

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Optimización e implementación de un sistema mecánico para
la automatización de un sistema Varioguide-Brainlab**

Trabajo de graduación presentado por Marco Steffano Alejandro Juárez
Urrutia para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería
Mecatrónica

Guatemala,

2023

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Optimización e implementación de un sistema mecánico para
la automatización de un sistema Varioguide-Brainlab**

Trabajo de graduación presentado por Marco Steffano Alejandro Juárez
Urrutia para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería
Mecatrónica

Guatemala,

2023


Vo.Bo.:

(f) 
Ing. Kurt Kellner

Tribunal Examinador:

(f) 
MSc. Carlos Esquit

(f) 
Ing. Kurt Kellner

(f) 
Ing. Yosemite Meléndez

Fecha de aprobación: Guatemala, 6 de enero de 2023.

En esta parte quiero tomarme el tiempo de agradecer a todas las personas que estuvieron presentes para poder completar este capítulo de mi vida, porque sin ellas yo no estaría aquí ahora.

A Dios por otorgarme la salud y la fuerza para seguir adelante cada día, por darme una familia que siempre me apoyó a lo largo de mi vida y la oportunidad de estudiar en una universidad que me permitió crecer no solo académicamente si no también como persona.

A mis padres: Blanca Dina Urrutia Cifuentes y Marco Tulio Juárez Montenegro, por siempre ser un apoyo incondicional a lo largo de mi vida en cada aspecto de mi vida, porque sin ellos yo no podría haber llegado hasta este momento.

A mi hermana: Daphne Juárez debido a que desde niños nos hemos apoyado mutuamente, alentándonos a seguir adelante, por permitirme ser su ejemplo a seguir y siempre tenerme la confianza en su vida.

A mis abuelos: Blanca Cifuentes, Rafaela Vásquez, Juventina Montenegro, Pedro Calel y José Choxon (E.P.D.), por estar en esos momentos donde mis padres no podían estar y suplir ese papel a la perfección, siendo mis segundos padres cuidándome y guiándome por un camino de bien.

A mis amigos: Mario, Helder, Rodrigo, Katharine, Natalia y Alejandra. Por estar a mi lado a lo largo de estos cinco años, apoyándome no solo académicamente, sino también en mi vida personal, llegando a ser amigos incondicionales.

A mi asesor: Ing. Kurt Kellner por apoyarme en el desarrollo de mi trabajo de graduación. Por transmitirme su conocimiento a lo largo de estos cinco años, estando presente desde el primer curso propio de la carrera hasta el curso que culmina todo mi aprendizaje.

Prefacio	v
Lista de figuras	XII
Lista de cuadros	XIII
Resumen	XV
Abstract	XVII
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
2.1. Cirq	3
2.2. VarioGuide	4
2.3. Prótesis de muñeca motorizada de dos grados de libertad	4
2.4. Brazo robótico UVG prototipo 3	5
3. Justificación	7
4. Objetivos	9
4.1. Objetivo general	9
4.1.1. Objetivos específicos	9
5. Alcance	11
6. Marco teórico	13
6.1. Tornillo sinfín - corona	13
6.2. Tornillo de potencia	14
6.3. Motores de avance paso a paso	14
6.4. Encoder AMT103-V	15
6.5. Engranajes cónicos	15
6.6. Engranajes helicoidales dobles	16
6.7. Ácido poliláctico (PLA)	16

7. Rediseño y optimización del primer grado de libertad.	19
7.1. Transmisión de potencia	19
7.1.1. Caja reductora	21
7.1.2. Sistema tornillo sinfín-corona	23
7.2. Torque necesario	25
7.3. Motor seleccionado	26
7.4. Modelo físico	27
8. Rediseño y optimización del segundo grado de libertad.	29
8.1. Transmisión de potencia	30
8.1.1. Sistema ball-screw	30
8.1.2. Ball-screw seleccionada	33
8.1.3. Caja reductora	34
8.2. Torque necesario	34
8.3. Motor seleccionado	35
8.4. Modelo físico	36
9. Rediseño y optimización del tercer grado de libertad.	37
9.1. Transmisión de potencia	37
9.1.1. Engranajes rectos	38
9.1.2. Engranajes planetarios	41
9.2. Motor seleccionado	42
9.3. Modelo físico	42
10. Rediseño y optimización del cuarto grado de libertad.	45
10.1. Transmisión de potencia	46
10.1.1. Engranajes rectos	46
10.1.2. Sistema tornillo sinfín-corona	47
10.1.3. Sistema diferencial	50
10.2. Motores seleccionados	51
10.3. Torque necesario	51
10.4. Modelo físico	52
11. Pruebas de repetibilidad y exactitud.	53
11.1. Segundo grado de libertad	53
11.2. Tercer grado de libertad	55
11.3. Cuarto grado de libertad	56
11.4. Quinto grado de libertad	57
12. Conclusiones	59
13. Recomendaciones	61
14. Bibliografía	63
15. Anexos	65
15.1. Evolvent Design	65
15.2. Catálogos	66
15.2.1. Worm gears sets - Framo Morat.	66

15.2.2. Ball Screw - THK	66
16.Glosario	67

Lista de figuras

1. Brazo robótico Cirq.	3
2. VarioGuide de Brainlab.	4
3. Prótesis de muñeca motorizada de dos grados de libertad.	4
4. Brazo robótico UVG.	5
5. Diagrama que muestra las fuerzas ejercidas sobre el sinfín.	14
6. Tornillo de potencia.	14
7. Encoder AMT103-V.	15
8. Engranaje cónico recto.	16
9. Engranaje cónico helicoidal.	17
10. Propiedades mecánicas del PLA con infil al 100 %.	17
11. Propiedades mecánicas del PLA con infil al 20 %.	17
12. Primer grado de libertad de Varioguide.	19
13. Sistema de transmisión.	20
14. Primer grado de libertad.	20
15. Especificaciones A22U30.	24
16. Distancia total.	26
17. Especificaciones Nema 17.	26
18. Engranajes dentro de carcasa para primer grado.	27
19. Pivote para primer grado de libertad.	27
20. Segundo grado de libertad de VarioGuide.	29
21. Segundo grado de libertad.	30
22. Precisión del ángulo de avance.	30
23. Largo del tornillo.	31
24. Largo del tornillo y ángulo de paso.	32
25. Método de montaje.	32
26. Tipo deflector.	32
27. Características ball-screw seleccionada.	33
28. Motor NEMA17-STH-39H112.	35
29. Sistema de desplazamiento transversal.	36
30. Carcasa del sistema de desplazamiento transversal.	36

31. Segundo grado de libertad de VarioGuide.	37
32. Tercer grado de libertad.	38
33. Primera etapa de engranajes rectos.	38
34. Segunda etapa de engranajes rectos.	40
35. Etapa de engranajes planetarios.	41
36. Especificaciones Nema 17.	42
37. Tercer grado de libertad interno.	43
38. Tercer grado de libertad.	43
39. Cuarto grado de libertad de VarioGuide.	45
40. Tercer y cuarto grado de libertad.	46
41. Engranajes presentes en el cuarto grado de libertad.	47
42. Especificaciones A17U40.	48
43. Sistema tornillo sinfín-corona del cuarto grado de libertad.	50
44. Sistema diferencial.	51
45. Especificaciones Nema 11.	51
46. Carcasa cuarto y quinto grado de libertad.	52
47. Sistema diferencial efector final.	52
48. Análisis en Tracker para el segundo grado de libertad.	54
49. Análisis en Tracker del tercer grado de libertad.	55
50. Análisis en Tracker del cuarto grado de libertad.	57
51. Análisis en Tracker del quinto grado de libertad.	58
52. Pagina web Evolvent Design.	65
53. Catálogo sistema tornillo sinfín-corona.	66
54. Catálogo tornillo trapezoidal.	66

Lista de cuadros

1. Especificaciones engranaje 1 primera etapa	21
2. Especificaciones segundo engranaje (21 dientes).	21
3. Especificaciones engranaje primer grado (27 dientes).	22
4. Especificaciones engranaje primer grado (26 dientes).	22
5. Especificaciones engranaje primer grado (16 dientes).	23
6. Especificaciones engranaje primer grado (22 dientes).	23
7. Especificaciones tornillo sinfín A22U30	25
8. Especificaciones corona A22U30	25
9. Especificaciones para ambos engranaje helicoidal utilizado en segundo grado.	34
10. Especificaciones NEMA17-STH-39H112	35
11. Especificaciones corona primera etapa.	39
12. Especificaciones piñon primera etapa.	39
13. Especificaciones corona segunda etapa.	40
14. Especificaciones piñon segunda etapa.	41
15. Especificaciones caja planetaria.	42
16. Especificaciones engranaje 1 primera etapa	47
17. Especificaciones tornillo sinfín A17U40	49
18. Especificaciones corona A17U40	50
19. Especificaciones engranajes cónicos	50
20. Valores obtenidos en Tracker para el segundo grado de libertad	54
21. Valores calculados para el segundo grado de libertad	55
22. Valores obtenidos en Tracker para el tercer grado de libertad	56
23. Valores calculados para el tercer grado de libertad	56
24. Valores obtenidos en Tracker para el quinto grado de libertad	56
25. Valores calculados para el quinto grado de libertad	57
26. Valores obtenidos en Tracker para el quinto grado de libertad	58
27. Valores calculados para el quinto grado de libertad	58

El principal objetivo es optimizar y fabricar un sistema mecánico de 4 grados de libertad que sustituya el actual sistema VarioGuide utilizado en el Centro de Epilepsia y Neurocirugía funcional, HUMANA. Para lograr este objetivo se tomará como base las iteraciones ejecutadas en años anteriores y al propio sistema VarioGuide, el cual es empleado para este tipo de operaciones en dicha institución. Buscando así optimizar la fluidez del diseño ya presente.

Con esto buscamos que en Guatemala se puedan ejecutar operaciones de mínima invasión con mayor velocidad y precisión, pero siempre guardando la misma seguridad y calidad que presenta un aparato estereotáxico. A través del rediseño de la parte mecánica de la versión actual del brazo robótico asistencial desarrollado en la Universidad del Valle de Guatemala.

Al tener un brazo robótico funcional, con un movimiento preciso y fluido, se verificó la repetibilidad de la posición que presentan los diferentes grados de libertad. Realizando las iteraciones necesarias para lograr tener la mayor precisión posible.

The main objective is to optimize and manufacture a mechanical system with four degrees of freedom to replace the current VarioGuide system used in the Epilepsy and Functional Neurosurgery Center HUMANA. Therefore, the iterations executed in previous years and the VarioGuide system, which has been used for this type of operation in the institution, will be used as the basis. In this way, we seek to optimize the fluidity of the existing design.

In addition, we look for performing minimally invasive operations in Guatemala with optimized speed and precision while maintaining the same safety and quality that a stereotactic section presents. Through the redesign of the mechanical part of the current version of the assistive robotic arm developed at the Universidad del Valle de Guatemala.

With a functional robotic arm with precise and fluid movement, it will be possible to check the repeatability of the position presented by the different degrees of freedom. Performing the necessary iterations to achieve the highest possible accuracy.

CAPÍTULO 1

Introducción

El presente trabajo de graduación tiene como principal objetivo optimizar y fabricar un sistema mecánico de cuatro grados de libertad, el cual sea capaz de sustituir al actual sistema estereotáxico VarioGuide, utilizado en el centro de epilepsia y neurología funcional, HUMANA. Para lograr este objetivo se evaluó y verificó la funcionalidad del tercer prototipo del brazo robótico asistencial desarrollado en la Universidad del Valle de Guatemala en el año 2021.

Utilizando el software Autodesk Inventor se llevó a cabo el rediseño de cada uno de los cuatro grados de libertad superiores del brazo robótico. A partir de los datos que nos proporcionó Inventor se calculó la masa total de cada eslabón, el torque máximo que se ejercía para seleccionar el tipo de motores a utilizar y la transmisión de potencia necesaria implementar en cada grado de libertad (GDL).

Luego de realizar un prototipo funcional por medio de técnicas de impresión 3D se procedió a verificar la repetibilidad de cada grado de libertad por medio del programa Tracker, programa de análisis de vídeo y construcción de modelos, obteniendo así un banco de datos que nos permitió analizar la media, desviación estándar y la varianza de la precisión en cada GDL.

2.1. Cirq

Cirq es un brazo robótico utilizado en intervenciones quirúrgicas desarrollado por Brainlab, éste ofrece una alta precisión utilizando software de guiado para llegar a una alineación aproximada basado en la trayectoria pre-planificada. Luego del pre-ajuste del usuario, Cirq efectúa ajustes finos que permiten alcanzar una precisión mayor a la que se llegaría a tener si se realizara a mano alzada. [1] La ventaja que presenta Cirq es el intercambio de módulos: la cual permite que con el mismo brazo robótico se pueda realizar operaciones tanto de columna como craneales.

En la Figura [1] podemos observar como el efector final se encuentra acoplado al brazo, y como no sólo el módulo es intercambiable, sino que también la guía de la aguja. Éste presenta cuatro estrellas de seguimiento para mayor precisión y de esta forma siempre tener ubicado el efector final.



Figura 1: Brazo robótico Cirq.

2.2. VarioGuide

VarioGuide de Brainlab, representado en la Figura 1, le permite a los cirujanos seguir trayectorias planificadas. Este soporte universal de instrumentos, gracias al software de reconocimiento, informa constantemente acerca de la posición e incorpora un asistente informático para guiar paso a paso al momento de colocar catéteres por derivación (Shunt) o utilizar endoscopios. También utilizado en biopsias navegadas, permite alcanzar con rapidez las trayectorias planificadas con ayuda de la Aguja pre-calibrada de biopsias. 2



Figura 2: VarioGuide de Brainlab.

2.3. Prótesis de muñeca motorizada de dos grados de libertad

Este artículo describe un diseño para una muñeca de dos grados de libertad basado en un mecanismo diferencial que combina la flexión y extensión de la muñeca y la **Pronación:** y **Supinación:** en un formato que apunta al uso práctico en aplicaciones protésicas.

El diseño utiliza dos motores dentro de la palma colocados paralelos a la muñeca anatómica. Ambos motores impulsan ambos grados de libertad a través del mecanismo diferencial. Mediante el uso sinérgico de dos motores, se pueden accionar dos DOF's con casi el doble del par proporcionado con dos motores separados, como se puede observar en la Figura 4. 3

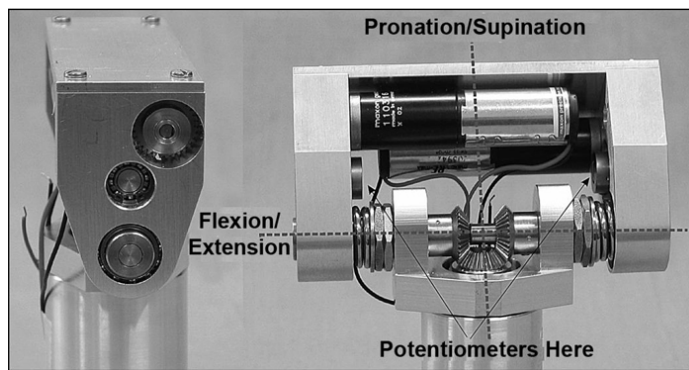


Figura 3: Prótesis de muñeca motorizada de dos grados de libertad.

