentando la vida útil del componente.
- Con 55 dientes, cada diente soporta menos carga individualmente en comparación con un engranaje con menos dientes, lo que mejora la durabilidad

## 3. Compatibilidad con la fabricación en impresión en 3D:

- Se seleccionó este número de dientes considerando el espacio disponible en la montura y las limitaciones de resolución en la impresión 3D.
- Un menor número de dientes podría haber generado interferencias mecánicas o dificultado la impresión de detalles finos en los dientes del engranaje.

## 4. Precisión y suavidad del movimiento:

- Un mayor número de dientes permite una mejor interpolación del movimiento, reduciendo vibraciones y errores en el posicionamiento angular.
- La cantidad de 55 dientes fue validada mediante simulaciones de movimiento en SolidWorks para asegurar que la transmisión de torque fuera eficiente y sin irregularidades.

**Ancho de cara ( $b$ ):**

El ancho de cara se estableció en 4.35 cm, una medida suficientemente grande para distribuir las cargas tangenciales y minimizar los esfuerzos locales en los dientes. Según el estándar de diseño de engranajes [AGMA 2003-B97], el ancho de cara de un engranaje cónico se selecciona en función del diámetro de paso  $d_p$  y el número de dientes  $Z$  usando la Ecuación (9):

$$b = (0.3)(d_p) \dots \dots (9)$$

Sustituyendo el diámetro de paso de 27 cm:

$$b = (0.3)(27cm) = 8.1extcm$$

Sin embargo, debido a las limitaciones de impresión 3D y el espacio disponible en la montura, se optó por 4.35 cm, lo que aún garantiza una distribución efectiva de cargas sin comprometer la rigidez estructural.

**Angulo de hélice ( $\beta$ ):**

Se seleccionó un ángulo de hélice de **74.87°** durante el modelado para mejorar el contacto gradual entre los dientes y reducir las vibraciones. Según la literatura de diseño de engranajes helicoidales [Shigley, 2014], un ángulo de hélice mayor aumenta la suavidad del movimiento, pero también introduce fuerzas axiales que deben ser manejadas adecuadamente.

La elección de 74.87° se basó en:

1. Optimización del contacto progresivo de los dientes, reduciendo impactos y desgaste prematuro.
2. Minimización de ruidos y vibraciones en comparación con engranajes de ángulo menor.

3. Compatibilidad con impresión 3D, asegurando una manufacturabilidad óptima sin deformaciones en los dientes.

### Configuración de impresión en 3D

Para garantizar un engranaje resistente y funcional, se utilizó una configuración de impresión optimizada:

- **Material:** PLA de alta calidad, adecuado para prototipos funcionales.
- **Densidad de relleno: 80%**, ya que estudios [Górski, 2021] han demostrado que esta densidad ofrece un equilibrio entre peso y rigidez sin desperdiciar material.
- **Tipo de relleno: Giroide**, seleccionado porque distribuye las fuerzas de manera uniforme dentro de la pieza, mejorando su resistencia mecánica según pruebas de resistencia de estructuras celulares [Yang, 2018].
- **Altura de capa: 0.2 mm**, lo que asegura precisión en los dientes y un acabado superficial adecuado, minimizando defectos que puedan afectar la transmisión de torque.
- **Orientación de impresión:** Se imprimieron con los dientes alineados en la dirección de las fuerzas tangenciales para maximizar la resistencia a tracción y flexión, conforme a las recomendaciones en manufactura aditiva para piezas mecánicas [Gibson et al., 2020].

La resistencia estructural del engranaje es garantizada por la combinación de la densidad de relleno y la estructura giroide, asegurando que los esfuerzos calculados  $\sigma_f$  y  $\sigma_c$  se mantengan dentro de los límites del material (PLA), como se demostró en el análisis previo. La configuración de impresión avanzada y el uso de un diámetro de **28.0 cm** garantizan que la pieza sea suficientemente resistente para manejar las cargas y el torque del sistema, en las figuras 20 y 21 se muestra el engrane conducido conforme a las especificaciones dadas anteriormente.

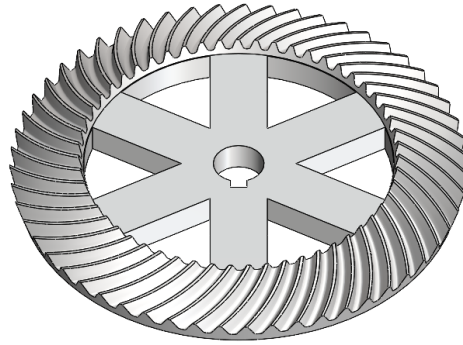


Figura 19 simulación de la rueda (engrane conducido) en solidworks 2021



Figura 20 Engranaje conducido (rueda) impresa en su totalidad

#### 4.4.1.2 Dimensiones de piñón (engrane conductor)

El diseño del piñón se realizará considerando las mismas limitaciones prácticas del equipo de impresión 3D y las necesidades mecánicas del proyecto. Las dimensiones del piñón deben ser compatibles con las del engrane conducido para garantizar una transmisión de torque eficiente y suave.

#### **Tabla de dimensiones clave del piñón**

Para facilitar la comprensión de los parámetros diseñados, se presenta la tabla 8 con sus definiciones y valores:

Tabla 10 características de las dimensiones del piñón

Parámetro	Símbolo	Descripción
Diámetro exterior	$d_e$	Distancia total del engranaje
Diámetro de paso	$d_p$	Diámetro donde engranan los dientes
Ancho de cara	$b$	Superficie del diente de contacto
Angulo de hélice	$\beta$	Ángulo de inclinación de los dientes
Número de dientes	$Z$	Cantidad total de dientes

### Justificación del módulo ( $m$ ) y cálculo del diámetro de paso ( $d_p$ ):

El módulo ( $m$ ) es un parámetro que se elige con base en estándares de diseño de engranajes. En este caso, la selección se realizó considerando la relación de transmisión y las limitaciones de impresión 3D. Según normas de diseño de engranajes, el módulo se calcula retomando la Ecuación (6):

$$m = \frac{d_p}{Z}$$

Donde:

- $d_p$  = Diámetro de paso
- $Z$  = Numero de dientes

En este proyecto, el diámetro de paso se estableció con base en la relación de transmisión con el engrane conducido. Dado que el engrane conducido tiene un diámetro de paso de 27 cm y 55 dientes, y la relación de transmisión es de aproximadamente 3.24, el diámetro de paso del piñón se calcula de la siguiente manera:

$$d_p = \frac{d_p \text{ del engrane conducido}}{i} = \frac{27 \text{ cm}}{3.24} \approx 8.33 \text{ cm}$$

Sustituyendo:

$$m = \frac{8.33 \text{ cm}}{17 \text{ dientes}} \approx 0.49 \text{ cm}$$

### **Diámetro exterior ( $d_e$ ):**

El diámetro exterior del piñón se calcula de manera similar al del engrane conducido. Una vez definido el módulo, el diámetro exterior  $d_e$  se calcula retomando la Ecuación (7):

$$d_e = d_p + 2m$$

Sustituyendo:

$$d_e = 8.33cm + 2(0.49 cm)$$

$$d_e = 9.31cm$$

### **Número de dientes (Z):**

El piñón cuenta con 17 dientes, definidos durante el modelado para garantizar una relación de transmisión adecuada con el engrane conducido. Esta cantidad de dientes se seleccionó considerando:

#### 5. Relación de transmisión:

- Con 17 dientes en el piñón y 55 dientes en el engrane conducido, calculamos la relación de transmisión retomando la Ecuación (8):

$$i = \frac{Z \text{ conducido}}{Z \text{ piñón}} = \frac{55}{17} \approx 3.24$$

- Este valor garantiza un control preciso del movimiento en el eje de azimut.

#### 6. Distribución de carga y reducción de desgaste

- Aunque el piñón tiene menos dientes que el engrane conducido, la distribución de carga se optimiza mediante el ángulo de hélice y el ancho de cara.

#### 7. Compatibilidad con la fabricación en impresión en 3D:

- Se seleccionó este número de dientes considerando las limitaciones de resolución en la impresión 3D y el espacio disponible en la montura.

8. Precisión y suavidad del movimiento:

- A pesar de tener menos dientes, el ángulo de hélice seleccionado garantiza una transmisión suave y precisa.

**Ancho de cara ( $b$ ):**

El ancho de cara del piñón se estableció en **4.35 cm**, la misma medida que el engrane conducido, para garantizar una distribución uniforme de las cargas tangenciales y minimizar los esfuerzos locales en los dientes. Según el estándar de diseño de engranajes [AGMA 2003-B97], el ancho de cara de un engranaje cónico se selecciona en función del diámetro de paso  $d_p$  retomando la ecuación (9):

$$b = (0.3)(d_p)$$

Sustituyendo el diámetro de paso de 0.33 cm:

$$b = (0.3)(8.33cm) = 2.5cm$$

Sin embargo, debido a las limitaciones de impresión 3D y para mantener la compatibilidad con el engrane conducido, se optó por un ancho de cara de 4.35 cm.

**Angulo de hélice ( $\beta$ ):**

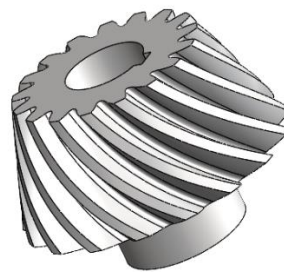
Se seleccionó un ángulo de hélice de  $74.87^\circ$  para el piñón, el mismo que se utilizó en el engrane conducido. Este ángulo se eligió para mejorar el contacto gradual entre los dientes y reducir las vibraciones. Según la literatura de diseño de engranajes helicoidales [Shigley, 2014], un ángulo de hélice mayor aumenta la suavidad del movimiento, pero también introduce fuerzas axiales que deben ser manejadas adecuadamente.

**Configuración de impresión en 3D**

Para garantizar un piñón resistente y funcional, se utilizó la misma configuración de impresión que para el engrane conducido:

- **Material:** PLA de alta calidad, adecuado para prototipos funcionales.
- **Densidad de relleno: 80%**, ya que estudios [Górski, 2021] han demostrado que esta densidad ofrece un equilibrio entre peso y rigidez sin desperdiciar material.
- **Tipo de relleno: Giroide**, seleccionado porque distribuye las fuerzas de manera uniforme dentro de la pieza, mejorando su resistencia mecánica según pruebas de resistencia de estructuras celulares [Yang, 2018].
- **Altura de capa: 0.2 mm**, lo que asegura precisión en los dientes y un acabado superficial adecuado, minimizando defectos que puedan afectar la transmisión de torque.
- **Orientación de impresión:** Se imprimieron con los dientes alineados en la dirección de las fuerzas tangenciales para maximizar la resistencia a tracción y flexión, conforme a las recomendaciones en manufactura aditiva para piezas mecánicas [Gibson et al., 2020].

El diseño del piñón se realizó siguiendo los mismos principios que el engrane conducido, garantizando una transmisión de torque eficiente y suave. Las dimensiones y parámetros seleccionados son compatibles con las limitaciones de impresión 3D y las necesidades mecánicas del proyecto, en las figuras 22 y 23 se muestra el engrane conducido conforme a las especificaciones dadas anteriormente.



*Figura 21 simulación del piñón (engrane conductor) en solidworks 2021*



*Figura 22 Engranaje conductor (piñón) impreso en su totalidad*

#### 4.4.1.3 Metodología del diseño

El diseño de los engranajes cónicos helicoidales para la montura altazimutal requirió un enfoque sistemático y riguroso para garantizar su funcionalidad, durabilidad y eficiencia en la transmisión de torque. Dado que estos engranajes son componentes críticos en el sistema mecánico, fue esencial validar su diseño mediante un análisis estructural que asegurara su resistencia a las cargas y esfuerzos a los que estarán sometidos durante su operación.

