

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Diseño mecánico de un brazo robótico para la automatización
de un sistema VarioGuide-Brainlab para realizar cirugías
estereotácticas.**

Trabajo de graduación presentado por Héctor Daniel Cano Calderón
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2022

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



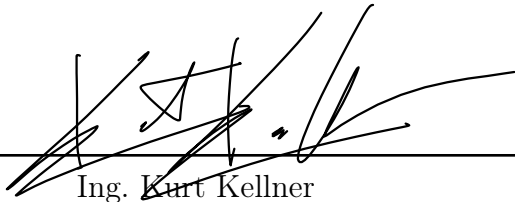
**Diseño mecánico de un brazo robótico para la automatización
de un sistema VarioGuide-Brainlab para realizar cirugías
estereotácticas.**

Trabajo de graduación presentado por Héctor Daniel Cano Calderón
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

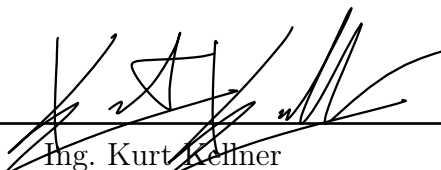
Guatemala,

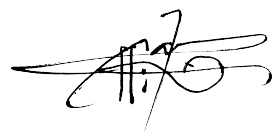
2022

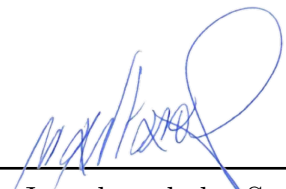
Vo.Bo.:

(f) 
Ing. Kurt Kellner

Tribunal Examinador:

(f) 
Ing. Kurt Kellner

(f) 
MSc. Carlos Esquit

(f) 
Ing. Jonathan de los Santos

Guatemala 7 de Enero de 2022

Resumen	IX
Abstract	XI
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
2.1. Inicio del uso de robots en la neurocirugía	3
2.2. Sistemas robóticos utilizados hoy en día	4
2.2.1. DaVinci	4
2.2.2. R.O.S.A	5
2.2.3. Brazo robótico de 6 grados de libertad prototipo 1 UVG . . .	5
2.2.4. Brazo robótico de 6 grados de libertad prototipo 2 UVG . . .	6
2.3. Sistemas robóticos utilizados en neurocirugía	7
3. Justificación	9
4. Objetivos	11
4.1. Objetivo general	11
4.2. Objetivos específicos	11
5. Alcance	13
6. Marco teórico	15
6.1. Epilepsia	15
6.1.1. Tratamiento	15
6.1.2. Cirugía en epilepsia fármacorresistente	16
6.2. Equipo con el que se trabajará	17
6.2.1. Materiales de uso quirúrgico	17
6.2.2. Fundas quirúrgicas	18
6.2.3. Ácido poliláctico	18
6.2.4. Resina epóxica	19

6.2.5.	Engranés planetarios	20
6.2.6.	Sistema tornillo-corona	20
6.3.	Software a utilizar	21
6.3.1.	Brainlab	21
6.3.2.	VarioGuide	22
6.4.	Normas a utilizar	22
6.4.1.	Norma IEC 80601-2-77	22
6.4.2.	Norma ISO 10993-1	23
6.4.3.	Cálculo y diseño de engranes según la norma JGMA 405-01	23
6.4.4.	Cálculo y diseño de los sistema de rieles de movimiento lineal según la norma ISO 10285:2007	23
6.4.5.	Cálculo y diseño de los husillos de bola según la norma ISO 3408-1	23
7.	Diseños guía	25
8.	Diseño del primer grado de libertad	31
8.1.	Características a tomar en cuenta	31
8.2.	Sistema tornillo sin fin - corona	31
8.3.	Elección del worm drive adecuado	32
8.4.	Características	32
8.5.	Cálculo de Fuerzas	32
8.6.	Momento máximo ejercido sobre el eje crítico	33
8.7.	Cálculo de la velocidad de deslizamiento	36
8.8.	Durabilidad superficial	38
8.9.	Cálculo de las fuerzas ejercidas en el transmisor de potencia	38
8.10.	Diseño de las piezas adicionales del primer grado de libertad	39
9.	Diseño del segundo grado de libertad	41
9.1.	Elección del husillo de bola adecuado	41
9.2.	Cálculo del paso y la velocidad óptima del tornillo	41
9.3.	Vida nominal del tornillo y esfuerzo axial	44
9.4.	Elección de los rieles	46
9.5.	Cálculo del torque ejercido sobre los deslizadores	46
10.	Diseño del tercer grado de libertad	51
11.	Cuarto grado de libertad	55
11.1.	Comprobación de cálculos	58
12.	Acoplamiento entre los brazos robóticos	59
12.1.	Primer ensamblaje	59
12.2.	Engranés planetarios	60
12.3.	Base del brazo robótico	60
12.4.	Segundo y tercer grado de libertad	61
12.5.	Último grado de libertad del brazo mecánico	62
12.6.	Ensamblaje final	64

12.7. Diseño de la junta de acople entre ambos brazos	64
12.8. Ensamblaje final entre ambas piezas	64
13.Prueba de concepto	67
13.1. Engranajes del primer grado de libertad	67
13.2. Tornillo de bola y deslizador del segundo grado de libertad	68
13.3. Motores Nema 11	69
14.Construcción del prototipo físico	71
14.1. Desensamblaje y reparación del brazo anterior	71
14.2. Impresión y ensamblaje del brazo automático	72
15.Conclusiones	75
16.Recomendaciones	77
17.Bibliografía	79

El diseño descrito en éste paper tiene como fin automatizar el movimiento de un brazo robótico asistencial a través de la incorporación de motores Stepper NEMA 11 y sistemas de transmisión de potencia para reemplazar los sistemas manuales del brazo original.

Según las características que cada sistema de transmisión de potencia del brazo robótico necesitaba, se eligieron los sistemas que mejor lo cumplían. El primer grado de libertad debía ser capaz de mover todo el brazo, tener una calidad de movimiento de 0.01 grados y bloquearse automáticamente, por lo que se eligió un sistema Tornillo Sinfín - Corona.

El segundo grado de libertad debía moverse linealmente con una exactitud de 0.1mm, por lo que se utilizó un husillo de bola para convertir el movimiento rotacional del motor en movimiento lineal, con un paso de 1mm por vuelta del motor.

Debido a las limitaciones de espacio, se diseñaron los últimos grados de libertad para funcionar solo con la instalación del NEMA 11, sin la necesidad del sistema de transmisión de potencia utilizado en los grados anteriores.

Durante todo el diseño se tuvieron en cuenta las medidas de desfase entre los ejes de rotación y traslación del brazo original, ya que son las medidas con las que trabaja el sistema de guía por computadora para indicar la posición actual del brazo y los movimientos que debe efectuar para ir a la posición deseada.

Se mejoró el ensamble y movimiento del brazo anterior para que funcionara de base y acople para el brazo automático que se diseñó en este trabajo.

The design described in this paper aims to automate the movement of an assistive robotic arm through the incorporation of NEMA 11 Stepper motors and power transmission systems to replace the manual systems of the original arm.

According to the characteristics that each power transmission system of the robotic arm needed, the systems that best fulfilled it were chosen. The first degree of freedom had to be able to move the entire arm, have a quality of movement of 0.01 degrees and lock automatically, so a Worm driver was chosen.

The second degree of freedom had to move linearly with an accuracy of 0.1mm, so a ball screw was used to convert the rotational movement of the motor into linear movement, with a step of 1mm per motor turn.

Due to space limitations, the last degrees of freedom were designed to operate only with the NEMA 11 installation, without the need for the power transmission system used in the previous degrees.

Throughout the design, the offset measurements between the axes of rotation and translation of the original arm were taken into account, since they are the measurements with which the computer guidance system works to indicate the current position of the arm and the movements that it should perform to go to the desired position.

The assembly and movement of the front arm was improved to function as a base and coupling for the automatic arm that was designed in this work.

En este trabajo se tienen como objetivos el diseñar y automatizar los diferentes componentes de un brazo quirúrgico manual y convertirlo en un brazo robótico completamente automatizado, dirigido por el sistema de guía por computadora de Brainlab, para ello se validaron y mejoraron iteraciones pasadas de la base del brazo para su uso en este proyecto, además de recrear las piezas a utilizar del brazo manual original para la verificación de las piezas de acople en el mismo.

En el trabajo se fueron trabajando cada uno de los grados de libertad por separado, cada uno descrito en su propio capítulo. Una por una se calcularon las fuerzas máximas ejercibles sobre cada uno de los grados y se diseñó el sistema de automatización con base a los parámetros dados por el sistema original. Cada capítulo se divide en las distintas secciones que abarcan los procesos llevados a cabo para enfrentar las complicaciones que surgieron en cada uno de ellos. Desde las normas utilizadas hasta los torques máximos ejercidos y los diferentes mecanismos que se utilizaron para soportar estas fuerzas.

2.1. Inicio del uso de robots en la neurocirugía

El uso de robots guía y de intervención para neurocirugía ha sido uno de los campos más abordados desde que se empezó a trabajar con los sistemas de control de alta precisión. Siendo el primer campo la extirpación de cuerpos malignos con la mínima invasión posible.

La ablación láser por medio de imágenes de resonancia magnética (IRM) ha sido utilizada exitosamente desde 2006, teniendo su origen en Francia, orientada a tumores metastásicos y de origen primario. [1]

Con la ayuda de sistemas de láser robotizado (PathFinder, Renaissance y Surgiscope), se han logrado extirpar lesiones epileptogénicas como la esclerosis tuberosa, la esclerosis mesial temporal, así como la displasia cortical focal, las últimas dos siendo las causas más comunes de epilepsia demostrable por imágenes. [2] La ventaja de este método contra la intervención quirúrgica normal se basa en la abertura mínimamente invasiva (de aproximadamente 3.2 mm de diámetro), el tiempo de ablación (en promedio unos cinco minutos con intervención láser) y el tiempo de escaneo por IRM han vuelto este procedimiento el estándar de cuidado en las cirugías de ablación y estereotáctica invasiva. [1]

2.2. Sistemas robóticos utilizados hoy en día

2.2.1. DaVinci

El famoso robot quirúrgico DaVinci, originalmente desarrollado para la intervención quirúrgica nefrológica, ha sido evaluado en varias situaciones para demostrar su viabilidad en operaciones en la cabeza y el cuello. [3]

Sin embargo, a pesar de las ventajas que representa el sistema, se han encontrado ciertas restricciones aplicables al robot. En primer lugar, las incisiones de baja invasividad no permiten el acceso a los brazos del robot y al mismo tiempo al endoscopio, limitando la visibilidad en craneotomías y limitando la capacidad del robot en operaciones de cisterna intracraneal y de cisterna profunda. [3]

Ya que el robot DaVinci es un sistema quirúrgico de acción directa, presenta la ventaja de la comodidad y ergonomía para el cirujano, aumentando los tiempos óptimos de operación y aumentando la eficiencia del mismo. Sin embargo la retroalimentación háptica, la cual es muy importante en las intervenciones neurológicas, es más limitada de lo necesario para considerar el DaVinci como el estándar de cuidado en intervenciones de cisterna intracraneal y/o estereológicas. [4]



Figura 1: Robot Quirúrgico DaVinci

2.2.2. R.O.S.A

El sistema de asistencia estereotáctica robotica (ROSA por sus siglas en inglés) es un brazo controlado por computadora que utiliza un sistema de guía por imagen para asistir a neurocirujanos con procedimientos de invasión mínima.

El sistema de guía consiste en utilizar imágenes de tomografías computarizadas (CT Scanning) e imágenes de resonancia magnética (IRM), y ha sido utilizado para cirugías esterotácticas, endoscópicas e incluso en operaciones de cráneo abierto. [5]

Debido a su amplio uso para estimulación profunda del cerebro, extirpación láser y colocación de electrodos para monitorear ataques epilépticos, ROSA será el mayor referente en el diseño mecánico, electrónico y de control del brazo robótico asistencial que se estará elaborando.



Figura 2: Brazo Robótico ROSA

2.2.3. Brazo robótico de 6 grados de libertad prototipo 1 UVG

El primer prototipo del brazo requerido por el centro de epilepsia y neurocirugía funcional HUMANA fue desarrollado por alumnos de la Universidad del Valle de Guatemala. Éste primer prototipo fue realizado con MDF y PLA y simulado en MATLAB.

2.2.4. Brazo robótico de 6 grados de libertad prototipo 2 UVG

Durante el año 2020 se diseñó un brazo robótico de 6 grados de libertad inspirado en el sistema de asistencia estereotáctica robótica (ROSA). El prototipo se realizó en PLA y está diseñado para resistir los esfuerzos de tracción generados por los motores steppers y para permanecer inmóvil aún con la totalidad del brazo desplegado, sin ningún peligro de falla por tensión o torsión. [6]

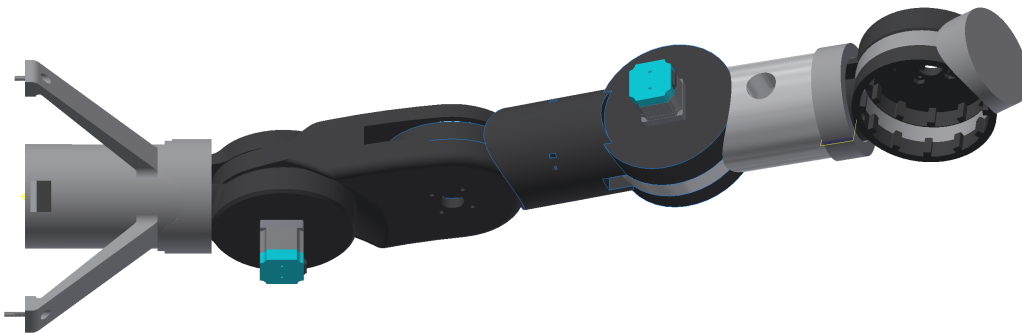


Figura 3: 2do Prototipo [6]

2.3. Sistemas robóticos utilizados en neurocirugía

Proyecto	Estado comercial	Tipo de control	Uso y comentarios
Da Vinci	En venta (Intuitive Surgical)	Control remoto	Uso principal en nefrología, recientemente utilizado en cirugía de cabeza y cuello
NeuroArm	Desarrollo	Control remoto	Diseñado para operar con IRM intraoperativo
RoboCast	Desarrollo	Control remoto y supervisado	Neurocirugía sin necesidad de guías estereotácticas.
Renaissance	En venta (Mazor Robotics Ltd)	Control supervisado	Diseñado para servir de apoyo junto a la plataforma Stewart-Gough.
SurgiScope	En venta (ISIS Robotics)	Control supervisado	Robot paralelo encargado del microscopio
NeuroMate	En venta (Renishaw-Mayfield)	Control supervisado	Root con navegación computarizada basada en tomografías.
Rosa	En venta (MedTech S.A.)	Control supervisado y compartido	Puede operar tanto de manera manual cómo con planificación modular basada en imágenes
NeuRobot	Desarrollo	Control supervisado	Robot con 4 grados de libertad para manipular un endoscopio
PathFinder	Descontinuado (Prosurgics Ltd.)	Control supervisado	Navegación basada en marcadores ópticos.

[7]

A pesar de la acelerada innovación en el uso de robots para diversas cirugías alrededor del mundo, no es el caso en países como Guatemala. A pesar de que la cirugía estereotáctica se practica en Guatemala en pacientes con epilepsia fármacorresistente, esta se hace de forma manual, utilizando aparatos estereotáticos manuales para tal efecto.

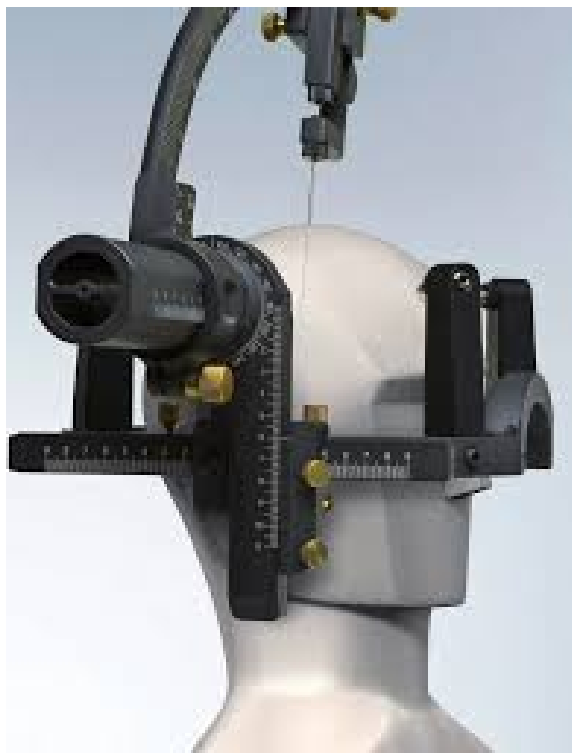


Figura 4: Aparato estereotático

Este aparato, diseñado para imposibilitar el movimiento del cráneo con respecto a la herramienta que se está utilizando en la cirugía, ha sido el estándar de cuidado desde los inicios del siglo XX [8]. A partir de ese entonces pocas mejoras han sido añadidas, siendo siempre más precisión o materiales más resistentes, siempre con la misma premisa manual.

