

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Optimización e implementación de un brazo robótico
asistencial de 4 grados de libertad**

Trabajo de graduación presentado por Mario Andrés Estrada Ortiz para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2023

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



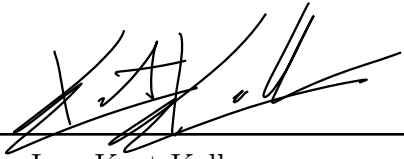
**Optimización e implementación de un brazo robótico
asistencial de 4 grados de libertad**

Trabajo de graduación presentado por Mario Andrés Estrada Ortiz para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

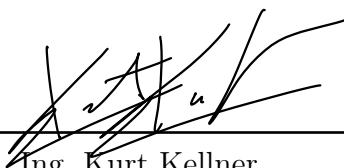
Guatemala,


2023

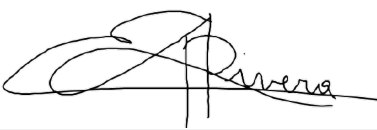
Vo.Bo.:

(f) 
Ing. Kurt Kellner

Tribunal Examinador:

(f) 
Ing. Kurt Kellner

(f) 
MSc. Carlos Esquit

(f) 
Dr. Luis Alberto Rivera Estrada

Fecha de aprobación: Guatemala, 7 de enero de 2023.

Quisiera agradecer este trabajo a toda mi familia, principalmente a mi papá Mario Estrada Aguilar, a mi mamá Paola Ortiz y mi hermana Ana Paula Estrada. Ellos han sido la razón por la que siempre pude seguir adelante y son mi motivación para poder seguir obteniendo logros y hacerlos orgullosos. También les agradezco a mis amigos, especialmente a Marco, Natalia, Helder, Rodrigo, Katharine y Alejandra, por compartir todo este tiempo juntos y hacer de estos 5 años una experiencia muy bonita e inolvidable. Les agradezco a mis amigos de Cobán, que nunca dejaron de apoyarme, aunque no nos viéramos tan seguido y por último le agradezco a Khrist Manzo, que ha sido mi apoyo incondicional cada día, desde el primero hasta el último.

Prefacio	V
Lista de figuras	IX
Lista de cuadros	XI
Resumen	XIII
Abstract	XV
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
2.1. Robot Mako	3
2.2. BrainLab	3
2.3. Primer prototipo del brazo robótico HUMANA	4
2.4. Segundo prototipo del brazo robótico HUMANA	4
3. Justificación	7
4. Objetivos	9
4.1. Objetivo general	9
4.2. Objetivos específicos	9
5. Alcance	11
6. Marco teórico	13
6.1. Engranajes planetarios	13
6.2. Norma ANSI/AGMA 2101-D04	14
6.3. Ácido poliláctico	15
6.4. Encoder	15

7. Evaluación de grados de libertad previos	17
7.1. Primer grado de libertad y base	18
7.2. Segundo y tercer grado de libertad	19
7.3. Cuarto grado de libertad	20
8. Primer grado de libertad y base	23
9. Segundo y tercer grado de libertad	27
10. Cuarto grado de libertad	33
10.1. Primera etapa	34
10.2. Segunda etapa	35
10.3. Tercera etapa	36
10.4. Cuarta etapa y sistema planetario	36
11. Pruebas de repetibilidad	41
11.1. Primer grado de libertad	42
11.2. Segundo y tercer grado de libertad	43
11.3. Cuarto grado de libertad	45
12. Conclusiones	47
13. Recomendaciones	49
14. Bibliografía	51
15. Anexos	53
15.1. Archivos CAD	53
15.2. Programación de motores	53

Lista de figuras

1. Robot quirúrgico Mako	3
2. Utilización del sistema VarioGuide	4
3. Primer prototipo del brazo robótico	5
4. Segundo prototipo del brazo robótico	5
5. Partes del mecanismo básico de engranajes planetarios.	14
6. Brazo robótico original	17
7. Primer grado de libertad original	19
8. Segundo y tercer grado de libertad original	20
9. Base de MDF y GDL1 actual	24
10. Vista inferior de caja reductora en GDL1	26
11. Vista media de caja reductora y ajuste de balines de GDL1	26
12. Peso distribuido en brazo robótico	28
13. Análisis de fuerzas del GDL2 en MDSolids	28
14. Análisis de torque del GDL2 en MDSolids	28
15. Segundo grado de libertad	31
16. Análisis de fuerzas del GDL3 en MDSolids	32
17. Análisis de torque del GDL3 en MDSolids	32
18. Tercer grado de libertad	32
19. Primera etapa del GDL4	34
20. Segunda etapa del GDL4	35
21. Tercera etapa del GDL4	36
22. Cuarta etapa del GDL4	37
23. Sistema planetario y salida del GDL4	37
24. Brazo nuevo ensamblado	39
25. Análisis de video de repetibilidad GDL2	43
26. Datos de video de repetibilidad GDL2	43
27. Análisis de video de repetibilidad GDL4	45

Lista de cuadros

1. Reducción de caja reductora previa GDL1	18
2. Dimensiones de caja reductora previa GDL1	19
3. Reducción de primera etapa de la caja reductora previa GDL4	21
4. Reducción de segunda etapa de la caja reductora previa GDL4	21
5. Reducción de caja reductora GDL1 etapa 1	24
6. Reducción de caja reductora GDL1 etapa 2	25
7. Dimensiones de caja reductora GDL1 etapa 1	25
8. Dimensiones de caja reductora GDL1 etapa 2	25
9. Cálculos de torque de piezas de PLA GDL2	27
10. Cálculos de torque total GDL2	27
11. Reducción de caja reductora GDL2 etapa 1	29
12. Reducción de caja reductora GDL2 etapa 2	30
13. Dimensiones de caja reductora GDL2 etapa 1	30
14. Dimensiones de caja reductora GDL2 etapa 2	30
15. Cálculos de torque total GDL3	31
16. Dimensiones de la primera etapa del GDL4	34
17. Dimensiones de la segunda etapa del GDL4	35
18. Dimensiones de sistema planetario GDL4	38
19. Reducción de sistema planetario GDL4	38
20. Resultados de repetibilidad GDL1	42
21. Resultados de repetibilidad GDL2	44
22. Resultados de repetibilidad GDL3	44
23. Resultados de repetibilidad GDL4	45

Este trabajo de graduación consiste en el diseño mecánico de un brazo electromecánico para asistir en cirugías paliativas, insertando electrodos en focos epilépticos. Este trabajo se realiza debido a la necesidad de una mayor eficiencia en las operaciones cerebrales actuales, debido a que el equipo que se posee las realiza de manera muy lenta. También se busca optimizar las fases previas de este proyecto, teniendo como resultado un brazo robótico útil y completamente funcional.

El brazo mecánico asistencial consistirá de un sistema de control, el cual controle los motores de pasos para que el brazo se posicione automática y precisamente en la posición deseada para que le cirujano pueda laborar insertando los electrodos. Para esto se busca optimizar las velocidades a las que se mueven los eslabones del brazo, haciendo de este un ayudante seguro y eficiente, buscando reducir el tiempo de operación. Se analizaron y rediseñaron los primeros 4 grados de libertad del brazo, con el fin de reparar errores existentes en el brazo actual, como desajustes que provocan que el brazo no se mantenga firme cuando está en funcionamiento, creando nuevas piezas que le permitan tener buena repetibilidad, optimizando la exactitud y eficiencia. Al mismo tiempo se rediseñaron las cajas reductoras implementadas previamente al brazo, esto para hacer que el movimiento sea más rápido y fluido.

This graduation work consists of the mechanical design of an electromechanical arm for assist in palliative surgeries, inserting electrodes in epileptic foci. This work is carried out due to the need for greater efficiency in current brain operations, due to the fact that the equipment that is owned performs them very slowly. It will also seek to optimize the previous phases of this project, resulting in a useful and fully functional robotic arm.