Para llevar a cabo este análisis, se optó por utilizar el método **AGMA (American Gear Manufacturers Association)**, un estándar ampliamente reconocido en la industria para el diseño y evaluación de engranajes. Este método permite calcular los esfuerzos de flexión en la raíz del diente, los esfuerzos de contacto entre los dientes y las fuerzas tangenciales transmitidas entre los engranajes. Estas consideraciones son fundamentales para garantizar que los engranajes no fallen bajo las condiciones de carga esperadas y que su vida útil sea la adecuada para las aplicaciones previstas.

El método AGMA se seleccionó por varias razones:

1. **Precisión y confiabilidad:** El método AGMA está respaldado por décadas de investigación y aplicación práctica en la industria, lo que lo convierte en una herramienta confiable para el análisis de engranajes.
2. **Consideración de múltiples factores:** El método no solo evalúa la resistencia de los dientes, sino que también tiene en cuenta factores como la geometría del

engranaje, el material utilizado, las condiciones de operación y las cargas dinámicas.

3. **Compatibilidad con materiales no tradicionales:** Aunque el método AGMA fue desarrollado originalmente para engranajes metálicos, sus principios pueden adaptarse para evaluar engranajes fabricados con materiales no tradicionales, como el PLA utilizado en este proyecto.

A continuación, se presentan los cálculos detallados basados en el método AGMA, que incluyen el análisis de los esfuerzos de flexión, los esfuerzos de contacto y las fuerzas tangenciales. Estos cálculos permitirán validar el diseño de los engranajes y asegurar que cumplen con los requisitos de resistencia y durabilidad necesarios para su aplicación en la montura altazimutal.

### Verificación de Capacidad de Carga

Para validar la capacidad del engranaje de soportar las condiciones del proyecto, se calculó la **fuerza tangencial máxima**  $F_t$  empleando la ecuación general de transmisión de potencia en engranajes:

- **Fuerza tangencial máxima ( $F_t$ ):**

La **fuerza tangencial máxima** se obtuvo a partir de la Ecuación (10) de transmisión de potencia en engranajes [Norton, 2011]:

$$F_t = \frac{2T}{d_p} \dots \dots (10)$$

Donde:

- $T$  es el torque transmitido (en N.cm)
- $d_p$  es el diámetro de pasco (en cm)

Sustituyendo los valores de la rueda (engrane conducido):

- $d_p = 27\text{cm}$
- $T = 4800$

$$F_t = \frac{2(4800)}{27\text{ cm}} = 355.56\text{N}$$

Sustituyendo los valores del piñón (engrane conductor):

- $d_p = 8.33\text{ cm}$
- $T = 4800$

$$F_t = \frac{2(4800)}{8.33\text{ cm}} = 1152.46\text{ N}$$

- Cálculo de los esfuerzos en los dientes

Para el análisis estructural de los esfuerzos en los dientes hay que tener la consideración de las características del material de fabricación debido a sus propiedades mecánicas y accesibilidad (en nuestro caso PLA). El límite de esfuerzo a tracción y compresión será comparado con los esfuerzos calculados para verificar si el diseño es funcional. En la tabla 9 se muestran las siguientes propiedades de ambos engranajes (piñón y rueda) para verificar la funcionalidad del diseño:

Tabla 11 Propiedades de sistema de engranes

Parámetro	Símbolo	Rueda	Piñón
Número de dientes	$Z$	55 dientes	17 dientes
Modulo	$m$	0.4909 cm	0.49 cm
Diámetro de paso	$d_p$	27 cm	8.33 cm
Ángulo de hélice	$\beta$	74.87°	74.87°
Ancho de cara	$b$	4.35 cm	4.35 cm

Para calcular los esfuerzos principales para validar el diseño y garantizar un desempeño adecuado de los engranajes, se consideraron los factores de corrección utilizados en el diseño de engranajes, siguiendo la norma AGMA 2001-D04 y referencias de diseño como Shigley (Mechanical Engineering Design) y Norton (Machine Design: An Integrated Approach).

Los esfuerzos principales en los dientes se calcularon utilizando las ecuaciones (11) y (12) de resistencia de engranajes [AGMA 2001-D04]:

1. Esfuerzo de flexión ( $\sigma_f$ ):

$$\sigma_f = \frac{(F_t)(K_o)(K_v)(K_s)}{(b)(m)(J)} \dots \dots (11)$$

2. Esfuerzo de contacto ( $\sigma_c$ ):

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{(F_t)(K_o)(K_v)(K_s)(C_f)}{(b)(d_m)(I)} \dots \dots} \quad (12)$$

Donde:

- $K_o, K_v, K_s$  son factores de sobrecarga, velocidad y tamaño.
- $b$  es el ancho de cara del diente
- $m$  es el módulo del engranaje.
- $J$  es el factor geométrico del diente

### Factores de corrección

Los siguientes factores de corrección se aplicaron en los cálculos de resistencia del engranaje:

- **( $K_o$ ) – Factor de sobrecarga**
  - Este factor toma en cuenta cargas adicionales debido a impactos o variaciones en la carga aplicada.
  - Para sistemas mecánicos con cargas moderadas y controladas, se adopta  $K_o = 1.25$ .
  - En aplicaciones con golpes o cargas variables, el valor puede aumentar hasta  $K_o = 1.5$  a  $2.0$ .
- **( $K_v$ ) – Factor de velocidad**
  - Relacionado con la calidad del engranaje y la velocidad de operación.
  - Para engranajes de velocidad baja a moderada (menor a 20 m/s), se adopta  $K_v = 1.1$ .
  - Para engranajes de alta velocidad o con acabados deficientes, se adoptan valores superiores a  $K_v = 1.5$ .
- **( $K_s$ ) – Factor de tamaño**
  - Corrige los esfuerzos considerando el tamaño del engranaje.

- Para engranajes fabricados en PLA y con dimensiones grandes, se asume  $K_s=1.0$ , ya que no hay una penalización significativa por tamaño.

El **factor geométrico** depende de la forma del diente, el ángulo de presión y el número de dientes. Se puede obtener de tablas de la norma **AGMA 2001-D04** o con la ecuación (13) aproximada:

$$J = \frac{0.484 - \frac{2.87}{Z}}{1} \dots \dots (13)$$

Donde:

- $Z$  es el número de dientes

Para el engrane conducido (rueda), con  $Z = 55$  dientes

$$J = \frac{0.484 - \frac{2.87}{55 \text{ dientes}}}{1}$$

Para el engrane conductor (piñón), con  $Z = 17$  dientes

$$J = \frac{0.484 - \frac{2.87}{17 \text{ dientes}}}{1}$$

Sin embargo, en el cálculo de esfuerzo de flexión, se utilizó un valor de  $J = 0.35$  para la rueda, y un valor de  $J = 0.25$  para el piñón. Estos valores provienen de tablas de la norma **AGMA 2001-D04**, donde se consideran factores adicionales como:

- Corrección por ángulo de presión específico.
- Corrección por forma del diente en engranajes cónicos helicoidales.

La diferencia entre el valor tabulado y el calculado teóricamente se debe a la necesidad de considerar la geometría real del diente, por lo que  $J = 0.35$  y  $J = 0.25$  son una mejor representación de la resistencia efectiva de los engranajes en este caso.

Estos valores se validaron en la simulación del engranaje dentro de **SolidWorks 2021**, asegurando que los esfuerzos calculados sean consistentes con el comportamiento real del sistema.

Con estos valores específicos ya establecidos calcularemos los esfuerzos principales para validar el diseño: el esfuerzo de flexión en la raíz de los dientes y el esfuerzo de contacto en la superficie de los dientes.

### Engrane conducido (rueda):

1. Ecuación (11) esfuerzo de flexión ( $\sigma_f$ ):

$$\sigma_f = \frac{(F_t)(K_o)(K_v)(K_s)}{(b)(m)(J)}$$

Donde:

- $F_t$ : fuerza tangencial = 355.56N
- $K_o, K_v, K_s$ : factores de corrección por sobrecarga, velocidad y tamaño. Estos valores los estimaremos como:
  - $K_o = 1.25$
  - $K_v = 1.1$
  - $K_s = 1.0$
- $b = 4.34949 \text{ cm}$ : ancho de cara.
- $m = 0.4909 \text{ cm}$ : módulo del engranaje.
- $J = 0.35$ : factor geométrico del diente.

Sustituyendo valores en la formula  $\sigma_f$ :

$$\sigma_f = \frac{(355.56N)(1.25)(1.1)(1.0)}{(4.34949\text{cm})(0.4909\text{cm})(0.35)}$$

$$\sigma_f = 654.21 \text{ N/cm}^2$$

2. Ecuación (12) esfuerzo de contacto ( $\sigma_c$ ):

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{(F_t)(K_o)(K_v)(K_s)(C_f)}{(b)(d_m)(I)}}$$

Donde:

- $F_t = 355.56$ : fuerza tangencial calculada.
- $C_f$ : Coeficiente elástico, depende del material. Para el PLA, aproximamos  $C_f \approx 190$ .
- $d_m = 27 \text{ cm}$ : Diámetro de paso

- $I$ : Factor geométrico del contacto. Aproximamos  $I = 0.12$ .
- $K_o, K_v, K_s$ : factores de corrección por sobrecarga, velocidad y tamaño. Estos valores los estimaremos como:
  - $K_o = 1.25$
  - $K_v = 1.1$
  - $K_s = 1.0$

Sustituyendo valores en la formula  $\sigma_c$ :

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{(355.56N)(1.25)(1.1)(1.0)(190)}{(4.34949cm)(27cm)(0.12)}}$$

$$\sigma_c = 81.19 \text{ N/cm}^2$$

### Engrane conductor (piñón):

1. Ecuación (11) esfuerzo de flexión ( $\sigma_f$ ):

$$\sigma_f = \frac{(F_t)(K_o)(K_v)(K_s)}{(b)(m)(J)} \dots \dots (9)$$

Donde:

- $F_t$ : fuerza tangencial = 1152.46N
- $K_o, K_v, K_s$ : factores de corrección por sobrecarga, velocidad y tamaño. Estos valores los estimaremos como:
  - $K_o = 1.25$
  - $K_v = 1.1$
  - $K_s = 1.0$
- $b = 4.34949 \text{ cm}$ : ancho de cara.
- $m = 0.49 \text{ cm}$ : módulo del engranaje.
- $J = 0.25$ : factor geométrico del diente.

Sustituyendo valores en la formula  $\sigma_f$ :

$$\sigma_f = \frac{(1152.46N)(1.25)(1.1)(1.0)}{(4.34949cm)(0.49cm)(0.25)}$$

$$\sigma_f = 1935.2 \text{ N/cm}^2$$

2. Ecuación (12) esfuerzo de contacto ( $\sigma_c$ ):

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{(F_t)(K_o)(K_v)(K_s)(C_f)}{(b)(d_m)(I)}}$$

Donde:

- $F_t$ : fuerza tangencial = 1152.46N
- $C_f$ : Coeficiente elástico, depende del material. Para el PLA, aproximamos  $C_f \approx 190$ .
- $d_m = 8.33cm$ : Diámetro de paso
- $I$ : Factor geométrico del contacto. Aproximamos  $I = 0.12$ .
- $K_o, K_v, K_s$ : factores de corrección por sobrecarga, velocidad y tamaño. Estos valores los estimaremos como:
  - $K_o = 1.25$
  - $K_v = 1.1$
  - $K_s = 1.0$

Sustituyendo valores en la formula  $\sigma_c$ :

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{(1152.46N)(1.25)(1.1)(1.0)(190)}{(4.34949cm)(8.33cm)(0.12)}}$$

$$\sigma_c = 193.8 N/cm^2$$

### Propiedades Mecánicas del PLA

El filamento PLA (ácido poliláctico) es ampliamente utilizado en la fabricación aditiva por sus propiedades mecánicas y facilidad de impresión. Sin embargo, su uso en aplicaciones mecánicas funcionales requiere un análisis cuidadoso. Las propiedades clave del PLA se presentan en la tabla 10:

Tabla 12 Propiedades de temperatura del filamento PLA

Propiedad	Valor típico
Resistencia a tracción	50 – 70 MPa (5000 – 7000 N/cm <sup>2</sup> )
Resistencia a compresión	70 – 90 MPa (7000 – 9000 N/cm <sup>2</sup> )
Módulo elástico	2.7 – 3.2 Gpa
Temperatura de deflexión térmica (HDT)	50 – 60 °C

### Resistencia a Tracción y Esfuerzo de Flexión

El esfuerzo de flexión calculado para los dientes de los engranajes es:

- Rueda:

$$\sigma_f = 654.21 \text{ N/cm}^2$$

Esto representa solo el 13% de la resistencia mínima a tracción del PLA (5000 N/cm<sup>2</sup>), indicando que los dientes no sufrirán fracturas por flexión bajo la carga actual.