Los robots estereotácticos tales como ROSA cambiaron completamente esta premisa, utilizando siempre un sujetador estereotáxico, y automatizando el brazo de aplicación, volviéndolo mucho más versátil y rápido en su funcionamiento. Este brazo se volvió capaz de utilizar sensores y crear modelos 3D en tiempo real del cráneo del paciente, además de ser capaz de localizar y posicionarse en puntos de manera milimétrica y evitando el posicionamiento manual y los cálculos necesarios para identificar dichos puntos. [5]

A pesar de que Guatemala cuenta con más de 350,000 casos confirmados de epilepsia [9], siendo más del 10% del tipo fármacorresistente, aún no se cuenta con la tecnología de los robots de asistencia estereotáctica, debido a los elevados costos que aún presentan.

Este proyecto busca reducir significativamente estos costos, proveyendo un robot de asistencia estereotáctica competente y seguro, capaz de asistir de manera precisa a los neurocirujanos en el tratamiento de la epilepsia y en el futuro de asistir en otros tipos de procedimientos quirúrgicos.

4.1. Objetivo general

Diseñar y automatizar los componentes mecánicos de un brazo asistencial automático para su implementación con el sistema de guía por computadora VarioGuide.

4.2. Objetivos específicos

- Recrear las dimensiones del porta-agujas que utiliza el sistema VarioGuide e implementación de motores para cada uno de los grados de libertad del brazo con el fin de automatizar el proceso de posicionamiento de la aguja quirúrgica.
- Evaluación del segundo prototipo del brazo robótico asistencial creado en la UVG para la implementación de sus componentes en la base del brazo.
- Diseño e implementación de motores según las normas de seguridad investigadas, para obtener tres grados de libertad en la base del brazo para su control manual hacia el área de operación del sistema VarioGuide.
- Realizar los cálculos mecánicos y de diseño necesarios de acuerdo a las normas investigadas y elegidas para garantizar la integridad del robot y su correcto funcionamiento al momento de ser operado en un quirófano.

Se diseñó un brazo de cuatro grados de libertad en Inventor con el fin de ser automatizado por medio del sistema de guía por computadora VarioGuide.

Se terminó el diseño del primer prototipo trabajado, el cuál cuenta con tres métodos de transmisión de potencia diferentes. Los primeros cuatro grados de libertad cuentan con un sistema de engranes planetarios, ésto debido a su exactitud y su capacidad de distribuir la carga dentro de los engranes planetas presentes, muy útil en las partes del brazo que estarán recibiendo más carga. La siguiente parte utiliza un sistema Tornillo Sinfín - Corona debido a su propiedad autobloqueante y la precisión que tienen éste tipo de engranes y para el movimiento lineal se utilizó un husillo de bolas.

Todo el prototipo se trabajó bajo los estándares de las normas elegidas para garantizar su seguridad y correcto funcionamiento y todas las piezas que lo conforman son estructuralmente capaces de soportar las cargas necesarias según los factores de seguridad elegidos para el proyecto.

6.1. Epilepsia

La epilepsia es una enfermedad cerebral, crónica y no transmitible que afecta a cincuenta millones de personas en todo el mundo. Consiste de breves episodios de movimientos involuntarios llamados estados epilépticos, que pueden involucrar el cuerpo de manera parcial o general.

Un estado epiléptico son una serie de convulsiones recurrentes, acompañadas de pérdida de conciencia y de la función intestinal, causadas por descargas eléctricas excesivas de grupos de células cerebrales. [10] Los episodios pueden ser de unos pocos segundos a durar varios minutos y la frecuencia de los episodios va desde menos de uno al año hasta varias veces al día.

La mortalidad de esta enfermedad es, en su mayoría, circunstancial. Aunque la persona puede fallecer debido a convulsiones muy prolongadas, la mayoría de los decesos ocurren por otros factores involucrados (ahogamiento, quemaduras, caídas, etc.) [11]

6.1.1. Tratamiento

El tratamiento de la epilepsia consiste en controlar las convulsiones que produce mediante tratamientos anticonvulsionantes, los cuales son efectivos en el 75 % de los casos. Para los casos más graves y de baja respuesta a fármacos, se recomienda la cirugía. [12]



Figura 5: Fármacos utilizados contra la epilepsia

6.1.2. Cirugía en epilepsia fármacorresistente

El rango de pacientes más afectados por epilepsia farmacorresistente se encuentra entre los 18 y los 35 años.

Más del 90 % de las cirugías de epilepsia son resecciones focales. 70 % del lóbulo temporal, 23 % del lóbulo extratemporal y el resto son la callosotomía y la transección subpial múltiple. La cirugía de resección focal consiste en registrar el foco de las crisis epilépticas y extirparlo. Para ello se utiliza la electrocorticografía, la cuál controla la resección del foco epiléptico mediante electrodos instalados en la corteza cerebral. [13]

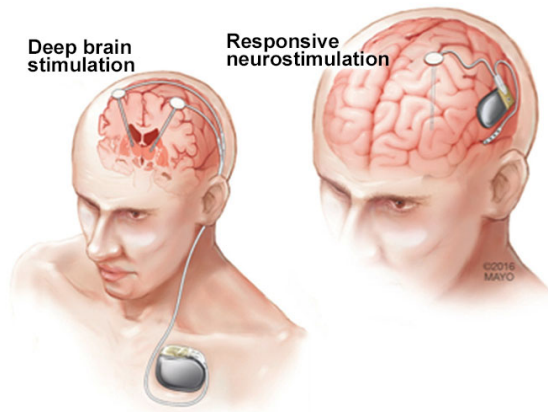


Figura 6: Diodos colocados para monitorear la epilepsia

6.2. Equipo con el que se trabajará

6.2.1. Materiales de uso quirúrgico

Una de las opciones para el brazo fue utilizar plásticos esterilizables y de uso quirúrgico para el brazo robótico. Hoy en día varios plásticos cumplen con los requerimientos para soportar alguna de las diferentes formas de desinfección y esterilización de los quirófanos.

Estos plásticos deben cumplir con ciertos requisitos para ser utilizables en un quirófano sin ningún tipo de protección adicional:

- Esterilizable y desinfectable.
- Hipoalergénico.
- Impermeable.
- No inflamable.
- Toda parte en contacto con el paciente o los doctores debe ser dieléctrico y biocompatible. [14]

Debido a estas características, los candidatos ideales para equipo quirúrgico son metales como el aluminio, algunos tipos de acero y titanio, ya que cumplen todas las especificaciones y son compatibles con el autoclave, por lo que no se requiere ningún tipo adicional de esterilización.

Sin embargo con los plásticos es diferente, ya que gran mayoría de ellos no resisten las presiones y temperaturas que se manejan en el autoclave, muchos tienen acabados porosos, son inflamables o no son biocompatibles. Es por ello que se han creado polímeros médicos, que cumplen estas características, como el UHMWPE (Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular) utilizado para realizar prótesis o el XLPE que es una versión del UHMWPE con mayor resistencia al desgaste. El ACETAL se utiliza para prototipos de prótesis y mango de equipo quirúrgico [15].

Estos plásticos cuentan con las características de uso en quirófano y con la resistencia a la tracción y esfuerzos mecánicos que se apoyarán en el brazo.

La mayor desventaja de estos plásticos es su manufactura y su precio. Son polímeros muy especializados y muy difíciles de conseguir, al menos en Guatemala. Requieren de métodos bastante especializados de manufactura; ya que se requieren moldes para su modelado y fresas específicas para su detallado, lo que dificulta diseñar en 3D para manufacturar con estos polímeros.

6.2.2. Fundas quirúrgicas

Las fundas quirúrgicas son elementos utilizados en los quirófanos para cubrir equipo sensible que no puede ser desinfectado y esterilizado por métodos convencionales. Estas fundas pueden estar hechas tanto de polietileno de alta densidad (HDPE) o de polietileno de baja densidad (LDPE) [16] aunque los más comunes son los de alta densidad.

El uso de estas fundas nos permite crear el robot con materiales no esterilizables, aumentando el rango de materiales y métodos de manufactura que podemos utilizar.



Figura 7: Funda quirúrgica

6.2.3. Ácido poliláctico

El PLA (Ácido Poliláctico) es un termoplástico biodegradable derivado del almidón de maíz o la caña de azúcar. Es un bioplástico muy popular, con aplicaciones muy variadas en el campo de la impresión 3D. Su uso extendido se debe a sus excelentes propiedades mecánicas, su facilidad de manufactura y su docilidad al momento de utilizarse para imprimir en 3D. Al contrario del Nylon o el ABS, el PLA no sufre deformaciones al enfriarse, evitando el "warping" o el "cracking" de las piezas en su mayoría [17].

Este material se estará utilizando para el prototipado principal y la validación del diseño. Se compararán sus propiedades físicas con las necesarias para el correcto funcionamiento del brazo y para la elección del material definitivo.



Figura 8: Ácido poliláctico

6.2.4. Resina epóxica

La resina epóxica (o epoxi) es un polímero termoestable líquido que se solidifica con un endurecedor o un catalizador. Es altamente utilizada como recubrimiento para el piso de quirófanos y salas estériles debido a sus propiedades mecánicas:

- Alta resistencia térmica: Esta resina puede aguantar temperaturas de hasta 70°C .
- Resistencia a la corrosión: Esta resina es inerte contra la mayoría de agentes químicos corrosivos.
- Resistencia a la tracción: Tiene una resistencia a la tracción de $65 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$.
- Fácil limpieza: Una de las características más útiles en el contexto de esta investigación, ya que elimina el problema de la porosidad presente en el PLA sin tratar.
- Aislante e hipoalergénico: La resina epóxica es totalmente aislante y de superficie lisa, evitando la acumulación de polvo, bacteria y humedad en su superficie. [18]

Estas características la vuelven la principal candidata para recubrir el polímero que se estará utilizando en la construcción del brazo.



Figura 9: Resina epóxica

6.2.5. Engranés planetarios

Estos engranes se utilizan para disminuir la velocidad que entra a través del eje conectado al sol y multiplicando el par transmitido. También es útil cuando se necesita estabilidad estática, impidiendo el movimiento accidental de las partes. [19]

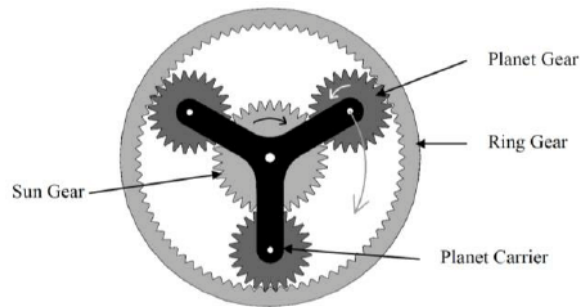


Figura 10: Esquema engrane planetario

6.2.6. Sistema tornillo-corona

Un sistema tornillo corona consiste en un piñón que en este caso está representado por un tornillo sin fin y una corona que se acopla al mismo. Este sistema se caracteriza principalmente por la alta reducción de engranes, ya que una vuelta del tornillo representa solo un leve movimiento de un diente para la corona [20].

También presenta la característica de que los ejes de rotación de ambos componentes se encuentran perpendiculares, lo que puede minimizar espacios en algunos

casos. Otra de sus propiedades es que este sistema es auto-bloqueante, una de las propiedades más importantes en este sistema, ya que se necesita que el sistema no se pueda mover una vez establecida su posición final.

Se considerará el uso de un sistema tornillo-corona en los 3 grados finales del sistema, ya que presenta mucho más flexibilidad y su tamaño es mucho menor al de los engranes planetarios, atributo necesario para esta última parte donde no se pueden tener equipos muy grandes [20].



Figura 11: Sistema tornillo-corona

6.3. Software a utilizar

6.3.1. Brainlab

Brainlab es un sistema de guía por computadora para neuronavegación utilizado para la localización en tres dimensiones de espacios físicos alojados en la cabeza y la columna vertebral [21].

La mayor ventaja de este sistema es su capacidad de brindar imágenes en tiempo real, creando una nueva manera de realizar operaciones estereoscópicas, utilizándose un brazo manual en lugar del marco estereotaxico utilizado hasta el momento.

El sistema consiste de unos emisores de rayos infrarrojos que se emiten desde dos emisores diferentes, para crear un paralaje y un mapeo en 3D. Estas frecuencias rebotan en las esferas refractantes, permitiendo al aparato saber su posición y rotación, y por lo tanto, crear un mapa en tiempo real de la cabeza donde se realizará el procedimiento.

6.3.2. VarioGuide

VarioGuide es el sistema de calibración de Brainlab. Permite conocer la posición de la aguja quirúrgica que se utilizará en el espacio de trabajo. Este sistema también se encarga de dar las instrucciones necesarias mover los últimos cuatro ejes del brazo estereotáxico que se utiliza. Dando el porcentaje de error al cirujano y permitiéndole poner de manera manual la aguja donde corresponde para llegar al lugar deseado del cerebro [22].

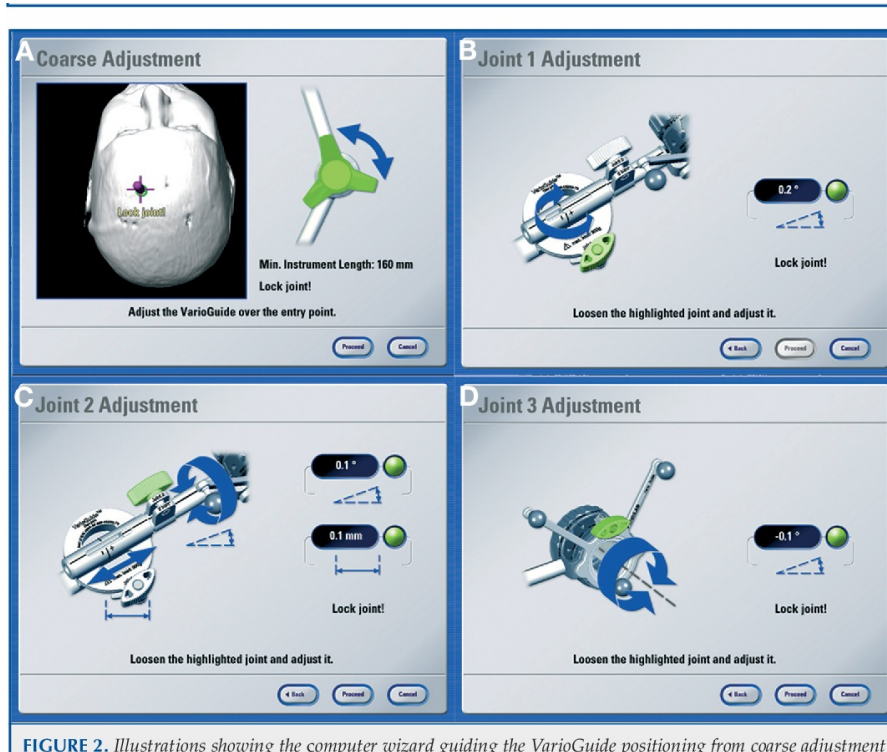


Figura 12: Programa de guía por computadora

6.4. Normas a utilizar

Se utilizarán dos tipos de normas, las médicas, las cuales garantizarán que el proyecto es adecuado para su uso en un quirófano, y las mecánicas, que garantizarán la integridad del brazo y su correcto funcionamiento.

6.4.1. Norma IEC 80601-2-77

La norma internacional para la seguridad de robots quirúrgicos fue actualizada en 2019 por la comisión electrotécnica internacional (IEC) y la organización internacional de estandarización (ISO) reemplazando toda norma utilizada en el ámbito

quirúrgico de la robótica. Este estándar presenta todos los lineamientos que un robot de naturaleza médica debe cumplir para poder ser utilizado en un quirófano y será la norma principal con la que se estará trabajando [23].