The assistive mechanical arm will consist of a control system in which control the stepper motors so that the arm automatically and precisely positions itself in the desired position so that the surgeon can work inserting the electrodes. For this, it seeks to optimize the speeds at which the links of the arm move, making it a safe and efficient assistant, seeking to reduce the operating time. The first 4 degrees of freedom of the arm will be analyzed and re-designed, in order to repair existing errors in the current arm, such as misalignments that cause the arm not to remain firm when it is in operation, creating new parts that allow it to have Good repeatability, optimizing accuracy and efficiency. At the same time, the gearboxes previously implemented in the arm will be redesigned to make the movement faster and more fluid.

En este trabajo se presenta el rediseño y optimización de los primeros 4 grados de libertad de un brazo robótico asistencial utilizando software de diseño digital y cálculos de momentos y esfuerzos. Se realizaron modificaciones a los sistemas de transmisión de potencia de cada grado de libertad, los cuales en este caso fueron transmisión por engranajes, para obtener un movimiento más fluido y rápido del brazo completo. Para este proceso se evaluaron los sistemas de transmisión de potencia existentes previo al inicio del rediseño, obteniendo velocidades máximas y torques máximos que nos permitieron concluir sobre la eficiencia de estos sistemas y las mejoras que se le pudieron implementar.

Al evaluar cada grado de libertad por separado y obtener puntos de mejora, se diseñaron transmisiones de potencia nuevas, todas siendo cajas reductoras planetarias, realizando modificaciones en las relaciones de reducción y torque, tomando en cuenta las limitaciones de tamaño de los eslabones existentes del brazo y las limitaciones de torque y velocidad de los motores utilizados como fuentes de potencia. Todos los componentes diseñados fueron fabricados con impresión 3D utilizando ácido poliláctico (PLA, por sus siglas en inglés).

Todas las cajas reductoras planetarias fueron diseñadas de manera que estas fueran auto-bloqueantes y que maximizaran la velocidad de rotación de cada grado de libertad, siempre cumpliendo con los torques mínimos requeridos para soportar el peso y las cargas del brazo robótico.

2.1. Robot Mako

El robot Mako de la empresa Stryker es un tipo de robot que se asemeja a lo que se desea lograr en la fase final del proyecto. Este robot consta de un soporte móvil motorizado, dentro del cual se encuentran los sistemas de control, y un brazo robótico. El brazo robótico cuenta con 6 juntas, un sistema de guía y herramientas quirúrgicas para la operación en el efector final. El sistema de este equipo es de lazo cerrado, teniendo retroalimentación en los ángulos de rotación de las juntas, con lo cual realiza cambios de pose sin necesidad de ayuda externa. [\[1\]](#)



Figura 1: Robot quirúrgico Mako

2.2. BrainLab

BrainLab VectorVision es un sistema de neuronavegación, que vincula una sonda manual, rastreado por un sistema de sensor de marcador pasivo a un espacio de imagen de computadora virtual en las imágenes preoperatorias de CT o MR de un paciente. Deste-

llos infrarrojos emitidos por dos cámaras fueron reflejadas por marcadores montados en instrumentos quirúrgicos y en el reposacabezas de Mayfield. Utilizando los datos de ambas cámaras, el software puede calcular la posición tridimensional de una esfera. Por lo tanto intraoperatorio es posible la visualización de la posición de una sonda. [2]

Este sistema de consta de in brazo mecánico de 6 grados de libertad, los cuales se mueven manualmente. El sistema es cerrado, por lo que este recibe retroalimentación de los movimientos realizados por el usuario, los cuales aparecen en una pantalla como se observa en la Figura 2. Este sistema cerrado permite ingresar la posición a la que se desea que el brazo llegue e indicar al usuario las distancias y ángulos faltantes en cada grado de libertad para llegar a esa posición.

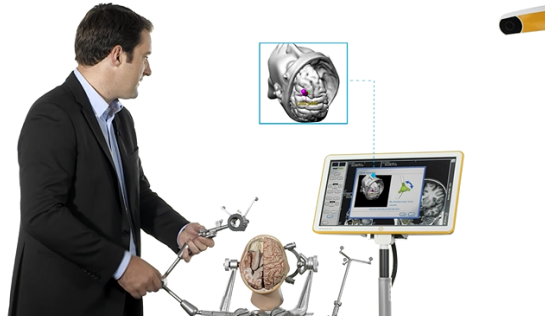


Figura 2: Utilización del sistema VarioGuide

2.3. Primer prototipo del brazo robótico HUMANA

El primer prototipo fue realizado en 2019 por alumnos de la Universidad del Valle de Guatemala. Este prototipo fue creado utilizando piezas de PLA y MDF para su estructura. Este diseño dio información importante en torno al mecanismo de eslabones, juntas y resistencia a la tracción y flexión, pero no ofrecía la seguridad y precisión requerida por la aplicación, por lo que se decidió no utilizar MDF para la estructura del brazo robótico.

2.4. Segundo prototipo del brazo robótico HUMANA

El segundo prototipo fue realizado en 2020 por alumnos de la Universidad del Valle de Guatemala. Este prototipo fue creado en seguimiento a la información obtenida con el primer prototipo del brazo robótico. En esta parte se diseñaron los eslabones del brazo y los engranajes de la caja reductora planetaria utilizando PLA.

Realizando simulaciones de esfuerzos en Autodesk Inventor, se concluyó que el eslabón bajo más esfuerzos y la sección crítica de los eslabones base del brazo robótico fue el eslabón 2. Para la reducción de velocidad del motor stepper en la base utilizaron engranajes rectos planetarios. Para la reducción de velocidad de la junta 3 se utilizaron engranajes helicoidales planetarios.

Se hizo uso de rodamientos para permitir un movimiento libre y sin fricción en el primer

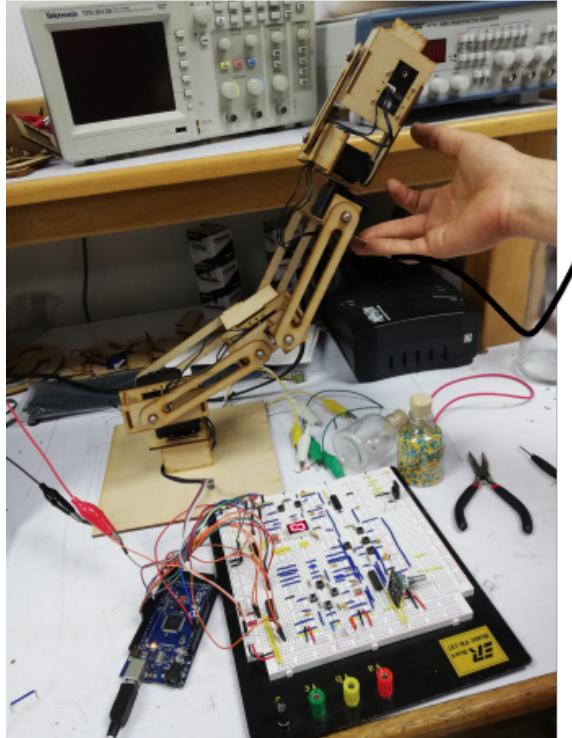


Figura 3: Primer prototipo del brazo robótico

grado de libertad del brazo. Para los grados de libertad 2 y 3 se utilizaron cajas reductoras de engranajes planetarios helicoidales. Para el cuarto grado de libertad se utilizó una caja reductora de engranajes planetarios rectos. Para cada grado de libertad con engranajes planetario se analizaron las capacidades de carga entre los engranajes helicoidales y los engranajes rectos, por lo que se eligieron los tipos de engranajes más aptos para cada caso. Estas cajas se hicieron auto-bloqueantes para asegurar que estos no se muevan por el propio peso del brazo.