- Piñón:

$$\sigma_f = 1935.2 \text{ N/cm}^2$$

Este valor representa aproximadamente el **27.65%** de la resistencia mínima a tracción del PLA (7000 N/cm<sup>2</sup>), lo cual indica que, en condiciones de carga normal, el piñón no debería sufrir fracturas o fallos por flexión bajo cargas moderadas. Sin embargo, este valor está más cerca del límite comparado con el de la rueda, lo que sugiere que, aunque es seguro bajo cargas moderadas, es más vulnerable a fallos por flexión si las cargas superan lo esperado.

### Resistencia a Compresión y Esfuerzo de Contacto

El esfuerzo de contacto calculado es:

- Rueda:

$$\sigma_c = 81.19 \text{ N/cm}^2$$

Esto equivale a aproximadamente el 1% de la resistencia mínima a compresión del PLA (7000 N/cm<sup>2</sup>). Esto asegura que los dientes soportarán las cargas sin experimentar deformación plástica significativa.

- Piñón:

$$\sigma_c = 193.8 \text{ N/cm}^2$$

Este esfuerzo representa aproximadamente el **2.77%** de la resistencia mínima a compresión del PLA (7000 N/cm<sup>2</sup>). Este valor es bastante bajo, lo que indica que el piñón puede soportar cargas de compresión sin sufrir deformación plástica significativa. La baja relación con la resistencia a compresión del material asegura que el piñón resistirá las fuerzas de contacto sin que se produzcan fallos por compresión o aplastamiento, a menos que las cargas sean considerablemente altas.

### **Justificación del Diseño**

- **Carga de trabajo baja:**

El torque máximo transmitido es de 48Nm, una carga moderada en comparación con las capacidades del diseño.

Los esfuerzos resultantes ( $\sigma_f$  y  $\sigma_c$ ) están muy por debajo de los límites mecánicos del PLA.

- **Acho de cara adecuado:**

El ancho de cara ( $b = 4.35 \text{ cm}$ ) distribuye la carga sobre una superficie amplia, reduciendo los esfuerzos locales en cada diente.

- **Geometría optimizada:**

El ángulo de hélice ( $\beta = 74.87^\circ$ ) incrementa la suavidad en la transmisión de potencia y reduce vibraciones, lo que protege los dientes de daños acumulativos.

- **Limitaciones térmicas del PLA:**

Aunque el diseño es funcional mecánicamente, el PLA tiene una temperatura de deflexión térmica baja (50–60 °C). Esto significa que la exposición prolongada a calor podría comprometer la integridad estructural. En condiciones normales de operación, este riesgo es mínimo.

- **Aplicaciones funcionales del PLA:**

El PLA es adecuado para prototipos funcionales y aplicaciones con cargas moderadas, como en este proyecto. Sin embargo, para mejorar la durabilidad, se puede considerar reemplazar el PLA por materiales como PETG o nylon en iteraciones futuras.

El diseño cumple con los requisitos de resistencia mecánica bajo las condiciones actuales de carga. Los esfuerzos calculados están muy por debajo de los límites del material, lo que asegura un funcionamiento confiable en la aplicación de la montura altazimutal. Además, las propiedades del PLA, combinadas con la geometría del diseño, hacen que sea una solución eficiente para prototipado funcional. Sin embargo, se recomienda monitorear el desempeño térmico durante la operación.

#### 4.4.2 Diseño y fabricación de base giratoria para el acoplamiento del engrane conducido.

Para garantizar un movimiento fluido y preciso en la montura altazimutal automatizada, se diseñó y fabricó una base giratoria que permite el acoplamiento adecuado entre el engrane conducido y el soporte del piñón. Este componente es fundamental para la transmisión de movimiento en los ejes de azimut y altitud, asegurando estabilidad y reduciendo fricciones innecesarias.

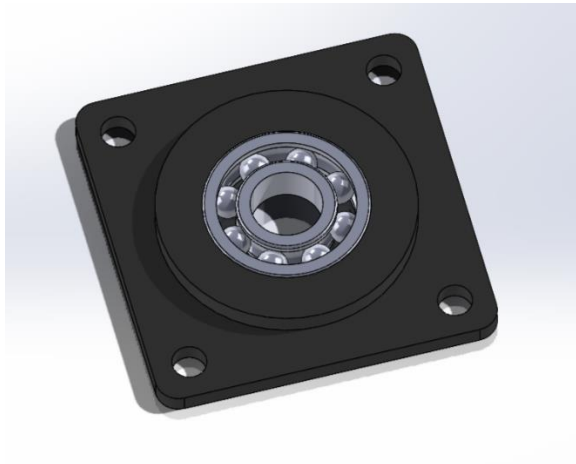
##### **Diseño de la base giratoria**

El diseño de la base giratoria se realizó en SolidWorks, tomando en cuenta las dimensiones de los engranajes cónicos helicoidales y los componentes de fijación. Se consideraron los siguientes aspectos clave:

- **Dimensiones:** La base giratoria tiene un diseño en forma de cuadrado con dimensiones de 15 cm por 15 cm y un grosor de 11.2 cm.
- **Integración del rodamiento:** En el centro de la base se incorporó una circunferencia en forma de cilindro para alojar un rodamiento de balero radial sellado con un diámetro exterior de 80 mm.

- **Ajuste del rodamiento:** Se realizó un vaciado de 80 mm de diámetro dentro del cilindro con una profundidad de 1.9 cm, permitiendo que el rodamiento encaje y descansa correctamente dentro de la base.
- **Material:** Se optó por PLA impreso en 3D debido a su facilidad de fabricación y buena resistencia mecánica relativa al peso.
- **Sistema de fijación:** Se incluyeron perforaciones para tornillos y sujetadores que aseguran las uniones entre la base giratoria y los ejes de los motores.

Como se muestra en la **Figura 24**, la simulación del diseño de la base giratoria permitió visualizar la integración de los componentes antes de su fabricación. Posteriormente, en la **Figura 25**, se observa la base giratoria construida físicamente.



*Figura 23 Simulación de la base estructural giratoria*



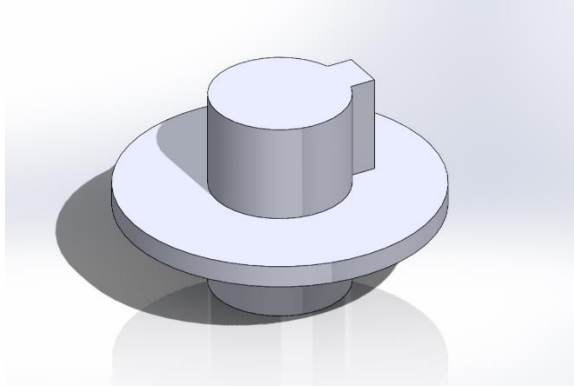
*Figura 24 Base giratoria impresa y ensamblada*

### **Diseño del eje de conexión entre el rodamiento y el engrane conducido**

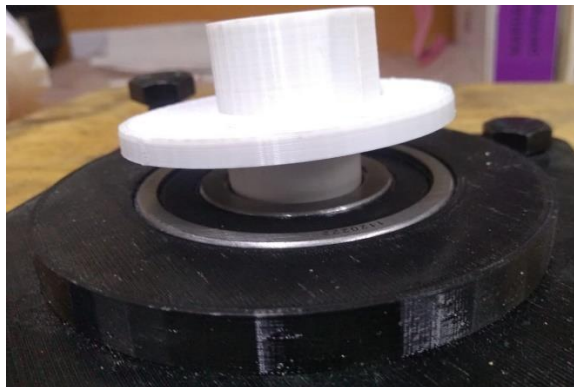
Para garantizar una correcta transmisión del movimiento entre el rodamiento y el engrane conducido, se diseñó un eje de conexión con las siguientes características:

- **Estructura del eje:** El eje cuenta con dos secciones de distinto diámetro para permitir la conexión adecuada entre el rodamiento y el engrane.
- **Separación de interacciones:** A la mitad del eje se incorporó una pared circular con un volumen de 0.5 cm para separar las dos secciones de conexión.
- **Diámetro de la conexión con el rodamiento:** La sección del eje que se conecta al rodamiento tiene un diámetro de 3.1 cm, diseñado para encajar a presión dentro del orificio interno del rodamiento, asegurando una transmisión eficiente del movimiento giratorio.
- **Diámetro de la conexión con el engrane:** La sección del eje que se conecta al engrane tiene un diámetro de 1.55 cm, compatible con el agujero central del engrane impreso.
- **Chavetero:** Se incorporó un chavetero en la sección del eje que conecta con el engrane para evitar deslizamientos sobre el cubo del engrane y garantizar una transmisión segura del torque.

Como se observa en la **Figura 26**, la simulación del diseño del eje permitió evaluar la viabilidad de la conexión entre el rodamiento y el engrane conducido. La **Figura 27** muestra el eje fabricado y ensamblado en el sistema.



*Figura 25 Simulación del eje de transmisión de movimiento del eje del azimut*



*Figura 26 Eje de transmisión ensamblada en la base giratoria*

### **Fabricación de la base giratoria y del eje**

La fabricación de la base giratoria se llevó a cabo mediante impresión 3D, siguiendo estos pasos:

1. **Preparación del modelo 3D:** Se exportó el diseño desde SolidWorks en formato STL y se optimizó para la impresión.
2. **Impresión 3D:** Se utilizó una impresora con boquilla de 0.4 mm y una altura de capa de 0.2 mm para garantizar una alta resolución en los detalles.

3. **Post-procesado:** Se realizaron ajustes en la base impresa, incluyendo lijado de superficies y ensamble de rodamientos para asegurar un acoplamiento preciso.

### **Ensamble y pruebas**

Una vez fabricada la base giratoria y el eje de conexión, se procedió con su montaje en la estructura de la montura altazimutal. Se realizaron pruebas de giro para evaluar la suavidad del movimiento y la transmisión del par de los motores a los engranajes. Se verificó que la base giratoria permitiera el ajuste correcto del engrane conducido y del piñón, evitando juegos mecánicos indeseados.

#### 4.4.3 Diseño y fabricación de la base estructural para el montaje de los motores del sistema de transmisión

Para sostener de manera estable el motor NEMA 34 junto con su reductor, se diseñó y fabricó una base estructural que permite el montaje adecuado de estos componentes, asegurando la alineación correcta para la transmisión del torque al engranaje impulsor.

#### **Diseño de la base estructural**

Dado el tamaño y peso del motor NEMA 34 y su reductor, se optó por construir una base de soporte a partir de un bloque de madera. Las características de la base son las siguientes:

- **Material:** Se utilizó un trozo de polín de madera recuperado, previamente cortado y pulido para garantizar estabilidad y un buen acabado.
- **Dimensiones:** La base tiene una altura de 4.5 cm, un ancho de 9 cm y una profundidad de 20 cm.
- **Función:** Esta base sirve como plataforma de descanso para el motor y el reductor, proporcionando una superficie estable para su montaje.