6.4.2. Norma ISO 10993-1

La norma para la evaluación biológica de dispositivos médicos; emitida en 2018 por la ISO evalúa los riesgos alrededor del uso de dispositivos médicos y busca garantizar la protección de todos los seres humanos que deban estar en contacto con los mismos. Esta norma no solo presenta los lineamientos para garantizar la seguridad humana en el uso del equipo, también lo catalogará de acuerdo a su naturaleza, su duración y su manera de interactuar con el ser humano [24].

6.4.3. Cálculo y diseño de engranes según la norma JGMA 405-01

La norma japonesa JGMA 405-01 se utiliza para dimensionar engranes según los esfuerzos aplicados. Se utiliza para comparar datos teóricos y prácticos y no contempla sistemas de engranes más allá de pares [25].

La norma también provee las formulas para calcular los engranes y todos los procesos a tomar en cuenta para su manufactura.

6.4.4. Cálculo y diseño de los sistema de rieles de movimiento lineal según la norma ISO 10285:2007

Esta norma es la encargada de estandarizar los sistemas de movimiento lineal de tipo manga. Esto incluye raíles, deslizadores y otros tipos de sistemas que utilicen rodamientos [26].

6.4.5. Cálculo y diseño de los husillos de bola según la norma ISO 3408-1

Esta norma es la encargada de estandarizar el uso, cálculo y diseño de los husillos de bola utilizados para convertir el movimiento rotacional de un motor en movimiento lineal [27].

Se realizaron una serie de diseños CAD orientados a definir los métodos que se iban a utilizar para mover los cuatro grados de libertad del brazo robótico asistencial.

Para el primer grado de libertad se decidió utilizar un sistema Sinfín - Corona, acoplados al círculo que estará rotando la pieza entera. Esto para imitar el primer grado de libertad del VarioGuide.

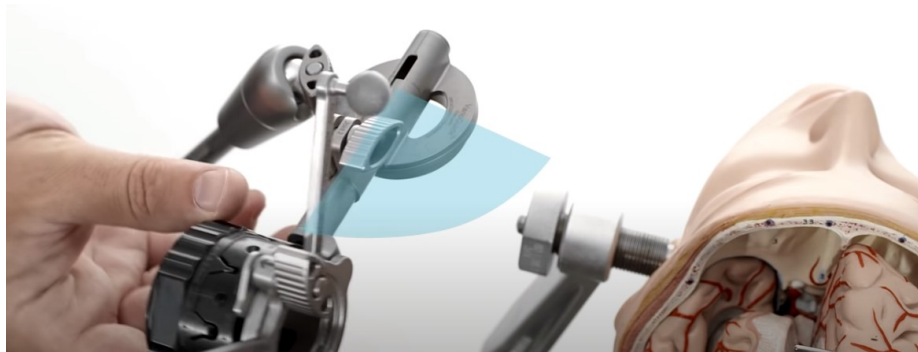


Figura 13: Movimiento del primer grado de libertad del VarioGuide

Como se puede ver en 13 el movimiento del primer grado es circular y debe moverse hasta llegar al grado adecuado. Por lo que se replicó el movimiento con el sistema sinfín-corona:

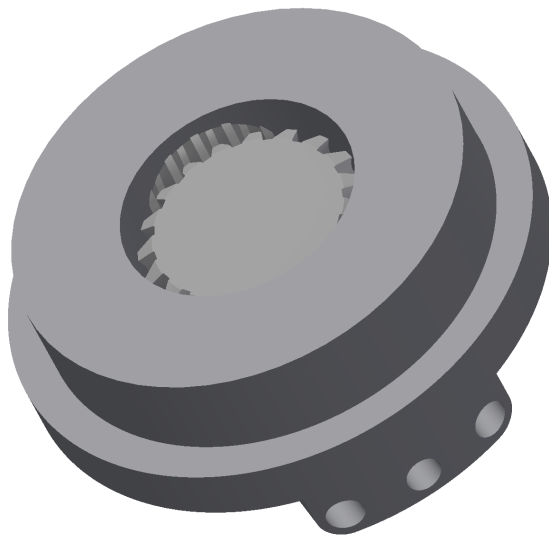


Figura 14: Mecanismo del primer grado de libertad de la pieza

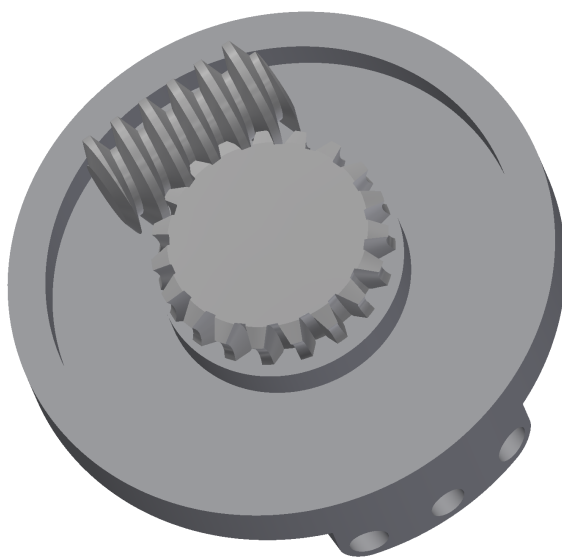


Figura 15: Sistema tornillo-corona

El segundo grado de libertad se ve de la siguiente manera:



Figura 16: Movimiento del segundo grado de libertad del VarioGuide

Como se puede observar, el grado de libertad requiere un movimiento lineal, antes que uno circular, por lo que para este se utilizará un sistema de husillo de bola para recrear el movimiento, por lo que se verá de la siguiente manera:

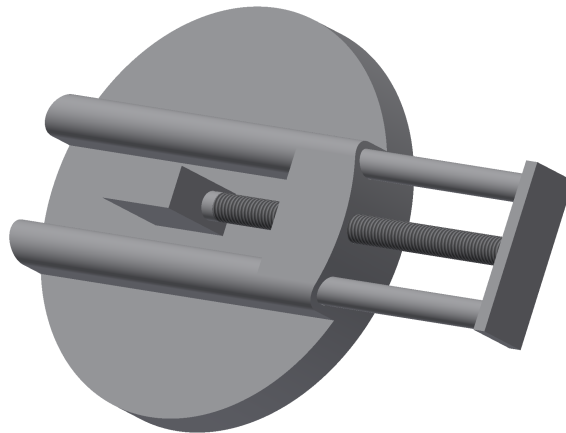


Figura 17: Sistema tornillo-tuerca

El tercer grado de libertad tiene un movimiento rotacional, como se puede observar en 16, por lo que el diseño del grado de libertad será similar al primero.

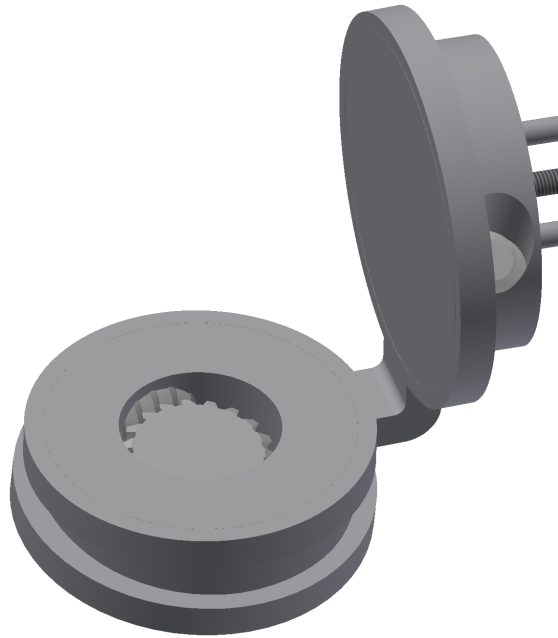


Figura 18: Sistema tornillo-tuerca

El cuarto grado de libertad es similar al primero también 15: de rotación, por lo que se utilizó el mismo sistema para referenciarlas.



Figura 19: Movimiento del segundo grado de libertad del VarioGuide

Por lo que el modelo del sistema completo quedaría de la siguiente manera:

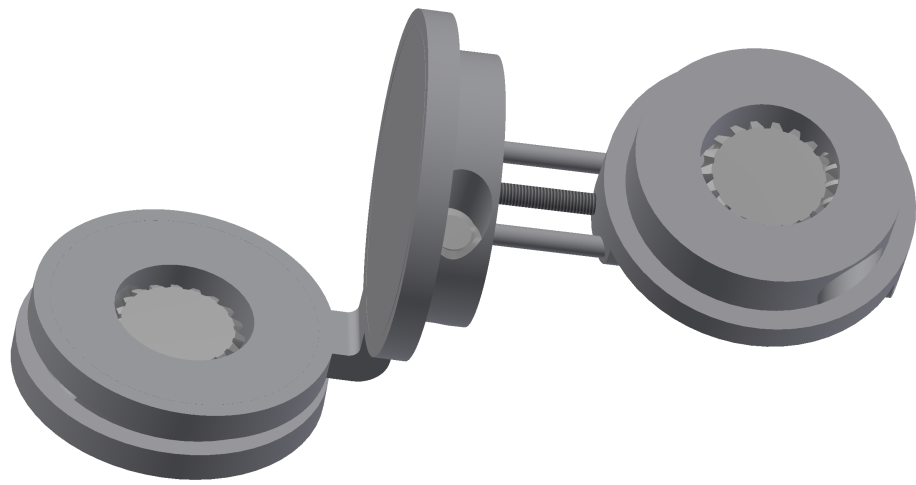


Figura 20: Modelo inicial brazo robotico

8.1. Características a tomar en cuenta

Se plantearon una serie de requerimientos al momento de elegir el sistema de transmisión de potencia que se utilizaría en el brazo robótico.

- El sistema debe ser autobloqueante: Debido a que el brazo estará utilizándose en cirugías de naturaleza neurológica, es imperante que ninguna fuerza externa sea capaz de cambiar la posición del brazo.
- El sistema de transmisión debe transmitir el suficiente torque para mover el brazo en su máxima extensión sin comprometer su integridad ni la del brazo.
- La reducción de velocidad debe cumplir la precisión que se decidió efectiva para el brazo robótico.

8.2. Sistema tornillo sin fin - corona

Un sistema tornillo sin fin - corona es un sistema de transmisión de potencia utilizado especialmente en la industria musical para tensar y dar nota a diferentes mecanismos musicales.

También se utilizan cuando se necesita un sistema autobloqueante, cómo en mecanismos de abertura de puertas o en prensas. Era especialmente atractivo debido a

que es un sistema muy compacto y es muy eficaz cuando se quiere transmitir potencia de manera perpendicular.

La razón por la que se decidió utilizar un worm drive es debido a su función autobloqueante, fundamental en éste proyecto, y por su diseño compacto, perfecto para ser implementado en un brazo robótico de las dimensiones que se están manejando.

8.3. Elección del worm drive adecuado

Para facilidad de obtención, se eligió el worm drive de manera que coincida con los modelos estandarizados presentes en el mercado.

Para el diseño de los engranes se utilizó la norma JGMA 405-01 [28] y se utilizaron las guías: Elements of metric gear technology [29] y "KHK Worm Gear Pair"[28].

8.4. Características

Lo primero que se decidió fue la reducción que debe tener el sistema y el módulo.

Según la información que nos proveyó el dr. Lara, el sistema VarioGuide tiene una precisión angular de 0.1 grados, por lo que la precisión del brazo debe ser igual o mayor a la de la computadora.

Ya que se utilizarán motores NEMA 11, se está trabajando con un motor de 200 pasos por vuelta, por lo que se tiene una distancia recorrida de 1.8° . La resolución requerida es de 18 veces más exactitud, por lo que el ratio debe ser de mínimo $1/18$.

Tomando en cuenta el deslizamiento que pueden llegar a tener los sistema tornillo sinfín-coronas, se decidió utilizar un ratio de $1/20$ para tener una distancia de paso de 0.9° corregibles por micro-stepping. Esto aumenta la cantidad de deslizamiento permisible en el engrane, pudiendo elegir uno de pocos hilos, los cuales son más sencillos, baratos y fáciles de reemplazar.

8.5. Cálculo de Fuerzas

Para calcular el worm drive a utilizar, se estimó la distancia máxima en la que se estará ejerciendo el momento y el punto crítico al que se le estarán aplicando estas fuerzas. Debido a que el eje de rotación del primer grado de libertad es el que se encuentra más alejado de la punta y es el único punto de apoyo entre ambos brazos, se considerará este como el eje crítico y se diseñará el resto del brazo acorde.

La distancia máxima que debe alcanza el brazo completamente extendido es de

23.7cm



Figura 21: Brazo original del sistema brainlab extendido

8.6. Momento máximo ejercido sobre el eje crítico

Debido a que se tiene una forma compleja en el brazo, se estará simplificando en varias formas simples y utilizando el teorema de ejes paralelos para obtener el momento de inercia total ejercido sobre el eje.

Se dividió el brazo original en cinco figuras diferentes. El eje principal, los dos aros que permiten el giro del brazo y las dos antenas que sostienen los sensores del VarioGuide.

El eje principal se tomará como un cilindro rotando en un extremo, con radio despreciable y longitud L , por lo que su momento de inercia es:

$$I = ML^2 \quad (1)$$

Donde L según [21] es 15cm y r se muestra en [22]



Figura 22: Diámetro del cilindro principal

Se obtuvo el material y su densidad para conseguir la masa del cilindro que se está calculando. Los sistemas VarioGuide utilizan acero inoxidable para sus componentes,

por lo que su densidad es $7850 \frac{kg}{m^3}$. Con este dato y el diámetro [22] se puede obtener la masa del cilindro, utilizando [1]:

$$I_{cilindro} = \frac{1}{3}ML^2 = \frac{1}{3}\delta VL^2 = \frac{1}{3}\delta\pi r^2 L^3 \quad (2)$$

Resolviendo para la ecuación [2] queda:

$$I_{cilindro} = \frac{1}{3}\pi(7850 \frac{kg}{m^3})(6mm * \frac{1m}{1000mm})^2(15cm * \frac{1m}{100cm})^3 = 3.18x10^{-4}kg \cdot m^2 \quad (3)$$

Para las otras geometrías se siguió el mismo procedimiento, pero utilizando el teorema de ejes paralelos:



Figura 23: Diámetro externo de los grados de libertad



Figura 24: Diámetro interno de los grados de libertad

Los círculos se tomarán como cilindros huecos y se utilizará tanto el diámetro externo (23) como el interno (24). Primero se obtiene el momento de inercia según el centroide original del disco.

$$I_{1erCirculo} = \frac{1}{2}M(R_1^2 + R_2^2) = \frac{1}{2}\delta V(R_1^2 + R_2^2) \quad (4)$$

Resolviendo en [4] queda:

$$I_{1erCirculo} = \frac{1}{2}(7850 \frac{kg}{m^3})(1.589x10^{-5}m^3)(\frac{22.5^2}{1000} + \frac{13^2}{1000}) = 4.21x10^{-5}kg \cdot m^2 \quad (5)$$

Utilizando el teorema de ejes paralelos con [5]:

$$I'_{1erCirculo} = I_s + md^2 = 4.21x10^{-5}kg \cdot m^2 + (7850 \frac{kg}{m^3})(1.589x10^{-5}m^3)(\frac{4.5}{100})^2 = 2.95x10^{-4}kg \cdot m^2 \quad (6)$$

Y se realizó el mismo procedimiento para los componentes faltantes.

$$I_{2doCirculo} = \frac{1}{2}(7850 \frac{kg}{m^3})(4.238x10^{-5}m^3)(\frac{22.5^2}{1000} + \frac{13^2}{1000}) = 1.12x10^{-4}kg \cdot m^2 \quad (7)$$

$$I'_{2dorCirculo} = 1.12x10^{-4}kg \cdot m^2 + (7850 \frac{kg}{m^3})(4.238x10^{-5}m^3)(\frac{18}{100})^2 = 1.09x10^{-2}kg \cdot m^2 \quad (8)$$

Las dos antenas se tomarán como placas rectangulares con eje de rotación en el extremo.

$$I_{antenas} = \frac{1}{3}Ma^2 = \frac{1}{3}(7850 \frac{kg}{m^3})(1.376x10^{-6}m^3)(\frac{68.8mm^2}{1000 \frac{m}{mm}}) = 1.7x10^{-5}kg \cdot m^2 \quad (9)$$

$$I'_{antenas} = 1.7x10^{-5}kg \cdot m^2 + (7850 \frac{kg}{m^3})(1.376x10^{-6}m^3)(\frac{24.8}{100})^2 = 6.81x10^{-4}kg \cdot m^2 \quad (10)$$

Sumando los momentos de inercia encontrados en: [5], [6], [10],[8] se obtiene el momento de inercia total del brazo.

$$3.18x10^{-4}kg \cdot m^2 + 2.95x10^{-4}kg \cdot m^2 + 1.09x10^{-2}kg \cdot m^2 + 2*6.81x10^{-4}kg \cdot m^2 = 12.94x10^{-3}kg \cdot m^2 \quad (11)$$

El peso de la aguja en el brazo puede considerarse como despreciable, por lo que el torque ejercido sobre el grado de libertad más alejado al final del brazo es el momento de inercia del brazo [11]:

$$\tau_{brazo} = I_{brazo} * \alpha_{brazo} = (12.94x10^{-3}kg \cdot m^2)(\frac{9.81 \frac{m}{s^2}}{\frac{18.5cm}{100 \frac{m}{cm}}}) = 0.686Nm \quad (12)$$

El motor NEMA 11 tiene un torque estático máximo de $6.5x10^{-2}Nm$ y el sistema tornillo sinfín-corona tiene una multiplicación del torque de 20, por lo que el torque máximo que podría aguantar el sistema es de:

$$6.5x10^{-2}Nm * 20 = 1.3Nm \quad (13)$$

Lo que es 1.9 veces más que el valor del torque máximo ejercido por el brazo [12]. Se utilizó el datasheet de KHK Gears para obtener el torque permisible ejercido sobre el sistema tornillo sinfín-corona y elegir el sistema a utilizar.