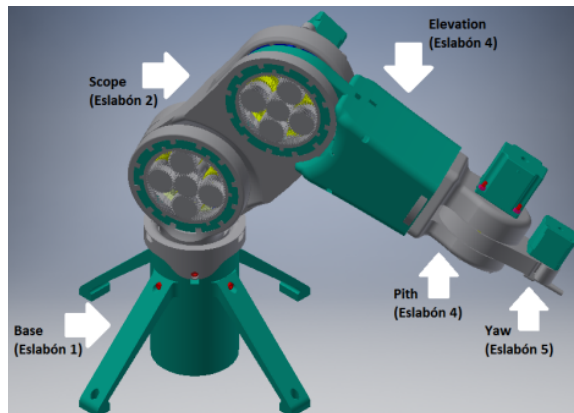


Figura 4: Segundo prototipo del brazo robótico

Existen aproximadamente 325,000 casos reportados de epilepsia en Guatemala, de los cuales el 30 % son pacientes con epilepsia de difícil control. [3] En el Centro de Epilepsia y Neurología Funcional HUMANA, se utilizan equipos estereotácticos para realizar operaciones paliativas, que tiene como objetivo inhibir conexiones cerebrales para evitar la propagación de la crisis en el cuerpo cuando sucede un ataque epiléptico. A pesar de la gran cantidad de casos, en Guatemala no se cuenta con robots quirúrgicos para facilitar estas operaciones, ya que estos robots tienen costos muy elevados, por lo que las operaciones toman mucho tiempo, llegando a durar hasta 8 horas.

En la Universidad del Valle de Guatemala se han hecho prototipos de un brazo robótico quirúrgico para darle solución a este problema. El último prototipo realizado contaba con 8 grados de libertad, intentando asemejarse lo más posible al funcionamiento de los equipos las operaciones paliativas, pero este prototipo aún cuenta con varios aspectos a mejorar antes de poder ser utilizado en una operación real. Las cajas reductoras de engranajes de este prototipo reducían demasiado la velocidad de los movimientos de los primeros eslabones, lo cual resulta ser contraproducente, ya que el objetivo del proyecto es hacer las operaciones en periodo más corto. Al mismo tiempo, el ajuste del eje de rotación inicial no era tan preciso, por lo que se generaban movimientos no deseados que se extendían a lo largo de todo el brazo robótico y pueden resultar perjudiciales para la operación, ya que este eje es el soporte de todo el brazo.

Este proyecto busca corregir estos errores, proveyendo un robot de asistencia quirúrgicas seguro y eficiente, capaz de asistir en operaciones paliativas en tratamiento de la epilepsia.

4.1. Objetivo general

Optimización e implementación de los primeros cuatro grados de libertad del brazo robótico asistencial para el Centro de Epilepsia y Neurología Funcional HUMANA

4.2. Objetivos específicos

- Evaluación y optimización de velocidad de los primeros 4 grados de libertad.
- Diseño e implementación de cajas reductoras de engranajes para lograr un movimiento mas rápido, conservando el sistema auto bloqueante en los grados de libertad 2, 3 y 4.
- Evaluación de exactitud y repetibilidad de los primeros 4 grados de libertad.

Este trabajo de graduación consiste en re-diseñar e implementar los primeros 4 grados de libertad de un prototipo de un brazo robótico asistencial. Todos los grados de libertad del brazo robótico tienen como fuente de potencia motores de pasos, cada uno con características que se adapten a las necesidades de torque de su grado de libertad. El brazo cuenta con una base rotativa con un rango de movilidad de 360° creada utilizando un rodamiento de empuje fabricado y una caja reductora planetaria compuesta.

En cada junta existe una caja planetaria compuesta, la cual permite la reducción de velocidad del motor respectivo y dar la propiedad de auto-bloqueo a cada grado de libertad. Para la fabricación de estas cajas reductoras, se utilizaron softwares como *Inventor* para el diseño de las piezas y *MDSolids 4.0* para cálculos de momento y esfuerzos.

El brazo robótico tendrá una base fabricada con tableros de fibra de densidad media (MDF, por sus siglas en inglés), los cuales proveerán estabilidad cuando el brazo se encuentre en operación. Todas las piezas diseñadas se fabricarán por medio de impresión 3D utilizando como material principal PLA.

6.1. Engranajes planetarios

Un sistema de engranajes planetarios es un mecanismo que se compone de cuatro elementos principales: el engranaje planeta, la corona, los engranajes satélites y el portasatélites. El engranaje planeta se sitúa en el centro del mecanismo, mientras que el engranaje o engranajes satélite (según el número de estos) se colocan alrededor del planeta, girando alrededor de este. Tanto el planeta como los satélites son engranajes de dentado exterior. Los engranajes satélites van acoplados al portasatélites, el cual se encarga de sostenerlos y mantenerlos en su correcta posición dentro del mecanismo. El último elemento que compone el sistema es la corona, esta se trata de un engranaje de dentado interior que se monta de forma concéntrica al planeta y engrana directamente con los satélites, como se puede apreciar en la Figura 5.

Un reductor planetario o reductora de engranajes planetarios es un tipo de transmisión que emplea trenes epicicloidales para la transmisión de potencia. Suelen ser elementos que se acoplan a la salida motores hidráulicos y motores eléctricos para variar la velocidad de giro y las características de par a la salida. Se les denomina reductores debido a que su uso más común se encuentra en el de reducir el régimen de giro del motor al que están acoplados, y como consecuencia aumentar el par a la salida. Los reductores planetarios suelen componerse de un árbol de entrada, un árbol de salida, una carcasa, el tren epicicloidal, un soporte-adaptador para el motor y de los correspondientes elementos auxiliares como rodamientos, circlips, tonillos y arandelas. 4

Para el cálculo de la reducción de un sistema planetario depende de cuál es el elemento fijo. Los elementos fijos pueden ser: El portaplanetas y la corona. Estas reducciones se calculan de la siguiente manera:

$$\text{Portaplanetas fija} : \epsilon = \frac{Z_1}{Z_3}$$

$$\text{Corona fija} : \epsilon = 1 - \frac{Z_1}{Z_3}$$

Siendo Z_1 el número de dientes del sol y Z_3 el número de dientes de la corona. La metodología de diseño de un sistema planetario es definir la geometría del sol, montar los planetas y diseñar la corona. [5]

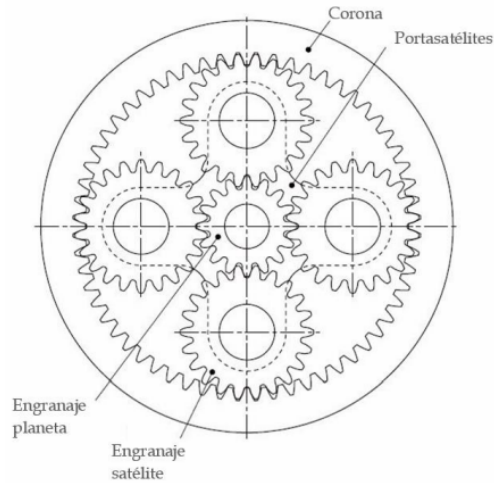


Figura 5: Partes del mecanismo básico de engranajes planetarios.

6.2. Norma ANSI/AGMA 2101-D04

Esta es una norma que rige estándares de diseño para cálculos de capacidad de carga para engranajes rectos y helicoidales. La norma ANSI/AGMA 2101-D04 proporciona un método de cálculo mediante el cual distintas parejas de engranajes pueden ser evaluadas y comparadas de forma teórica. Las fórmulas utilizadas en el proceso de cálculo son aplicables para el cálculo del factor de seguridad frente a fallo por picado superficial en el flanco del diente y frente a fallo por flexión en la base del diente de engranajes de dientes rectos o helicoidales, sean engranajes externos o internos, cuyos ejes de funcionamiento sean paralelos. Las fórmulas evalúan la capacidad de la transmisión según los principales factores que influyen en el picado superficial y en la fractura en la base del diente. [6]

Esta normativa no es aplicable bajo cualquiera de las siguientes condiciones:

- Los dientes están dañados.
- Engranajes rectos con un grado de recubrimiento inferior a 1.0.
- Engranajes rectos o helicoidales con un grado de recubrimiento superior a 2.0.
- Existen interferencias entre la cabeza del diente y la base del diente con la que engrana.
- Dientes puntiagudos.
- No existe reacción.
- El área superior a la zona activa se encuentra debilitada.