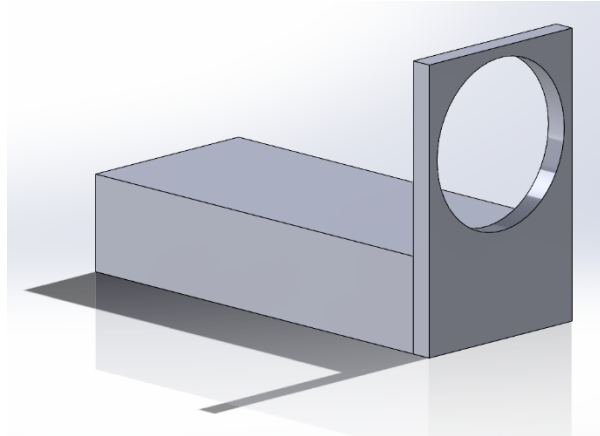
#### **Diseño de la pared de soporte**

Para evitar movimientos indeseados del motor y el reductor, se añadió una pared de soporte en uno de los costados de la base, con las siguientes características:

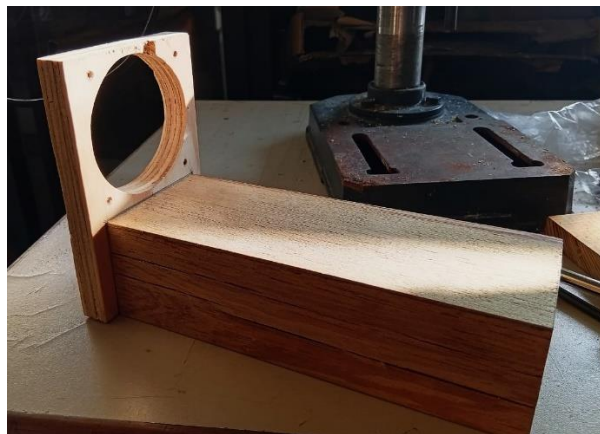
- **Dimensiones:** La pared tiene una altura de 14.5 cm y un ancho de 9 cm.
- **Agujero de montaje:** Se incorporó un orificio de 80 mm de diámetro con un grosor de 3 cm, permitiendo el ajuste de la placa de montaje del reductor.

- **Grosor de la pared:** La estructura tiene un grosor total de 1.5 cm, lo que le proporciona resistencia sin añadir un peso excesivo.

En la **Figura 28**, se observa la simulación del diseño de la base estructural, mientras que en la **Figura 29** se muestra la base estructural construida y ensamblada.

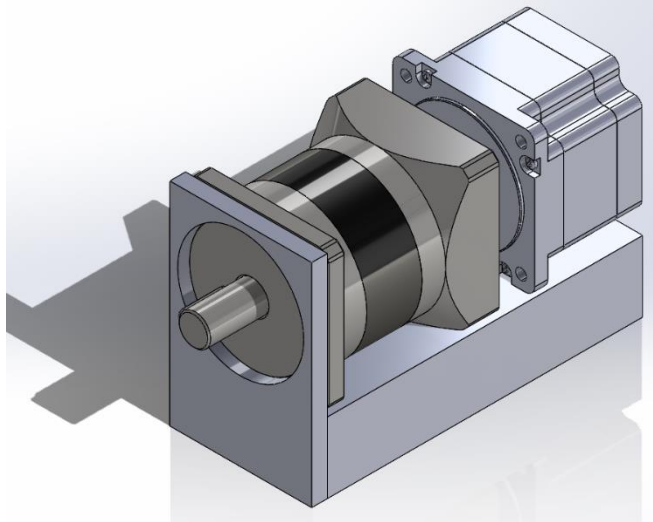


*Figura 27 simulación de la base estructural del sistema mecánico*

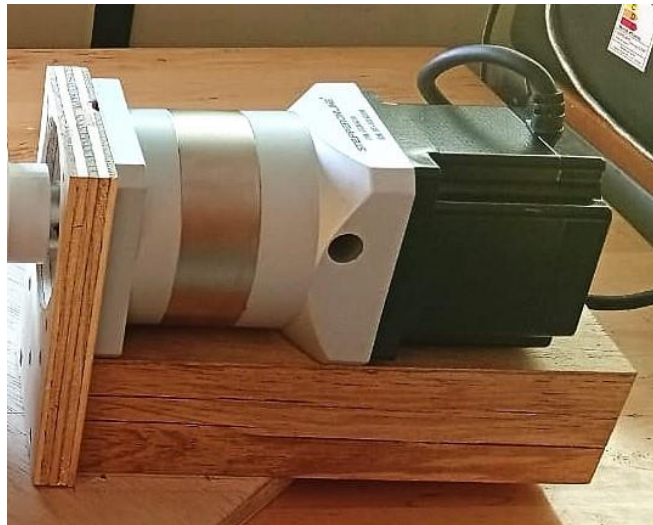


*Figura 28 Base estructural construida*

Esta base estructural permitió fijar el motor NEMA 34 y su reductor de manera estable, asegurando que el sistema de transmisión funcione correctamente y evitando desplazamientos no deseados durante la operación del mecanismo. En la figura 30 se muestra la simulación de la estructura con los motores ensamblados mientras que en la figura 31 se muestra el ensamblaje físico estructurado.



*Figura 29 simulación del motor y el reductor ensamblado en la estructura*



*Figura 30 Motore nema 34 y su reductor en la estructura ensamblada*

#### 4.4.4 Diseño y fabricación de ejes de transmisión para los reductores

El diseño de los ejes de transmisión de movimiento es fundamental para garantizar la correcta transferencia de torque desde los reductores hacia los engranajes cónicos helicoidales. Estos ejes fueron diseñados considerando las dimensiones de los reductores y los motores, asegurando un ajuste preciso y un montaje estable dentro del sistema de transmisión.

## Diseño de los ejes

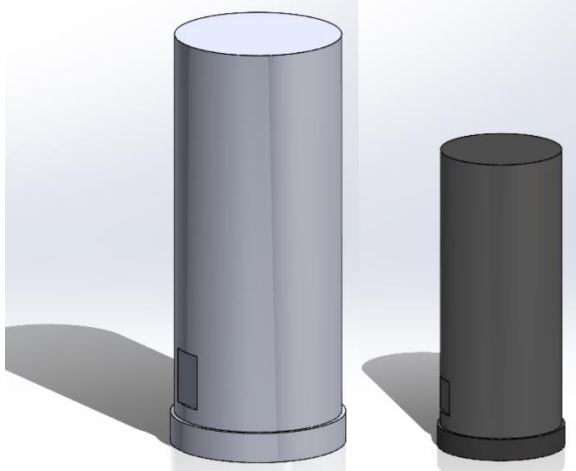
Los ejes fueron diseñados en aluminio debido a su combinación de resistencia mecánica y peso reducido. Cada eje fue mecanizado en torno, garantizando precisión en sus dimensiones y un ajuste adecuado con los componentes del sistema. Para fijar los engranajes y evitar deslizamientos durante la operación, se optó por el uso de prisioneros en lugar de chaveteros. Para ello, se mecanizó una base plana en una sección del eje, permitiendo que el prisionero se asentara firmemente y asegurara la fijación del piñón.

El diseño de los ejes incluyó una ligera variación en el diámetro en una sección específica, con el propósito de evitar que el cubo del piñón entre completamente y asegurar una correcta transmisión del movimiento.

Las dimensiones de los ejes son las siguientes:

- **Eje para reductor del NEMA 34:**
  - **Longitud total:** 6.91 cm
  - **Diámetro principal:** 1.38 cm
  - **Sección de mayor diámetro:** 2.9 cm (con una transición de 5 mm para evitar que el cubo del piñón entre completamente)
  - **Agujero para acoplamiento con el reductor:** Diámetro de 20 mm y profundidad de 30 mm
  
- **Eje para reductor del NEMA 23:**
  - **Longitud total:** 4.91 cm
  - **Diámetro principal:** 0.98 cm
  - **Sección de mayor diámetro:** 2.06 cm (con una transición de 3.6 mm para evitar que el cubo del piñón entre completamente)
  - **Agujero para acoplamiento con el reductor:** Diámetro de 14 mm y profundidad de 28 mm

En la Figura 32 se presenta el modelo CAD de los ejes de transmisión, donde se pueden observar sus dimensiones, la base plana para los prisioneros y la variación de diámetro para el ajuste con los piñones.



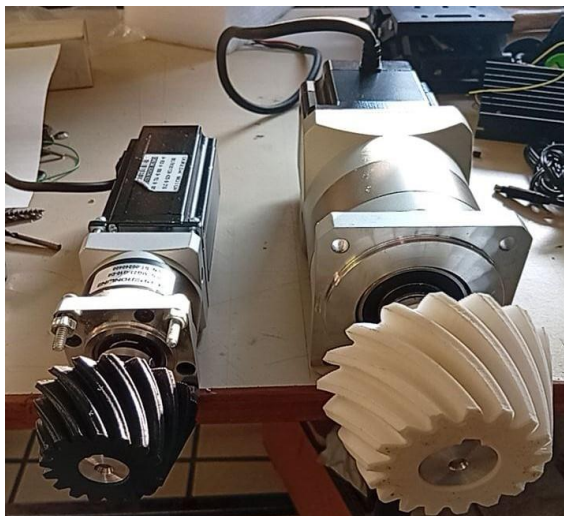
*Figura 31 Modelo CAD de los ejes de transmisión diseñados en SolidWorks*

### **Construcción de los ejes**

La fabricación de los ejes se realizó utilizando torno, asegurando precisión en los diámetros y longitudes requeridos. Se prestó especial atención a la calidad del acabado superficial, en particular en las zonas de contacto con los reductores y engranajes, para minimizar el desgaste y garantizar un ajuste óptimo.

Una vez mecanizados los ejes, se realizaron pruebas de ensamblaje para verificar su compatibilidad con los reductores y engranajes. Se comprobó que la variación de diámetro en cada eje cumpliera su función de limitar la inserción del cubo del piñón, asegurando una transmisión eficiente del torque. Además, se validó la firmeza del sistema de fijación mediante prisioneros, confirmando que los ejes permanecían correctamente acoplados sin presentar deslizamientos durante la operación.

En la **Figura 32**, se muestra el ensamble final de los motores NEMA con sus respectivos reductores, los ejes de transmisión y los piñones acoplados.



*Figura 32 Ensamble de motores NEMA, reductores y ejes de transmisión con piñones.*

#### 4.4.5 Diseño y fabricación de la estructura para la adaptación del mecanismo (Base cilíndrica)

El diseño de la estructura de la montura inicial contemplaba que todos los componentes principales, incluyendo los brazos dobsonianos y el tubo detector de partículas, se montaran directamente sobre el sistema de engranajes del eje de azimut. Sin embargo, durante la fase de construcción, se identificó un problema dimensional: el diámetro interno del vaciado del engranaje conducido del azimut resultó ser insuficiente para alojar adecuadamente el conjunto de los brazos dobsonianos y el tubo detector. Esto generaba interferencias mecánicas que impedían el correcto funcionamiento del sistema.

Para solucionar esta limitación, se diseñó una base cilíndrica que permitiera elevar la estructura y evitar el conflicto entre los engranajes del azimut y los elementos superiores. Cualquier objeto montado directamente sobre el vaciado del engranaje conducido podría interferir con el piñón impulsor, obstaculizando el movimiento adecuado del sistema. La base cilíndrica resolvió este problema al proporcionar la elevación necesaria para garantizar la operación libre de interferencias.

#### **Criterios de fabricación**

La base cilíndrica fue fabricada mediante impresión 3D con filamento PLA, utilizando la misma configuración de impresión que se empleó para los engranajes mencionados anteriormente en este documento. La altura de la base es de 7 cm, la cual se determinó como la adecuada para evitar interferencias entre el piñón y otros componentes mecánicos.