Total length	Web thickness	Web O.D.	Mounting distance	Allowable torque (N·m) <small>NOTE 1</small>								Backlash (mm)	Weight (kg)	Catalog Number			
				30 _{rpm}	100 _{rpm}	300 _{rpm}	600 _{rpm}	900 _{rpm}	1200 _{rpm}	1800 _{rpm}							
G	(H)	(I)	J														
35	—	—	30	19.4	16.1	12.8	10.5	9.30	8.49	7.31	0.11~0.24	0.25	AGF2-20R1				
			30	19.9	16.1	12.2	9.99	8.75	7.92	6.74		0.25	AGF2-20R2				
			35	29.4	24.5	19.6	16.3	14.4	13.2	11.4		0.37	AGF2-25R1				
			40	41.1	34.5	27.7	23.2	20.7	18.8	16.4		0.51	AGF2-30R1				
			40	42.3	35.0	27.0	22.1	19.9	17.7	15.4		0.51	AGF2-30R2				
	—	—	47	57.8	48.6	39.3	33.2	29.6	27.0	23.6		0.73	AGF2-36R1				
			50	70.3	59.2	48.1	40.7	36.4	33.2	28.9		0.85	AGF2-40R1				
			(10)	(76)	60	98.5	83.0	68.0	57.9	51.9		47.5	1.14	AGF2-48R1			
			(12)	(81)	60	106	89.5	73.4	62.5	56.2		51.5	1.14	AGF2-50R1			
			(12)	(96)	70	149	126	103	88.4	80.3		73.3	64.2	1.51	AGF2-60R1		
			40	—	—	40	35.1	29.0	22.6	18.6		16.3	14.8	12.8	0.14~0.27	0.44	AGF2.5-20R1
						40	34.6	27.9	20.9	17.1		14.8	13.4	11.3		0.44	AGF2.5-20R2
46.25	53.0	43.9				34.8	28.9	25.3	23.0	20.0	0.66	AGF2.5-25R1					
52.5	74.1	62.0				49.1	41.2	36.7	32.8	28.7	0.87	AGF2.5-30R1					
52.5	73.6	60.6				46.2	37.8	33.2	29.9	25.8	0.87	AGF2.5-30R2					
—	—	60	104	87.4	69.8	59.0	51.8	47.1	41.2	1.19	AGF2.5-36R1						
		65	127	106	85.4	72.4	63.7	57.9	50.5	1.42	AGF2.5-40R1						
		(13)	(97)	75	178	149	121	103	90.8	83.1	72.2	1.72	AGF2.5-48R1				
		(13)	(100)	77.5	192	161	130	111	98.4	90.0	78.3	1.92	AGF2.5-50R1				
		(13)	(125)	90	268	226	183	157	141	128	112	2.59	AGF2.5-60R1				

Figura 25: Tabla con los torques permisibles de los engranes de KHK. [28]

El torque está dado según la velocidad aplicada al sistema, por lo que se utilizó el datasheet de los motores NEMA 11 para obtener su velocidad máxima.

MODEL	step angle	current/phase	resistance/phase	inductance/phase	max holding torque	max optimal speed	body length
	(°)	(A)	typ (Ω±10%)	typ (mH±20%)	(oz-in)	(RPS)	max (inch)
NEMA11-13-01D-AMT112S	1.8	0.67	5.6	3.08	9.2	16	1.26
NEMA11-18-01D-AMT112S	1.8	0.67	7.1	4.79	13.7	13	1.77
NEMA11-18-02D-AMT112S	1.8	1.3	1.3	0.63	12.0	44	1.77
NEMA11-20-01D-AMT112S	1.8	0.67	8.6	6.16	16.6	11	2.01
NEMA11-20-02D-AMT112S	1.8	1.3	1.9	1.46	16.6	22	2.01

Figura 26: Tabla con la velocidad máxima del motor Nema 11. [30]

Por lo que la velocidad máxima alcanzable del motor es de 16RPS que son 969RPM, y en (25) se puede observar que el torque máximo admisible del AGF2-20R1 a 1200RPM es de 8.49Nm [26], muy superior al torque máximo que estará ejerciendo el brazo sobre el engrane.

8.7. Cálculo de la velocidad de deslizamiento

Se debe verificar que la velocidad de deslizamiento máximo permisible del engrane elegido sea mayor a la del sistema.

Catalog number	Maximum seizing allowable sliding speed (m/s)
AGDL	* 15
AGF	* 15
AG	* 15
BG	* 10
CG	* 2.5
PG	1 (Not lubricated)

Figura 27: Valores máximos de deslizamiento según la norma JGMA 405-1 [28]

Y la ecuación para encontrar el deslizamiento máximo es:

$$v_s = \frac{dn}{19100\cos\gamma} \quad (14)$$

Donde v_s es la velocidad de deslizamiento, d es el diámetro de paso, n es la velocidad del tornillo y γ es el ángulo de avance nominal.

Catalog No.	Reduction ratio	Transverse module	No. of teeth	Number of starts	Profile shift coefficient	Helix angle	Hand thread	Shape	Bore	Hub dia.	Pitch dia.	Throat dia.	Outside dia.	Face width	Hub width(R)
									A _{H7}	B	C	D	D'	E	F
AGF2-20R1	20	m2	20	1	-0.5	5°12'	R	H6	12	32	40	42	44	18	12
AGF2-20R2	10		20	2	-0.5	10°18'	R	H6	12	32	40	42	44	18	12
AGF2-25R1	25		25	1	-0.5	5°12'	R	H6	12	35	50	52	54	18	12
AGF2-30R1	30		30	1	-0.5	5°12'	R	H6	12	38	60	62	64	18	12
AGF2-30R2	15		30	2	-0.5	10°18'	R	H6	12	38	60	62	64	18	12
AGF2-36R1	36		36	1	0	5°12'	R	H6	12	40	72	76	78	18	12
AGF2-40R1	40		40	1	-0.5	5°12'	R	H8	12	45	80	82	84	18	12
AGF2-48R1	48		48	1	+0.5	5°12'	R	H9	12	50	96	102	104	18	12
AGF2-50R1	50		50	1	-0.5	5°12'	R	H9	12	50	100	102	104	18	12
AGF2-60R1	60		60	1	-0.5	5°12'	R	H9	12	50	120	122	124	18	12
AGF2.5-20R1	20	m2.5	20	1	0	4°46'	R	H6	12	35	50	55	57.5	20	15
AGF2.5-20R2	10		20	2	0	9°28'	R	H6	12	35	50	55	57.5	20	15
AGF2.5-25R1	25		25	1	0	4°46'	R	H6	12	40	62.5	67.5	70	20	15
AGF2.5-30R1	30		30	1	0	4°46'	R	H6	12	40	75	80	82.5	20	15
AGF2.5-30R2	15		30	2	0	9°28'	R	H6	12	40	75	80	82.5	20	15
AGF2.5-36R1	36		36	1	0	4°46'	R	H8	12	45	90	95	97.5	20	15
AGF2.5-40R1	40		40	1	0	4°46'	R	H8	12	45	100	105	107.5	20	15
AGF2.5-48R1	48		48	1	0	4°46'	R	H9	12	50	120	125	127.5	20	15
AGF2.5-50R1	50		50	1	0	4°46'	R	H9	12	55	125	130	132.5	20	15
AGF2.5-60R1	60		60	1	0	4°46'	R	H9	12	60	150	155	157.5	20	15

Figura 28: Tabla con los valores de los engranes de KHK. [28]

De [28] se pueden obtener éstos valores y reemplazar en [14], por lo que la velocidad de deslizamiento queda:

$$v_s = \frac{40mm * 969RPM}{19100\cos(5.12)} = 5.071 \frac{m}{s} \quad (15)$$

Como se puede ver en [27] la velocidad de deslizamiento es menor a la máxima permitida para engranes KFG.

8.8. Durabilidad superficial

Se calcularon las fuerzas permisibles por el sistema de transmisión de potencia AGF2-20R1 y su durabilidad superficial, los resultados son los siguientes:

Zone factor	1.34797
Sliding speed factor	0.60147
Rotating speed factor	0.639
Lubricant factor	0.8
Lubrication method factor	1
Roughness factor	0.7
Contact ratio factor	1
Allowable stress factor	0.67
Allowable circumferential force (N)	80.59114
Allowable worm wheel torque (N·m)	0.80924
Allowable power (kW)	0.00407

Figura 29: Fuerzas permisibles en los engranes

8.9. Cálculo de las fuerzas ejercidas en el transmisor de potencia

Se utilizó la calculadora de fuerzas de KHK. Ingresando el torque del motor y los engranes a utilizar, devolvió las fuerzas que se estarán aplicando, según la norma JGMA 405-01 [31].

Worm gear Calculation of force acting on gears 2021/09/24

Normal module	1	
Normal pressure angle	20° 0' 0"	
Lead angle	1°25'57"	
	Worm	Worm wheel
Number of threads · number of teeth	1	20
Normal tooth profile shift coefficient	· · · · ·	0
Center distance	30.00313	
Pitch circle diameter	40	20.00625
Coefficient of friction	0.05	
Efficiency (%)	31.92993	
Transmitted torque(N·m)	0.065	0.41509
Tangent line force(N)	3.25	41.49594
Shaft direction force(N)	41.49594	3.25
Radial direction force(N)	15.12814	15.12814

KHK GCSW

Figura 30: Tabla con las fuerzas que actúan en los engranes

Comparando entre [29] y [30] se confirma que los valores de fuerza aplicados por

el sistema son menores a los máximos permisibles tanto en el torque permisible, como en las fuerzas actuadoras permisibles.

8.10. Diseño de las piezas adicionales del primer grado de libertad

Una vez se seleccionó el sistema tornillo sin fin-corona a utilizar, se procedió a diseñar el primer grado de libertad del brazo en Inventor 2019.

Se decidió acoplar el sistema tornillo sin fin-corona al eje de manera estática, de tal manera que la corona se mantiene en su posición y es el tornillo sin fin el que se mueve alrededor de la misma.

El largo de la carcasa fue diseñado para que el segundo grado de libertad pueda moverse de manera lineal la distancia original del brazo mecánico.

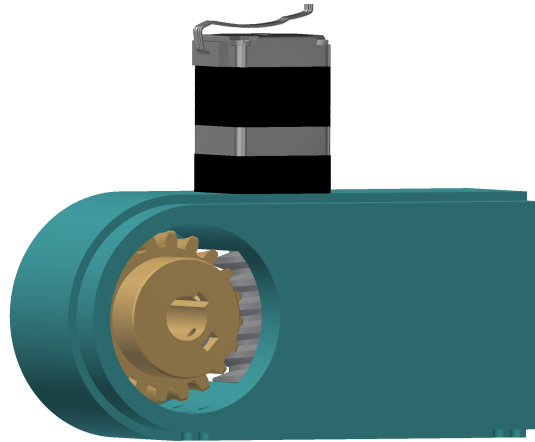


Figura 31: Grado de libertad sin tapadera

Debido a las limitaciones de espacio, se decidió utilizar bushings de bronce en las juntas tanto de la corona como del tornillo sin fin, en lugar de rodamientos. El motor se acopló al tornillo sin fin y finalmente se acopló una tapadera para cerrarlo.

Se acoplaron los rieles en el centro para servir de guía para el movimiento del segundo grado de libertad.

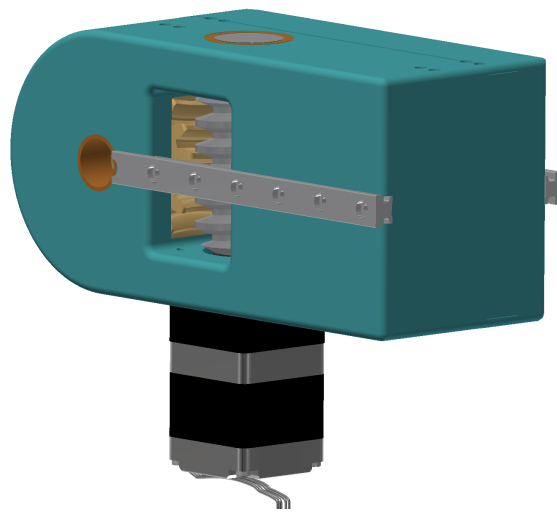


Figura 32: Primer Grado Completo

Diseño del segundo grado de libertad

Para el segundo grado de libertad se requería de movimiento traslacional, no rotacional, por lo que se utilizó un husillo de bola y su respectiva tuerca para generar el movimiento, y se instalarán dos soportes para mantenerlo en posición. En este sistema también se utilizaron bushings de cobre para proveer fluidez en el movimiento rotacional del tornillo.

9.1. Elección del husillo de bola adecuado

Ya que el movimiento se necesita en el centro del brazo y el husillo de bola va instalado en la parte superior, se utilizarán raíles para transmitir el movimiento traslacional de manera correcta.

Los husillo de bola tienen una ecuación de movimiento sencilla. Por cada giro completo del motor, la pieza se trasladará el paso del tornillo, por lo que la ecuación de transferencia es:

$$Ratio = \frac{1}{P_h} \quad (16)$$

[32]

9.2. Cálculo del paso y la velocidad óptima del tornillo

Para calcular el paso óptimo del tornillo, se utilizará la velocidad del motor presente en (26). Sin embargo, ya que no se quiere que los motores se encuentren trabajando

a la velocidad máxima todo el tiempo, se calculará el paso asumiendo la mitad de ésta velocidad.

$$N_{optimo} = \frac{(V_{optima})(60 \times 10^3)}{P_h} \quad (17)$$

Siendo N_{optimo} la velocidad angular media del motor en RPM, V_{optima} la velocidad lineal en $\frac{m}{s}$ y P_h el paso del tornillo en mm.



Figura 33: Distancia máxima del segundo grado de libertad.

De acuerdo a las mediciones hechas sobre el VarioGuide original (33), la distancia de desplazamiento del brazo es de 47.82mm, número que será aproximado a 50mm en el diseño.

Según lo discutido en la reunión con el Dr. Lara. La cantidad de tiempo óptima para que el segundo grado de libertad recorra esta distancia es de 5 segundos. por lo que se tomarán estos datos para calcular la velocidad óptima.

$$V_{optima} = \frac{50mm}{3s * 1000 \frac{mm}{m}} = 0.01 \frac{m}{s} \quad (18)$$

Con estos datos se despeja para el paso del tornillo en [18]:

$$P_h = \frac{(V_{optima})(60 \times 10^3)}{N_{optimo}} = \frac{(0.01 \frac{m}{s})(60 \times 10^3)}{480} = 1.25mm \quad (19)$$

Al momento de elegir la serie a utilizar se tomó en cuenta la exactitud que ofrecen y que existan unidades de un diámetro adecuado.

Se eligió la serie BNK de THK ya que cuentan con diámetros externos de 5mm,

mientras que otras series como la SGD tienen un diámetro mínimo de 20mm, demasiado grande para el brazo.