2.4. Brazo robótico UVG prototipo 3

En el año 2021 se llevaron a cabo las modificaciones de diseño que permitieran mejorar el brazo robótico en cada uno de los cuatro grados de libertad que éste posee en la parte superior. Para este nuevo diseño se utilizaron transmisiones de potencia con las que se lograba una mayor precisión. Por lo que se trabajó por separado cada uno de los grados de libertad, calculando y verificando la fuerza y momentos ejercidos sobre las piezas.

Para el primer grado de libertad se requería que el sistema fuera autobloqueante preciso y compacto, por lo que se decidió utilizar un sistema de tornillo sin fin-corona para lograr tener una precisión de 0.1 grados.

En el segundo grado de libertad se utilizó un husillo de bola y un sistema de rieles tipo k para el desplazamiento lineal del actuador. También, se diseñó las piezas de acople entre el segundo y tercer grado de libertad.

Para el tercer grado de libertad primero se diseñó la pieza conectora entre el motor y el resto del brazo, ya que contaba con un pequeño desfase que influyó en el sistema de seguimiento del VarioGuide.

Para el último grado de libertad se utilizó un eje flexible capaz de rotar la pieza sin la necesidad de obstruir completamente el efector final por algún sistema de transmisión de potencia más grande.

El prototipo de la versión final se puede observar en la Figura 4. Para esta versión se logró recrear la pieza del porta-agujas para realizar las pruebas del funcionamiento del efector final, no obstante se pensaba emplear motores Stepper Nema 11, los cuales no se lograron obtener, por lo que no se llegó a probar con este tipo de motores. 4

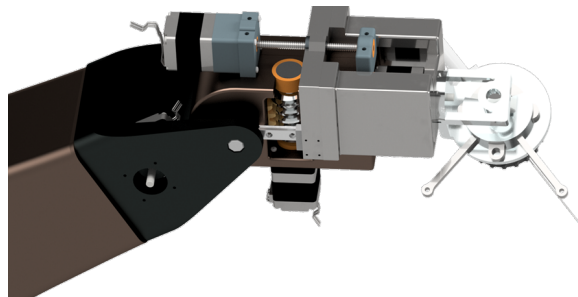


Figura 4: Brazo robótico UVG.

En Guatemala, específicamente en el centro de epilepsia y neurocirugía funcional HUMANA, se realizan cirugías a personas que presentan problemas de epilepsia con la ayuda del sistema VarioGuide, éste al ser un sistema mecánico completamente manual, toma demasiado tiempo debido al ajuste que debe realizarse por cada intervención. Por este motivo, el principal objetivo es automatizar la versión actual de VarioGuide sustituyendo la mayor parte mecánica por un brazo robótico asistencial, el cual sea más económico, viable, preciso y lo más seguro posible no sólo para los pacientes, sino también para los neurocirujanos al momento de manipularlo.

Para alcanzar este objetivo, en la Universidad del Valle de Guatemala se ha llevado a cabo el diseño de un brazo robótico que en su tercera versión permite la movilidad de los primeros grados de libertad del ajuste grueso. En cuanto al ajuste más fino, se han efectuado iteraciones que permiten acercarnos un poco más al objetivo, aunque para llegar a tener un modelo funcional se debe seguir realizando los ajustes necesarios para así poder proceder a ejecutar pruebas. Debido a esto se verificará que el brazo sea de fácil manipulación, que el movimiento en cada uno de los 4 grados de libertad sea fluido, el desgaste entre piezas y que todos los motores estén instalados.

4.1. Objetivo general

Optimizar y fabricar un sistema mecánico de 4 grados de libertad que sustituya el actual sistema VarioGuide utilizado en el centro de epilepsia y neurocirugía funcional, HUMANA.

4.1.1. Objetivos específicos

- Evaluar y verificar la funcionalidad del tercer prototipo del brazo robótico asistencial creado en la UVG.
- Rediseñar y optimizar los movimientos de los 4 grados de libertad implementados.
- Realizar pruebas de repetibilidad y exactitud de cada uno de los grados de libertad.

La cuarta iteración del brazo robótico asistencial presenta cuatro grados de libertad capaces de cubrir el espacio de trabajo requerido por el software de VarioGuide, optimizando el tiempo de operación del mismo.

Cada grado de libertad es impulsado por un motor stepper y cuentan con la característica de poseer un sistema mecánico capaz de auto-bloquearse, característica que ayuda a que el brazo sea más seguro al momento de su manipulación. El primer grado de libertad presenta un sistema tornillo sinfín capaz de manejar el torque que ejercen los otros tres grados de libertad, el segundo grado de libertad presenta un tornillo trapezoidal capaz de transformar el movimiento angular del motor a un movimiento lineal y por último el tercer y cuarto grado cuenta con un sistema diferencial que permite el movimiento de flexión y rotación del efector final.

La estructura del brazo robótico, engranajes y acoples se llevaron a cabo bajo técnicas de fabricación aditiva, utilizando ácido poliláctico (PLA) como material. Mientras que mecanismos como los deslizadores y rieles IGUS fueron modelados en la tercera iteración y aplicados en la versión actual.

6.1. Tornillo sinfín - corona

Este tipo de transmisión de potencia permite el movimiento entre ejes que se encuentran perpendiculares entre sí. Cuando el tornillo sin fin realiza una vuelta completa, la corona avanza un número de dientes igual al número de entradas del tornillo sin fin. Por lo general, se componen de un tornillo sin fin de acero y una rueda de latón. [5]

Este sistema tiene la característica de tener una alta reducción de velocidad, presentar un costo elevado y que la transmisión proviene del tornillo sinfín en el eje de alta velocidad, por lo tanto, el sin fin impulsa la corona. [5]

El movimiento relativo entre dientes del tornillo sinfín y de la corona es deslizamiento puro y, por consiguiente, cabe esperar que la fricción tenga una función importante en el desempeño de los engranes del tornillo sinfín. Al tener un coeficiente de fricción f , logramos observar en la Figura [5] que la fuerza W , actúa normal al perfil del diente del sinfín, ésta produce una fuerza de fricción $W_f = fW$, con una componente $fW \cos l$ en la dirección x negativa y otra componente $fW \sen \lambda$ en la dirección z positiva. [5].

Por lo tanto, tenemos para el sinfín que la fuerza tangencial, radial y axial considerando la fricción, respectivamente, son:

$$W^x = W(\cos \phi_n \sen \lambda + f \cos \lambda) \quad (1)$$

$$W^y = W \sen \phi_n \quad (2)$$

$$W^z = W(\cos \phi_n \cos \lambda - f \sen \lambda) \quad (3)$$

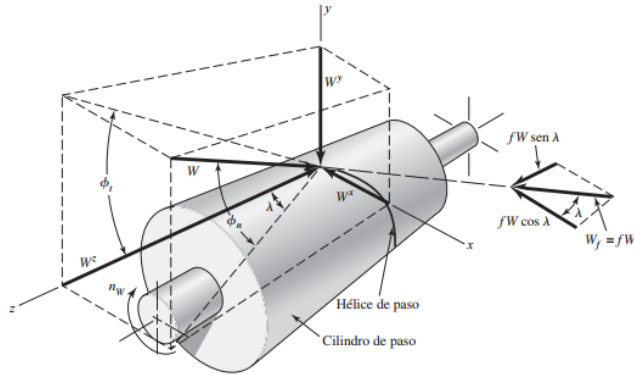


Figura 5: Diagrama que muestra las fuerzas ejercidas sobre el sinfín.

6.2. Tornillo de potencia

Un tornillo de potencia, como se puede ver en la figura ?? es un dispositivo utilizado para cambiar el movimiento angular a movimiento lineal y, normalmente, para transmitir potencia. Entre las aplicaciones más comunes se incluyen los tornillos de tornos, los tornillos para prensas de banco, prensas de sujeción y gatos para automóviles. [5]

En un husillo de bola, de acuerdo a la normativa DIN, las bolas sometidas a carga giran por el camino de rodadura entre el eje y la tuerca, soportando así la carga axial, pasan al circuito adyacente a través de un deflector insertado en la tuerca y después vuelven a la zona de carga. [6]



Figura 6: Tornillo de potencia.

6.3. Motores de avance paso a paso

Este es un tipo especial de motor síncrono capaz de girar cierto número de grados por cada pulso eléctrico que recibe de la unidad de control. Este tipo de motores son muy útiles en sistemas de control y posicionamiento, debido a que el software que realiza el control puede saber tanto la velocidad como la posición exacta del motor sin la necesidad de tener retroalimentación que provenga del eje del motor. Además, conociendo la posición inicial del eje, la computadora puede determinar el ángulo exacto del eje del rotor en cualquier

momento, contando el número total de pulsos que ha mandado a la unidad de control del motor de avance paso a paso. 7

6.4. Encoder AMT103-V

En pocas palabras, un encoder es un dispositivo de detección que proporciona retroalimentación. Estos convierten el movimiento en una señal eléctrica que puede ser leída por algún tipo de dispositivo de control en un sistema de control de movimiento, como un contador o un PLC. El codificador envía una señal de retroalimentación que se puede usar para determinar la posición, el conteo, la velocidad o la dirección. Además puede utilizar esta información para enviar un comando para una función particular. 8

La serie AMT 103-V, mostrada en 7, es un codificador rotatorio Incremental con cuadratura programable con índice (Incremental) de ángulo recto. Éste presenta las características de tener salidas CMOS, 16 resoluciones seleccionables por DIP switch, 8 opciones de orificios de montaje que permiten acoplarlos a diferentes diámetros de ejes y ser capaz de soportar temperaturas desde -40° hasta 100°C . 9



Figura 7: Encoder AMT103-V.

6.5. Engranajes cónicos

Existen diferentes tipos de engranajes cónicos:

Los engranajes cónicos rectos ilustrados en la Figura 8 permiten velocidades en la línea de paso de hasta 1 000 pie/min (5 m/s). Están disponibles en muchos tamaños comerciales y su costo de producción es menor que otros engranes cónicos.

Los engranajes cónicos en espiral se recomiendan para desarrollar velocidades mayores y donde el nivel de ruido sea un elemento de consideración. Los engranes cónicos espirales representan la contra parte cónica del engrane helicoidal.

El engranaje cónico Zerol es un engrane patentado con dientes curvos pero con un ángulo de espiral con valor de cero. Las cargas de empuje axial permisibles para los engranes Zerol no son tan grandes como para el engrane cónico espiral, y por ello a menudo se utilizan en lugar de los engranes cónicos rectos. [5]

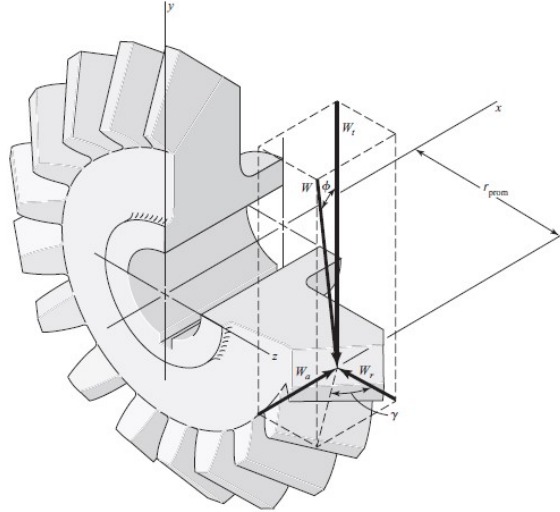


Figura 8: Engranaje cónico recto.

6.6. Engranajes helicoidales dobles

Un engrane helicoidal doble (del tipo conocido como espina de pescado) equivale a dos engranes helicoidales con sentidos opuestos, montados lado a lado en el mismo eje. Estos engranes desarrollan reacciones de empuje opuestas y por lo tanto cancelan la carga de empuje.

El contacto inicial de los dientes de engranes helicoidales es un punto que se extiende en una línea a medida que se desarrolla el acople de los dientes. En los engranes rectos la línea de contacto resulta paralela al eje de rotación; en los engranes helicoidales la línea es diagonal a lo largo de la cara del diente. Este acoplamiento gradual de los dientes y la transferencia uniforme de la cara de un diente a otro proporcionan a los engranes helicoidales la capacidad de transmitir cargas pesadas a altas velocidades. [5]

6.7. Ácido poliláctico (PLA)

Es uno de los materiales más populares utilizados en la impresión 3D de escritorio. Es el filamento por defecto elegido para la mayoría de las impresoras 3D basadas en extrusión porque puede imprimirse a baja temperatura y no requiere una cama calentada. [10]

Las propiedades mecánicas del material nos permiten realizar un análisis de elementos finitos, estas propiedades fueron obtenidas de la tesis de Didier Salazar [11].

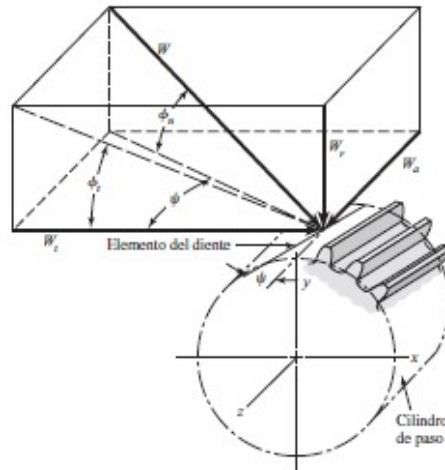


Figura 9: Engranaje cónico helicoidal.

En la Figura 10 se puede observar las propiedades del material con un infill del 100 % mientras que en la Figura 11 se puede observar las mismas propiedades, pero con un infill del 20 %.

Parámetros	Valores	Unidades
Densidad	1.23E+03	kg/m3
Coefficiente de Poisson	0.43	Mpa
Límite de elasticidad	48.49	MPa
Esfuerzo último a tracción	48.49	GPa
Módulo de Young	1.53	MPa
Módulo de corte	536.73	

Figura 10: Propiedades mecánicas del PLA con infill al 100 %.

Parámetros	Valores	Unidades
Densidad	1.24E+03	kg/m3
Coefficiente de Poisson	0.25	MPa
Esfuerzo último a tracción	45.6	GPa
Módulo de Young	0.42	GPa
Módulo de corte	195.2	GPa
Resistencia a la flexión	8.46	Mpa

Figura 11: Propiedades mecánicas del PLA con infill al 20 %.

Rediseño y optimización del primer grado de libertad.