- El perfil de la base está dañado o es irregular.
- Cuando la base de los dientes se ha producido por un proceso distinto a la generación (por ejemplo, mediante mecanizado).
- El ángulo de hélice es mayor de 50 grados

6.3. Ácido poliláctico

El PLA (ácido poliláctico) es un termoplástico biodegradable derivado de recursos renovables como el almidón de maíz o la caña de azúcar. Es uno de los bioplásticos más populares, utilizado para muchas aplicaciones que van desde vasos de plástico hasta implantes médicos. El PLA es el material de impresión 3D más usado, se usa para prototipado genérico y series cortas en las que se requiera un buen acabado o precio. [7]

El PLA ofrece una buena resistencia a la tracción y calidad superficial, facilita el trabajo a altas velocidades de impresión, simplifica el uso en entornos domésticos y de oficina y permite la creación de piezas de alta resolución. Existe una amplia gama de opciones de color disponibles. Este tiene una resistencia a la flexión de 103 MPa, modulo de elasticidad a la tracción de 2346.5 MPa y una densidad media de $1.24 \frac{g}{cm^3}$. [8]

6.4. Encoder

Los encoders son componentes que se añaden a un motor de corriente continua para convertir el movimiento mecánico en pulsos digitales que puedan ser interpretados por el sistema de electrónica de control integrado. El principal objetivo de los distintos tipos de encoders es el de transformar información de un formato a otro, con el propósito de estandarización, adecuación de la velocidad o control de la seguridad. [9]

Evaluación de grados de libertad previos

Para la evaluación de los 4 grados de libertad inferiores se realizaron cálculos de reducción de las cajas reductoras de todos los grados y pruebas de funcionamiento para los grados de libertad 1, 2 y 3.



Figura 6: Brazo robótico original

7.1. Primer grado de libertad y base

Para analizar las cajas reductoras se utilizaron las ecuaciones descritas por Vincenzo Vullo [10]. Vullo describe 4 tipos de cajas reductoras planetarias, variando tanto en rangos de reducción de velocidad como en eslabones de entrada y salida. La caja planetaria que estaba siendo utilizada en el primer grado de libertad previamente era una caja de sol como entrada de potencia y porta planetas como salida. La reducción de la caja está dada por la ecuación I en donde Z_1 hace referencia a la cantidad de dientes del engranaje sol y Z_3 de la corona.

$$i = 1 + \frac{Z_3}{Z_1} \quad (1)$$

Utilizando la velocidad máxima que provee el motor en este grado de libertad, se realizaron los cálculos tanto de reducción de velocidad como velocidad angular de salida.

Tipo 1		
Entrada	Salida	Fijo
Sol	Planetas	Corona
$i = \frac{W_1}{W_3} = 1 + \frac{Z_2}{Z_1}$		
Velocidad angular de Sol		60
Número de dientes de Sol		30
Número de dientes de Corona		100
Relación de reducción		4.333333333
Velocidad angular de planetas		13.84615385

Cuadro 1: Reducción de caja reductora previa GDL1

También se hicieron cálculos relacionados a las dimensiones físicas de los engranajes, las ecuaciones utilizadas para estos cálculos fueron dadas por Vullo [10], en donde relaciona directamente estas dimensiones con el módulo de los engranajes.

$$D_p = m * Z \quad (2)$$

$$D_e = D_p + 2m \quad (3)$$

$$D_i = m * (Z - 2.5) \quad (4)$$

$$D_c = \frac{D_{p1} + D_{p2}}{2} \quad (5)$$

Calculadora de dimensiones (en mm)			
Módulo (m)	0.75		
	Sol	Planeta	Corona
Número de dientes (Z)	30	30	90
Diámetro primitivo	22.50	22.50	67.50
Diámetro externo	24.00	24.00	69.00
Diámetro interno	20.63	20.63	65.63
Distancia entre centros de planetas y Sol	22.5		

Cuadro 2: Dimensiones de caja reductora previa GDL1

En el primer grado de libertad se tenía un motor NEMA 23 como fuente de potencia, ensamblado a una caja reductora planetaria con el sol como entrada, corona fija y porta planetas de salida. El eslabón entre el grado de libertad 1 y 2 descansaba directamente sobre el porta planetas y se tenían dos ranuras semicirculares, una en la base y otra en la parte inferior del eslabón, entre los cuales se colocaban balines metálicos de 4.5 milímetros, los cuales trabajaban como un rodamiento de empuje, teniendo como objetivo darles movilidad a los eslabones superiores del brazo y soportar el peso de los grados de libertad superiores.



Figura 7: Primer grado de libertad original

El primer problema que se encontró tanto en la caja reductora como en el soporte fue que todo el peso del brazo tenía como soporte el porta planetas y no sobre los balines metálicos, lo cual provocaba que el brazo se tambaleara cuando se utilizaba, ya que la caja reductora no estaba diseñada como soporte del brazo. Al mismo tiempo esto dejaba inutilizados los balines, por lo que únicamente aparentaban ser funcionales, pero no lo eran. Al evaluar la base se encontró que esta realizaba también movimientos no deseados al momento de utilizar el brazo, ya que esta no estaba fija y no estaba anclada a un objeto sólido.

7.2. Segundo y tercer grado de libertad

Se evaluaron los grados de libertad 2 y 3 realizando pruebas de velocidad y exactitud. Ya que tanto las cajas reductoras como los motores utilizados en ambos grados de libertad eran idénticos, se realizaron pruebas únicamente en el segundo grado de libertad, ya que este es el

que requiere un mayor torque. Se realizaron las pruebas comprobando la velocidad de salida cuando se programaba el motor para entregar la velocidad máxima posible. La velocidad resultante obtenida fue de 0.14 rpm. Para las pruebas de repetibilidad se realizaron varias iteraciones de movimiento, colocando el brazo en la misma posición inicial cada iteración, dejando en funcionamiento el motor la misma cantidad de tiempo y midiendo el ángulo final entre la base y el segundo eslabón.

Los resultados obtenidos demostraron que el segundo grado de libertad tenía una repetibilidad muy precisa, ya que los ángulos resultantes en todas las iteraciones fueron iguales, lo cual se debía a que se tiene una velocidad muy baja. El problema con ambos grados de libertad fue que se tenía una velocidad de movimiento muy baja, lo cual es contraproducente para nuestros objetivos, ya que se busca tener un brazo robótico eficiente y que reduzca lo más posible el tiempo de operación.

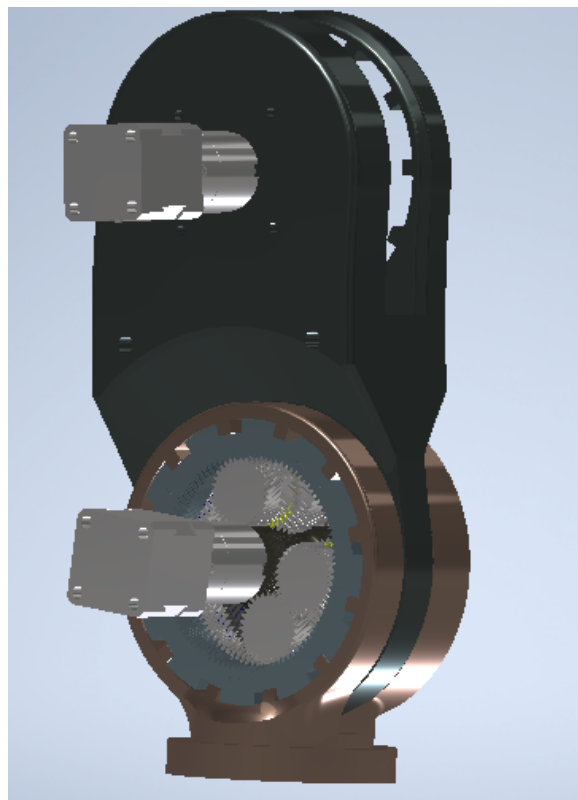


Figura 8: Segundo y tercer grado de libertad original

7.3. Cuarto grado de libertad

En el cuarto grado de libertad se tenía un motor NEMA 23, el cual proporciona un torque de 1.2 N-m y tiene una masa de 0.7 kg. El motor estaba ensamblado a una caja reductora planetaria de dos etapas. Los engranajes de esta caja eran dobles helicoidales y la caja tenía como salida la corona de la segunda etapa. La corona se encontraba encajada a presión dentro de un rodamiento 16811, el cual le permitía rotar sin que se generaran esfuerzos por fricción con la carcasa del eslabón.