Model No.	Stroke	Lead	Basic load rating		Detail specifications
			Dynamic rating	Static rating	
	mm	mm	Ca kN	C _{0a} kN	
BNK 0501-3G0+77LC3Y	20	1	0.32	0.55	○
BNK 0501-3G0+77LC5Y	20	1	0.32	0.55	○
BNK 0501-3G2+77LC7Y	20	1	0.32	0.55	○
BNK 0501-3G0+97LC3Y	40	1	0.32	0.55	○
BNK 0531-3G0+97LC5Y	40	1	0.32	0.55	○
BNK 0501-3G2+97LC7Y	40	1	0.32	0.55	○
BNK 0501-3G0+127LC3Y	70	1	0.32	0.55	○
BNK 0501-3G0+127LC5Y	70	1	0.32	0.55	○
BNK 0501-3G2+127LC7Y	70	1	0.32	0.55	○

Figura 34: Tabla de elección del husillo de bola serie BNK. [33]

Como se puede observar en (34) en el formato de 5mm de diámetro, solo está disponible el paso de 1mm por vuelta. Sin embargo esto es arreglable aumentando ligeramente la velocidad del motor.

$$N_{optimo} = \frac{(V_{optima})(60x10^3)}{P_h} = \frac{(0.01\frac{m}{s})(60x10^3)}{1mm} = 600RPM \quad (20)$$

Por lo que el motor deberá moverse a una velocidad óptima de 600RPM [20], los cuales son 10RPS, por debajo de los 16RPS máximos permitidos.

9.3. Vida nominal del tornillo y esfuerzo axial

Una vez obtenido el paso del tornillo, se calculó la vida nominal del mismo con estos parámetros de uso.

Vibrations/impact	Speed(V)	f_w
Faint	Very low $V \leq 0.25 \text{ m/s}$	1 to 1.2
Weak	Slow $0.25 < V \leq 1 \text{ m/s}$	1.2 to 1.5
Medium	Medium $1 < V \leq 2 \text{ m/s}$	1.5 to 2
Strong	High $V > 2 \text{ m/s}$	2 to 3.5

Figura 35: Factor de carga del tornillo. [33]

Ball Screw Specifications			
Lead (mm)	1		
BCD (mm)	5.15		
Thread minor diameter (mm)	4.4		
Threading direction, No. of threaded grooves	Rightward, 1		
No. of circuits	1 turn \times 3 rows		
Clearance symbol	G0	GT	G2
Axial clearance (mm)	0	0.005 or less	0.02 or less
Basic dynamic load rating C_a (kN)	0.32	0.32	0.32
Basic static load rating C_{0a} (kN)	0.55	0.55	0.55
Preload torque (N•m)	to 9.8×10^{-3}	—	—
Spacer ball	None	None	None
Rigidity value (N/ μm)	47		
Circulation method	Deflector		

Figura 36: Valores del tornillo especificado. [33]

La ecuación de vida nominal del tornillo es:

$$L_{10m} = \left(\alpha x \frac{C_a}{F_{am}}\right)^3 x 10^6 \quad (21)$$

Donde $\alpha = \frac{1}{f_w}$, siendo f_w el factor de carga, C_a es la capacidad de carga dinámica en newtons y F_{am} la carga axial. [26]

Debido a que la velocidad del motor será muy baja (de 0.01m/s) se utilizará un factor de carga bajo, por lo que $f_w = 1.2$ según (35)

La capacidad de carga dinámica del tornillo está dada por (36), por lo que $C_a = 0.32kN$

Para obtener la carga axial máxima del brazo, se planteará la situación en la cual el eje axial del tornillo se encuentre recibiendo más peso, que es cuándo el brazo se encuentra completamente vertical. En ese momento, la fuerza ejercida sobre el tornillo será igual a la masa del brazo multiplicada por la gravedad:

$$F_{axial} = (M_{1erCirculo} + M_{2doCirculo} + M_{antenas} + M_{motores})g \quad (22)$$

Operando para [22]:

$$F_{axial} = (0.12kg + 0.33kg + 0.022kg + 0.471kg)(9.81 \frac{m}{s^2}) = 5.91 \frac{kg \cdot m}{s^2} = 9.25N \quad (23)$$

Ya teniendo todos los valores necesarios, se opera para la vida nominal del tornillo.

$$L_{10m} = \left(\frac{1}{1.2} x \frac{320N}{9.25N}\right)^3 x 10^6 = 2.39x10^{10}rev \quad (24)$$

Conociendo el número de revoluciones [24] y la velocidad del motor, se pueden obtener las horas de vida que tendrá el tornillo:

$$L_h = \frac{L_{10m}}{60N_m} = \frac{2.39x10^{10}rev}{60 * 600RPM} = 6.63x10^5horas \quad (25)$$

Debido a que el grado de libertad está sujeto gracias a los rieles, las fuerzas de torsión y corte en el tornillo son despreciables.

Una vez confirmados todos los parámetros necesarios para la elección del tornillo, se escogió un BNK 0501-3G0+97LC3Y de THK cómo el sistema de transmisión de potencia lineal en el segundo grado de libertad.

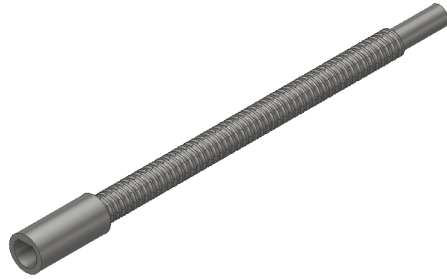


Figura 37: CAD del husillo de bola elegido

Ya obtenido el tornillo [37], se procedió a crear los soportes y a adjuntar el motor NEMA 11 en el diseño del segundo grado.

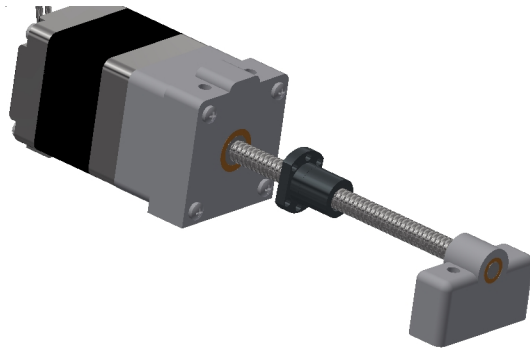


Figura 38: Tornillo acoplado a los soportes

9.4. Elección de los rieles

Se utilizará un riel tipo K, ya que la instalación corresponde a una montura de pared. [34] Estarán recibiendo el peso del resto del brazo

Se requiere que el largo del riel sea de 72mm con rieles de una longitud máxima de 25mm, ya que el movimiento lineal debe ser de por lo menos 47mm en el riel.

9.5. Cálculo del torque ejercido sobre los deslizadores

Se utilizará la fuerza calculada en la elección del husillo de bola para determinar el torque ejercido en los deslizadores.

$$2.95 \times 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^2 + 1.09 \times 10^{-2} \text{kg} \cdot \text{m}^2 + 2 * 6.81 \times 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^2 = 12.622 \times 10^{-3} \text{kg} \cdot \text{m}^2 \quad (26)$$

Con este momento de inercia [26] y asumiendo el brazo completamente extendido, se tiene que la distancia entre la punta del brazo y los rieles será de 15cm, por lo que la

ecuación del torque sería:

$$\tau_{Deslizadores} = W_{brazo} * L_{brazo} = (0.5191kg)(9.81 \frac{m}{s^2})(\frac{7.5cm}{100 \frac{cm}{m}}) = 0.3819N \cdot m \quad (27)$$

Por lo que los deslizadores deben ser capaces de resistir ese torque [27].

Debido a las dimensiones del brazo robótico, se buscaron rieles de tamaño pequeño, entre diez y veinte milímetros, por lo que se decidió utilizar de la serie IGUS TS-04.

Mechanical properties	
Max. torque	0.3 Nm
Static load capacity Coy	200 N
Static load capacity Co	200 N
Static load capacity Coz	100 N
Static load capacity Mox	1 Nm
Static load capacity Moy	1 Nm
Static load capacity Moz	1 Nm

Figura 39: Propiedades mecánicas del deslizador. [35]

Debido a que se utilizarán dos deslizadores, el torque máximo que son capaces de soportar es de $0.3N \cdot m$ (39) por cada uno, por lo que el torque máximo que pueden soportar es de $0.6N \cdot m$

Con estos datos, se decidió utilizar rieles igus TS-04-07 ya que cumplen con los requerimientos. Los deslizadores a utilizar serán los TW-04 ya que cumplen con las especificaciones de torque y de dimensiones requeridas.

Ya habiendo elegido los rieles que se utilizarán, se diseñaron las piezas de acople acorde a las medidas de los CAD proveídos por igus.

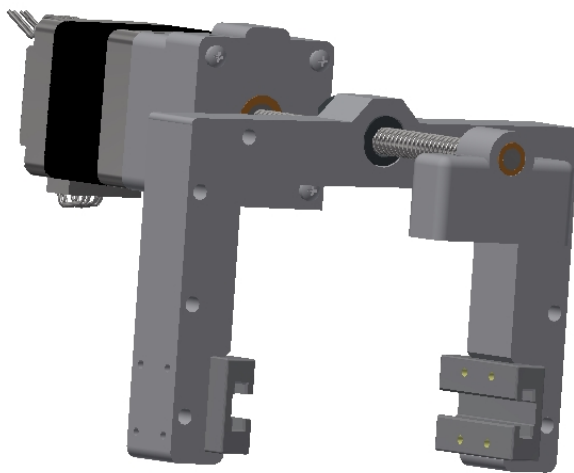


Figura 40: Segundo grado de libertad con deslizadores

Por último se diseño la pieza de acople entre el segundo y tercer grado de libertad. Debido a que el segundo grado genera un movimiento lineal, el motor del tercer grado de libertad debe moverse de la misma manera. Por ello se diseñó la pieza de acople para poder transportar al tercer motor con ella.

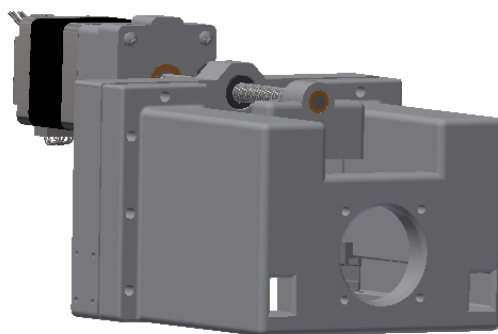


Figura 41: Segundo grado de libertad con el acople

También se generó un agujero en la carcasa principal del primer grado de libertad, en donde descansará el motor cuando el brazo se encuentre contraído.

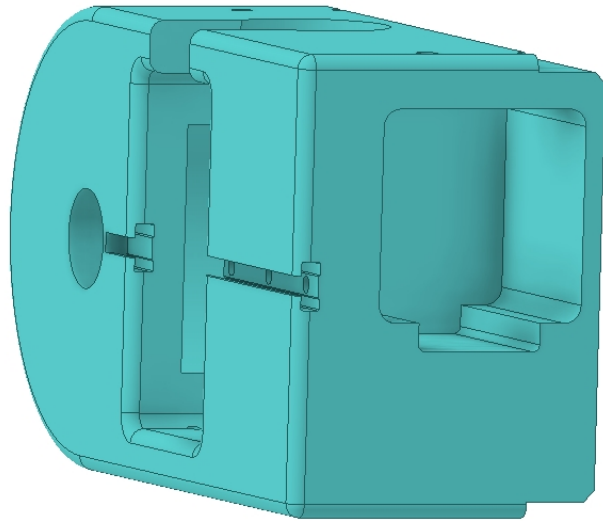


Figura 42: Agujero donde descansa el motor

En 54 se pueden observar ya ensamblados los dos primeros grados de libertad.

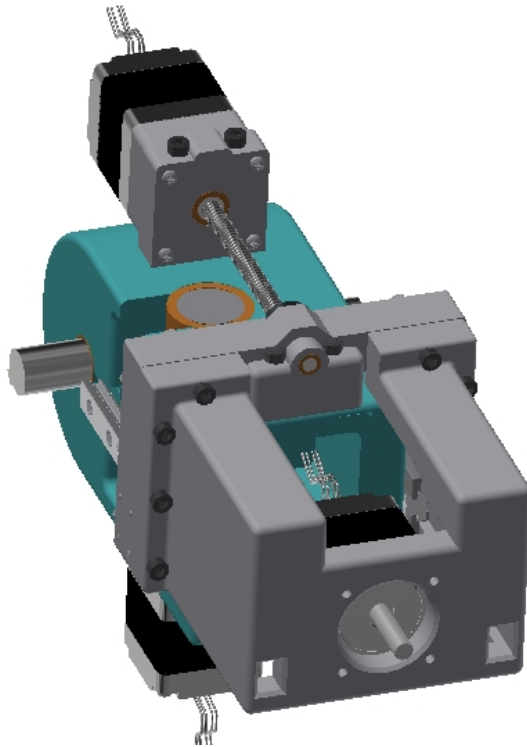


Figura 43: Primeros dos grados de libertad completos

Diseño del tercer grado de libertad

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

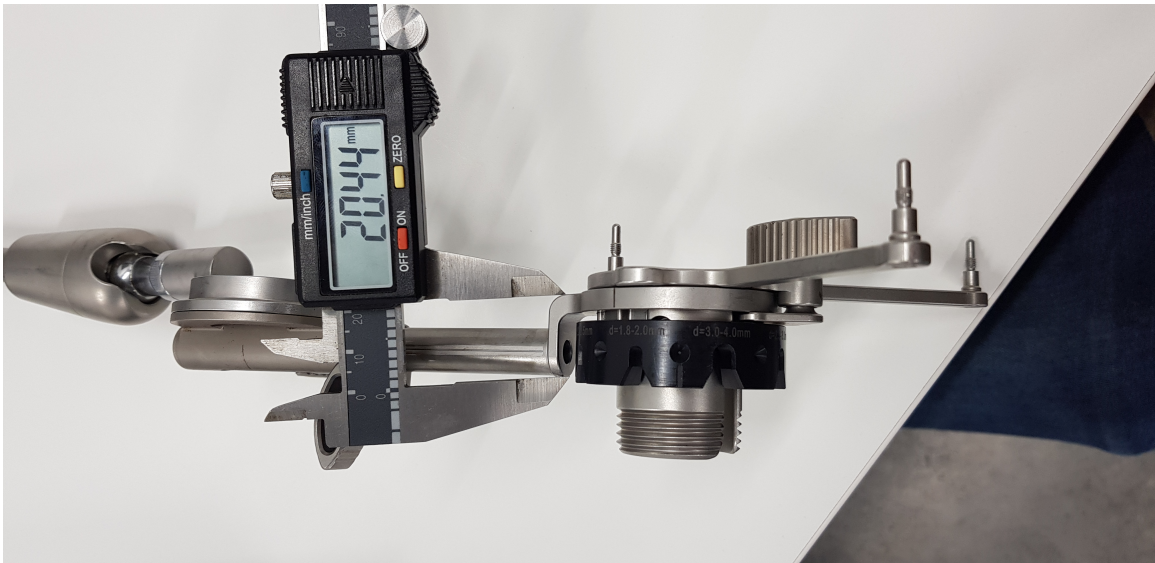


Figura 44: Distancia de desfase del tercer grado de libertad

Como se puede observar en [44] la distancia entre el centro de rotación del eje y el movimiento del tercer grado de libertad es de 14mm (ya que se resta el radio del cilindro). La geometría de esta pieza también es necesaria, ya que estará acoplada a la única pieza que se reutilizará del modelo anterior



Figura 45: Geometría de acople entre las piezas

La geometría en [45] fue medida y replicada en el software de diseño, así como las medidas necesarias en la pieza:

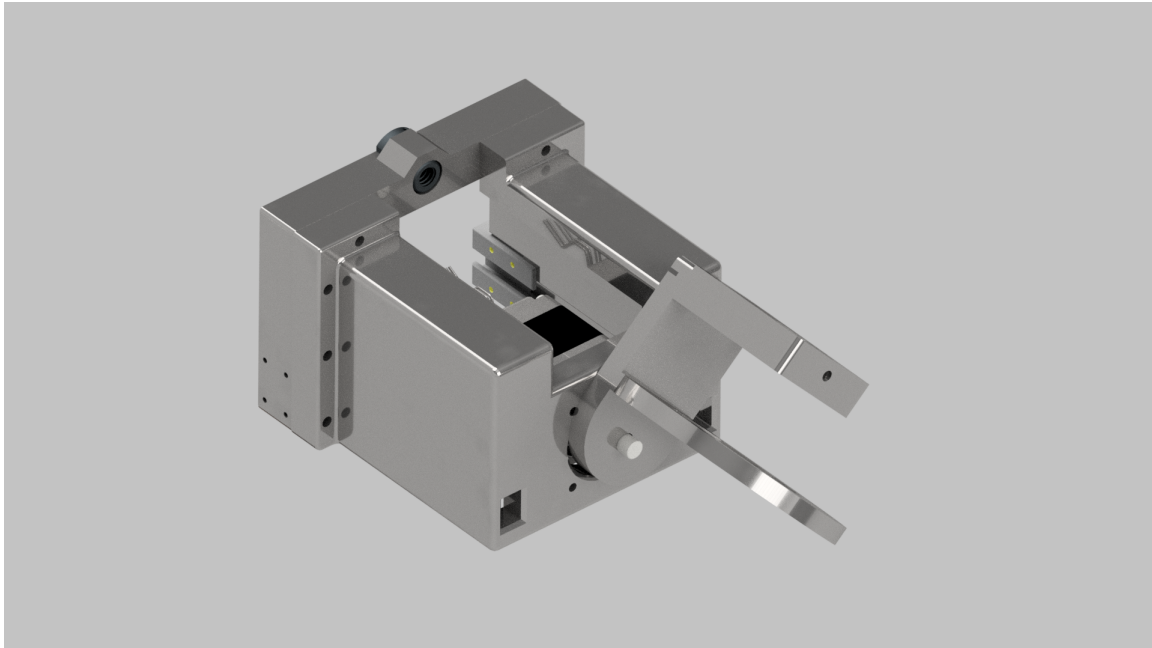


Figura 46: Geometría de acople creada en Inventor

Esta geometría se encontrará acoplada al segundo grado de libertad a través de un rodamiento. Se obtuvo el torque que deberá ejercer la pieza, ya que se conoce tanto su peso cómo la distancia entre acoples.

$$\tau_{3erMotor} = F_{Pieza} * d_{pieza} = (M_{2doCirculo} + M_{antenas} + M_{Motor})(9.81 \frac{m}{s^2})(d_{pieza}) \quad (28)$$

Resolviendo para [28] tenemos:

$$\tau_{3erMotor} = (0.33kg + 0.022kg + 0.157kg)(9.81\frac{m}{s^2})(\frac{14mm}{1000\frac{mm}{m}}) = 4.8x10^{-2}N \cdot m \quad (29)$$

Como se puede observar en [26] el torque máximo estático del motor NEMA 11 es de $6.5x10^{-2}N \cdot m$ por lo que el motor es capaz de mantener el cuarto grado de libertad de manera estática sin ninguna complicación.