Su diámetro total es de 18.9 cm, coincidiendo con el vaciado del engranaje conducido del azimut.

Para optimizar el uso de filamento y evitar un consumo excesivo de material, la base cilíndrica se diseñó con pilares, anillos y arriostramientos que garantizan estabilidad y resistencia estructural sin comprometer la rigidez del sistema. Además, en la parte inferior, se integraron conexiones que permiten un ajuste preciso dentro del vaciado de la rueda del sistema de engranajes del azimut.

En la plataforma superior, la base cuenta con tres vigas entrelazadas en forma de estrella. Este diseño permite ahorrar material y, al mismo tiempo, forma parte del sistema de conexión con la siguiente estructura: el cono truncado invertido. Las cavidades generadas por esta estrella permiten realizar uniones de madera que sostienen el cono, asegurando una transición estable entre ambas estructuras.

En la Figura 34 se muestra un esquema detallado de las dimensiones de la base cilíndrica, incluyendo altura, diámetro y la disposición de los elementos estructurales.

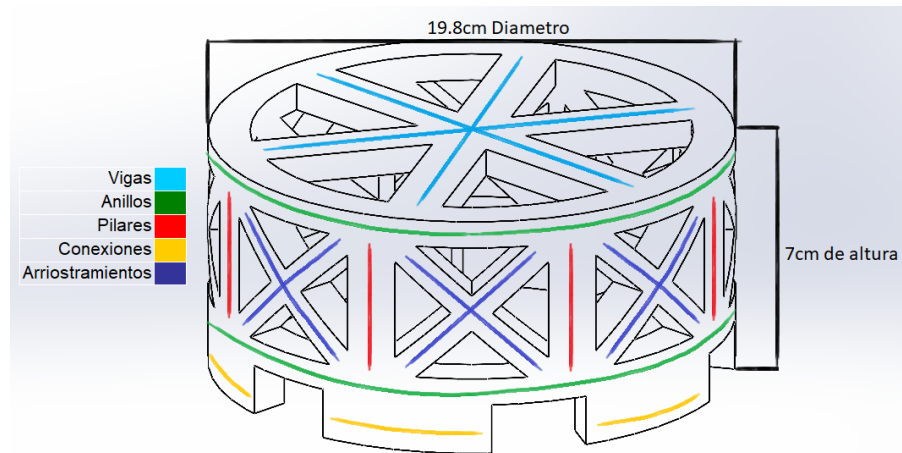


Figura 33 Dimensiones de la base cilíndrica y elementos estructurales.

En la Figura 35 se presenta una imagen de la base cilíndrica impresa en 3D, donde se pueden observar los pilares, anillos y vigas en estrella, resaltando su estructura optimizada para reducir el consumo de material sin comprometer la estabilidad.



*Figura 34 Base cilíndrica impresa.*

Con la implementación de esta base cilíndrica, se logró evitar cualquier interferencia mecánica entre el sistema de engranajes del azimut y los componentes superiores de la montura, asegurando el correcto funcionamiento del mecanismo. En el siguiente apartado se detallará el diseño y fabricación de una base adicional en forma de cono truncado invertido, que permitirá extender aún más el diámetro de apoyo para los brazos dobsonianos.

#### 4.4.6 Diseño y fabricación de una base en forma de cono tumbado invertido

Para garantizar la estabilidad estructural y proporcionar una base adecuada para el montaje de los brazos dobsonianos y el tubo detector de partículas, se diseñó una base en forma de cono truncado invertido. Esta estructura permite ampliar el diámetro de apoyo desde 19.8 cm (coincidente con la base cilíndrica) hasta 30 cm, asegurando el espacio necesario para la correcta separación de los brazos y el tubo detector.

##### **Construcción de la base**

La base cónica truncada invertida se fabricó utilizando madera MDF y componentes impresos en 3D. La construcción se realizó en dos etapas:

1. **Bases circulares:** Se cortaron cuatro discos de MDF. Dos de ellos corresponden a la base inferior y superior, con diámetros de 19.8 cm y 30 cm respectivamente. Los otros dos discos adicionales, con los mismos diámetros, fueron diseñados con seis perforaciones distribuidas en los vértices de un hexágono, correspondientes a las medidas de las catenarias, para permitir su ensamblaje correcto. Estas

perforaciones aseguraron que las catenarias quedaran alineadas y firmemente sujetas.

2. **Estructura de soporte:** En lugar de imprimir un cono sólido en 3D (lo que habría implicado un alto consumo de material PLA), se optó por utilizar seis pilares estructurales que conectaran ambas bases circulares. Inicialmente, estos pilares fueron diseñados como elementos rectos, pero tras pruebas con modelos a escala, se observó que no ofrecían la resistencia adecuada bajo carga.

### Uso de catenarias en la estructura

Para mejorar la resistencia de la base cónica truncada invertida, se adoptó un diseño basado en catenarias, una geometría ampliamente utilizada en la arquitectura de cúpulas de iglesias debido a su capacidad para distribuir cargas de manera eficiente. La catenaria, al invertirse, mantiene su resistencia estructural, lo que permite soportar esfuerzos significativos sin comprometer la estabilidad. En la Figura 36 se muestra una representación esquemática de las catenarias utilizadas en arquitectura, resaltando su aplicación en la distribución de cargas.



*Figura 35 Empleo de los arcos catenarios en la construcción de la cúpulas.*

Las seis catenarias fueron diseñadas y fabricadas mediante impresión 3D con filamento PLA, utilizando la misma configuración de impresión que en los engranajes y la base cilíndrica. Estas piezas se ensamblaron entre las bases circulares de MDF, encajando en los agujeros previamente diseñados para garantizar una fijación estable. Este diseño proporcionó una estructura liviana pero altamente resistente. Durante las pruebas, un modelo a escala reducida de esta base cónica con catenarias demostró ser capaz de soportar hasta 70 kg sin deformaciones significativas. En la Figura 37 se muestra la base a escala de la estructura impresa en 3D, que fue sometida a una carga de 70 kg para evaluar su resistencia.



Figura 36 Base cónica truncada invertida a escala.

En la figura 38 se presenta el diseño estructural de las bases circulares elaboradas en material MDF para el asentamiento del cono truncado invertido. Estas placas son las esenciales para la construcción total de la estructura.

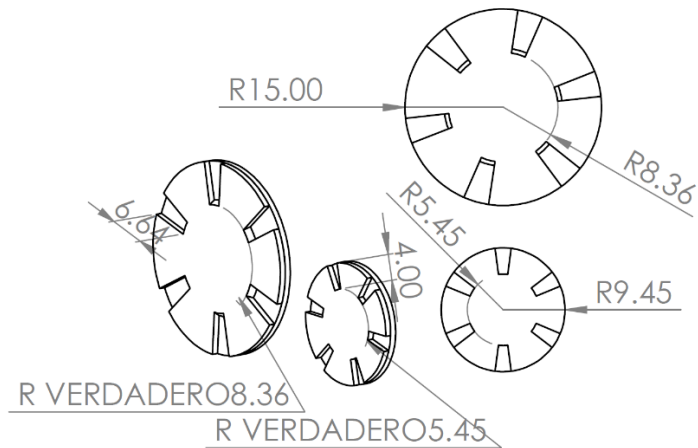
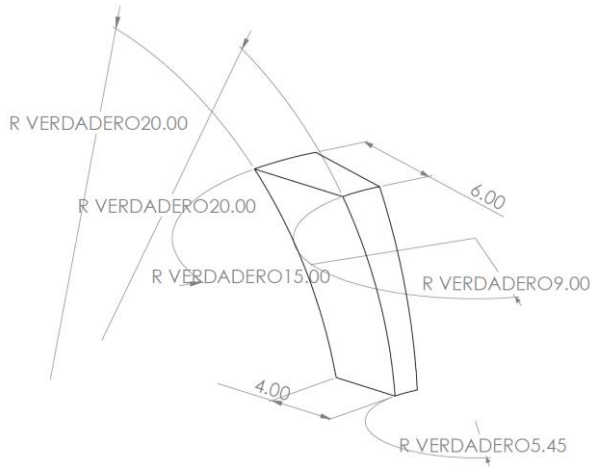


Figura 37 Diseño estructural de las bases circulares de la estructura con su respectivo acoplamiento.

En la Figura 39 se presenta un esquema de la base cónica truncada invertida con las dimensiones de las catenarias utilizadas en su diseño.



*Figura 38 Esquema de la catenaria diseñada para este proyecto.*

En la Figura 40 se exhibe una imagen de una catenaria impresa en 3D, fabricada con PLA bajo las mismas condiciones de impresión aplicadas a los engranajes y la base cilíndrica.



*Figura 39 Catenaria para soporte de las bases impresa en 3D*

En la Figura 41 se presenta una ilustración detallada del ensamblaje de la base cónica truncada invertida, mostrando la disposición de las bases circulares, las catenarias y los puntos de fijación.



*Figura 40 Base cónica truncada invertida ensamblada con sus 6 catenarias.*

Este diseño permitió obtener una base estructuralmente eficiente, con un equilibrio entre resistencia y optimización de materiales, asegurando la correcta funcionalidad del sistema sin generar un consumo excesivo de PLA ni comprometer la estabilidad del detector de partículas.

#### 4.4.7 Diseño y fabricación de los brazos tipo dobsonianos para el movimiento de la altura y bases de empotramiento de los brazos

Para permitir el movimiento del tubo óptico en el eje de altitud, se diseñaron y fabricaron los brazos tipo dobsonianos. Estos brazos sostienen el tubo y facilitan su rotación mediante rodamientos, asegurando un movimiento fluido y preciso. Además, se construyeron dos bases circulares con el mismo diámetro que la base superior del cono truncado invertido, las cuales sirven como puntos de anclaje de los brazos.

Todas las piezas mencionadas en este apartado fueron fabricadas en madera, garantizando una estructura ligera pero resistente.

#### **Diseño y características de los brazos dobsonianos**

Para determinar la altura necesaria de los brazos, primero se analizó la dimensión del tubo óptico. Con base en esto, se establecieron las siguientes dimensiones:

- **Altura:** 63 cm
- **Ancho:** 20 cm

- **Grosor:** 1 cm

Los brazos tienen diseños específicos en sus partes superior e inferior para cumplir con sus funciones mecánicas:

### Parte superior

- Se realizó un corte circular de 20 cm de diámetro en la parte superior de cada brazo para reducir fricciones al interactuar con los anillos de sujeción del tubo.
- Se incorporaron dos aberturas circulares de 7.2cm de diámetro diseñadas para el montaje de rodamientos, los cuales permiten que el tubo gire suavemente al estar sujeto por los anillos de soporte.

### Parte inferior

- Los últimos 3 cm del brazo presentan una reducción de ancho, pasando de 20 cm a 12 cm, formando un perfil escalonado.
- Esta forma escalonada permite el acople preciso en las aberturas rectangulares de las bases circulares sin necesidad de fijaciones adicionales como tornillos o clavos.

En la Figura 42 se presenta una ilustración del diseño de los brazos dobsonianos con sus dimensiones.

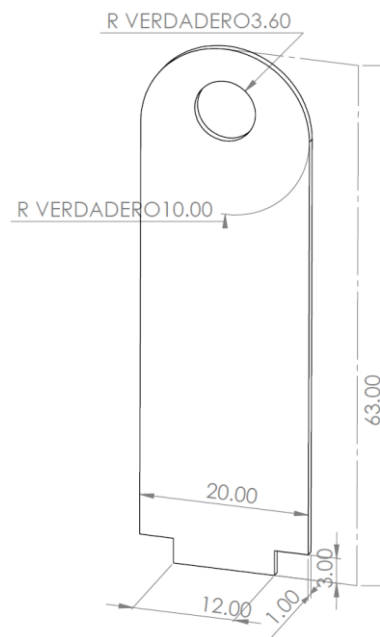


Figura 41 Dimensiones del diseño estructural de los brazos dobsonianos.