Tipo 1		
Entrada	Salida	Fijo
Sol	Planetas	Corona
$i = \frac{W_1}{W_3} = 1 + \frac{Z_2}{Z_1}$		
Velocidad angular de Sol		200
Número de dientes de Sol		22
Número de dientes de Corona		78
Relación de reducción		4.545454545
Velocidad angular de planetas		44

Cuadro 3: Reducción de primera etapa de la caja reductora previa GDL4

Tipo 4		
Entrada	Salida	Fijo
Planetas	Corona	Sol
$i = \frac{W_3}{W_1} = 1 + \frac{Z_1}{Z_2}$		
Velocidad angular de planetas		44
Número de dientes de Sol		28
Número de dientes de Corona		80
Relación de reducción		1.35
Velocidad angular de planetas		32.5925926

Cuadro 4: Reducción de segunda etapa de la caja reductora previa GDL4

El principal problema con este grado de libertad era que debido a que se utilizó un NEMA 23, el peso de este grado genera una exigencia de torque mayor en el motor del GDL2, disminuyendo el factor de seguridad en este grado de libertad. Puesto que la corona se encuentra ensamblada a un rodamiento, el torque real para generar el movimiento de este grado es mucho menor al torque que provee el NEMA 23, por lo que utilizar un motor de estas dimensiones perjudica la seguridad de utilización del brazo.

Primer grado de libertad y base

Para el diseño de nuevas piezas para el brazo robótico, se buscó realizar modificaciones únicamente donde eran necesarias, evitando imprimir nuevamente piezas de gran tamaño para no desperdiciar material ni tiempo, por lo que se diseñó tomando como referencia estas piezas y reutilizándolas.

Para solucionar los problemas descritos en el capítulo 7.1, se inició por diseñar una base estable para el brazo, la cual permitiera al robot funcionar sin presentar oscilaciones y movimientos no deseados, por lo que se fabricó una base circular con piezas de MDF, la cual nos permite anclar las piezas del primer grado de libertad. También se fabricaron dos piezas utilizadas como ajustes que fueron colocadas sobre las planchas de la base de modo que la pieza central del primer grado de libertad se pudiera insertar en ellas, impidiendo que esta se mueva hacia los lados. Para fijar el brazo, se crearon agujeros en la plancha inferior de la base, para poder colocar tuercas para atornillar los soportes laterales del brazo a la base.

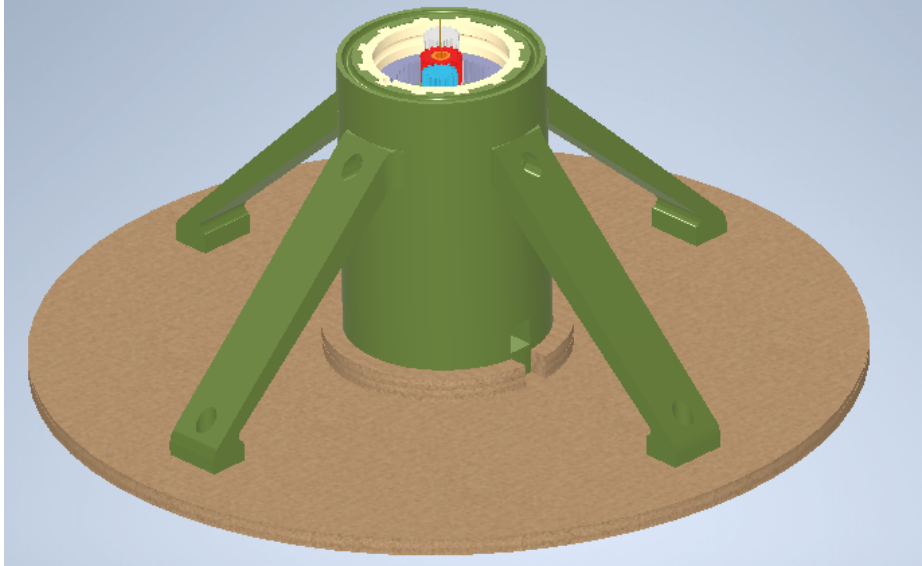


Figura 9: Base de MDF y GDL1 actual

Para solucionar el problema de la caja reductora, se rediseño el soporte de balines que simulaban un rodamiento de empuje y la caja reductora. Se diseñó una caja reductora compuesta de dos etapas, una etapa que utilizaba el engranaje sol como entrada y los planetas como salida y otra con los planetas como entrada y la corona como salida. Para la fabricación de cajas planetarias compuestas es vital tener distancias de centros entre los engranajes sol y planetas idénticos, ya que esto permite alinear el movimiento de ambas etapas. Teniendo establecida la reducción deseada y , y por lo tanto, el número de dientes en los engranajes, se calculó el módulo de la segunda etapa de la caja compuesta con base en el módulo de la primera etapa utilizando la ecuación (6)

$$m_2 = \frac{m_1 * (Z_1 + Z_2)}{Z_3 + Z_4} \quad (6)$$

Tipo 1		
Entrada	Salida	Fijo
Sol	Planetas	Corona
$i = \frac{W_1}{W_3} = 1 + \frac{Z_2}{Z_1}$		
Velocidad angular de Sol		60
Número de dientes de Sol		15
Número de dientes de Corona		51
Relación de reducción		4.4
Velocidad angular de planetas		13.63636364

Cuadro 5: Reducción de caja reductora GDL1 etapa 1

Tipo 4		
Entrada	Salida	Fijo
Planetas	Corona	Sol
$i = \frac{W_3}{W_1} = 1 + \frac{Z_1}{Z_2}$		
Velocidad angular de planetas	13.63	
Número de dientes de Sol	18	
Número de dientes de Corona	48	
Relación de reducción	1.375	
Velocidad angular de planetas	9.91272727	

Cuadro 6: Reducción de caja reductora GDL1 etapa 2

Calculadora de dimensiones (en mm)			
Módulo (m)	1		
	Sol	Planeta	Corona
Número de dientes (Z)	15	18	51
Diámetro primitivo	15.00	18.00	51.00
Diámetro externo	17.00	20.00	53.00
Diámetro interno	12.50	15.50	48.50
Distancia entre centros de planetas y Sol	16.5		

Cuadro 7: Dimensiones de caja reductora GDL1 etapa 1

Calculadora de dimensiones (en mm)			
Módulo (m)	1		
	Sol	Planeta	Corona
Número de dientes (Z)	18	15	48
Diámetro primitivo	18.00	15.00	48.00
Diámetro externo	20.00	17.00	50.00
Diámetro interno	15.50	12.50	45.50
Distancia entre centros de planetas y Sol	16.5		

Cuadro 8: Dimensiones de caja reductora GDL1 etapa 2

Se optó por diseñar una caja con mayor reducción para obtener un mayor torque en la base, ya que se prevé un aumento de peso tanto en los grados de libertad superiores como los del efector final. Utilizando la pieza de la corona de la segunda etapa de la caja reductora, se diseñó un rodamiento de empuje con balines de 4.5 milímetros. Este rodamiento está compuesto por dos piezas, el ajuste de balines fijo colocado sobre la corona de la primera etapa de la caja y la base del segundo grado de libertad. En ambas piezas se crearon ranuras semicirculares en las cuales se posicionaron los balines para soportar el peso del brazo. A comparación de las ranuras del rodamiento previo, que dejaban una separación horizontal con respecto a la ranura inferior y superior, se crearon ranuras que creaban una separación vertical. Este cambio provocaba que todo el peso que recaía sobre la base del grado de

libertad 2, el peso de todos los grados de libertad superiores, recayeran directa y únicamente sobre los balines, ya que la cara inferior de la pieza nunca tiene contacto con otra pieza, generando un esfuerzo cortante en ellos. Este diseño evita que el peso recaiga directamente sobre la caja, por lo cual se tiene una base fija, estable y que permite un movimiento de rotación suave para los grados de libertad superiores.