Cuarto grado de libertad

Se realizaron las piezas que estarán acopladas al cuarto grado de libertad. Dado que no se tiene disponible las piezas reales que irán acopladas, se imprimieron en 3D réplicas de las mismas para validar el diseño de las piezas que van acopladas a estas.

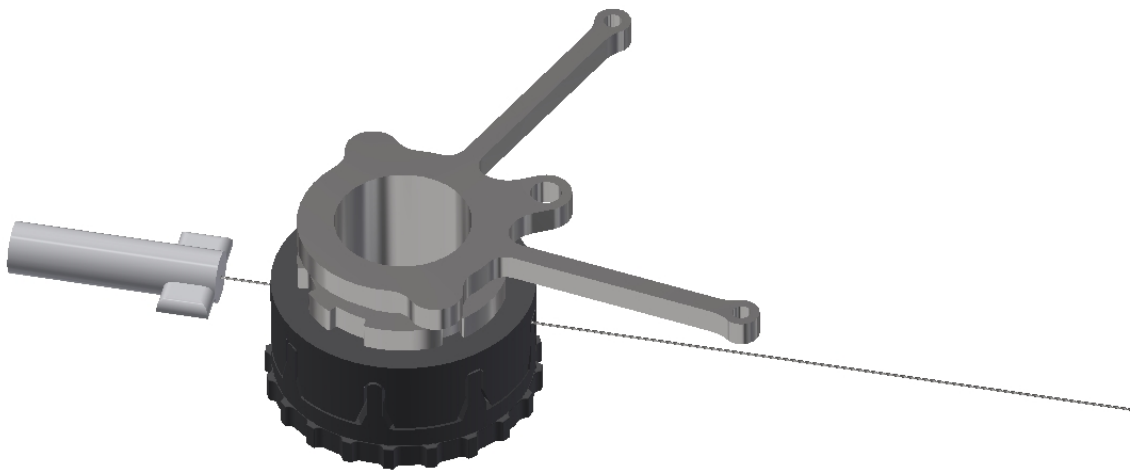


Figura 47: Piezas replicadas del brazo original

Estas piezas rotarán en su propio eje gracias al cuarto motor que estará conectado por un eje flexible conectado a la base del brazo.



Figura 48: Eje flexible utilizado en el cuarto grado de libertad. [36]

La razón por la que se utilizará un eje flexible es para evitar ocultar la tercera antena de detección del brazo, la cuál se encuentra en la parte de atrás de la pieza y necesita una vía lo más despejada posible para poder ser identificada por el VarioGuide. [36]

Con este ensamblaje se procuró que la tercera antena se encuentre visible en la mayoría de las posiciones en las que podrá estar el brazo y conseguir una correcta interpretación de su posición por el sistema VarioGuide.

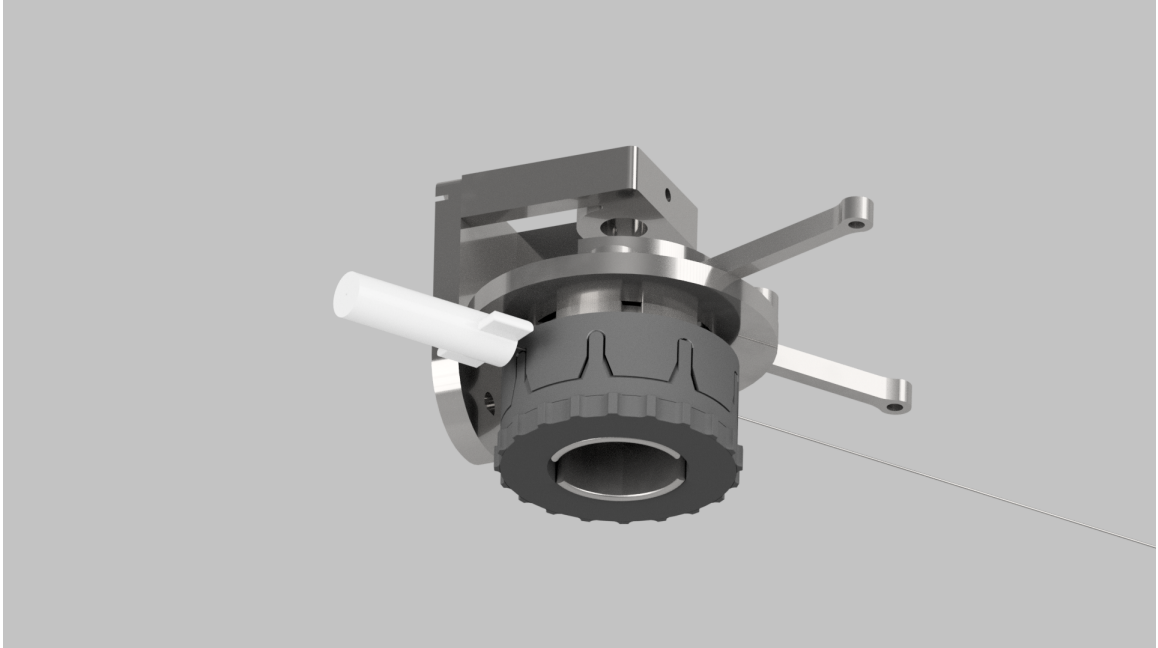


Figura 49: Ensamblaje del cuarto grado de libertad

El ensamblaje final del brazo robótico encargado de seguir las instrucciones automáticas del sistema VarioGuide se ve de la siguiente manera:

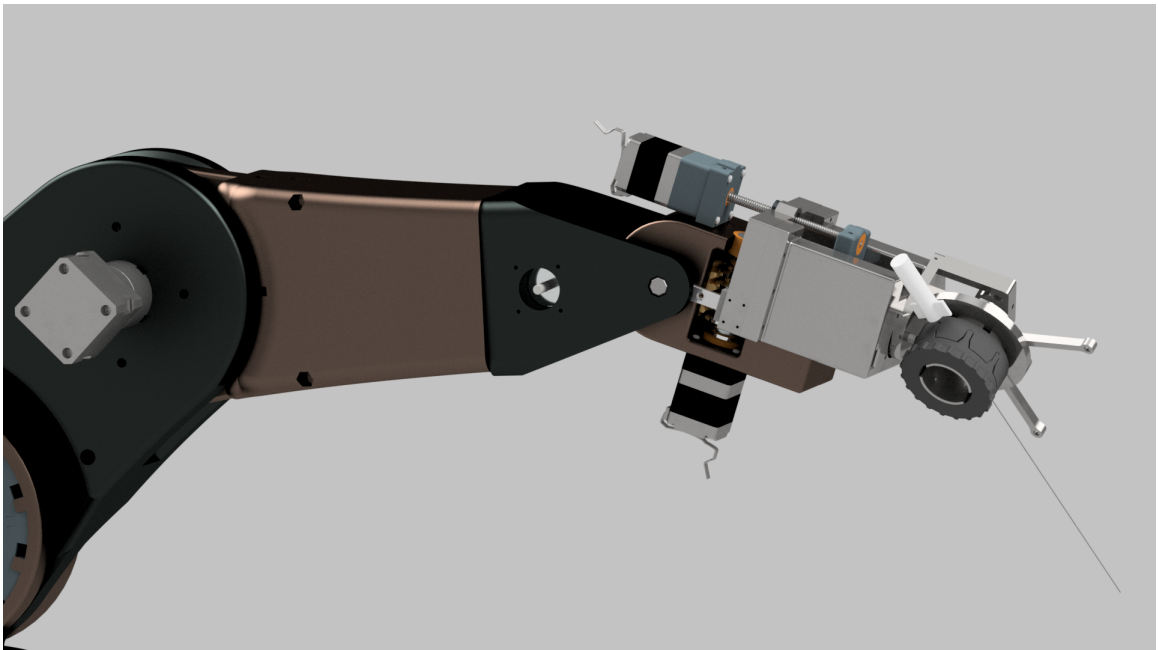


Figura 50: Ensamblaje completo del sistema automático

11.1. Comprobación de cálculos

Una vez terminado el diseño en el software de diseño, se obtuvo mediante la función `iproperties` el volumen total de las piezas del brazo y asumiendo el uso de aluminio para crear las piezas, se tienen los datos necesarios para calcular la masa total del brazo.

El volumen total de las piezas del brazo es de 514839.950mm^3 lo cual son 514.84cm^3 , por lo que la masa del brazo es de:

$$m_{\text{brazo total}} = 514.84\text{cm}^3 * 2.7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1390\text{g} = 1.29\text{kg} \quad (30)$$

El principal momento de inercia del brazo según Inventor es de $18957.109\text{kg} * \text{mm}^2$ lo que son $18.957\text{kg} * \text{m}^2$

Por lo que si se multiplica este momento de inercia por el alfa del brazo, se obtiene la inercia máxima ejercida sobre el eje.

$$\tau = (18.957\text{kg} * \text{m}^2) \left(\frac{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{\frac{18.5\text{cm}}{100 \frac{\text{m}}{\text{cm}}}} \right) = 1.005\text{Nm} \quad (31)$$

Por lo que el motor es capaz de levantarlo con un factor de seguridad de 1.3.

Acoplamiento entre los brazos robóticos

Una vez terminado el ensamblaje del primer prototipo del brazo robótico automático, se procedió a validar el sistema.

12.1. Primer ensamblaje

El primer ensamblaje se encuentra creado con sistemas dobles de engranes planetarios. Este sistema de transmisión de potencia tiene la capacidad de autobloquearse cuándo la reducción del sistema es suficientemente alta. [37]

12.2. Engranajes planetarios

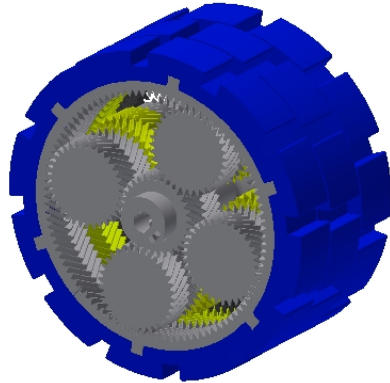


Figura 51: Sistema doble de engranes planetarios utilizado

Como se puede ver en [51] la entrada de potencia se realiza desde el sol del primer sistema y la salida de éste mismo son los planetas, manteniendo fija la corona. Los planetas transmiten la potencia hacia los planetas del segundo sistema de engranes y la potencia sale hacia el brazo gracias a la corona de este segundo sistema, manteniendo el sol estático y logrando una reducción de $\frac{1}{70}$, suficiente para ser autobloqueante. Las propiedades mecánicas de estos engranes, validación de diseños y análisis de fuerzas se encuentran en [6] y fueron validados a través de un análisis exhaustivo de los manuales y normas utilizadas.

12.3. Base del brazo robótico

La base del brazo se encuentra diseñada como un cilindro de 100mm de diámetro y cuatro apoyos para brindar estabilidad al sistema. Dentro de este cilindro va instalado un motor Stepper NEMA 23, utilizado debido a la potencia que es capaz de brindar, al tener que mover todo el brazo. Este motor va acoplado al sistema de engranajes planetarios descrito anteriormente [51]. Todo esto va hacia un acople encargado de sostener el resto del brazo y brindarle el apoyo necesario para garantizar su estabilidad.



Figura 52: Ensamblaje de la base del brazo robótico

12.4. Segundo y tercer grado de libertad

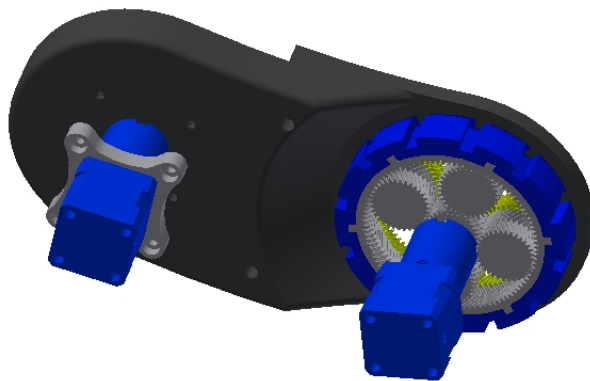


Figura 53: Ensamblaje de los motores

Estos grados de libertad son similares. Ambos cuentan con los sistemas de potencia descritos en [51] y utilizan motores Stepper NEMA 17 con caja reductora para su funcionamiento, como se puede observar en [53].



Figura 54: Segundo y tercer grado de libertad

Como se ve en [54] ambos grados de libertad rotan sobre el mismo eje y su función es acercar el brazo hacia el área de operación, donde la parte automática podrá seguir las órdenes del sistema de guía por computadora.

12.5. Último grado de libertad del brazo mecánico

El último grado de libertad antes del brazo robótico automático rota de manera perpendicular a los dos anteriores y su función es rotar todo el brazo a conveniencia de los cirujanos.

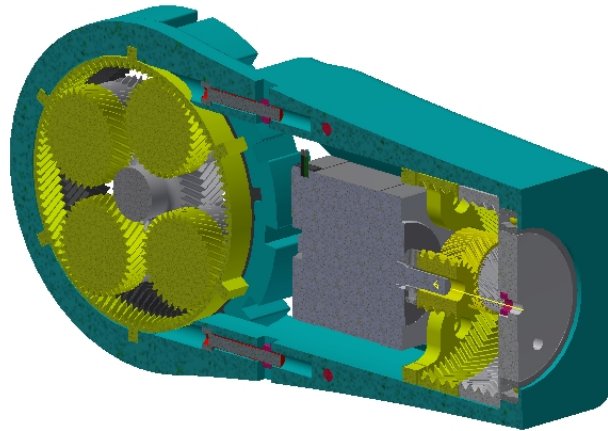


Figura 55: Sistema de rotación de todo el brazo

En este caso [55] se utilizó un un motor Stepper NEMA 23 similar al de la base y los mismos engranes planetarios como transmisores de potencia. Este sistema va conectado al acople que conectará ambos brazos y utiliza un rodamiento para evitar fricción al momento de rotar el brazo.