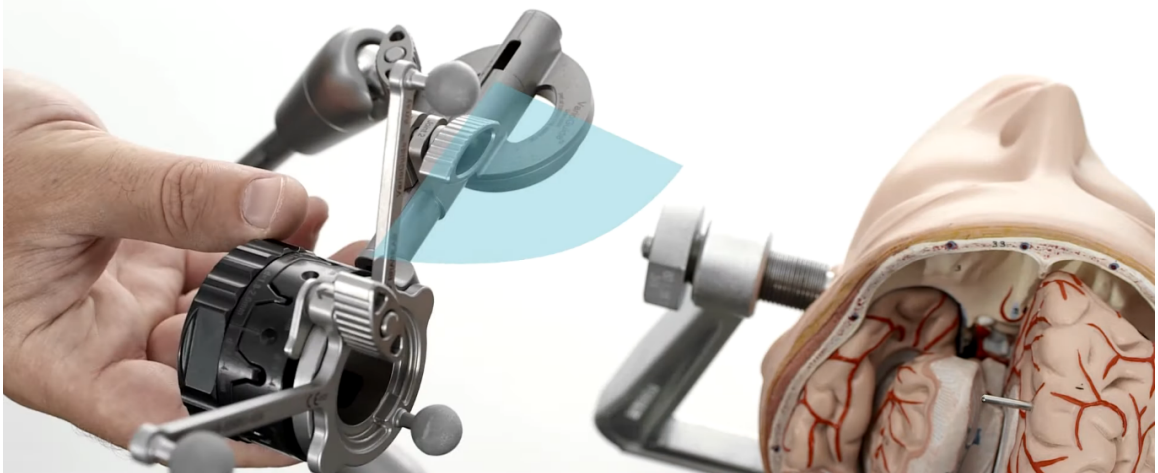


Figura 12: Primer grado de libertad de Varioguide.

7.1. Transmisión de potencia

Para no generar un mayor momento en los grados inferiores del brazo se realizó una transmisión para el primer grado de libertad desde la parte donde se unen los grados gruesos y finos, como puede observarse en la Figura 13. Desde esta parte únicamente se realizó una

transmisión de 1:1 realizada con engranajes rectos acoplados a una fase que nos permitirá tener un eje de salida en el centro de la junta.

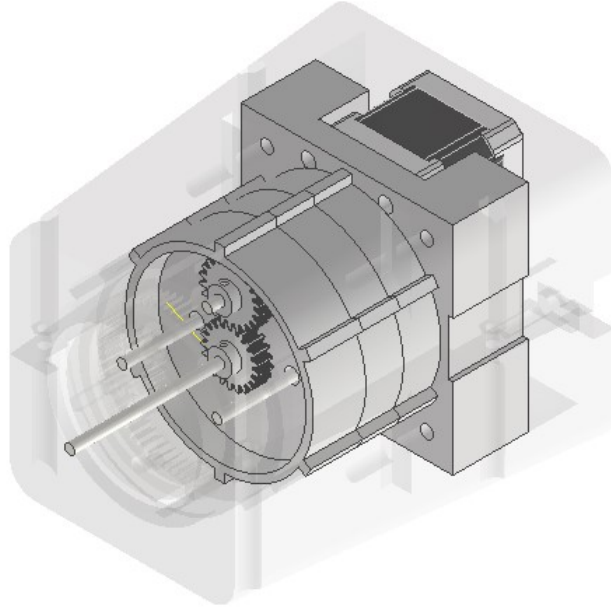


Figura 13: Sistema de transmisión.

Luego, dentro de la carcasa del primer grado de libertad se realizó una reducción de 2:1 para poder transmitir el movimiento hacia el eje del tornillo sinfín, siendo la siguiente etapa la que nos dará el torque definitivo para soportar el peso de los otros grados de libertad.

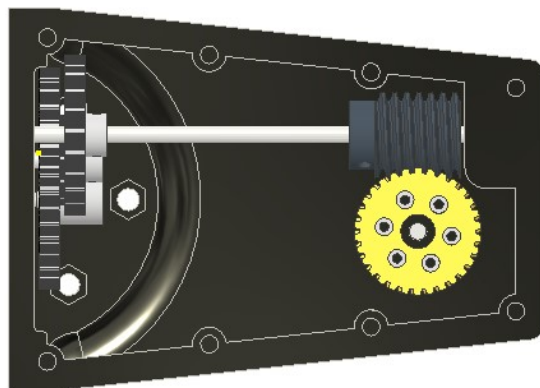


Figura 14: Primer grado de libertad.

7.1.1. Caja reductora

Primera etapa - Carcasa unión de grados.

Para la transmisión realizada en la parte observada en la Figura 13 se tiene una distancia definida entre centro de 21.5mm y, ya que no se buscaba realizar ninguna reducción, únicamente se utiliza este parámetro para poder definir el tamaño de ambos engranajes, los cuales presentan las siguientes especificaciones:

Dato	Abreviatura	Valor (mm)
Módulo	M	1
Número de dientes	N	22
Diámetro primitivo	Dp	22
Diámetro exterior	De	24
Altura del diente	H	2.17
Paso	P	3.142
Diámetro interior	di	19.66
Espesor del diente	e	1.57
Altura de la cabeza del diente	L	1

Cuadro 1: Especificaciones primer engranaje (22 dientes).

Dato	Abreviatura	Valor (mm)
Módulo	M	1
Número de dientes	N	21
Diámetro primitivo	Dp	21
Diámetro exterior	De	23
Altura del diente	H	2.17
Paso	P	3.142
Diámetro interior	di	18.66
Espesor del diente	e	1.57
Altura de la cabeza del diente	L	1

Cuadro 2: Especificaciones segundo engranaje (21 dientes).

Segunda etapa - Carcasa primer grado de libertad.

Para la etapa dentro de la carcasa del primer grado de libertad se utilizaron 3 engranajes, de los cuales los engranajes presentes en las tablas 4 y 3 son utilizados únicamente para transmitir la potencia.

Dato	Abreviatura	Valor (mm)
Módulo	M	1.5
Número de dientes	N	27
Diámetro primitivo	Dp	40.5
Diámetro exterior	De	43.5
Altura del diente	H	3.25
Paso	P	4.712
Diámetro interior	di	36.999
Espesor del diente	e	2.356
Altura de la cabeza del diente	L	1.5

Cuadro 3: Especificaciones engranaje primer grado (27 dientes).

Dato	Abreviatura	Valor (mm)
Módulo	M	1.5
Número de dientes	N	26
Diámetro primitivo	Dp	39
Diámetro exterior	De	42
Altura del diente	H	3.25
Paso	P	4.712
Diámetro interior	di	35.499
Espesor del diente	e	2.356
Altura de la cabeza del diente	L	1.5

Cuadro 4: Especificaciones engranaje primer grado (26 dientes).

Ya con la relación de dientes para la primera etapa establecida se tiene que la etapa de reducción de 2:1 posee las siguientes especificaciones:

Dato	Abreviatura	Valor (mm)
Módulo	M	1.25
Número de dientes	N	16
Diámetro primitivo	Dp	20
Diámetro exterior	De	22.5
Altura del diente	H	2.709
Paso	P	3.927
Diámetro interior	di	17.082
Espesor del diente	e	1.964
Altura de la cabeza del diente	L	1.25

Cuadro 5: Especificaciones engranaje primer grado (16 dientes).

Dato	Abreviatura	Valor (mm)
Módulo	M	1.25
Número de dientes	N	22
Diámetro primitivo	Dp	27.5
Diámetro exterior	De	30
Altura del diente	H	2.709
Paso	P	3.927
Diámetro interior	di	24.582
Espesor del diente	e	1.964
Altura de la cabeza del diente	L	1.25

Cuadro 6: Especificaciones engranaje primer grado (22 dientes).

7.1.2. Sistema tornillo sinfin-corona

Para la elección del sinfin-corona adecuado se utilizó el catálogo FramoMorat para elegir el que mejor se adecua para este grado de libertad, siguiendo los requerimientos presentados en el catálogo tenemos:

Para calcular el factor de torque se utiliza la tabla presentada en el catálogo y para esto se necesita n_1 , las cuales son las RPM a las que trabajara el motor.

$$n_1 = 500rpm \quad (4)$$

$$factor_{n_1} = 1.33 \quad (5)$$

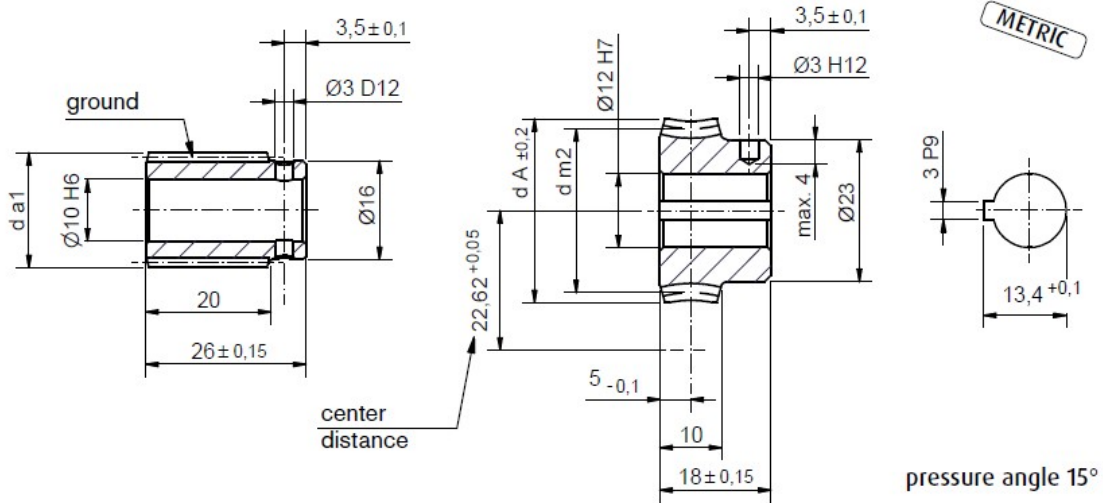
Para el factor de vida utilizamos la mayor cantidad de horas de vida que presenta el catálogo, siendo este 3000 horas aproximadamente. Por lo que:

$$factor_{L_h} = 1 \quad (6)$$

Luego se requiere calcular el torque sin considerar las condiciones de operación, para esto

primero se seleccionó el tornillo sinfín-corona **A22U30** del catálogo con las especificaciones que se pueden observar en la Figura 15.

A22 (22.62 mm center distance)



Catalog	i	γ_m	m	z_1	worm		wormgear			MF	T_2 [Nm]No.		
					d_{m1}	d_{a1}	z_2	d_{m2}	d_A		Brass	SO	Phe-nolic
A22U3	3:1	17°36'	1,0	7	23,15	25,15	21	22,09	24,8	2,2	2,6	3,3	0,9
A22U4	4:1	19°32'	1,25	5	18,7	21,2	20	26,54	29,8	3,6	4,3	5,4	1,4
A22U7	7:1	11°46'	1,25	3	18,4	20,9	21	26,84	29,8	3,6	4,3	5,4	1,4
A22U11	10,5:1	7°41'	1,25	2	18,7	21,2	21	26,54	29,8	3,4	4,1	5,1	1,4
A22U21	21:1	3°48'	1,25	1	18,9	21,4	21	26,34	29,8	3,4	4,1	5,1	1,4
A22U30	30:1	2°50'	0,9	1	18,2	20	30	27,04	29,8	3,6	4,3	5,4	1,4
A22U40	40:1	2°20'	0,7	1	17,2	18,6	40	28,04	29,8	3,9	4,7	5,8	1,6

Figura 15: Especificaciones A22U30.

Entonces para el torque de salida sin las condiciones de operación se tiene:

$$Output - torque = T_2(Mineraloil) * n_1(Factor) * L_h(Factor) \quad (7)$$

Se seleccionó T_2 de la tabla y se sustituyó 20 y 21 en 22 para obtener el valor deseado:

$$Output - torque = 3.6Nm * 1.33 * 1 = 4.79Nm \quad (8)$$

Por último, para obtener el torque de salida real se consideraron las condiciones de operación, teniendo que los diferentes factores presentaron los siguientes valores:

$$shock - factor(f_1) = 1, \quad start - factor(f_2) = 1, \quad duty - cycle - factor(f_3) = 1.15 \quad (9)$$

Tomando en cuenta el torque de salida calculado en 23 se tiene:

$$Output - torque = T_2 / (f_1 * f_2 * f_3) \quad (10)$$

$$Output - torque = 4.79Nm / (1 * 1 * 1.15) = 4.16Nm \quad (11)$$

Este sistema al presentar un ángulo de paso menor a 3° posee la característica de ser dinámicamente auto-bloqueante, lo cual es una es muy importante para cada uno de los grados de libertad. También, todos los sistemas tornillo sinfín-corona de Framo Morat presentan tolerancias ISO como $\text{Ø}32^{H7}$.

Tomando en cuenta las especificaciones del tornillo sinfín-corona seleccionado, se calculó las demás características propias del tornillo y la corona. Por lo que para el tornillo sinfín se obtuvo:

Paso	p	2.83
Altura diente	h	1.95
Diámetro interior	di	16.10
Ángulo de avance del filete	alpha	2.83
Espesor	e	1.41
Espacio entre dientes	c	1.41
Altura pie del filete	I	1.05
Altura cabeza del filete	L	0.9
Ancho de fondo del filete	T	0.85
Longitud de la rosca	LR	14.42
Extremo sin rosca	F	2.83
Radio de la cabeza	R	0.14
Ángulo total entre flancos	delta	30

Cuadro 7: Especificaciones tornillo sinfín A22U30

Y las especificaciones de la corona son las siguientes:

Paso	P	2.83
Altura diente	H	1.95
Concavidad periferica	R'	8.20
Diente mayor	D2	31.15
Ancho engranaje	A	11.73

Cuadro 8: Especificaciones corona A22U30

7.2. Torque necesario

Para este grado de libertad se tiene que el peso total que debe soportar el sistema mecánico es de 1.6Kg así que el torque necesario esta dado por:

$$T = F * d \quad (12)$$

Donde la distancia posee un valor de 0.0956m, la cual sera aproximada a 0.1m para simplificarla. Ésta se encuentra medida desde el pivote del eslabón hasta el centro de masa del mismo. La medida se puede observar en la siguiente figura.

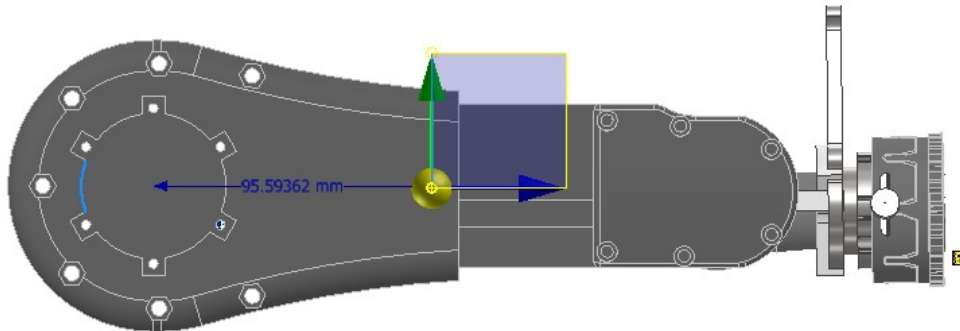


Figura 16: Distancia total.