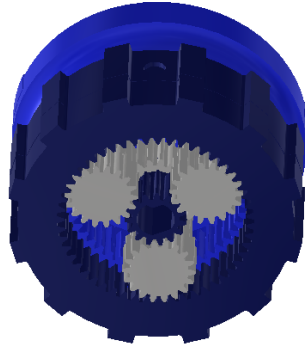


Figura 10: Vista inferior de caja reductora en GDL1

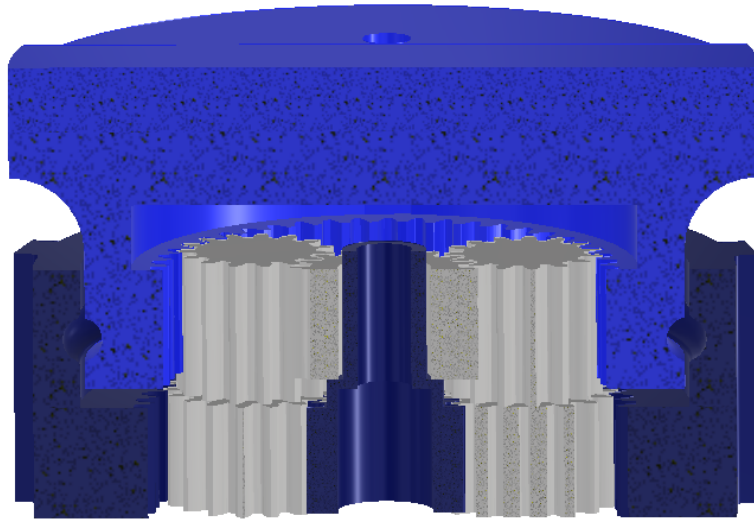


Figura 11: Vista media de caja reductora y ajuste de balines de GDL1

Segundo y tercer grado de libertad

Para el diseño de los grados de libertad 2 y 3 se buscaba aumentar la velocidad de salida de las cajas reductoras, proveyendo el torque que requiere. Para esto se realizó un análisis estático, donde se separó el brazo por partes, teniendo como resultado tres: Grado de libertad 3, grado de libertad 4 y efector final. Se calculó el peso de cada parte tomando en cuenta la cantidad de PLA utilizado, los motores y componentes adicionales (tuercas, tornillos, etc.).

GDL2 - PLA				
	Volumen PLA (m ³)	Peso (N)	Distancia (m)	Torque (N-m)
Eslabón 2	0.000815	9.913986	0.10916	1.082210712
Caja GDL3	0.000437	5.3158428	0.17	0.903693276
Eslabón 3	0.000612	7.4446128	0.2797	2.0822582
Caja GDL4	0.000173	2.1044412	0.335	0.704987802

Cuadro 9: Cálculos de torque de piezas de PLA GDL2

GDL2 - Total				
Pieza	Masa (kg)	Peso (N)	Distancia (m)	Torque (N-m)
Nema 17 GDL3	0.564	5.53284	0.17	0.9405828
Nema 17 GDL4	0.54	5.2974	0.279	1.4779746
Efector Final		24.4269	0.55	13.434795
Total		60.0360228		20.62650239

Cuadro 10: Cálculos de torque total GDL2

Utilizando la fórmula 7 calculamos la distancia a la que se encontraba el centro de masa con referencia a nuestro eje de rotación, el cual en este caso fue el motor Nema 17 del grado

de libertad 2. La distancia del centro de masa obtenida fue de 34.36 cm con respecto al motor.

$$x_{cm} = \frac{\sum x_i m_i}{M} \quad (7)$$

Se utilizaron los datos obtenidos para realizar el análisis en el software MDSolids. En este software se simuló el brazo robótico como si se tratara de una barra empotrada, con una fuerza única, la cual fue el peso del brazo. Este análisis se realizó ya que de esta manera se puede obtener el torque máximo necesario, teniendo en cuenta que al colocar el brazo de manera completamente horizontal se exige a su máximo al motor Nema 17, ya que esta posición es la que requiere más torque, por lo que se analizó el comportamiento del motor en el peor caso.

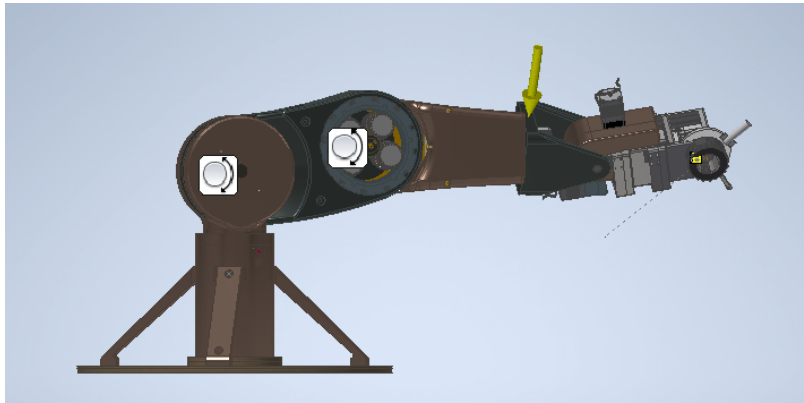


Figura 12: Peso distribuido en brazo robótico

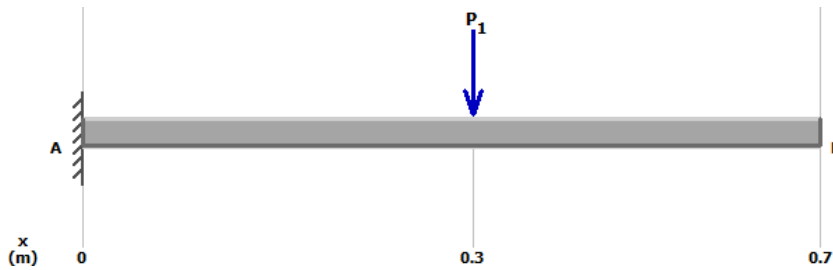


Figura 13: Análisis de fuerzas del GDL2 en MDSolids

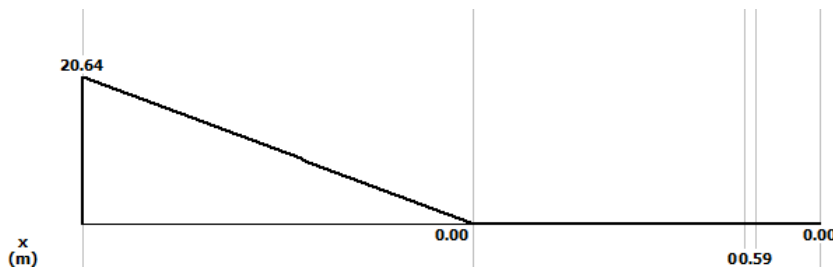


Figura 14: Análisis de torque del GDL2 en MDSolids

Los análisis de torque dieron como resultado un momento máximo de 20.64 N-m en el peor caso como se puede observar en la Figura 14. Según las especificaciones de los motores utilizados en los grados de libertad 2 y 3, el torque máximo que proveen son de 4.8 N-m, por lo cual fue necesario adaptar el reductor planetario para proveer el torque obtenido por los análisis en MDSolids.