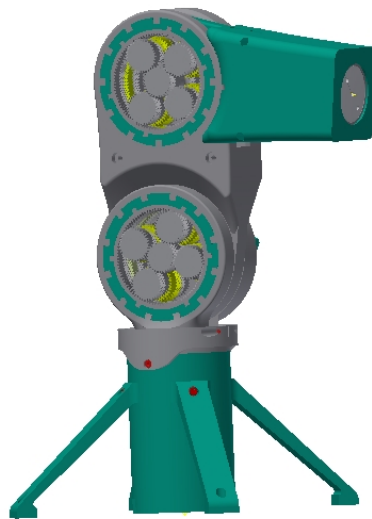


Figura 56: Ensamblaje total del brazo anterior

Una vez validados los componentes mecánicos del brazo robótico anterior, se procedió a ensamblarlo en su totalidad, como se puede ver en [56]

12.6. Ensamblaje final

12.7. Diseño de la junta de acople entre ambos brazos

Esta junta se generó para servir de soporte para el brazo automático y de acople entre ambos brazos.

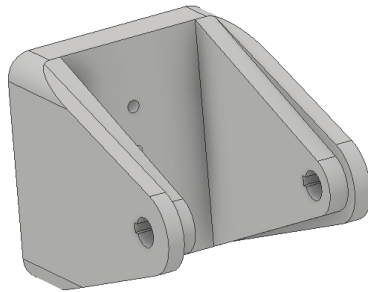


Figura 57: Junta de acople entre ambos brazos

La distancia extra que hay entre los agujeros de ensamblaje y la base en [57] es para garantizar la correcta rotación del brazo sin que los motores interfieran con la pieza.

12.8. Ensamblaje final entre ambas piezas

Con la junta creada, se ensamblaron ambos brazos juntos para formar finalmente el brazo robótico de ocho grados de libertad para la asistencia en cirugías de naturaleza estereotáctica.

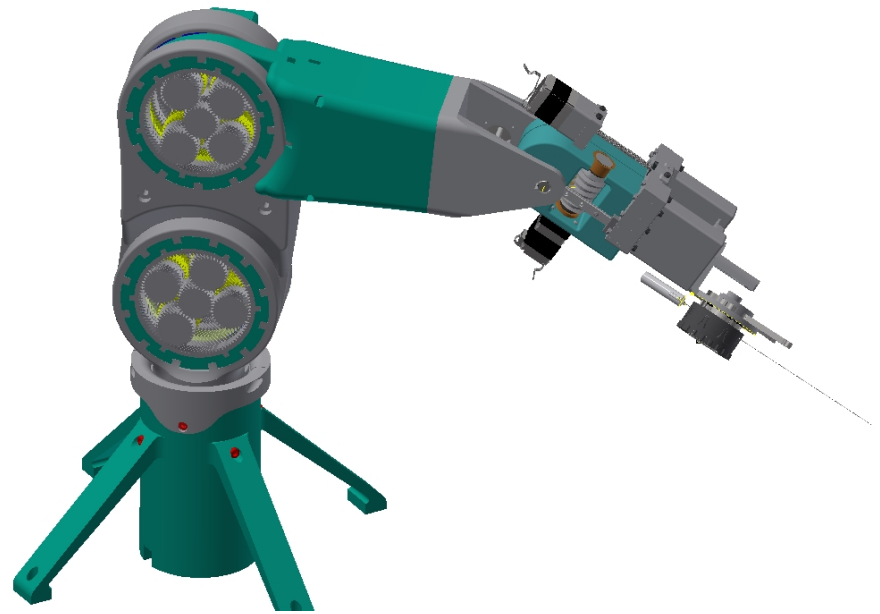


Figura 58: Ensamblaje final del brazo robótico asistencial

Debido a complicaciones por la actual pandemia, no se pudieron conseguir todos los componentes necesarios para armar el prototipo, por lo que fueron rediseñados para su demostración.

13.1. Engranajes del primer grado de libertad

Los engranes del primer grado de libertad fueron rediseñados para poder ser impresos en resina debido a la exactitud de la impresión con este material y a la geometría de los engranes.

Tanto el engrane helicoidal como el eje del mismo se cambiaron a un octágono para asegurar el anclaje del brazo, en el diseño original se utilizaría un eje de metal y cuñas para anclar el sistema.

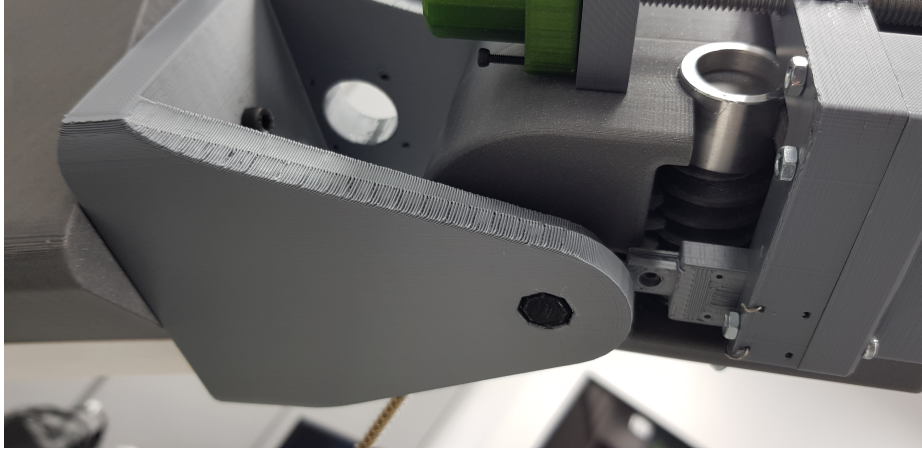


Figura 59: Cambios hechos en el eje y acople entre brazos en el prototipo físico

13.2. Tornillo de bola y deslizador del segundo grado de libertad

Debido a que tampoco se pudo conseguir el tornillo de bola elegido, se decidió utilizar un tornillo sinfín M8 y su respectiva tuerca para simular su funcionamiento. Esto genera un impacto negativo en la fluidez del mecanismo, su velocidad y precisión, pero es suficiente para representar el movimiento.

El acople del sistema lineal se cambió por una ranura en la pieza de movimiento, la cuál lleva dentro la tuerca M8 correspondiente al tornillo.

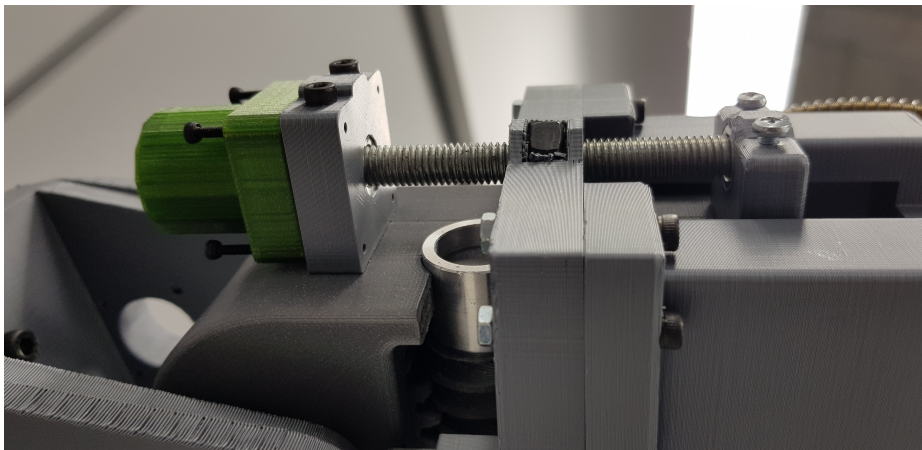


Figura 60: Tornillo M8 puesto en lugar del husillo de bola para el prototipo físico

Los deslizadores y los rieles de guía del movimiento lineal fueron impresos en PLA con una impresora 3D. Debido a que el PLA es diferente a los materiales que se utilizan en los originales, hubo que adaptar las tolerancias y tamaños en las áreas de contacto

para evitar lo mejor posible la fricción entre piezas.

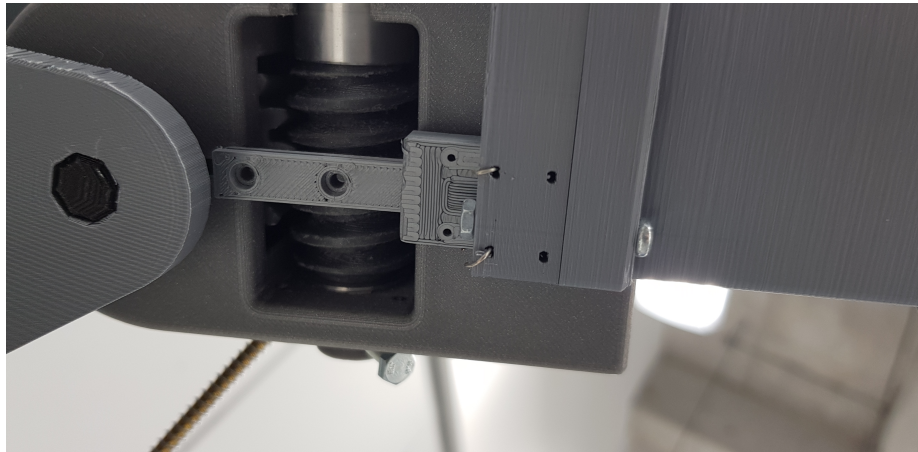


Figura 61: Patines impresos en 3D para el prototipo físico

13.3. Motores Nema 11

Debido a que no se pudo comprar los motores Nema 11 para el proyecto, se utilizó el eje flexible del cuarto grado de libertad para probar los mecanismos diseñados. Un modelo del motor fue impreso en 3D para referenciar y validar que no hay errores de diseño en lo que respecta a los motores.

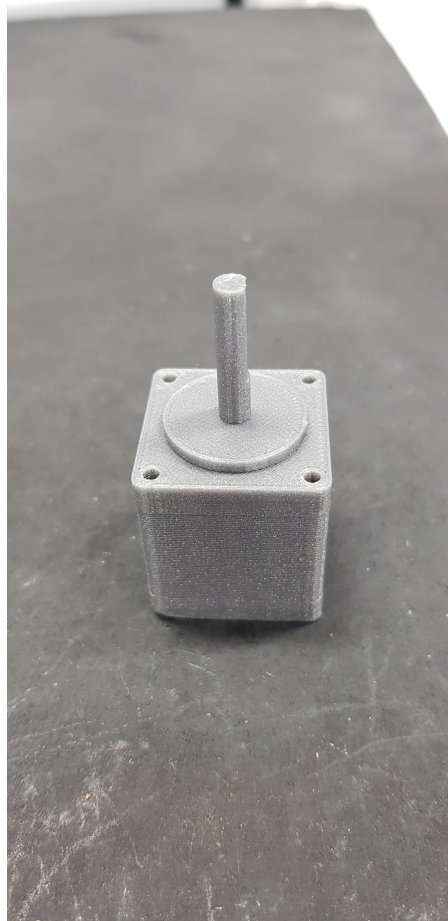


Figura 62: Motor NEMA 11 impreso en PLA

Se posicionó el motor en los lugares donde debe ir para verificar que sí cumple con las tolerancias físicas.

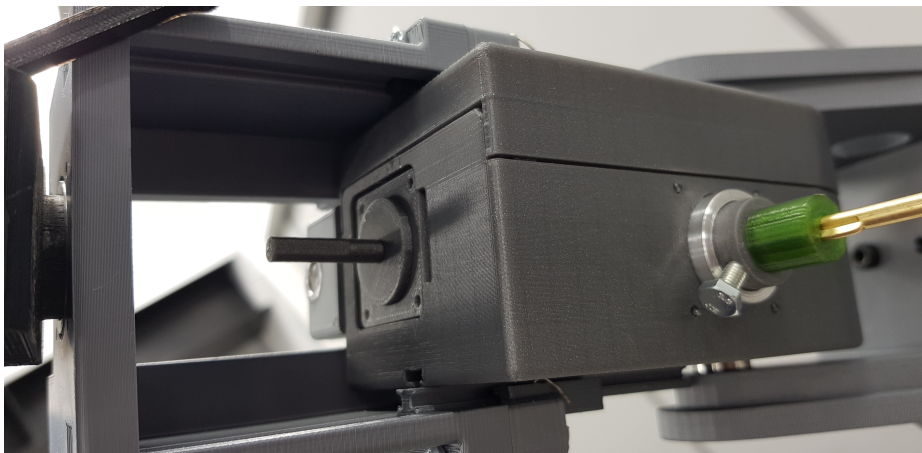


Figura 63: Motor NEMA 11 instalado en su lugar

Construcción del prototipo físico

Una vez completamente diseñado el brazo, se procedió a armar el prototipo físico para realizar las pruebas pertinentes.

14.1. Desensamblaje y reparación del brazo anterior

Para validar el funcionamiento físico del brazo anterior se desarmó y comprobó que las piezas estuvieran en un estado aceptable para su utilización. Las piezas dañadas fueron reimpresas y se reemplazaron los tornillos que se encontraban defectuosos.

Entre las partes que se repararon se encuentran la base, cuyos engranes fueron reimpresos, así como los métodos de sujeción del resto de los motores y los transmisores de potencia del último grado de libertad.

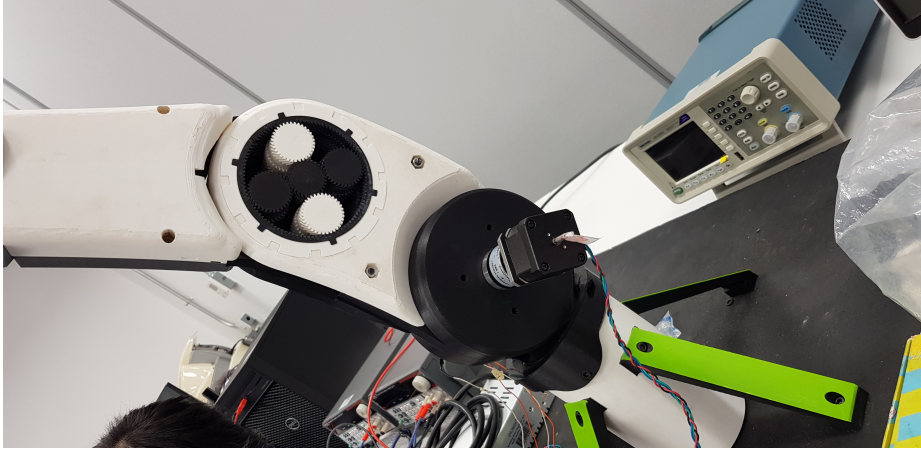


Figura 64: Brazo anterior rearmado

14.2. Impresión y ensamblaje del brazo automático

Se imprimieron los grados de libertad en orden ascendente. Primero se imprimió la carcasa del primer grado de libertad, el engrane helicoidal y el tornillo sinfín que servirá de piñón y el acoplador entre los dos brazos.

Entre los cambios que se hicieron a éstas partes se encuentra una edición para volver el eje de la corona un hexágono para mantener la posición deseada entre el acople y el resto del brazo. (El diseño original utiliza un eje cilíndrico y topes para mantenerse en posición debido a la forma que lleva el engrane original.) Los engranes impresos son una réplica exacta de los elegidos, sin embargo debido a la diferencia entre las propiedades del PLA y el acero inoxidable elegido en la pieza, no se recomienda el uso de las piezas de PLA para el producto final.

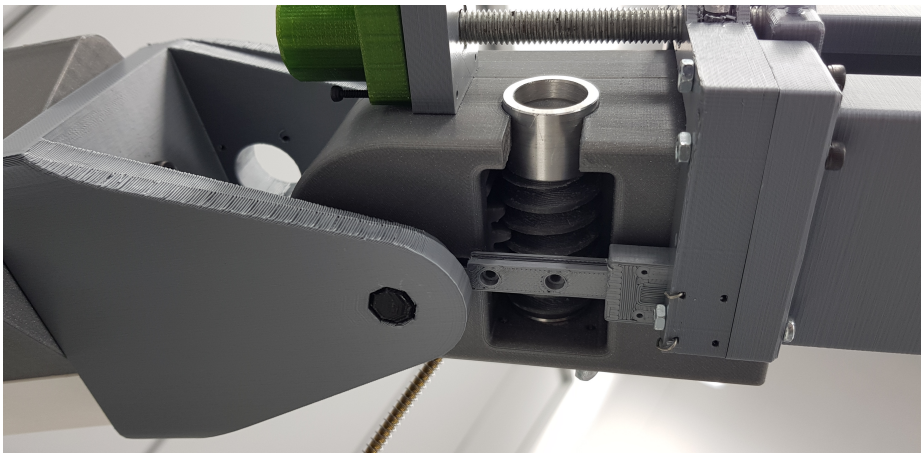


Figura 65: Primer grado de libertad construido

El segundo grado de libertad tuvo que ser fuertemente modificado para utilizar un

tornillo sinfín M8 y su respectiva tuerca en lugar del husillo de bola elegido debido a que no se pudo conseguir. Para ello se modificó el tamaño de los sostenedores del tornillo, el acople entre el tornillo y el motor y la pieza que se mueve linealmente, la cuál llevará la tuerca en lugar del husillo. Este cambio es únicamente demostrativo y no se recomienda utilizar cómo el método para mover el sistema ya que no cuenta ni con la exactitud ni con la capacidad de movimiento del tornillo elegido. El resultado se puede observar en 60

El tercer y cuarto grado fueron hechos enteramente de PLA y no se hizo ninguna modificación al diseño original. Sin embargo varias de las piezas tuvieron que ser reimprimadas debido a problemas de tolerancias entre ellas, necesitándose más o menos juego para un buen acople y funcionamiento correcto.