En la Figura 43 se exhibe una fotografía de los brazos ya fabricados en físico.



*Figura 42 Modelo de los brazos dobsonianos fabricados en madera*

### **Placa de estabilización de los brazos**

Para evitar vibraciones o inestabilidad en los brazos dobsonianos durante su operación, se diseñó una placa de soporte que conecta ambos brazos, brindando rigidez estructural al sistema.

Las dimensiones de la placa son:

- **Altura:** 30 cm
- **Ancho:** 24.6 cm (coincidiendo con la separación total entre los brazos, asegurando un ensamble preciso).

Esta placa se ubica estratégicamente entre los brazos, proporcionando mayor estabilidad y evitando desviaciones durante la manipulación del tubo óptico.

### **Bases circulares para el montaje de los brazos**

Las bases circulares, que sirven de punto de anclaje para los brazos, cuentan con las siguientes características:

- Cada base circular tiene un diámetro igual al de la base superior del cono truncado invertido.
- Se realizaron dos aberturas rectangulares de **1.2 cm de ancho por 12 cm de largo**, ubicadas a un radio de **11.4 cm** desde el centro de la base.
- Estas aberturas están diseñadas para permitir un ensamble preciso de los brazos dobsonianos, evitando el uso de sujeciones permanentes y garantizando estabilidad estructural.

En la Figura 44 se muestra un esquema detallado de las bases circulares con las aberturas rectangulares para el montaje de los brazos.



*Figura 43 Dimensiones del diseño estructural de las bases de acoplamiento.*

En la Figura 45 se presenta una imagen de las bases circulares físicas con sus respectivas aberturas rectangulares.



*Figura 44 Modelo de la base de acoplamiento fabricada en madera*

### **Rodamientos utilizados**

Los rodamientos empleados para el montaje del tubo óptico son los mismos que se utilizaron en la construcción de la base giratoria para el engranaje rueda del azimut, garantizando uniformidad en los componentes mecánicos y compatibilidad en el diseño del sistema.

En la Figura 46 se muestra el ensamblaje completo de los brazos dobsonianos con las bases circulares y el tubo óptico montado.



*Figura 45 Ensamblaje de toda la estructura con las piezas fabricadas en madera*

#### 4.4.8 Diseño y fabricación de anillos de sujeción para el tubo detector de partículas

Para permitir el movimiento libre del tubo óptico a lo largo del eje de la altitud se diseñó el anillo de sujeción de tal manera que pudiese interactuar con los rodamientos de los brazos dobsonianos, esto con el propósito de establecer una buena transmisión de movimiento al eje de la altitud. Este anillo de sujeción fu fabricado utilizando un cople de PVC, una pieza que es comúnmente utilizada para unir tuberías y conexiones. El principal reto en el diseño de este anillo fue desarrollar unos ejes que permitieran la transmisión de movimiento acoplados correctamente con los rodamientos para facilitar el giro conectado desde el engranaje que controla la altitud y que a su vez se garantice una sujeción firme al cople de PVC.

Para permitir la fijación y el movimiento del tubo detector de partículas dentro de los brazos dobsonianos, se diseñaron y fabricaron un total de siete piezas, incluyendo un anillo de sujeción, ejes de transmisión, cajas de alojamiento para los rodamientos y placas de fijación. Además, se incorporó un engranaje similar al utilizado en el eje de azimut, pero con dimensiones reducidas para adaptarse al eje de altura.

## **Componentes del sistema de sujeción y transmisión**

### **1. Anillo de sujeción para el tubo detector**

El anillo de sujeción fue diseñado a partir de un cople de PVC, el cual fue seccionado en uno de sus extremos para permitir su apertura y la posterior inserción del tubo detector de partículas. Para garantizar su cierre adecuado y permitir cierto ajuste, se incorporaron dos placas de madera en cada extremo del cople cortado. Estas placas están unidas mediante tornillos, asegurando que el anillo pueda ajustarse firmemente al tubo sin riesgo de deslizamiento.

Características del cople:

- Diámetro interior: 20cm
- Diámetro exterior: 20.60cm
- Longitud: 10.20cm

Características de las placas de sujeción:

- Ancho: 10.20cm
- Altura: 2.94cm
- Agujeros para tornillos: 5mm

En la Figura 47 se presenta una ilustración del diseño del anillo de sujeción y sus dimensiones estructurales.

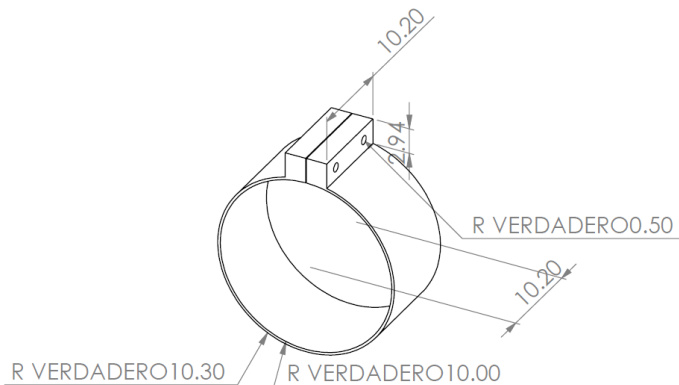


Figura 46 Diseño estructural del anillo de sujeción del tubo detector de partículas.

En la figura 48 se presenta el anillo de sujeción construido en su totalidad



Figura 47 Anillo de sujeción del tubo.

## 2. Ejes de transmisión de movimiento

Se diseñaron dos ejes cilíndricos en madera, cuya función principal es interactuar con los rodamientos acoplados en los brazos dobsonianos, permitiendo la rotación del tubo detector.

Las características de estos ejes son:

- **Diámetro:** 3.6cm.
- **Longitud:** 4 cm.

- Uno de los ejes está conectado al engranaje del eje de altura a través de una placa circular de madera de **13.45305 cm de diámetro**, la cual permite la transmisión del movimiento entre el engranaje y el eje.

En la Figura 49 se muestra un esquema de los ejes de transmisión de movimiento y su conexión con el engranaje del eje de altura.

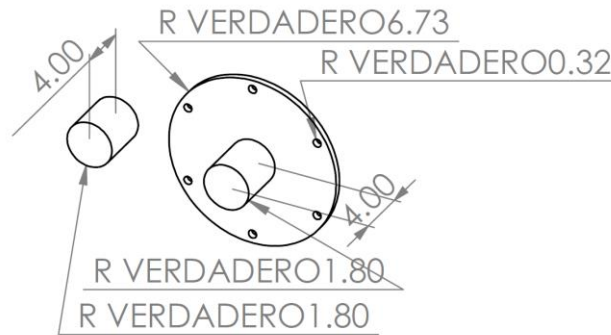


Figura 48 Diseño estructural de los ejes de transmisión de movimiento.

En la figura 50 se muestra los ejes de transmisión fabricados en un torno

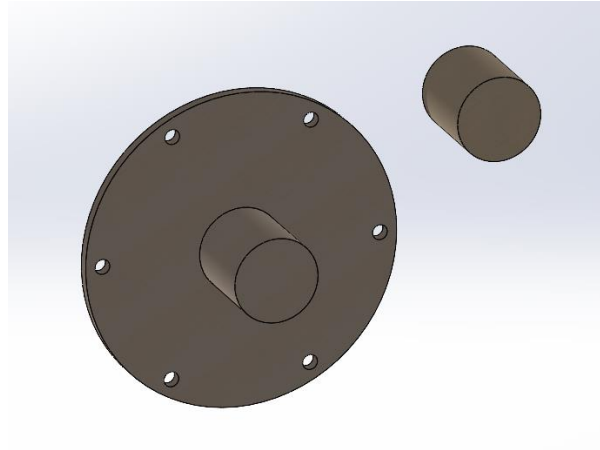


Figura 49 Simulación de ejes de transmisión fabricados en madera.

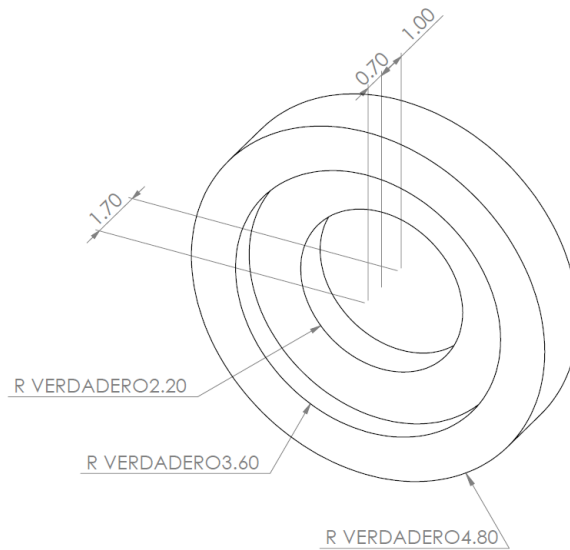
### 3. Cajas de alojamiento para los rodamientos

Se fabricaron dos cajas de madera diseñadas para fijar los rodamientos en los brazos dobsonianos, evitando desplazamientos no deseados. Estas cajas presentan las siguientes especificaciones:

- **Diámetro total:** 9.6 cm.

- **Apertura interna:** 7.2 cm (coincidiendo con el diámetro exterior del rodamiento).
- **Profundidad de la cavidad:** 0.7 cm.
- **Orificio central:** 4.4 cm de diámetro, permitiendo el paso del eje de transmisión y su conexión con el engranaje.

En la figura 51 se muestra el esquema estructural del diseño de las cajas de alojamiento para los rodamientos con las especificaciones indicadas.



*Figura 50 Diseño estructural de las cajas de alojamiento para los rodamientos.*

En la Figura 52 se exhibe una fotografía de las cajas de alojamiento de los rodamientos y su integración en los brazos dobsonianos.



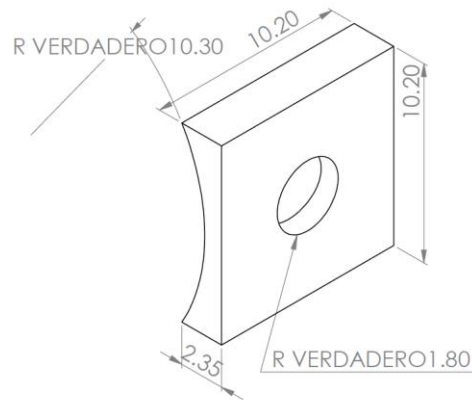
*Figura 51 cajas de alojamiento de rodamiento elaboradas en madera*

#### 4. Placas de fijación del anillo de sujeción

Se diseñaron dos placas de madera que cumplen la función de fijar los ejes cilíndricos al anillo de sujeción (cople de PVC). Estas placas cuentan con un orificio central en el cual se insertan los ejes de madera, los cuales se adhieren a las placas mediante un adhesivo resistente para garantizar una conexión firme.

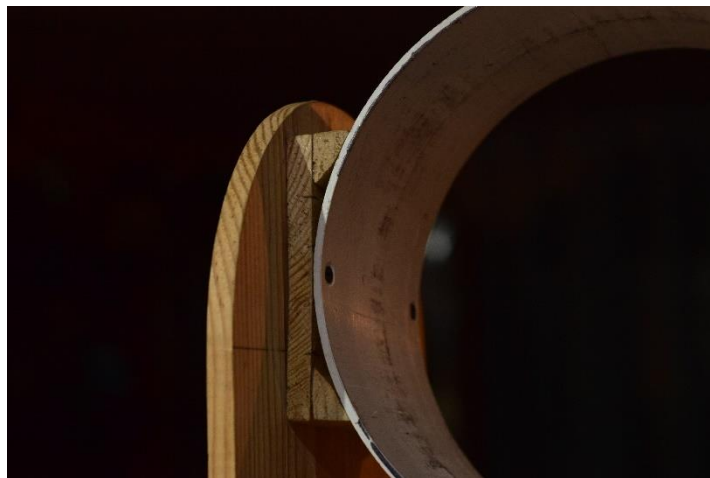
Las placas están fijadas al cople de PVC mediante tornillos, asegurando una estructura estable capaz de soportar el movimiento y el peso del tubo detector de partículas.