Realizando los cálculos se obtuvo que el torque total necesario es:

$$T = 1.6kg * 9.81m/s^2 * 0.1m = 1.6Nm \quad (13)$$

7.3. Motor seleccionado

Se seleccionó un motor NEMA17 con las siguientes especificaciones:

Brief Data:

- Nema17 Bipolar.
- Number of Phase: 2.
- Step Angle: 1.8°.
- Phase Voltage: 2.6Vdc.
- Phase Current: 1.7A.
- Resistance/Phase: 1.5Ω ±10%.
- Inductance: 2.8mH ±20% (1KHz).
- Number of Wire: 4 (100cm Length).
- Holding Torque: 43Ncm.
- Shaft Diameter: Ø5mm.
- Motor Length: 40mm.
- Rotor Inertia: 54gcm².
- Temperature rise: 80°C Max.
- Insulation Class: B.
- Dielectric Strength: 500VAC/1-minute.
- Mass: 280g.

Figura 17: Especificaciones Nema 17.

Tomando en cuenta cada una de las fases de reducción que se mencionaron anteriormente y los 0.43Nm de torque nominal que posee el motor, se tiene que el torque de salida es de 6.45Nm, lo cual nos resulta en un factor de seguridad de 4.

7.4. Modelo físico

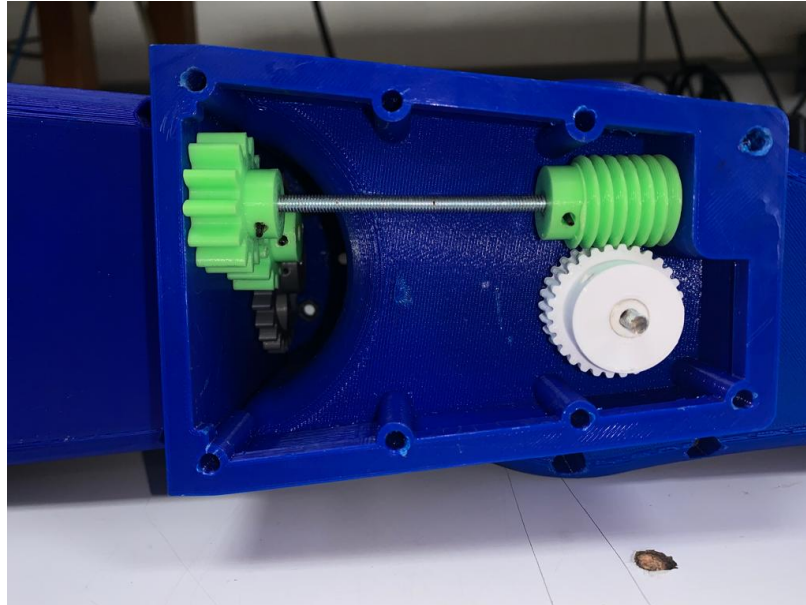


Figura 18: Engranajes dentro de carcasa para primer grado.

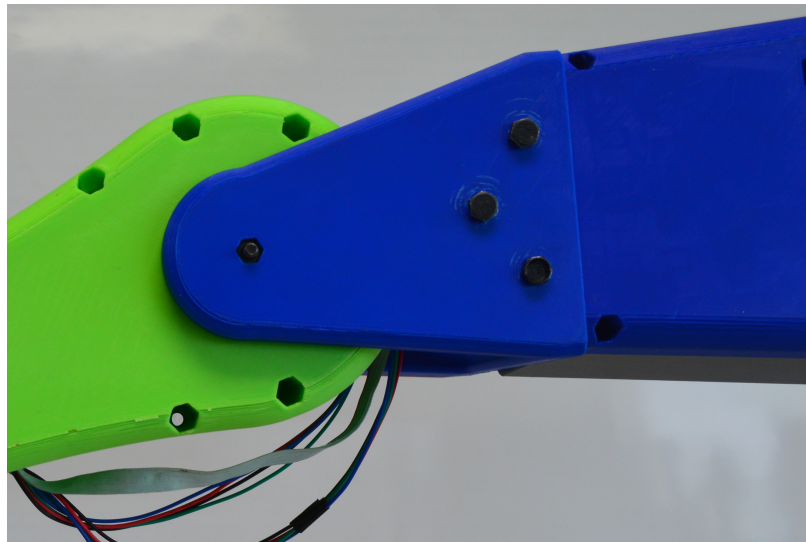


Figura 19: Pivote para primer grado de libertad.

Rediseño y optimización del segundo grado de libertad.



Figura 20: Segundo grado de libertad de VarioGuide.

El principal objetivo para este grado era ocultar el sistema mecánico para evitar contaminaciones hacia el ambiente previamente sometido a **Esterilización**. También, se buscó realizar los cálculos sobre el torque necesario para poder desplazar todo el efector final y la carcasa que contiene los motores Nema 11 del tercer y cuarto grado de libertad, los cuales permiten el movimiento de estos últimos dos grados.

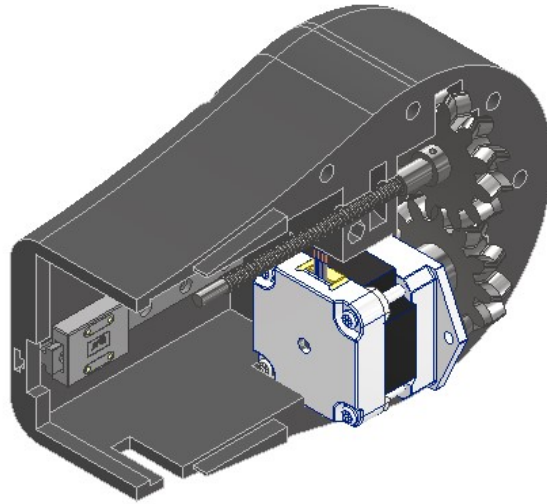


Figura 21: Segundo grado de libertad.

8.1. Transmisión de potencia

8.1.1. Sistema ball-screw

Para seleccionar el husillo de bola que mejor se adecuaba a las necesidades, se tomó como base el árbol de selección que se presenta el catálogo de THK. Por lo que se tiene:

Precisión del ángulo de avance

La precisión del ángulo de avance del husillo de bolas se controla de acuerdo con el estándar JIS B 1192 (ISO 3408). Para obtener de la tabla la precisión deseada se necesita saber la longitud de la rosca efectiva que en este caso, debido al lugar donde será acoplado, es de 115mm.

Table1 Lead Angle Accuracy (Permissible Value) Unit: μm

Accuracy grades		Precision Ball Screw										Rolled Ball Screw		
		C0		C1		C2		C3		C5		C7	C8	C10
Effective thread length	Above Or less	Representative travel distance error	Fluctuation	Representative travel distance error	Fluctuation	Representative travel distance error	Fluctuation	Representative travel distance error	Fluctuation	Representative travel distance error	Fluctuation	Travel distance error	Travel distance error	Travel distance error
		—	100	3	3	3.5	5	5	7	8	8	18	18	
100	200	3.5	3	4.5	5	7	7	10	8	20	18			
200	315	4	3.5	6	5	8	7	12	8	23	18			

Figura 22: Precisión del ángulo de avance.

Debido a que se busca que el ángulo de avance sea el mejor posible se toma un grado de

precisión de C0.

Estimando el largo del eje del tornillo

La tabla presente en el catálogo muestra las longitudes máximas de fabricación de husillos de bolas de precisión por grado de precisión.

Table15 Maximum Manufacturing Length of Precision Ball Screws by Accuracy Grade Unit: mm

Screw shaft outer diameter	Overall screw shaft length					
	C0	C1	C2	C3	C5	C7
4	90	110	120	120	120	120
6	150	170	210	210	210	210
8	230	270	340	340	340	340

Figura 23: Largo del tornillo.

Tomando en cuenta la longitud mencionada anteriormente, se seleccionó del catálogo un tamaño estándar que mejor se adecuó al largo nominal y un diámetro que permita optimizar el espacio donde será acoplado. Por esta razón se seleccionó un diámetro de 6mm y un largo de 150mm con un grado de precisión C0.

Selección del paso del tornillo

Para determinar el paso del tornillo se utiliza la fórmula:

$$P_h = \frac{(V_{ptimo})(60 * 10^3)}{N_{ptimo}} \quad (14)$$

Donde N_{ptimo} es la velocidad de entrada del motor en RPM y V_{ptimo} está dado por:

$$V_{ptimo} = \frac{50mm}{3s * 1000mm/s} = 0.0167m/s \quad (15)$$

Donde los 50mm son aproximados de las mediciones del VarioGuide original, siendo 47.82mm la distancia de desplazamiento real.

Sustituyendo se obtiene:

$$P_h = \frac{0.0167m/s * 60 * 10^3}{500} = 2mm \quad (16)$$

Teniendo un paso de 2mm se puede observar en la figura 26 que muestra combinaciones de diámetros de eje y pasos de husillos de bolas de precisión.

Como se mencionó anteriormente, se estimó un diámetro de 6mm y un paso de 2mm especificaciones que si se encuentran disponibles en el catálogo.

Table 18 Combinations of Screw Shaft Diameter and Lead (Precision Ball Screw)

Unit: mm

Screw shaft outer diameter	Lead																											
	1	1.5	2	2.5	3	4	5	6	8	10	12	15	16	20	24	25	30	32	35	36	40	42	50	60	80	90	100	
4	●																											
5	●																											
6	●		●	●																								
8	●	●	●	●	●	●				●	●	●																

Figura 24: Largo del tornillo y ángulo de paso.

Método de montaje

La carga axial admisible y la velocidad de rotación admisible varían con los métodos de montaje para el eje del husillo. Por lo tanto, se debe seleccionar un método de montaje apropiado de acuerdo con las condiciones. Por lo que se seleccionó el método de montaje Fixed-Free.

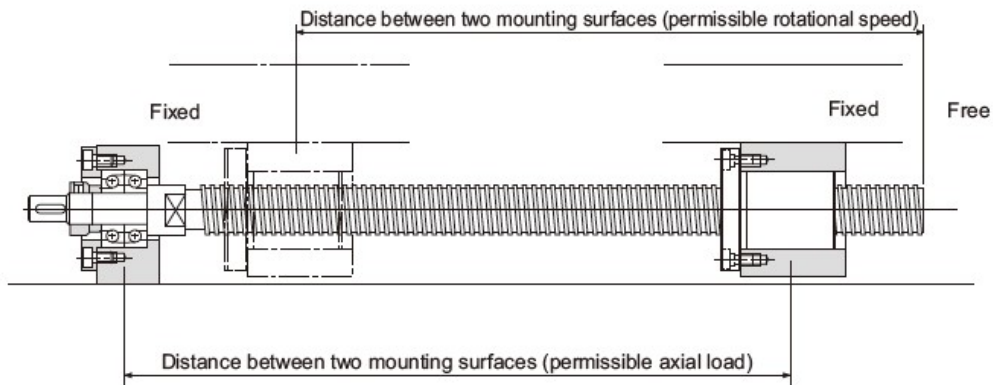


Figura 25: Método de montaje.

Selección de tuerca

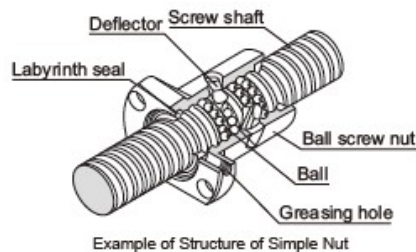


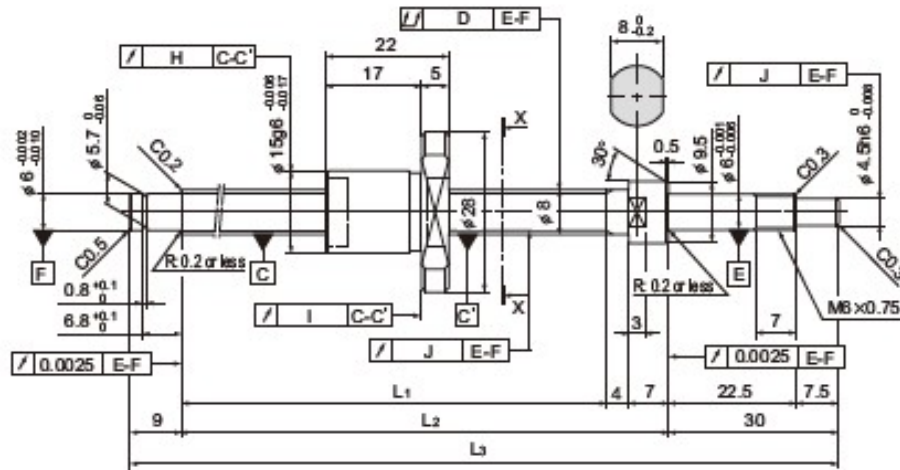
Figura 26: Tipo deflector.

Se seleccionó una tuerca tipo deflector disponible en modelos EBB-V, EPB-V, DK, DKN, DIK, JPF, DIR y MDK, debido a que posee la característica de ser el tipo de tuerca más

compacto. Las bolas cambian su dirección de desplazamiento con un deflector, pasan sobre la circunferencia del eje del tornillo y regresan a sus posiciones originales para completar un movimiento infinito.

8.1.2. Ball-screw seleccionada

Con las especificaciones mencionadas anteriormente se procedió a seleccionar un husillo de bola con el código BNK0802-3 con un diámetro de 8mm y paso de 2mm. El cual posee las siguientes características:



Model No.	Stroke	Screw shaft length			Runout of the screw shaft axis D	Runout of the nut circumference H	Flange mounting surface runout I	Runout of the thread groove surface J	Lead angle accuracy		Nut mass kg	Shaft mass kg/m
		L ₁	L ₂	L ₃					Representative travel distance error	Fluctuation		
BNK 0802-3RRG0+12SLC3Y	40	75	86	125	0.025	0.009	0.008	0.008	±0.008	0.008	0.034	0.27
BNK 0802-3RRG0+12SLC5Y					0.025	0.012	0.01	0.01	±0.018	0.018	0.034	0.27
BNK 0802-3RRG2+12SLC7Y					0.035	0.02	0.014	0.014	Travel distance: ±0.05/300	0.034	0.27	
BNK 0802-3RRG0+15SLC3Y	70	105	116	155	0.03	0.009	0.008	0.008	±0.01	0.008	0.034	0.27
BNK 0802-3RRG0+15SLC5Y					0.035	0.012	0.01	0.01	±0.02	0.018	0.034	0.27
BNK 0802-3RRG2+15SLC7Y					0.05	0.02	0.014	0.014	Travel distance: ±0.05/300	0.034	0.27	
BNK 0802-3RRG0+18SLC3Y	100	135	146	185	0.03	0.009	0.008	0.008	±0.01	0.008	0.034	0.27
BNK 0802-3RRG0+18SLC5Y					0.035	0.012	0.01	0.01	±0.02	0.018	0.034	0.27
BNK 0802-3RRG2+18SLC7Y					0.05	0.02	0.014	0.014	Travel distance: ±0.05/300	0.034	0.27	
BNK 0802-3RRG0+23SLC3Y	150	185	196	235	0.035	0.009	0.008	0.008	±0.01	0.008	0.034	0.27
BNK 0802-3RRG0+23SLC5Y					0.05	0.012	0.01	0.01	±0.02	0.018	0.034	0.27
BNK 0802-3RRG2+23SLC7Y					0.065	0.02	0.014	0.014	Travel distance: ±0.05/300	0.034	0.27	

Figura 27: Características ball-screw seleccionada.