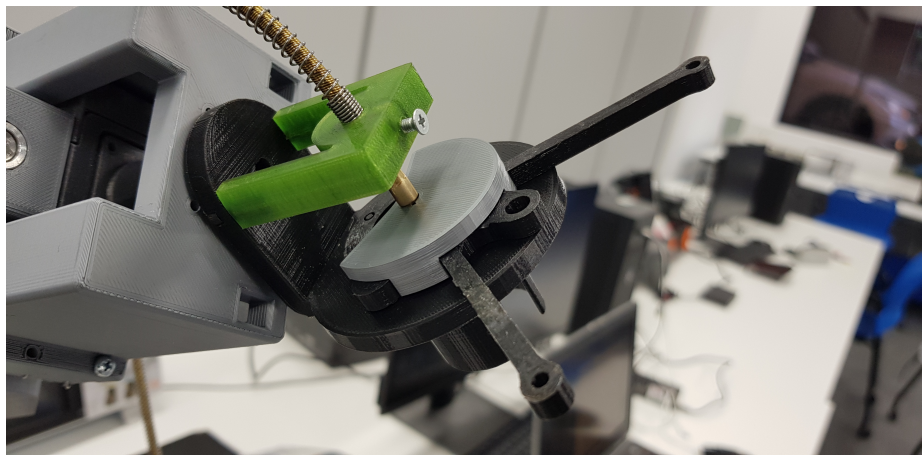


Figura 66: Cuarto grado de libertad construido

Ya teniendo la instalación del nuevo brazo, se procedió a ensamblar las dos partes juntas para realizar pruebas y tener ya un prototipo completo:



Figura 67: Brazo completo



Figura 68: Brazo estirado

- Se diseñó un brazo de cuatro grados de libertad para la asistencia en cirugías estereotácticas de manera automática utilizando el sistema de guía por computadora VarioGuide.
- Se validó y utilizó el diseño del brazo robótico asistencial diseñado en años anteriores como base y transportador del brazo automático.
- Las piezas se diseñaron para soportar las fuerzas ejercidas sobre ellas por los grados de movimiento del brazo robótico.
- Se recrearon las piezas del porta-agujas utilizadas por el brazo original del VarioGuide para su prueba y validación en el concepto realizado.
- Se eligieron los motores adecuados para transmitir la potencia necesaria para el funcionamiento correcto del brazo.

- Disminuir la relación de engranajes en los engranes planetarios del brazo anterior para lograr balancear entre torque necesario y la velocidad óptima del brazo.
- Al momento de rediseñar las piezas, es importante tener en cuenta las medidas originales de los ejes de rotación y movimiento del brazo, ya que es con éstas medidas que trabaja el sistema VarioGuide.
- Se recomienda mandar a hacer las piezas en aluminio una vez se valide el funcionamiento del brazo con Brainlab.
- A pesar de que el brazo automático se encuentra diseñado para no presentar un peligro al paciente o cirujano, los motores utilizados en el brazo antiguo cuentan con ejes que sobresalen de la parte trasera del robot, se recomienda remover o cubrir de alguna manera estos ejes para evitar daños.

-
- [1] J. Gonzalez-Martinez, S. Vadera, J. Mullin, R. Enatsu, A. V. Alexopoulos, R. Patwardhan, W. Bingaman e I. Najm, “Robot-Assisted Stereotactic Laser Ablation in Medically Intractable Epilepsy: Operative Technique,” *Operative Neurosurgery*, vol. 10, n.º 2, págs. 167-173, jun. de 2014, ISSN: 2332-4252. DOI: 10.1227/NEU.0000000000000286. dirección: <https://doi.org/10.1227/NEU.0000000000000286> (visitado 22-03-2021).
- [2] M. Gálvez M, G. Rojas C, J. Cordovez M, D. Ladrón de Guevara, M. Campos P e I. López S, “DISPLASIAS CORTICALES COMO CAUSA DE EPILEPSIA Y SUS REPRESENTACIONES EN LAS IMÁGENES,” *Revista chilena de radiología*, vol. 15, págs. 25-38, 2009, Publisher: Sociedad Chilena de Radiología, ISSN: 0717-9308. DOI: 10.4067/S0717-93082009000400005. dirección: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0717-93082009000400005&lng=es&nrm=iso&tlng=es (visitado 22-03-2021).
- [3] H. J. Marcus, A. Hughes-Hallett, T. P. Cundy, G.-Z. Yang, A. Darzi y D. Nandi, “da Vinci robot-assisted keyhole neurosurgery: a cadaver study on feasibility and safety,” en, *Neurosurgical Review*, vol. 38, n.º 2, págs. 367-371, abr. de 2015, ISSN: 1437-2320. DOI: 10.1007/s10143-014-0602-2. dirección: <https://doi.org/10.1007/s10143-014-0602-2> (visitado 22-03-2021).
- [4] A. Gasparetto, V. Zanotto, A. Rossi y P. Boscariol, “A master-slave haptic system for neurosurgery,” en, *Applied Bionics and Biomechanics*, dirección: https://www.academia.edu/3902002/A_master_slave_haptic_system_for_neurosurgery (visitado 15-03-2021).
- [5] J. H. Nelson, S. L. Brackett, C. O. Oluigbo y S. K. Reddy, “Robotic Stereotactic Assistance (ROSA) for Pediatric Epilepsy: A Single-Center Experience of 23 Consecutive Cases,” en, *Children*, vol. 7, n.º 8, pág. 94, ago. de 2020, Number: 8 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. DOI: 10.3390/children7080094. dirección: <https://www.mdpi.com/2227-9067/7/8/94> (visitado 23-03-2021).
- [6] “Diseño mecánico y fabricación de un brazo robótico de 6 grados de libertad asistencial en Cirugía Estereotáctica del Cerebro,” vol. 1, págs. 1-24, 2020.

- [7] K. Correa-Arana, O. A. Vivas-Albán y J. M. Sabater-Navarro, “Neurosurgery and brain shift: review of the state of the art and main contributions of robotics,” en, *TecnoLógicas*, vol. 20, n.º 40, págs. 125-138, dic. de 2017, Publisher: Instituto Tecnológico Metropolitano - ITM, ISSN: 0123-7799. dirección: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0123-77992017000300010&lng=en&nrm=iso&tlng=en (visitado 15-03-2021).
- [8] P. H. Schurr y W. Merrington, “The Horsley–Clarke stereotaxic apparatus,” *British Journal of Surgery*, vol. 65, n.º 1, págs. 33-36, 1978.
- [9] J. Garcia-Noval, E. Moreno, F. D. Mata, H. S. De Alfaro, C. Fletes, P. Craig y J. Allan, “An epidemiological study of epilepsy and epileptic seizures in two rural Guatemalan communities,” *Annals of Tropical Medicine & Parasitology*, vol. 95, n.º 2, págs. 167-175, 2001.
- [10] M. Hernández Ch., T. Mesa L., R. Escobar H. e I. Rojas R., “Estado epiléptico: Clasificación y pronóstico neurológico,” *Revista chilena de pediatría*, vol. 76, n.º 1, págs. 34-40, ene. de 2005, Publisher: Sociedad Chilena de Pediatría, ISSN: 0370-4106. DOI: 10.4067/S0370-41062005000100004. dirección: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0370-41062005000100004&lng=es&nrm=iso&tlng=es (visitado 15-03-2021).
- [11] “Fisiopatología de la epilepsia,” es, *Revista de la Facultad de Medicina (México)*, vol. 59, n.º 5, págs. 37-41, oct. de 2016, Publisher: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Medicina, ISSN: 0026-1742. dirección: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0026-17422016000500037&lng=es&nrm=iso&tlng=es (visitado 15-03-2021).
- [12] Á. J. L. Gallardo, J. R. M. Smith, C. C. Díaz y D. A. Pérez, “Cirugía extra temporal para resección del foco en epilepsia parcial intratable de causa no tumoral poco frecuente. Informe de 2 casos,” ES, *Mediciego*, vol. 20, n.º S1, 2014, ISSN: 1029-3035. dirección: <https://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumen.cgi?IDARTICULO=50607> (visitado 15-03-2021).
- [13] J. H. Riascos Lobo, M. U. Dearriba Romanidy, G. E. Castillo Lara, G. E. Lara Fernández, L. E. Zarrabeitia Oviedo, J. H. Riascos Lobo, M. U. Dearriba Romanidy, G. E. Castillo Lara, G. E. Lara Fernández y L. E. Zarrabeitia Oviedo, “Epilepsia farmacorresistente. Experiencia quirúrgica en el Instituto de Neurología y Neurocirugía (2012-2018),” *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, vol. 19, n.º 2, abr. de 2020, Publisher: ISCMH, ISSN: 1729-519X. dirección: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1729-519X2020000200009&lng=es&nrm=iso&tlng=es (visitado 15-03-2021).
- [14] E. V. Nilsen, “Managing Equipment and Instruments in the Operating Room,” *AORN Journal*, vol. 81, n.º 2, págs. 349-358, feb. de 2005, Publisher: John Wiley & Sons, Ltd, ISSN: 0001-2092. DOI: 10.1016/S0001-2092(06)60417-1. dirección: https://login.research4life.org/tacsgr1aornjournal_onlinelibrary_wiley_com/doi/full/10.1016/S0001-2092%2806%2960417-1 (visitado 18-05-2021).
- [15] *Antimicrobial Materials for 3D Printing Medical Devices*, en-US, oct. de 2020. dirección: <https://3dheals.com/antimicrobial-materials-for-3d-printing-medical-devices> (visitado 13-05-2021).

- [16] D. S. Corenman, E. L. Strauch, G. J. Dornan, E. Otterstrom y L. Zalepa King, “Navigation accuracy comparing non-covered frame and use of plastic sterile drapes to cover the reference frame in 3D acquisition,” *Journal of Spine Surgery*, vol. 3, n.º 3, págs. 392-397, sep. de 2017, ISSN: 2414-469X. DOI: 10.21037/jss.2017.08.14. dirección: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5637194/> (visitado 18-05-2021).
- [17] D. Delacruz, *PLA vs ABS. La comparativa definitiva 2020*, es-ES, abr. de 2019. dirección: <https://bitfab.io/es/blog/pla-vs-abs/> (visitado 18-05-2021).
- [18] S. Yamini y R. J. Young, “The mechanical properties of epoxy resins,” en, *Journal of Materials Science*, vol. 15, n.º 7, págs. 1823-1831, jul. de 1980, ISSN: 1573-4803. DOI: 10.1007/BF00550603. dirección: <https://doi.org/10.1007/BF00550603> (visitado 18-05-2021).
- [19] A. Kahraman, “Planetary Gear Train Dynamics,” *Journal of Mechanical Design*, vol. 116, n.º 3, págs. 713-720, sep. de 1994, ISSN: 1050-0472. DOI: 10.1115/1.2919441. dirección: <https://doi.org/10.1115/1.2919441> (visitado 04-06-2021).
- [20] J. J. Liou y S. Rakuff, “The development of worm drives,” en, en *International Conference on Gears 2017*, VDI Wissensforum GmbH, ed., VDI Verlag, 2017, págs. 503-516, ISBN: 978-3-18-102294-8. DOI: 10.51202/9783181022948-503. dirección: <https://elibrary.vdi-verlag.de/index.php?doi=10.51202/9783181022948-503> (visitado 04-06-2021).
- [21] H. K. Gumprecht, D. C. Widenka y C. B. Lumenta, “Brain Lab VectorVision Neuro-navigation System: Technology and Clinical Experiences in 131 Cases,” *Neurosurgery*, vol. 44, n.º 1, págs. 97-104, ene. de 1999, ISSN: 0148-396X. DOI: 10.1097/00006123-199901000-00056. dirección: <https://doi.org/10.1097/00006123-199901000-00056> (visitado 04-06-2021).
- [22] F. Ringel, D. Ingerl, S. Ott y B. Meyer, “VARIOGUIDE: A NEW FRAMELESS IMAGE-GUIDED STEREOTACTIC SYSTEM—ACCURACY STUDY AND CLINICAL ASSESSMENT,” *Operative Neurosurgery*, vol. 64, n.º suppl_5, ons365-ons373, mayo de 2009, ISSN: 2332-4252. DOI: 10.1227/01.NEU.0000341532.15867.1C. dirección: <https://doi.org/10.1227/01.NEU.0000341532.15867.1C> (visitado 04-06-2021).
- [23] “Safety of Surgical Robots and IEC 80601-2-77: The First International Standard for Surgical Robots,” en, *Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 16, n.º 8, sep. de 2019, ISSN: 17858860. DOI: 10.12700/APH.16.8.2019.8.10. dirección: http://uni-obuda.hu/journal/Chinzei_95.pdf (visitado 18-05-2021).
- [24] K. Li, “ISO 10993-1 BIOLOGICAL EVALUATION – THE RISK MANAGEMENT OF UNSTUDIED EXTRACTABLES AND LEACHABLES (E&L) IMPURITIES IN MEDICAL DEVICES AND COMBINATION PRODUCTS,” en, pág. 29, 2017.
- [25] T. J. Lisle, B. A. Shaw y R. C. Frazer, “External spur gear root bending stress: A comparison of ISO 6336:2006, AGMA 2101-D04, ANSYS finite element analysis and strain gauge techniques,” en, *Mechanism and Machine Theory*, vol. 111, págs. 1-9, mayo de 2017, ISSN: 0094-114X. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2017.01.006. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094114X16303159> (visitado 24-05-2021).

- [26] S. Mauro, S. Pastorelli y E. Johnston, "Influence of controller parameters on the life of ball screw feed drives," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 7, págs. 1-11, ago. de 2015. DOI: 10.1177/1687814015599728.
- [27] J. Singh, "Linear bearings and units with SKF factory pre-lubrication," en, dirección: https://www.academia.edu/32390427/Linear_bearings_and_units_with_SKF_factory_pre_lubrication (visitado 25-09-2021).
- [28] *Gear Strength and Gear Durability | KHK Gears*, en-US. dirección: https://khkgears.net/new/gear_knowledge/gear_technical_reference/gear-strength-and-gear-durability.html (visitado 08-12-2021).
- [29] D. Patel, "ELEMENTS OF METRIC GEAR TECHNOLOGY," dirección: https://www.academia.edu/23875419/ELEMENTS_OF_METRIC_GEAR_TECHNOLOGY (visitado 06-12-2021).
- [30] C. Amt, "SERIES: NEMA11-AMT112S DESCRIPTION: STEPPER SERVO MOTOR," en, pág. 6,
- [31] W. J. Hang, "Maximum Torque of Combination Threats for Spur Gear based on AGMA and JGMA Standards," *University Tun Hussein Onn, Malaysia*, 2014.
- [32] M. Lin, B. Ravani y S. Velinsky, "Kinematics of the ball screw mechanism," 1994.
- [33] "Standard-Stock Type with Screw Shaft (with Finished Shaft Ends)," en, pág. 22,
- [34] S.-H. Lee, S.-K. Lee y B.-M. Kim, "Study on the manufacturing process of precision linear guide rail through shape rolling and shape drawing," *Journal of mechanical science and technology*, vol. 24, n.º 8, págs. 1647-1653, 2010.
- [35] *drylin® T low-profile guide rail TS-04*. dirección: <https://www.igus.eu/product/730?artNr=TS-04-07> (visitado 08-12-2021).
- [36] *A Guide To Foredom Flex Shaft Tools*, en-GB. dirección: <https://www.cooksongold.com/blog/buying-guide/a-guide-to-foredom-flex-shaft-tools/> (visitado 04-12-2021).
- [37] Z. Lévai, "Structure and analysis of planetary gear trains," en, *Journal of Mechanisms*, vol. 3, n.º 3, págs. 131-148, sep. de 1968, ISSN: 0022-2569. DOI: 10.1016/0022-2569(68)90352-2. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022256968903522> (visitado 04-06-2021).