En la Figura 53 se presenta una imagen del diseño estructural de las placas de fijación.



*Figura 52 Diseño estructural de las bases de soporte de anillo.*

En la Figura 53 se muestra el ensamblaje completo de todos los componentes en el tubo detector de partículas.



*Figura 53 Ensamble completo del anillo de sujeción con su sistema de transmisión*

#### 4.4.9 Montaje del tubo detector de partículas

Tras la instalación de los brazos dobsonianos, se integró el tubo de PVC, que sirve como el detector de partículas en la estructura de la montura altazimutal. El tubo, de un diámetro de 20 cm, altura de 105 cm y grosor de 3 mm, fue elegido por sus propiedades de resistencia y facilidad de montaje.

##### Cálculo del peso del tubo de PVC

Para hacer el cálculo del tubo, vamos a determinar primero el volumen del material de PVC. El volumen del tubo se obtuvo restando el volumen del cilindro interno (hueco) al volumen del cilindro externo.

- Radio externo:  $0.10\text{ m}$
- Radio interno:  $0.10\text{ m} - 0.003\text{ m} = 0.097\text{ m}$
- Volumen del cilindro externo:

$$V_{\text{externo}} = \pi * (0.10\text{ m})^2 * 1.05\text{ m} \approx 0.033\text{ m}^3$$

- Volumen del cilindro interno:

$$V_{\text{interno}} = \pi * (0.097\text{ m})^2 * 1.05\text{ m} \approx 0.031\text{ m}^3$$

- Volumen del material del PVC:

$$V_{\text{PVC}} = V_{\text{externo}} - V_{\text{interno}} \approx 0.033\text{ m}^3 - 0.031\text{ m}^3 = 0.002\text{ m}^3$$

Con una densidad aproximada del PVC de  $1,400\text{ kg/m}^3$ , el peso del tubo es:

$$\text{Peso del tubo} = V_{\text{PVC}} * \text{densidad} \approx 0.002\text{ m}^3 * \frac{1400\text{ kg}}{\text{m}^3} = 2.73\text{ kg}$$

El peso del tubo, calculado previamente, es de aproximadamente 2.73 kg, contribuyendo al peso total que deben soportar los motores junto con los demás componentes de la estructura.

#### 4.4.10 Programación de la montura altazimutal

La montura altazimutal automatizada requiere un sistema de programación de control preciso, lo que le permita realizar los movimientos necesarios en los ejes del azimut y la altura. Como consecuencia, se desarrolló un programa en Arduino que nos permite controlar los motores paso a paso mediante controladores DRV8825. Estos drivers aseguran la sincronización y funcionalidad correcta de la montura.

##### **Objetivos del programa:**

El programa tiene como principal objetivo garantizar que la montura abarque los movimientos simulando la semiesfera superior para la detección de partículas, siguiendo el patrón de movimiento requerido para ello. Esto incluye:

- Mover el eje del azimut en intervalos predefinidos hasta completar una única vuelta de 360°.
- Sincronización de los movimientos proporcionados por el eje de la altura con los del eje del azimut realizando un giro de 90 grados, en intervalos predefinidos con un tiempo de espera ajustable entre cada intervalo.
- Alternar la dirección del giro del eje de la altura cada dos movimientos del eje del azimut lo cual permite cubrir el área de toda la semiesfera de detección.

### **Diagrama de flujo**

En la Figura 54 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo de control de los motores NEMA 23 y NEMA 34, donde se describe el proceso de referencia, movimientos y finalización del ciclo.

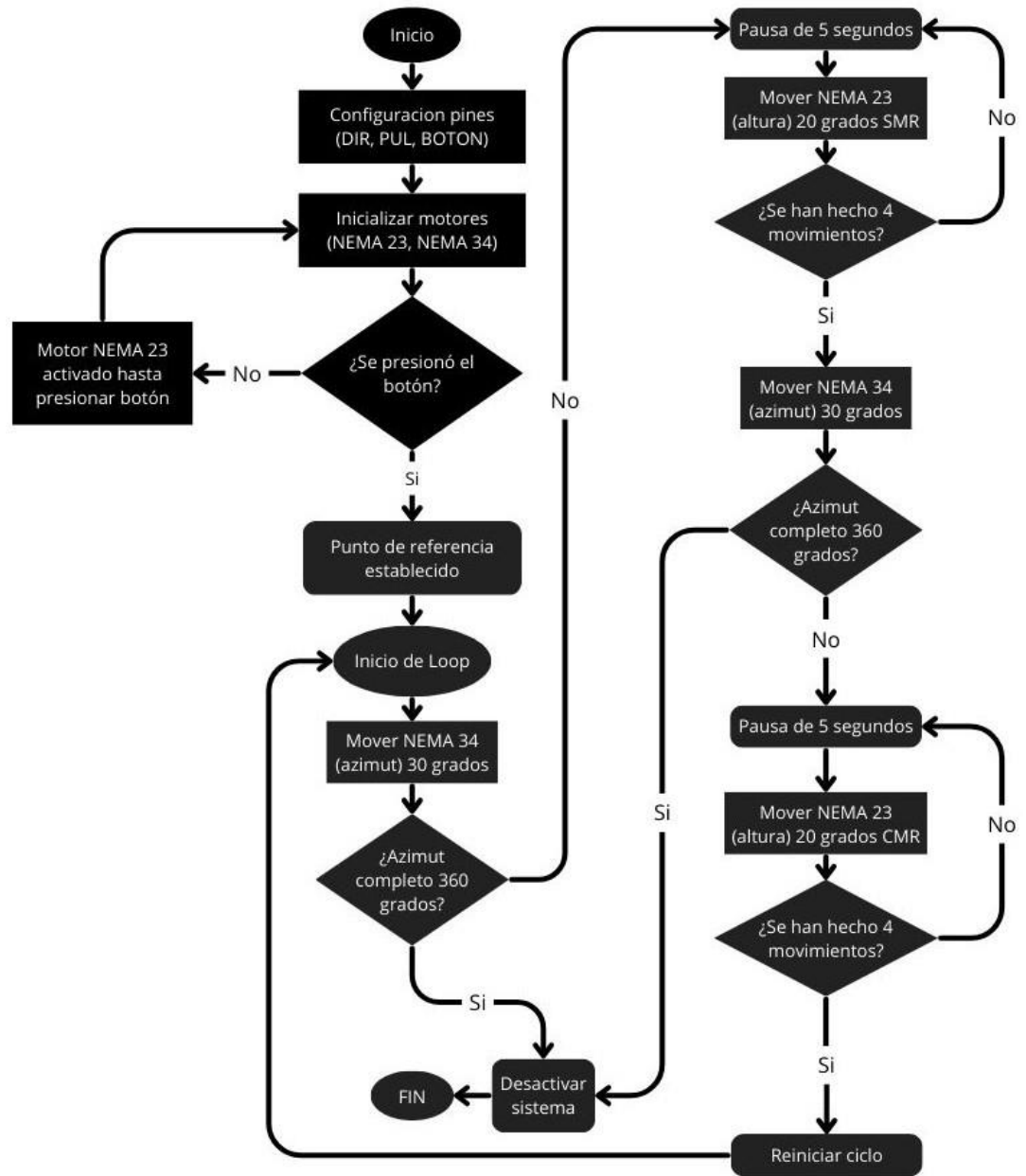


Figura 54 Diagrama de flujo del algoritmo de control de los motores NEMA 23 y NEMA 34. En este se describe el proceso de inicialización, referencia, movimiento en diferentes direcciones y la condición de finalización cuando el NEMA 34 completa una vuelta de 360°

### Justificación del diseño del programa

El diseño de este programa asegura que los movimientos de la montura sean precisos y repetibles. Definiendo los parámetros que sean ajustables, como los intervalos de movimiento y el tiempo de espera obtenemos la flexibilidad para adaptar el sistema a

diferentes requisitos experimentales. La sincronización entre ambos ejes permite garantizar que no haya movimientos descoordinados, lo cual es crucial para que podamos abarcar de manera eficiente la semiesfera de detección superior.

## Capítulo 5 Resultados obtenidos y funcionalidad del diseño

### 5.1 Ensamblaje final de la montura altazimutal automatizada

La estructura final de la montura altazimutal automatizada fue completamente ensamblada y puesta en operación, cumpliendo con los objetivos planteados en este proyecto. En la Figura 55 se muestra la estructura montada, la cual integra los siguientes elementos principales:

1. **Base Cilíndrica y Cono Truncado Invertido:** Diseñados para proporcionar estabilidad y soporte al sistema, asegurando la correcta alineación de los componentes.
2. **Brazos Dobsonianos:** Permiten sujetar y controlar el movimiento en altitud del tubo detector de partículas.
3. **Engranajes Cónicos Helicoidales:** Fabricados mediante impresión 3D, estos componentes aseguran una transmisión precisa del torque generado por los motores.
4. **Motores y Reductores:** Instalados para ejecutar los movimientos controlados en los ejes de azimut y altitud, alcanzando los niveles de precisión requeridos para el funcionamiento del sistema.
5. **Tubo Detector de Partículas:** Diseñado con plástico centellador, este componente es el núcleo del sistema de detección, capaz de identificar partículas subatómicas en un área semiesférica.