8.1.3. Caja reductora

La distancia entre centros de los engranajes se tomó fija con un valor de 34.7mm debido a que el eje del motor y el tornillo trapezoidal se encuentran a esa distancia, ésta puede ser modificada si se agrega otra etapa pero se trabajó de esta forma para optimizar el diseño. La transmisión realizada fue de 1:1.

Se utilizaron **engranajes doble helicoidales** debido a las ventajas que éste representa: mayor transmisión de potencia, operación más silenciosa, presenta menos esfuerzos y principalmente para eliminar la fuerza axial de empuje. Para el diseño del piñón y engranaje helicoidal se realizó un excel capaz de calcular los datos necesarios para diseñar los engranajes en Inventor. En la siguiente tabla se encuentran las especificaciones de los engranajes utilizados para este grado de libertad.

Datos		Engranaje
Ángulo presión	alpha	20
Beta	beta	18
Módulo	m	2.75
Paso normal	Pn	8.64
Número de dientes	Z	12
Diámetro primitivo	dp	34.70
Diámetro exterior	de	40.20
Diámetro interno	di	28.28
Diámetro base	db	32.61
Paso de la hélice	H	335.49
Módulo circular aparente	Mc	2.89
Paso circular aparente	Pc	9.08
Paso axial	Pa	27.96
Espesor del diente	e	4.54
Distancia entre centros	d	34.70

Cuadro 9: Especificaciones para ambos engranaje helicoidal utilizado en segundo grado.

8.2. Torque necesario

Para calcular el torque necesario en la entrada del husillo de bola se calculó con la siguiente formula:

$$T = \frac{P * Ph}{2\pi * e} \quad (17)$$

Donde:

P: Peso de la carga (N)

Ph: Paso del tornillo (mm)

e: Eficiencia

Sabiendo que el peso que debe desplazar es de 0.9kg, el paso del tornillo se mencionó anteriormente (2mm) y posee una eficiencia del 90 % se sustituyeron los valores y se tiene que:

$$T = \frac{0.9kg * 9.81m/s^2 * 2mm}{2\pi * 0.9} = 3.12Nmm \quad (18)$$

8.3. Motor seleccionado

Se seleccionó un motor bipolar NEMA17-STH-39H112 con las siguientes especificaciones:

Parámetro	Valor
Tamaño	39x39x32.5mm
Peso	157g
Esoado entre agujeros	31mm
Diámetro eje	4mm
Largo eje	15mm
Número de fases	2
Ángulo de paso	3.75°
Paso por revolución	96
Torque	1.5kg*cm
Corriente por fase	0.8A
Resistencia	15.1ohm
Voltaje	12v DC

Cuadro 10: Especificaciones NEMA17-STH-39H112

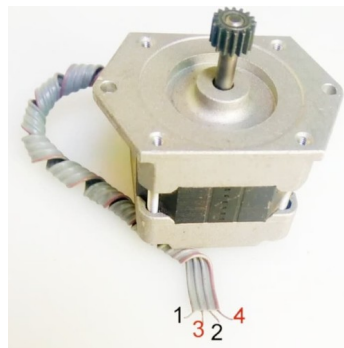


Figura 28: Motor NEMA17-STH-39H112.

A pesar de que el momento requerido es mínimo se realizó esta transmisión principalmente por la velocidad a la que opera el motor y la posición en la que se debía acoplar, para que éste se encontrara oculto dentro de la carcasa que se puede observar en la Figura [30](#).

8.4. Modelo físico

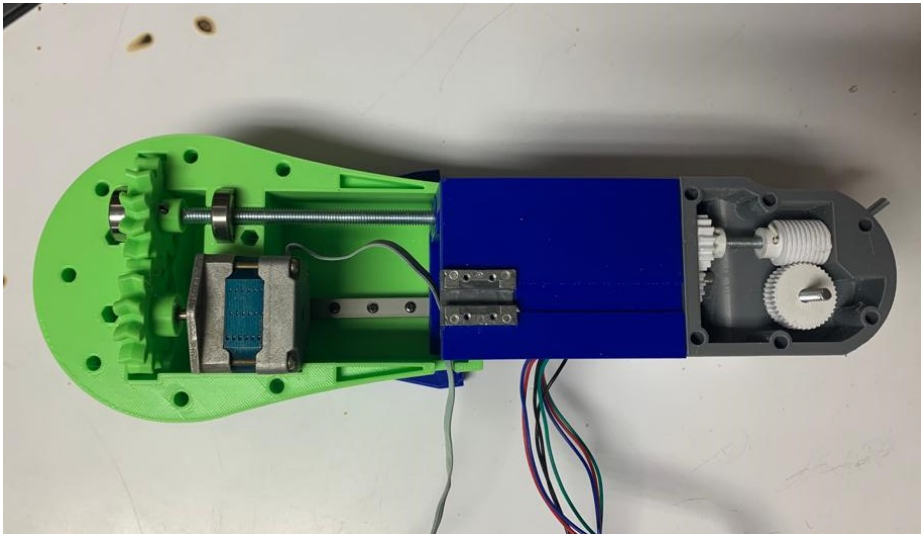


Figura 29: Sistema de desplazamiento transversal.

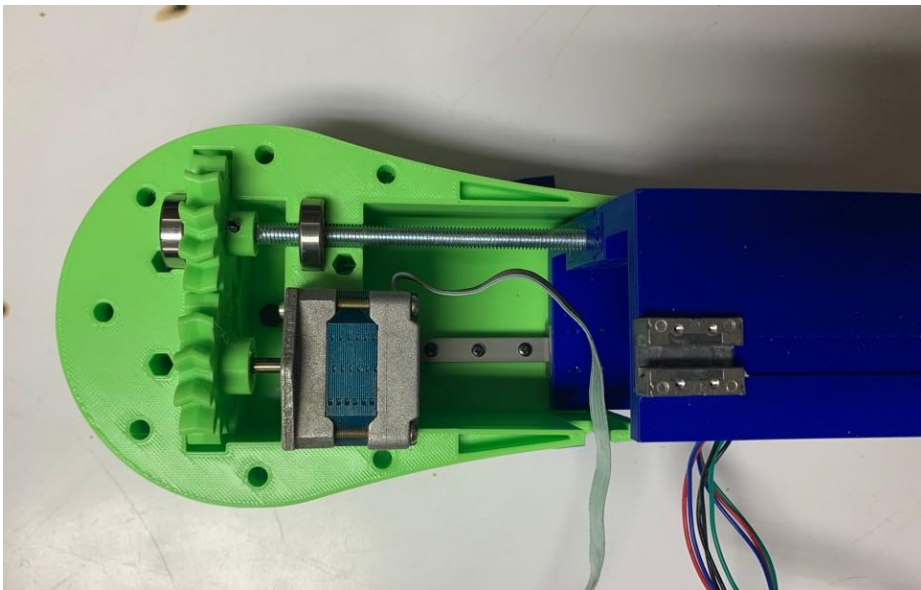


Figura 30: Carcasa del sistema de desplazamiento transversal.

Rediseño y optimización del tercer grado de libertad.

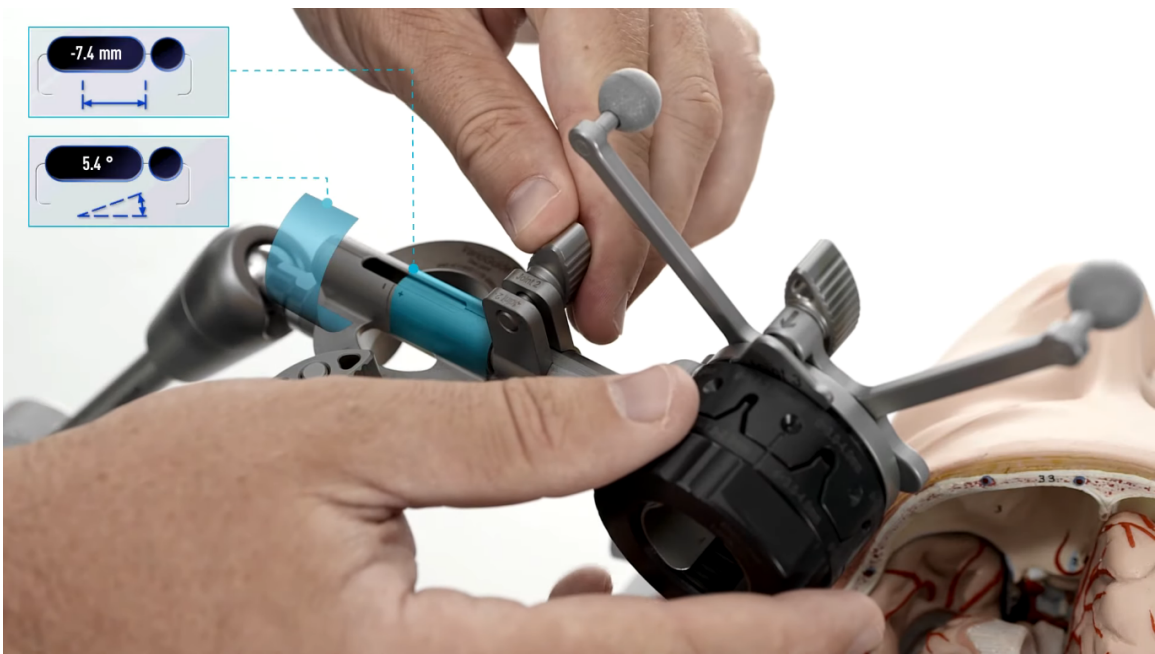


Figura 31: Segundo grado de libertad de VarioGuide.

9.1. Transmisión de potencia

Para la transmisión de este grado de libertad se trabajó por fases: las primeras fases se implementaron para aumentar el torque de salida por medio de un tren de engranajes y en

la última etapa se utilizó una caja de engranajes planetarios en la cual la entrada son los planetas y la salida la corona.

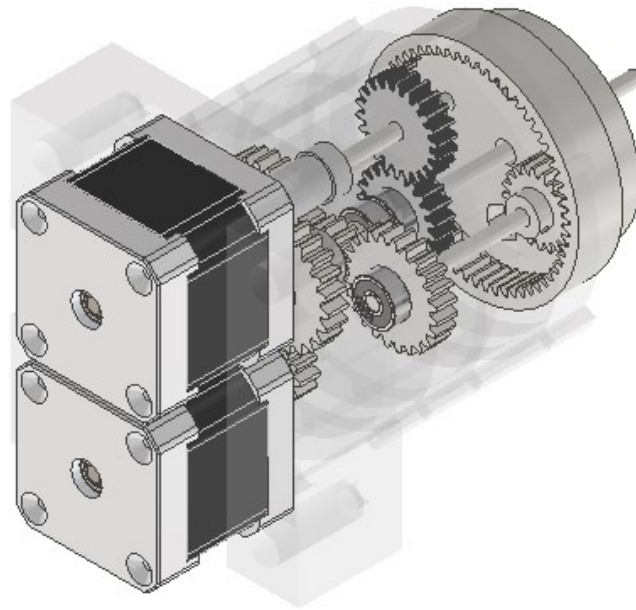


Figura 32: Tercer grado de libertad.

9.1.1. Engranajes rectos

Primera etapa

Durante esta etapa se realizó una reducción de 2:1 donde el engranaje de entrada cuenta con 12 dientes y se encuentra conectado directamente al motor, mientras que el segundo engranaje de 24 dientes busca alinear el eje al centro del acople de la primera etapa.

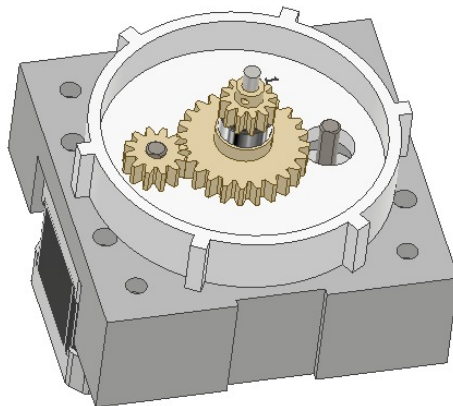


Figura 33: Primera etapa de engranajes rectos.

A continuación se detallan las especificaciones de cada uno de los engranajes:

Dato	Abreviatura	Valor (mm)
Módulo	M	1
Número de dientes	N	24
Diámetro primitivo	Dp	24
Diámetro exterior	De	26.25
Altura del diente	H	2.167
Paso	P	3.142
Diámetro interior	di	24.19
Espesor del diente	e	1.571
Altura de la cabeza del diente	L	1

Cuadro 11: Especificaciones corona primera etapa.

Dato	Abreviatura	Valor (mm)
Módulo	M	1
Número de dientes	N	12
Diámetro primitivo	Dp	12
Diámetro exterior	De	14.25
Altura del diente	H	2.167
Paso	P	3.142
Diámetro interior	di	10.69
Espesor del diente	e	1.571
Altura de la cabeza del diente	L	1

Cuadro 12: Especificaciones piñon primera etapa.

Segunda etapa

Con la segunda etapa se busca orientar los ejes de salida hacia los laterales para poder colocar directamente los engranajes de entrada, en este caso los planetas, del sistema de engranajes planetarios. A continuación se detallan las especificaciones para cada uno de los engranajes:

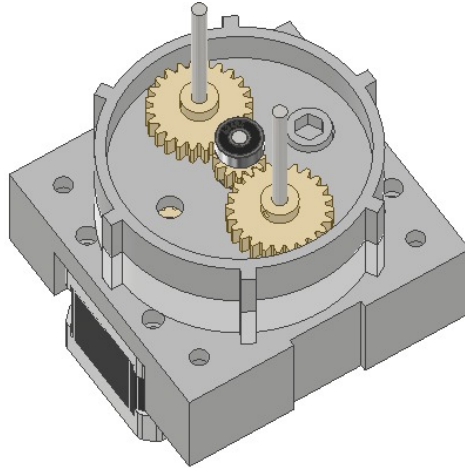


Figura 34: Segunda etapa de engranajes rectos.

Dato	Abreviatura	Valor (mm)
Módulo	M	1
Número de dientes	N	24
Diámetro primitivo	D_p	24
Diámetro exterior	D_e	26.25
Altura del diente	H	2.167
Paso	P	3.142
Diámetro interior	d_i	24.19
Espesor del diente	e	1.571
Altura de la cabeza del diente	L	1

Cuadro 13: Especificaciones segunda primera etapa.