Se diseñó una caja planetaria compuesta de dos etapas, donde la primera etapa tiene como entrada el engranaje sol y como salida los planetas y la segunda etapa tiene como entrada los planetas y salida la corona, similar a la caja implementada en el GDL1. Esta caja fue diseñada en arenque, lo cual significa que los engranajes son helicoidales dobles con la mitad de la espiral girando a una dirección y la otra mitad en dirección contraria. Esto se hizo para evitar que cualquier fuerza axial desensamblara la caja. La relación de reducción mínima de la caja planetaria era de 4.3, ya que esta relación proveía los 20.64 N-m. Debido a esto, la caja diseñada tuvo una relación de 4.55, con lo cual se obtiene un factor de seguridad de 1.06. Este factor de seguridad es bajo, ya que apenas cumple con el requerimiento de torque, pero esto se debe a que se busca utilizar todos los grados de libertad a su máxima velocidad posible, ya que ese fue uno de los objetivos principales del re-diseño, por lo que aumentar la relación de reducción aumentaría el factor de seguridad pero sería contraproducente al tomar en cuenta los objetivos y los requerimientos de tamaño del brazo, tomando en cuenta que esto aumentaría significativamente el tamaño de la caja reductora.

Tipo 1		
Entrada	Salida	Fijo
Sol	Planetas	Corona
$i = \frac{W_1}{W_3} = 1 + \frac{Z_2}{Z_1}$		
Velocidad angular de Sol		10
Número de dientes de Sol		40
Número de dientes de Corona		100
Relación de reducción		3.5
Velocidad angular de planetas		2.857142857

Cuadro 11: Reducción de caja reductora GDL2 etapa 1

Tipo 4		
Entrada	Salida	Fijo
Planetas	Corona	Sol
$i = \frac{W_3}{W_1} = 1 + \frac{Z_1}{Z_2}$		
Velocidad angular de planetas		2.85
Número de dientes de Sol		30
Número de dientes de Corona		100
Relación de reducción		1.3
Velocidad angular de planetas		2.19230769

Cuadro 12: Reducción de caja reductora GDL2 etapa 2

Calculadora de dimensiones (en mm)			
Módulo (m)	0.8		
	Sol	Planeta	Corona
Número de dientes (Z)	40	30	100
Diámetro primitivo	32.00	24.00	80.00
Diámetro externo	33.60	25.60	81.60
Diámetro interno	30.00	22.00	78.00
Distancia entre centros de planetas y Sol	28		

Cuadro 13: Dimensiones de caja reductora GDL2 etapa 1

Calculadora de dimensiones (en mm)			
Módulo (m)	0.862		
	Sol	Planeta	Corona
Número de dientes (Z)	30	35	100
Diámetro primitivo	25.86	30.17	86.20
Diámetro externo	27.58	31.89	87.92
Diámetro interno	23.71	28.02	84.05
Distancia entre centros de planetas y Sol	28.015		

Cuadro 14: Dimensiones de caja reductora GDL2 etapa 2

Se aumento la cantidad de planetas en comparación con la caja previa, la cual tenía 4 planetas. Segun Vullo [10], la suma de la cantidad de dientes del sol y la corona debe ser múltiplo de la cantidad de planetas para evitar interferencia. Ya que nuestra caja reductora está compuesta por dos etapas, el número de planetas tiene que ser divisor de ambas sumas. La suma de los dientes de la primera etapa fue de 140 dientes y la suma de la segunda etapa fue de 130 como nos indican los cuadros [11] y [12]. Vullo recomienda utilizar un máximo de 5 planetas para evitar contacto entre ellos, por lo que en nuestro caso, se podían utilizar 2 o 5 planetas. Se optó por utilizar 5 planetas para distribuir mejor la carga de la caja.

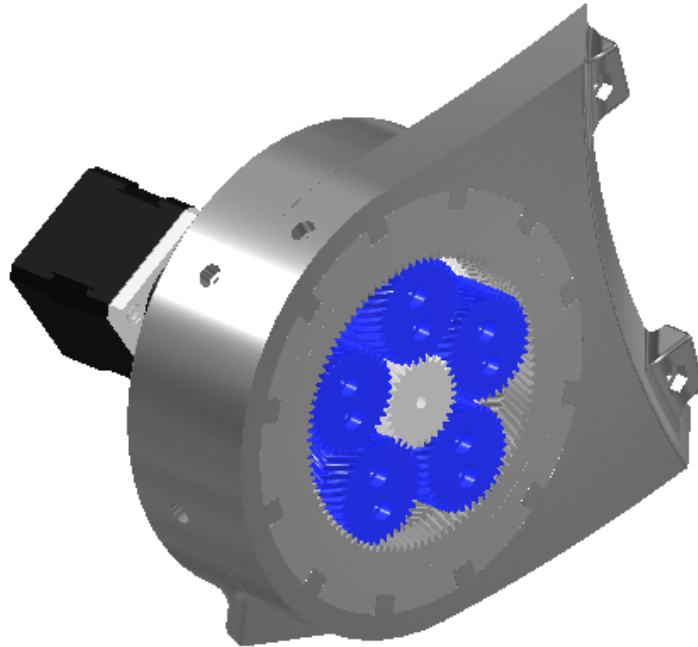


Figura 15: Segundo grado de libertad

Para calcular el torque necesario en la caja reductora del tercer grado de libertad se utilizó el mismo procedimiento que en el segundo, obviando el peso de los motores y eslabones previos a ese punto. Las distancias en este caso fueron respecto al motor de la caja reductora del GDL3.

GDL3			
Pieza	Peso (N)	Distancia (m)	Torque (N-m)
Eslabón 3	7.4446128	0.1097	0.816674024
Caja GDL4	2.1044412	0.165	0.347232798
Nema 23 GDL4	5.2974	0.109	0.5774166
Efactor Final	24.4269	0.38	9.282222
Total	39.273354		11.02354542

Cuadro 15: Cálculos de torque total GDL3

Utilizando nuevamente la fórmula [7](#) se calculó la distancia a la que se encontraba el centro de masa con referencia a nuestro eje de rotación, el cual en este caso fue el motor Nema 17 del grado de libertad 3. La distancia del centro de masa obtenida fue de 28.06 cm con respecto al motor. Se ingresaron los datos obtenidos a MDSolids para generar los análisis de torque.

El análisis de torque obtenido [17](#) nos indica que el tercer grado de libertad tiene un momento máximo de 11.03 N-m. Ya que se utilizó tanto el mismo motor como la misma caja reductora que en el segundo grado de libertad, lo cual nos dio un torque de 21.84 N-m, se calculó un factor de seguridad de 1.98, lo cual admite casi el doble del torque máximo necesario funcionando a máxima velocidad.