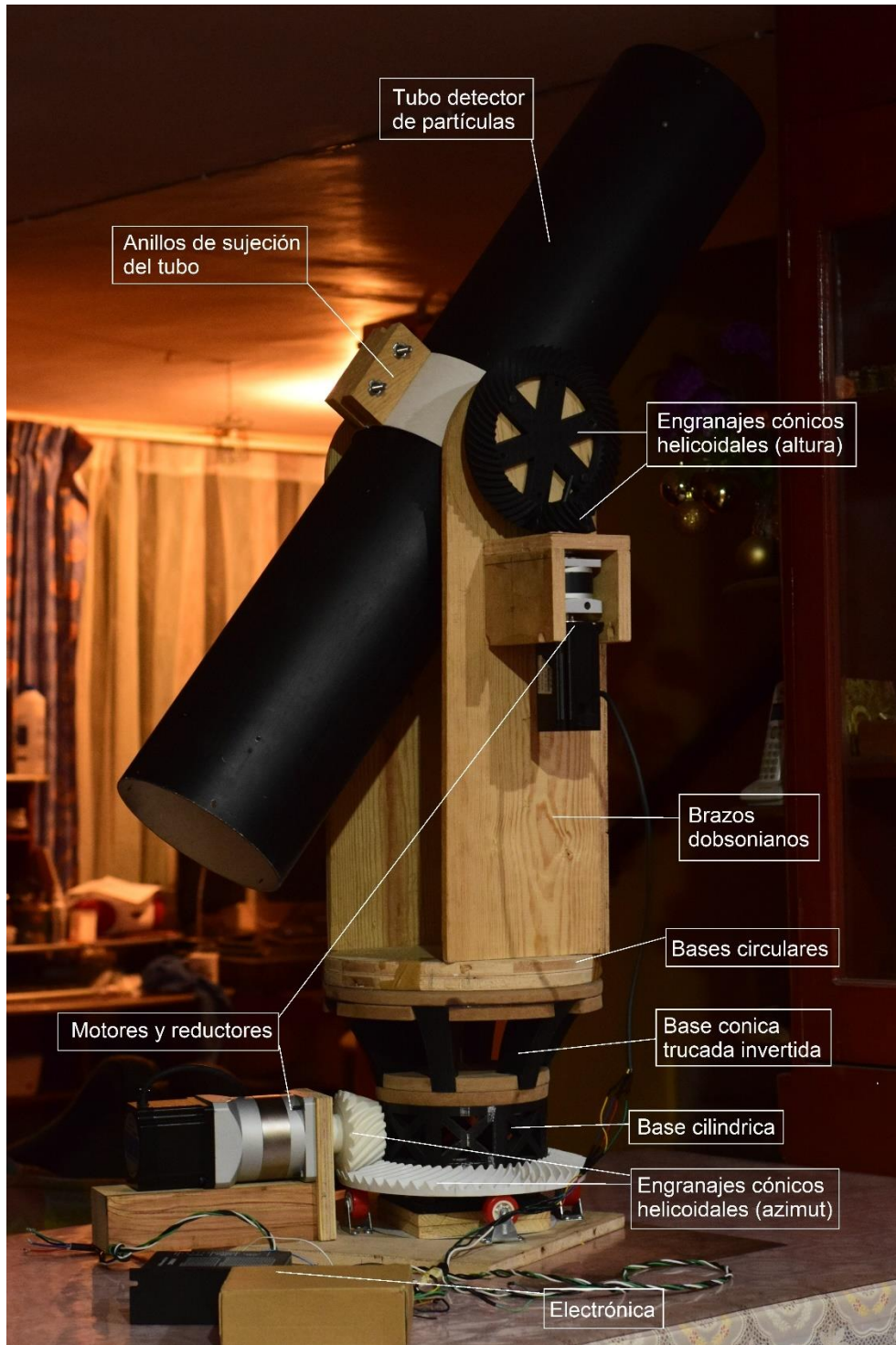


Figura 55 Imagen de la montura altazimutal ensamblada, donde se observan sus componentes principales: base cilíndrica, con truncado invertido, brazos dobsonianos, engranajes cónicos helicoidales, motores con reductores y el tubo detector de partículas.

El diseño final no solo garantiza la funcionalidad mecánica y electrónica, sino que también destaca por su versatilidad y la integración de materiales accesibles, como madera, PLA y PVC.

## 5.2 Pruebas Experimentales de Funcionamiento

### Objetivo de las pruebas

Se realizaron pruebas experimentales para validar que la montura altazimutal automatizada ejecuta los movimientos predefinidos con la precisión y estabilidad requeridas. El objetivo principal fue verificar que la estructura sigue correctamente los intervalos de movimiento programados en los ejes de azimut y altitud, asegurando que el detector de partículas cubra una semiesfera superior en su trayectoria.

### Metodología de las pruebas

Para evaluar el desempeño del sistema, se programaron los motores paso a paso NEMA 23 y NEMA 34 para realizar desplazamientos específicos en los ejes de azimut y altitud. Las pruebas consistieron en:

- Ejecutar movimientos en el eje de **azimut** en incrementos de  $30^\circ$ , hasta completar una rotación de  $360^\circ$ .
- Sincronizar los movimientos del eje de **altitud**, asegurando que cada vez que el azimut avanzara  $30^\circ$ , la altitud se incrementara en  $20^\circ$  hasta alcanzar  $80^\circ$  y luego se invirtiera el sentido.
- Medir los ángulos alcanzados en cada movimiento y compararlos con los valores esperados.
- Verificar que el sistema se detuviera correctamente tras completar una vuelta completa de  $360^\circ$  en azimut.

### Resultados y evidencias

Los resultados de las pruebas confirmaron que la estructura responde de manera estable a las órdenes de movimiento. La Figura Y muestra el desplazamiento del sistema en distintos intervalos de tiempo, donde se puede observar que los motores alcanzaron los ángulos deseados con un margen de error mínimo.

Asimismo, en la sección de **caracterización de motores** (Capítulo 4), se presentan gráficas que muestran la respuesta del sistema ante los comandos de movimiento. En dichas gráficas se evidencia la correcta ejecución de los desplazamientos programados en los motores NEMA 23 y NEMA 34.

Para validar la precisión de los movimientos, se realizaron **múltiples iteraciones del mismo patrón de desplazamiento**, obteniendo resultados consistentes en cada repetición. Esto demuestra que la montura opera de manera repetitiva y estable dentro de los parámetros establecidos.

### **Conclusión de las pruebas**

Los resultados obtenidos demuestran que la montura altazimutal ejecuta correctamente los movimientos programados, garantizando la cobertura de detección en una semiesfera superior. Además, el sistema mostró una alta estabilidad y repetibilidad en sus desplazamientos, confirmando que cumple con los requisitos funcionales y de diseño establecidos en este proyecto.

## Capítulo 6 Conclusiones

Durante el proceso del desarrollo de este proyecto permitió lograr los objetivos plantados inicialmente, demostrando que el diseño y el proceso de construcción de la montura automatizada es una solución viable y funcional para la detección de partículas dentro del contexto de las tecnologías de búsqueda arqueológica. Por medio del uso de técnicas y de materiales accesibles como plásticos centelladores y componentes con una estructuración específica que se obtuvieron por medio de la impresión en 3D, se logró un sistema eficaz que opera dentro del área de una semiesfera superior de captación de partículas y con ello minimizar el impacto ambiental y patrimonial de las zonas de interés de exploración.

La integración de los motores paso a paso con sus respectivos reductores planetarios proporcionó los niveles de torsión y precisión necesarios para ejecutar los movimientos predefinidos graduales en los ejes correspondientes del azimut y la altura. Los resultados obtenidos validan los aspectos de la metodología del diseño como la funcionalidad del prototipo en las condiciones ideales de control.

Este proyecto estableció una base sólida para futuros proyectos en desarrollo, sugiriendo mejoras en la durabilidad de los materiales y la implementación de los análisis acústicos derivados de los datos obtenidos. Así, el proyecto no solo ha cumplido con su propósito inicial, sino que además abre nuevas posibilidades en la intersección multidisciplinaria.

Para trabajos futuros, se propone mejorar la durabilidad y resistencia de los materiales utilizados en la estructura de la montura, explorando opciones como aleaciones metálicas ligeras o polímeros de mayor resistencia mecánica. Además, se sugiere optimizar el sistema de control mediante la implementación de algoritmos de calibración y compensación de errores para aumentar la precisión de los movimientos. También se plantea la integración de sensores adicionales que permitan una retroalimentación en tiempo real del posicionamiento, lo que facilitaría un control más preciso y automatizado.

## Capítulo 7 Referencias

### Libros y artículos científicos

- AGMA 2001-D04. Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gear Teeth.
- AGMA 2003-B97. Standard for Gear Design.
- Balletti, C., Ballarin, M., & Guerra, F. (2017). 3D printing: State of the art and future perspectives. *Journal of Cultural Heritage*, 26, 172-182.  
<https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.02.010>
- Becerra Sierra, D. E., & Torres Parra, J. D. (2022). Diseño de una montura altazimutal para un radiotelescopio de tres metros de diámetro utilizada en aplicaciones de radioastronomía. Universidad Industrial de Santander. Recuperado de  
<https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/12128>
- Dávalos, A. M., Alfaro, R. M., Belmont, E. M., Menchaca, A. R., & Moreno, M. Y. (2004). Uso de rayos cósmicos para estudiar la Pirámide del Sol de Teotihuacan. *Revista Digital Universitaria*, 5(7). Recuperado de  
[https://www.revista.unam.mx/vol.6/num9/art92/sep\\_art92.pdf](https://www.revista.unam.mx/vol.6/num9/art92/sep_art92.pdf)
- Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2020). *Additive Manufacturing Technologies*. Springer.
- Górski, F., et al. (2021). Optimization of infill density in 3D printing. *Journal of Manufacturing Processes*.
- Koehl, M., & Roussel, D. (2019). 3D printing for cultural heritage: Preservation, accessibility, and education. *Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development*, 9(3), 234-248. <https://doi.org/10.1108/JCHMSD-10-2018-0073>
- Martínez Dávalos, A., Alfaro Molina, R., Belmont Moreno, E., Menchaca Rocha, A., Moreno Yntriago, M., & Manzanilla Naim, L. (2004). Uso de rayos cósmicos para estudiar la pirámide del Sol de Teotihuacan. *Revista de la Universidad de México*, 6(9). Recuperado de  
<http://www.revista.unam.mx/vol.6/num9/art92/int92.htm>
- Norton, R. (2011). *Machine Design: An Integrated Approach*. Pearson.

- Pérez, E. F. (2023). La recuperación de paisajes arqueológicos a través de tecnologías geoespaciales. *Revista Geográfica del IPGH*, 4(1), 45-58. Recuperado de <https://revistasipgh.org/index.php/regeofi/article/view/228>
- Purisaca Martinez, G. M., & Zavaleta Velasquez, R. J. (2019). Sistema web para el control de inventario del área de gabinete en el proyecto del museo de sitio de Túcume-Lambayeque.
- Reilly, P. (2015). Additive archaeology: The state of 3D printing in archaeology and cultural heritage. *Advances in Archaeological Practice*, 3(2), 107-116. <https://doi.org/10.7183/2326-3768.3.2.107>
- Rodríguez-Gonzálvez, P., Muñoz-Nieto, A. L., & Gómez-Lahoz, J. (2017). 3D printing in cultural heritage: A systematic review. *Remote Sensing*, 9(3), 234. <https://doi.org/10.3390/rs9030234>
- Roy, A. E., & Clarke, D. (2003). *Astronomy: Principles and Practice*. Taylor & Francis.
- Shigley, J. (2014). *Mechanical Engineering Design*. McGraw Hill.
- Yang, L. (2018). Mechanical properties of gyroid lattice structures. *International Journal of Mechanical Sciences*.

#### Artículos y sitios web

- Astrofotografía.com. (n.d.). Montura Altazimutal: Qué es y cómo funciona. Recuperado de <https://astrofotografia.com>
- Ciencia sin Límites. (n.d.). Las herramientas tecnológicas más innovadoras en arqueología. Recuperado de <https://cienciasinlimites.org>
- Creafab3D. (n.d.). Impresión 3D en la arqueología. Recuperado de <https://creafab3d.com>
- Fundación Wiese. (n.d.). El uso de la tecnología 3D en pro de la arqueología y el arte. Recuperado de <https://fundacionwiese.org>
- IDC. (n.d.). Drones en arqueología. Recuperado de <https://idc.apddrones.com>
- Metrohm. (n.d.). Espectroscopía Raman en estudios arqueológicos. Recuperado de <https://www.metrohm.com>
- Metaverso. (n.d.). Drones y IA: Revolucionando la exploración de sitios arqueológicos inaccesibles. Recuperado de <https://metaverso.pro>

- Mundo Ingenieril. (n.d.). ¿Qué es la impresión 3D? Definición y aplicaciones. Recuperado de <https://mundoingenieril.com>
- Prehistoriaviva.es. (n.d.). Descubre las innovadoras técnicas no invasivas en arqueología: un enfoque revolucionario. Recuperado de <https://prehistoriaviva.es>
- Radio Victoria GT. (n.d.). *Proyecto de recuperación de Huaca Los Gavilanes, Huaca Las Abejas y Huaca Facho en Túcume*. Recuperado de <https://radiovictoriagt.com/internacionales/proyecto-de-recuperacion-de-huaca-los-gavilanes-huaca-las-abejas-y-huaca-facho-en-tucume/>
- Revista Ecociencias. (2023). *La tecnología al servicio del trabajo arqueológico*. Recuperado de <https://revistaecociencias.cl>
- Revista UNAM. (2004). *Uso de rayos cósmicos para estudiar estructuras arqueológicas*. Recuperado de <https://revista.unam.mx>
- Universo Blog. (n.d.). *Tipos de monturas de telescopios*. Recuperado de <https://josevicentediaz.com>