Dato	Abreviatura	Valor (mm)
Módulo	M	1
Número de dientes	N	12
Diámetro primitivo	D_p	12
Diámetro exterior	D_e	14.25
Altura del diente	H	2.167
Paso	P	3.142
Diámetro interior	d_i	10.69
Espesor del diente	e	1.571
Altura de la cabeza del diente	L	1

Cuadro 14: Especificaciones piñon segunda etapa.

9.1.2. Engranajes planetarios

Al contar con diferentes métodos de entrada para este sistema se optó por que la entrada fueran dos planetas y la salida la corona, debido a que de esta forma el sistema puede rotar libremente y al mismo tiempo aprovechar el espacio donde se ubicaría el sol para poder introducir el eje que permite el movimiento en el primer grado de libertad explicado anteriormente. Llegando a obtener un modelo como se puede observar en la Figura [35](#).

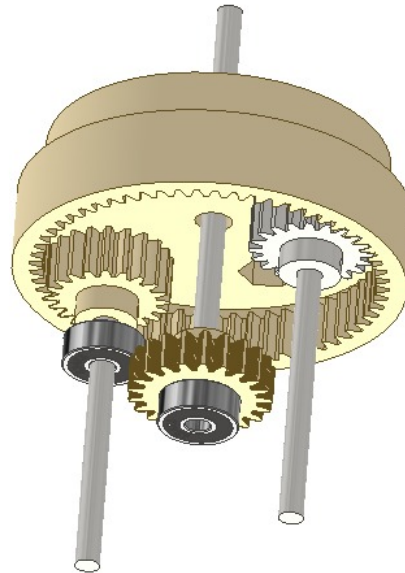


Figura 35: Etapa de engranajes planetarios.

Dato	Abreviatura	Planeta	Corona
Módulo	M	0.9	0.9
Número de dientes	N	20	60
Diámetro primitivo	Dp	18	54
Diámetro exterior	De	19.8	55.8
Diámetro interior	di	15.75	51.75
Distancia entre centros	d	18	18

Cuadro 15: Especificaciones caja planetaria.

9.2. Motor seleccionado

Para el movimiento de este grado de libertad se utilizó un motor NEMA17 con las siguientes especificaciones:

Brief Data:

- Nema17 Bipolar.
- Number of Phase: 2.
- Step Angle: 1.8°.
- Phase Voltage: 2.6Vdc.
- Phase Current: 1.7A.
- Resistance/Phase: 1.5Ω ±10%.
- Inductance: 2.8mH ±20% (1KHz).
- Number of Wire: 4 (100cm Length).
- Holding Torque: 43Ncm.
- Shaft Diameter: Ø5mm.
- Motor Length: 40mm.
- Rotor Inertia: 54gcm².
- Temperature rise: 80°C Max.
- Insulation Class: B.
- Dielectric Strength: 500VAC/1-minute.
- Mass: 280g.

Figura 36: Especificaciones Nema 17.

Tomando en cuenta cada una de las fases de transmisión y el torque nominal que presenta el motor se tiene que nuestro sistema mecánico presenta un torque de salida de 2.3Nm

9.3. Modelo físico

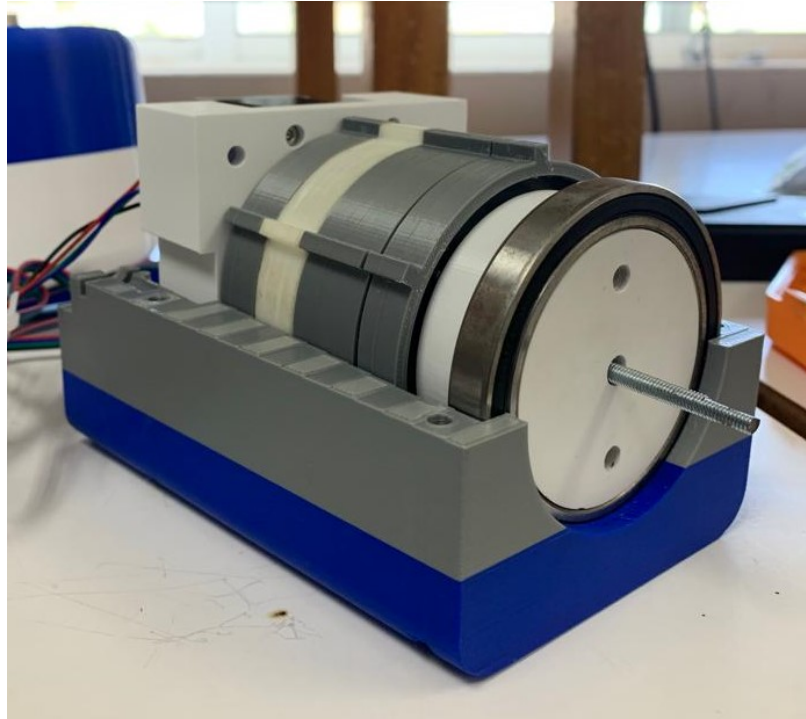


Figura 37: Tercer grado de libertad interno.

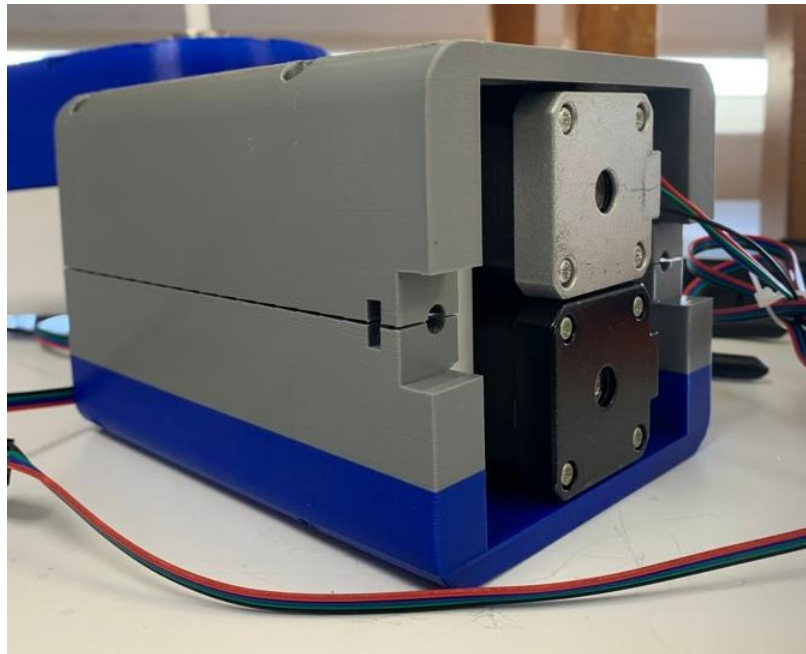


Figura 38: Tercer grado de libertad.

Rediseño y optimización del cuarto grado de libertad.



Figura 39: Cuarto grado de libertad de VarioGuide.

El principal objetivo al agregar un grado de libertad en el efector final era buscar que la antena del sistema VarioGuide no se obstruyera y al mismo tiempo tener un mecanismo compacto que se adecuara a las dimensiones del aparato **Estereotáxico** actual, para esto se utilizó un sistema diferencial de engranajes cónicos capaces de cubrir el espacio de trabajo del efector final.

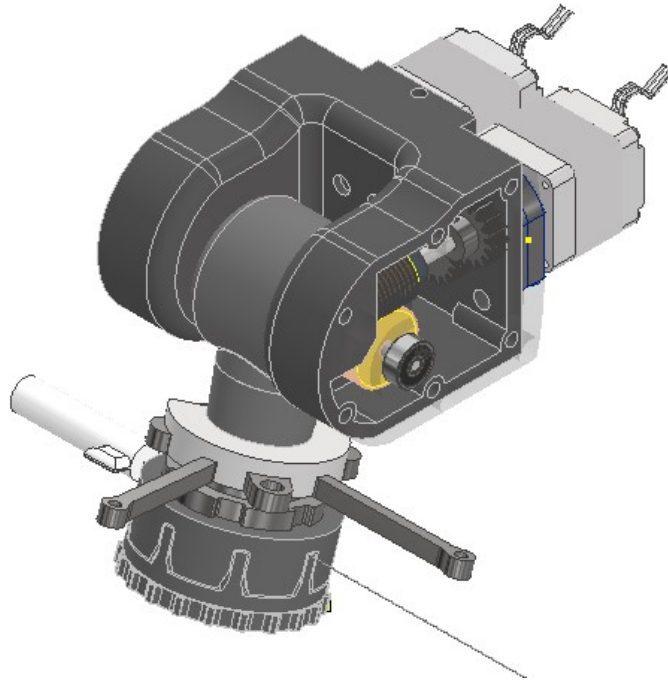


Figura 40: Tercer y cuarto grado de libertad.

10.1. Transmisión de potencia

Este mecanismo cuenta con tres etapas necesarias para transmitir la potencia de los motores y, debido a que el sistema mecánico es simétrico, se utilizan los siguientes cálculos para ambos lados.

- El primero es un sistema de engranajes rectos necesarios para ajustar la transmisión hacia el eje del tornillo sinfín.
- El segundo es un sistema de tornillo sinfín-corona el cual es el sistema auto-bloqueante que permite aumentar el torque con un buen factor de seguridad.
- Por último, se utiliza un sistema diferencial compuesto por engranajes cónicos de dientes rectos los cuales permiten que se den ambos grados de libertad.

10.1.1. Engranajes rectos

Esta etapa únicamente se utilizó para transmitir la potencia que entregan los motores, por lo que su relación es de 1:1 con las siguientes características:

Dato	Abreviatura	Valor (mm)
Módulo	M	1
Número de dientes	N	16
Diámetro primitivo	Dp	16
Diámetro exterior	De	18
Altura del diente	H	2.17
Paso	P	3.142
Diámetro interior	di	13.67
Espesor del diente	e	1.57
Altura de la cabeza del diente	L	1

Cuadro 16: Especificaciones primer engranaje (22 dientes).

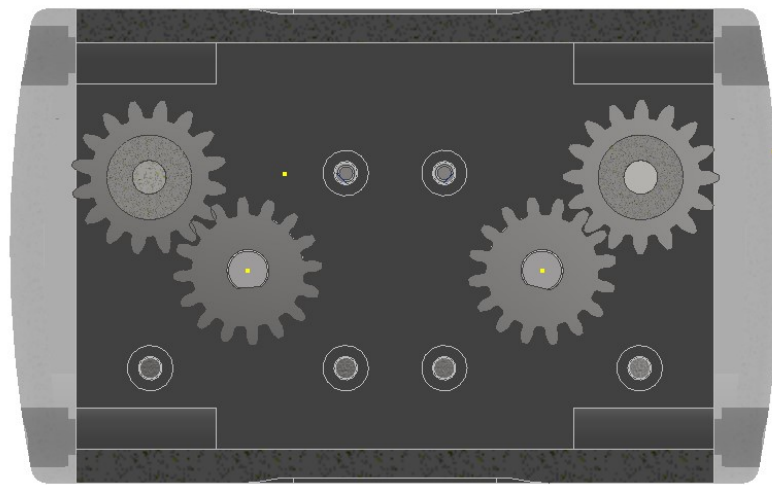


Figura 41: Engranajes presentes en el cuarto grado de libertad.

10.1.2. Sistema tornillo sinfín-corona

Para la elección del sinfín-corona adecuado se utilizó el catálogo FramoMorat para elegir el que mejor se adecua para este grado de libertad, siguiendo los requerimientos presentes en el catálogo se tiene:

Para calcular el factor de torque se utilizó la tabla que presenta el catálogo y para esto se necesita n_1 , las cuales son las rpm a las que trabajara el motor.

$$n_1 = 250rpm \quad (19)$$

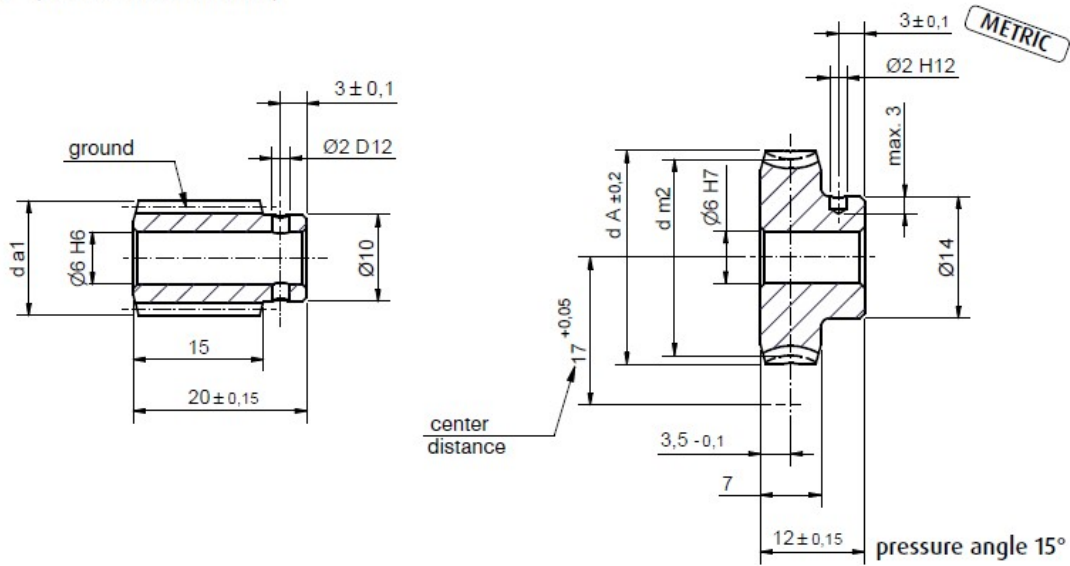
$$factor n_1 = 1.49 \quad (20)$$

Para el factor de vida se necesita la mayor cantidad de horas de vida que presenta el catálogo, siendo éste 3000 horas aproximadamente. Por lo que se tiene:

$$factor L_h = 1 \quad (21)$$

Luego se requiere calcular el torque sin considerar las condiciones de operación, para esto primero se seleccionó el tornillo sinfín-corona **A17U40** del catálogo con las especificaciones que se pueden observar en la Figura 42

A17 (17 mm center distance)



Catalog	i	γ_m	m	worm			wormgear			T_2 [Nm] No.			
				z_1	d_{m1}	d_{a1}	z_2	d_{m2}	d_A	MF	Brass M0	50	Phenolic
A17U2*	2,25	48°15'	0,9	8	10,15	11,95	18	23,85	25,63	1,1	1,3	1,6	0,4
A17U4	4,5	21°50'	0,75	6	12,1	13,6	27	21,9	24,6	1,7	2,0	2,6	0,7
A17U5	5	21°37'	0,7	6	11,4	12,8	30	22,6	24,6	1,8	2,2	2,7	0,7
A17U7	7	14°4'	1	3	12,34	14,34	21	21,66	24,6	1,6	1,9	2,4	0,6
A17U9	9	9°40'	0,75	3	13,4	14,9	27	20,6	22,7	1,5	1,8	2,2	0,6
A17U10	10	11°48'	0,75	3	11,0	12,5	30	23,0	24,6	1,9	2,3	2,8	0,8
A17U15	15	7°38'	0,75	2	11,3	12,8	30	22,7	24,6	1,9	2,3	2,8	0,8
A17U25	25	4°32'	0,9	1	11,4	13,2	25	22,6	24,6	1,8	2,2	2,7	0,7
A17U30	30	3°45'	0,75	1	11,45	12,95	30	22,55	24,6	1,9	2,3	2,8	0,8
A17U40	40	2°3'	0,5	1	13,98	14,98	40	20,02	21,6	1,4	1,7	2,1	0,6

Figura 42: Especificaciones A17U40.

Entonces para el torque de salida sin las condiciones de operación se tiene:

$$Output - torque = T_2(Mineraloil) * n_1(Factor) * L_h(Factor) \quad (22)$$

Se seleccionó T_2 de la tabla y se sustituyó 20 y 21 en 22 para obtener el valor deseado:

$$Output - torque = 1.4Nm * 1.49 * 1 = 2.086Nm \quad (23)$$

Por último para obtener el torque de salida real se consideraron las condiciones de operación, teniendo que los diferentes factores presentaron los siguientes valores:

$$shock - factor(f_1) = 1, \quad start - factor(f_2) = 1, \quad duty - cycle - factor(f_3) = 1.15 \quad (24)$$

Tomando en cuenta el torque de salida calculado en [23](#) se tiene:

$$Output - torque = T_2 / (f_1 * f_2 * f_3) \quad (25)$$

$$Output - torque = 2.086Nm / (1 * 1 * 1.15) = 1.814Nm \quad (26)$$

Este sistema al presentar un ángulo de paso menor a 3° posee la característica de ser dinámicamente auto-bloqueante, lo cual es una es muy importante para cada uno de los grados de libertad. También, todos los sistemas tornillo sinfín-corona de Framo Morat presentan tolerancias ISO como $\text{Ø}32^{H7}$.

Tomando en cuenta las especificaciones del tornillo sinfín-corona seleccionado, se calculó las demás características propias del tornillo y la corona. Por lo que para el tornillo sinfín se tiene:

Dato	Abreviatura	Valor
Paso	p	1.57
Altura diente	h	1.08
Diámetro interior	di	12.81
Ángulo de avance del filete	alpha	2.05
Espesor	e	0.79
Espacio entre dientes	c	0.79
Altura pie del filete	I	0.58
Altura cabeza del filete	L	0.50
Ancho de fondo del filete	T	0.47
Longitud de la rosca	LR	8.33
Extremo sin rosca	F	1.57
Radio de la cabeza	R	0.08
Ángulo total entre flancos	delta	30

Cuadro 17: Especificaciones tornillo sinfín A17U40

Y las especificaciones de la corona son las siguientes:

Paso	P	1.57
Altura diente	H	1.08
Concavidad periférica	R'	6.49
Diente mayor	D2	22.35
Ancho engranaje	A	8.74

Cuadro 18: Especificaciones corona A17U40

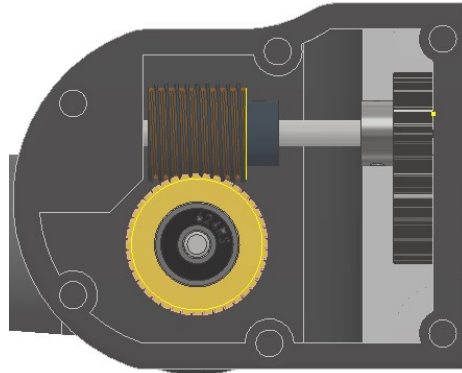


Figura 43: Sistema tornillo sinfín-corona del cuarto grado de libertad.

10.1.3. Sistema diferencial

El mecanismo se diseñó para que proporcione dos grados de libertad. Cuando un motor gira en diferente orientación al otro, el mecanismo permite un movimiento de rotación en el efector final, mientras que si ambos motores rotan en la misma dirección el mecanismo permite un movimiento de flexión.

Ya que esta etapa es únicamente de transmisión, la relación de los engranajes cónicos que se utilizó fue de 1:1. A continuación se especifican las dimensiones de ambos engranajes:

Elemento	Abreviatura	Valor
Módulo	M	2
Número de dientes	N	9
Ángulo al centro	α	20°
Longitud del diente	L	5
Diámetro primitivo	Dp	18
Diámetro exterior mayor	Dem	21.759
Diámetro interior mayor	Dim	13.651
Diámetro exterior menor	de	17.624
Altura del diente	H	4.334

Cuadro 19: Especificaciones engranajes cónicos

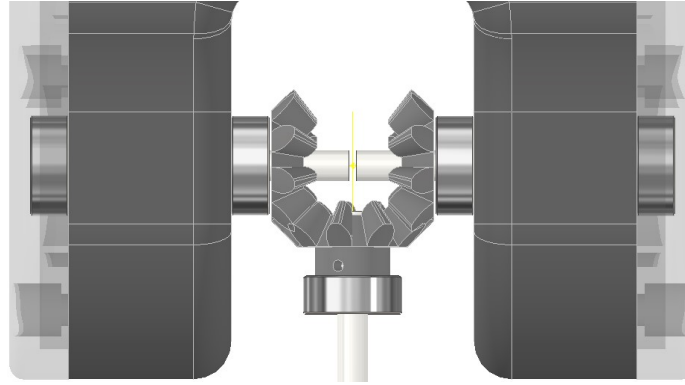


Figura 44: Sistema diferencial.

10.2. Motores seleccionados

Se necesitaba dos motores compactos capaces de transmitir el suficiente torque para poder mover la antena del sistema VarioGuide para esto se seleccionaron dos Nema 11 con un torque de 8.1oz-in (6Ncm). Las especificaciones del motor se pueden observar en la Figura [45](#).

General specifications		Electrical specifications	
Step Angle (°)	1.8	Rated Voltage (V)	3.8
Temperature Rise (°C)	80 Max (rated current, 2 phase on)	Rated Current (A)	0.67
Ambient Temperature (°C)	-20 ~ +50	Resistance Per Phase (± 10% Ω)	5.6 (25°C)
Number of Phase	2	Inductance Per Phase (± 20% mH)	3.2
Insulation Resistance (MΩ)	100 Min (500VDC)	Holding Torque (N.cm)	6
Insulation Class	Class B	Detent Torque (N.cm)	
Max.radial force (N)	28 (20mm from the flange)	Rotor Torque (g.cm ²)	9
Max.axial force (N)	10	Weight (Kg)	0.12

Figura 45: Especificaciones Nema 11.

10.3. Torque necesario

Para determinar el torque necesario para rotar el efector final se calculó la masa total que se necesita desplazar y el centro de masa.

Utilizando Inventor calculamos una masa total de 0.185kg a una distancia 72mm, por lo que se obtuvo:

$$\tau = (1.81 \text{ N})(0.072 \text{ m}) \quad (27)$$

$$\tau = 0.13 \text{ Nm} \quad (28)$$

De acuerdo al torque calculado se requiere 0.13Nm para rotar el efector final. Se realizó una reducción de 40:1 esto da un torque de 2.4Nm teniendo así un factor de seguridad de 18.5, se sobredimensionó de esta forma debido a que en el catálogo las propiedades que se buscaban para el tornillo sinfín-corona no se poseía uno con menor reducción.

10.4. Modelo físico

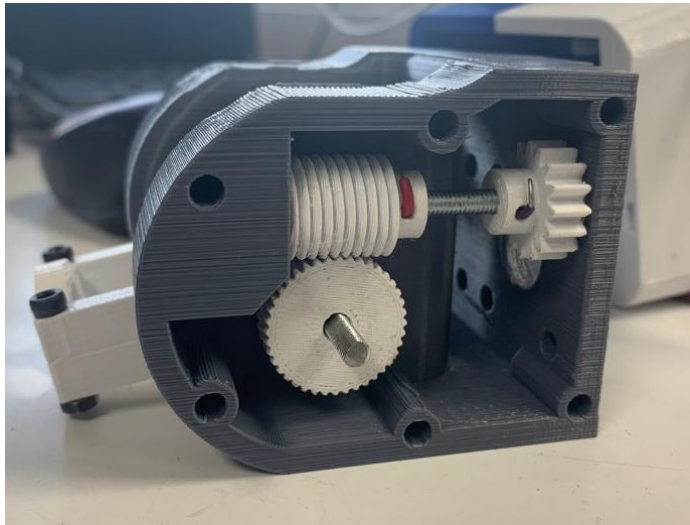


Figura 46: Carcasa cuarto y quinto grado de libertad.

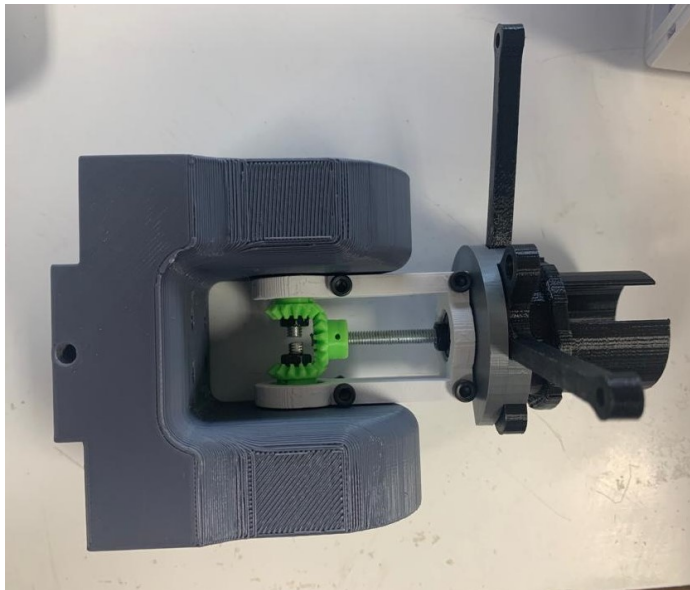


Figura 47: Sistema diferencial efector final.

Pruebas de repetibilidad y exactitud.

El análisis de cada uno de los grados de libertad se realizó por medio del programa Tracker, una herramienta diseñada para el análisis de videos.

Se tomó una cierta cantidad de videos para utilizarlos como muestra y luego de la medición de los ángulos que presentaba cada corrida poder determinar la media, desviación estándar y varianza respectivas al banco de muestras. De esta forma con los valores calculados se obtuvo el porcentaje de confiabilidad que poseen los diferentes grados de libertad.

11.1. Segundo grado de libertad

Para el segundo grado de libertad se buscó realizar la medición de repetibilidad desde el punto mínimo del que puede trasladarse el eslabón, hasta la distancia que llegaría luego de transcurrir tres segundos. Al tener estos puntos, en el programa se procedió a designar una distancia fija, previamente medida, y luego se realizó la medición de la distancia que había recorrido el eslabón durante ese rango de tiempo.

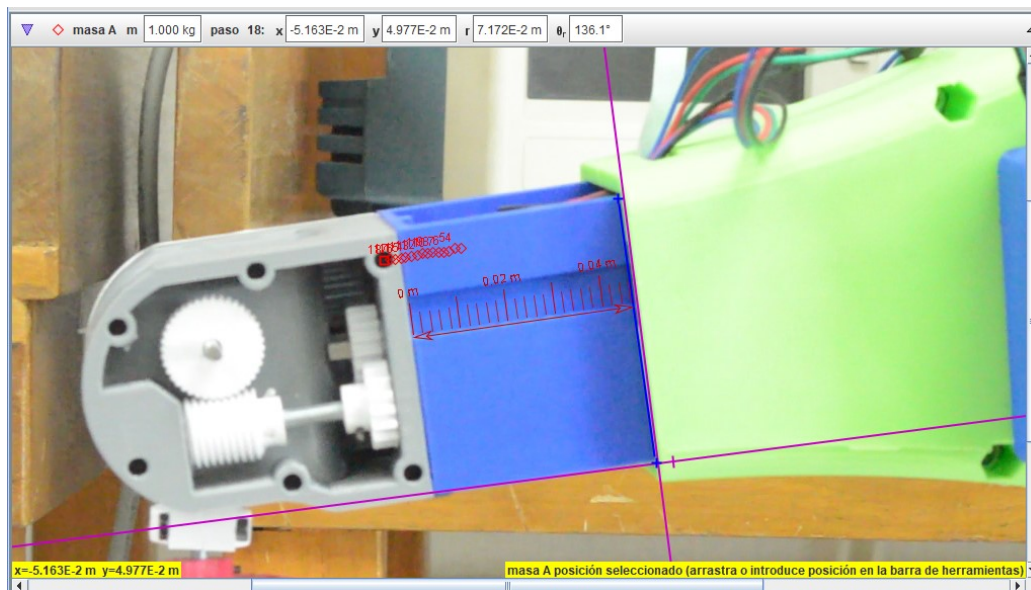


Figura 48: Análisis en Traker para el segundo grado de libertad.

Realizando este procedimiento para cada uno de los videos se obtuvieron los siguientes resultados:

Corrida	Distancia (mm)	Distancia por segundo (mm)
1	46.63	15.54
2	46.33	15.44
3	46.53	15.51
4	47.19	15.73
5	46.54	15.51
6	46.84	15.61
7	46.53	15.51
8	46.37	15.46
9	46.44	15.48
10	46.59	15.53

Cuadro 20: Valores obtenidos en Traker para el segundo grado de libertad

Media	46.599mm
Desviación estándar	0.252mm
Varianza	0.0571mm
Porcentaje de variación	0.54 %
Porcentaje de confiabilidad	99.46 %

Cuadro 21: Valores calculados para el segundo grado de libertad

11.2. Tercer grado de libertad

El tercer grado de libertad posee la característica de girar 360° en ambas direcciones, para la toma de mediciones se colocó un punto fijo el cual indicaría el inicio del recorrido y luego se tomó la posición final a la que llegó el eslabón pasados cinco segundos.

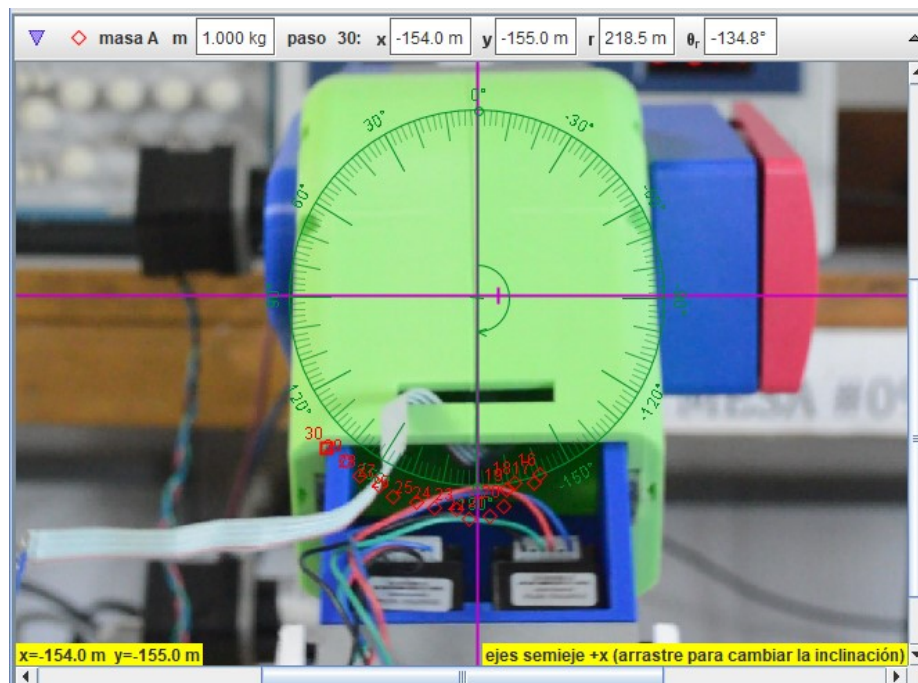


Figura 49: Análisis en Tracker del tercer grado de libertad.

Se realizó el mismo procedimiento para las 10 corridas realizadas y se obtuvo el ángulo para cada uno.

Corrida	Ángulo (°)	Distancia por segundo (°)
1	182.7	36.54
2	175.3	35.06
3	175.9	35.18
4	182.1	36.42
5	184.8	36.96
6	184.6	36.92
7	185.3	37.06
8	184.6	36.92
9	185.7	37.14
10	184.2	36.84

Cuadro 22: Valores obtenidos en Tracker para el tercer grado de libertad

Media	36.504°
Desviación estándar	0.76°
Varianza	0.523°
Porcentaje de variación	2.09%
Porcentaje de confiabilidad	97.91%

Cuadro 23: Valores calculados para el tercer grado de libertad

11.3. Cuarto grado de libertad

El cuarto grado de libertad posee un rango de movimiento de 360° este nos permite el movimiento de todo el efector final, lugar en el que serán colocadas las esferas de reconocimiento y la aguja utilizada en la operación.

Corrida	Ángulo (°)	Ángulo por segundo (°)
1	41.9	13.97
2	42.4	14.13
3	43.2	14.40
4	42.3	14.10
5	43.5	14.50
6	42.0	14.00
7	41.5	13.83
8	42.8	14.27
9	43.1	14.37
10	42.6	14.20

Cuadro 24: Valores obtenidos en Tracker para el quinto grado de libertad

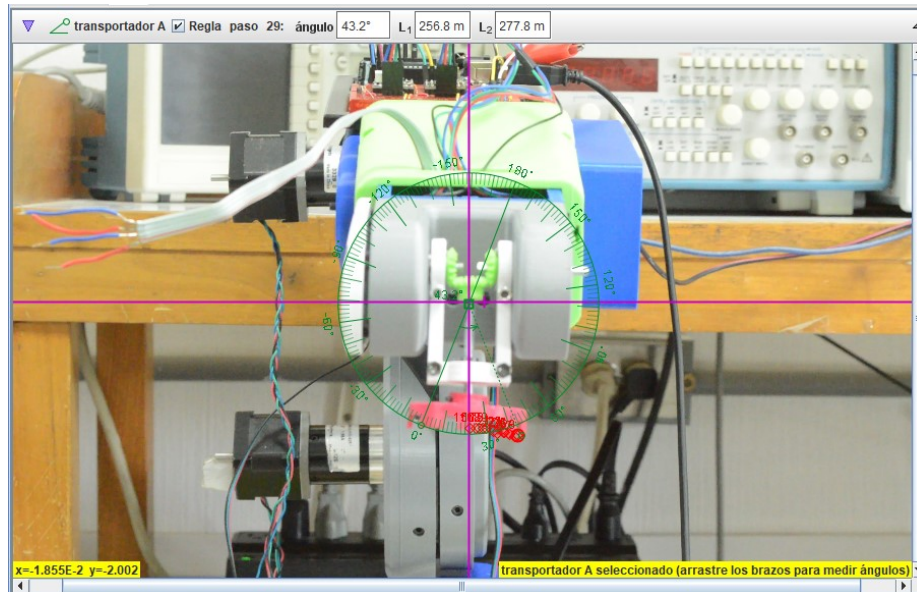


Figura 50: Análisis en Tracker del cuarto grado de libertad.

Media	42.53°
Desviación estándar	0.633°
Varianza	0.360°
Porcentaje de variación	1.49 %
Porcentaje de confiabilidad	98.51 %

Cuadro 25: Valores calculados para el quinto grado de libertad

11.4. Quinto grado de libertad

El quinto grado de libertad tiene la característica de ser un movimiento de flexión por lo que tiene un rango de trabajo de 180°. Para lograr realizar las pruebas se tomó una posición de inicio que siempre se encontrara en el mismo punto y luego de tres segundos se midió el ángulo a la que el efector final lograba llegar.

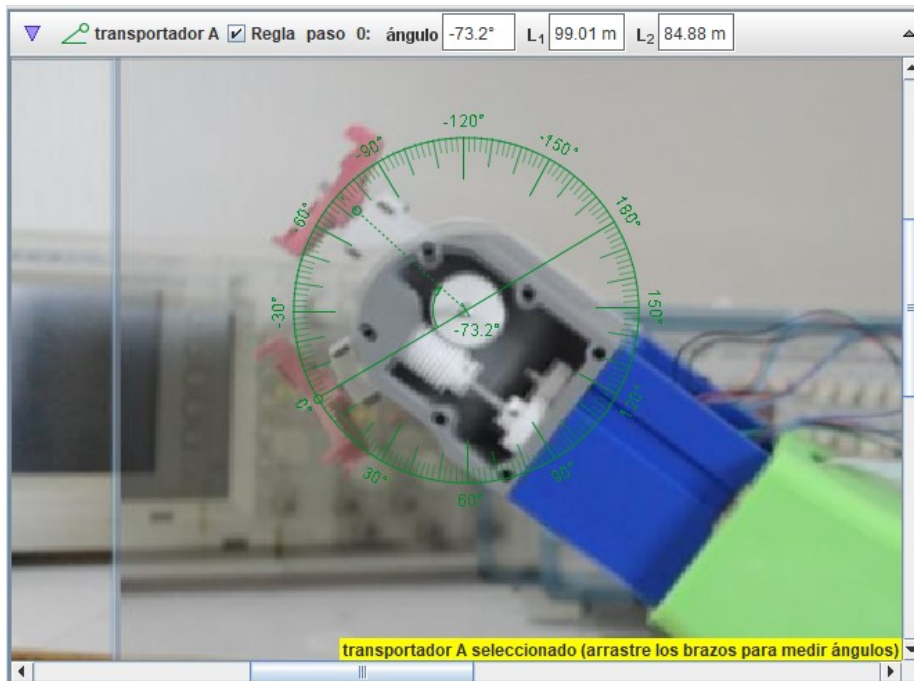


Figura 51: Análisis en Tracker del quinto grado de libertad.

Corrida	Ángulo (°)	Ángulo por segundo (°)
1	71.3	23.77
2	72.6	24.20
3	73.9	24.63
4	73.2	24.40
5	73.5	24.50
6	72.9	24.30
7	73.3	24.43
8	71.8	23.93
9	72.4	24.13
10	71.9	23.97

Cuadro 26: Valores obtenidos en Tracker para el quinto grado de libertad

Media	72.68°
Desviación estándar	0.832°
Varianza	0.624°
Porcentaje de variación	1.15 %
Porcentaje de confiabilidad	98.85 %

Cuadro 27: Valores calculados para el quinto grado de libertad

- Con el nuevo sistema mecánico se cubre el espacio de trabajo que el sistema VarioGuide abarca, el cual está limitado por: los 360° del efector final, los 360° del tercer grado de libertad, los 50mm que se deben desplazar en el segundo grado y los 180° del primer grado.
- Los motores fueron escogidos para transmitir el toque necesario en cada grado de libertad. Para el primer y segundo grado presentan un torque de 40Ncm y para los últimos dos grados se tiene un torque de 6Ncm.
- Las piezas del porta-agujas que serán utilizadas en el brazo robótico serán las mismas que utiliza el VarioGuide actual, por esta razón las mismas no pueden cambiar sus dimensiones. Además, es el componente que se buscó que no se obstruyera por los movimientos del brazo robótico.
- El sistema mecánico utilizado en el tercer prototipo presenta conceptos que pueden seguirse utilizando en futuras iteraciones.
- A pesar de tener porcentajes de confiabilidad mayores a 98 % este aún se debe de mejorar debido a que se esta tratando con un aparato que realizara operaciones neuronales, por lo que se espera una precisión mayor al 99.9 %

Recomendaciones

- Se recomienda realizar un concepto de todo el diseño mecánico para identificar como se acoplará todo el brazo y no tener que estar realizando iteraciones innecesarias.
- No se debe olvidar que la versión del brazo robótico de la Universidad del Valle de Guatemala será operado por el mismo software que el VarioGuide actual, por esto se deben conservar las dimensiones de este mismo.
- Con el prototipo del brazo robótico se recomienda realizar los cálculos necesarios para poder determinar el espacio de trabajo real del mismo.
- Se recomienda probar al menos un grado de libertad con otro tipo de motor para establecer las variaciones que se pueden dar y del mismo modo verificar las ventajas o desventajas que presentan los motores actuales.

-
-
- [1] BRAINLAB, *Libertad gracias al apoyo robótico*, 2019. dirección: <https://www.brainlab.com/es/productos-de-cirugia/cirugia-digital-de-columna/cirq-robotics/>.
 - [2] Brainlab, *Alineación con VarioGuide*, 2014. dirección: <https://www.brainlab.com/es/productos-de-cirugia/relacion-de-productos-de-neurocirugia/navegacion-craneal/>.
 - [3] P. J. Kyberd, E. D. Lemaire, E. Scheme y col., “Two-degree-of-freedom powered prosthetic wrist.,” *Journal of Rehabilitation Research & Development*, vol. 48, n.º 6, 2011.
 - [4] H. D. Cano, “Diseño mecánico de un brazo robótico para la automatización de un sistema VarioGuideBrainlab para realizar cirugías estereotácticas.,” en 2021, págs. 24-46.
 - [5] J. E. Shigley, C. R. Mischke, F. P. Bocanegra y C. O. Correa, “Diseño en ingeniería mecánica,” 1990.
 - [6] THK, *Husillo de bolas*, 2016. dirección: <https://www.thk.com/?q=es/node/4283>.
 - [7] S. J. Chapman y R. Castillo, *Máquinas eléctricas*. McGraw-Hill, 2000.
 - [8] E. P. COMPANY, *¿Qué es un Encoder?* 2021. dirección: <https://www.encoder.com/article-que-es-un-encoder>.
 - [9] C. devices, *¿Qué es un Encoder?* 2021. dirección: <https://www.cuidevices.com/product/resource/amt10.pdf>.
 - [10] 3. Market, *PLA IMPRESIÓN*, 2021. dirección: <https://www.3dmarket.mx/pla-impresion/>.
 - [11] D. F. S. Estrada, “Diseño mecánico y modelado matemático para brazo robótico asistencial en cirugía estereotáctica del cerebro.,” en 2019.

15.1. Evolvent Design

La calculadora que proporciona esta página permite generar la **Involuta:** de engranajes rectos, planetarios y juegos de piñón-cremallera en archivos DXF.

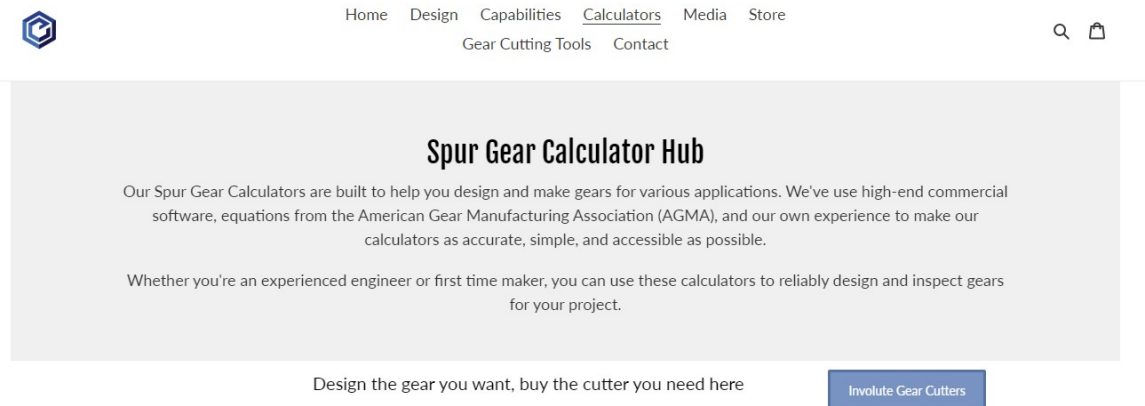


Figura 52: Pagina web Evolvent Design.

Link: <https://evolventdesign.com/pages/calculators>

15.2. Catálogos

15.2.1. Worm gears sets - Framo Morat.



Figura 53: Catálogo sistema tornillo sinfín-corona.

Link: https://framo-morat.com/wp-content/uploads/Worm_gear_sets_en.pdf

15.2.2. Ball Screw - THK.

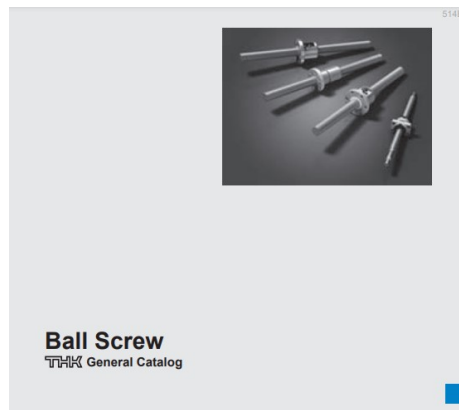


Figura 54: Catálogo tornillo trapezoidal.

Link: https://tech.thk.com/en/products/pdf_download.php?file=E_15_BallScrew.pdf

Esterotáxico: Sistema que utiliza tres coordenadas espaciales (X,Y,Z) que determinan la posición del blanco y dos coordenadas angulares (,) que determinan la trayectoria a seguir hasta el mismo. [45](#)

Esterilización: Destrucción completa de toda forma de vida microbiana incluyendo las esporas bacterianas, y los priones siendo estas últimas las formas de vida con más alta resistencia a los métodos de esterilización. [29](#)

Involuta: Es la geometría curva que se utiliza comúnmente como base para el diseño del perfil de de los dientes de los engranajes de transmisión de potencia. [65](#)

Pronación: Movimiento del antebrazo que hace girar la mano de fuera a dentro y poner la palma de la mano hacia abajo o adentro. [4](#)

Supinación: En este movimiento el segmento involucrado gira o se rota desde adentro de la línea media hacia afuera. [4](#)