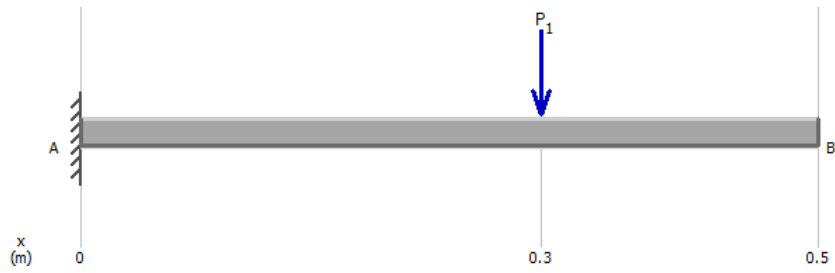


Figura 16: Análisis de fuerzas del GDL3 en MDSolids

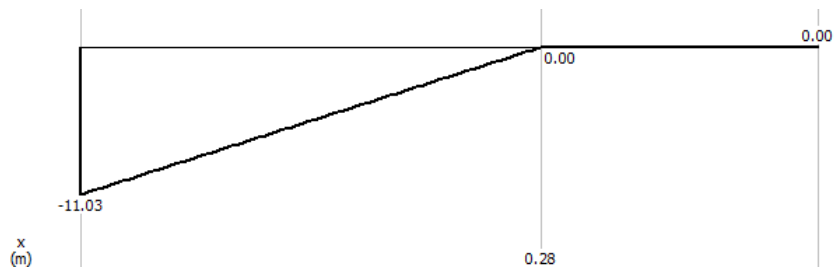


Figura 17: Análisis de torque del GDL3 en MDSolids



Figura 18: Tercer grado de libertad

Cuarto grado de libertad

El diseño del cuarto grado de libertad fue modificado para reducir el torque necesario en el motor del grado de libertad 2 y otorgar un grado de libertad adicional al efector final del brazo robótico. Previamente se utilizaba un motor NEMA 23 y una caja planetaria doble helicoidal, en la cual la salida era la corona, para darle un movimiento rotacional a la parte superior del brazo. Para disminuir el torque del motor del GDL2, se sustituyó el motor NEMA 23 por un NEMA 17, ya que el NEMA 23 proveía un torque mucho mayor al requerido para realizar el movimiento. Esto pudo determinarse ya que la salida de la caja planetaria previa descansaba sobre un rodamiento, lo cual la fuerza del motor únicamente debía vencer la fuerza de fricción entre la corona de PLA y el rodamiento, fuerza que no se acercaba al máximo que provee el motor. Previamente este sistema de engranajes únicamente proveía el movimiento rotacional del GDL4.

En nuestro caso buscamos disminuir el torque requerido a los motores de grados inferiores, por lo que se diseñó un sistema de trenes de engranajes y engranajes planetarios para dar movimiento al GDL4 y al GDL5, colocando los motores de ambos grados de libertad lo más cercanos a los grados inferiores, disminuyendo el brazo de palanca. Este sistema de engranajes consta de 4 etapas. Puesto que este trabajo únicamente abarca los primeros 4 grados de libertad del brazo, se explicará el funcionamiento únicamente de las etapas que estén involucradas con el movimiento del GDL4 y no del GDL5.

10.1. Primera etapa

Para la primera etapa se diseñó un par de engranajes que redujera la velocidad de entrada del motor y transmitiera el movimiento hacia un eje colocado en el centro de la pieza. Esto se hizo también para tener un espacio que permitiera la entrada del otro motor al sistema, como se observa en la Figura 19. Se diseñaron los engranajes para que estos realizaran una reducción de velocidad de 2:1. El módulo y la cantidad de dientes fueron calculadas de manera que tanto el eje del motor y el centro de la pieza coincidieran con el centro del piñón y la corona respectivamente. Para permitir que los ejes utilizados en todo el sistema tuvieran un movimiento suave se utilizaron rodamientos 624RS, los cuales fueron colocados en las bases de cada etapa.

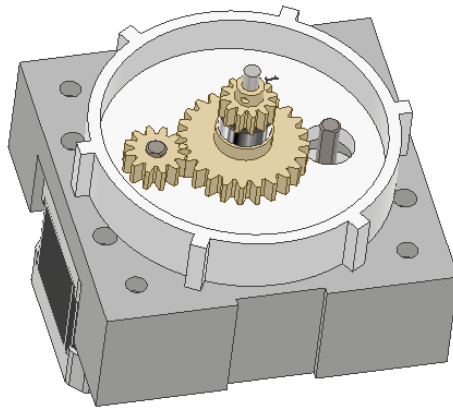


Figura 19: Primera etapa del GDL4

Calculadora de dimensiones (en mm)		
Módulo (m)	1.125	
	Corona	Piñón
Número de dientes (Z)	24	12
Diámetro primitivo	27.00	13.50
Diámetro externo	29.25	15.75
Diámetro interno	24.19	10.69
Distancia entre centros de planetas y Sol	20.25	

Cuadro 16: Dimensiones de la primera etapa del GDL4

10.2. Segunda etapa

En esta etapa se buscaba transmitir la potencia proveniente del eje central de la primera etapa a dos ejes, ambos a la misma distancia del centro, los cuales serían utilizados para los planetas del sistema planetario en cuarta etapa como se observa en la Figura 20. Esto también se hizo para permitir centralizar el movimiento del motor del GDL5, puesto que esto no era posible previamente ya que el centro del sistema estaba siendo utilizado por el eje de la primera etapa. También se buscó reducir la velocidad, por lo que se diseñó un par de engranajes con una reducción de 2:1. Se diseñaron estos engranajes con la misma cantidad de dientes que la primera etapa, pero no con el mismo módulo, puesto que el piñón se encontraba en el centro y las coronas en los extremos. Ya que teníamos un espacio restringido, esto provocaba que las coronas se tocaran con las paredes de la pieza si se utilizaba un módulo de 1.125, por lo que se decidió reducirlo a un módulo de 1, como se puede ver en el Cuadro 17. En esta etapa también se encuentra un acople que permitía transmitir la potencia del segundo motor a la tercera etapa para el movimiento del GDL5.

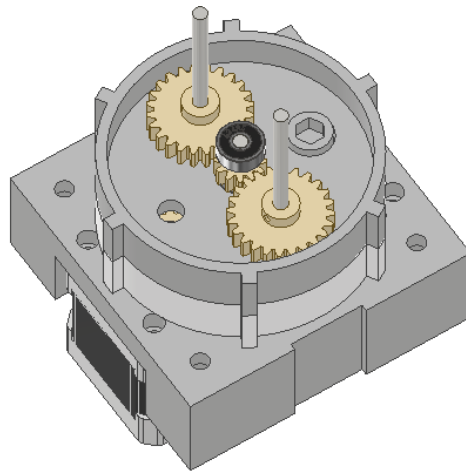


Figura 20: Segunda etapa del GDL4

Calculadora de dimensiones (en mm)		
Módulo (m)	1	
	Corona	Piñón
Número de dientes (Z)	24	12
Diámetro primitivo	24.00	12.00
Diámetro externo	26.00	14.00
Diámetro interno	21.50	9.50
Distancia entre centros de planetas y Sol	18	

Cuadro 17: Dimensiones de la segunda etapa del GDL4

10.3. Tercera etapa

En esta etapa se realiza la transmisión de movimiento para el GDL5. Puesto que los ejes que se utilizan para el movimiento del GDL4 ahora se encuentran en los agujeros laterales de la base y no en el centro, se utilizó un par de engranajes para centralizar el movimiento del segundo motor y transmitir la potencia a un eje que se utiliza en los grados de libertad superiores.

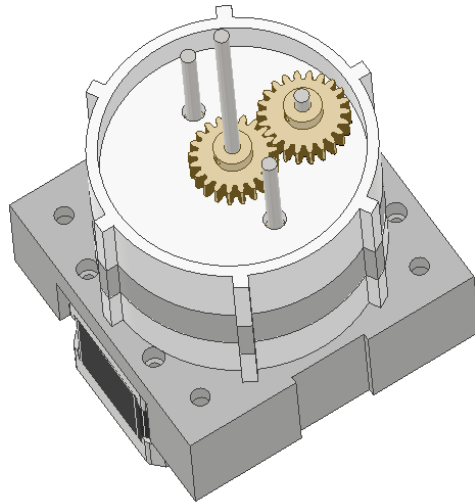


Figura 21: Tercera etapa del GDL4

10.4. Cuarta etapa y sistema planetario

En esta etapa se utiliza un sistema planetario para generar el movimiento de salida del GDL4. En la base de la etapa se colocaron dos rodamientos como soportes para los ejes provenientes de la segunda etapa. Estos fueron colocados lo más cercano posible a los planetas para evitar que los ejes se panderan al momento de ser utilizados por el sistema planetario. En el centro de esta etapa se encuentra el eje proveniente de la tercera etapa, el cual pasa a través de la corona del sistema planetario, llegando a los grados de libertad superiores [22](#).

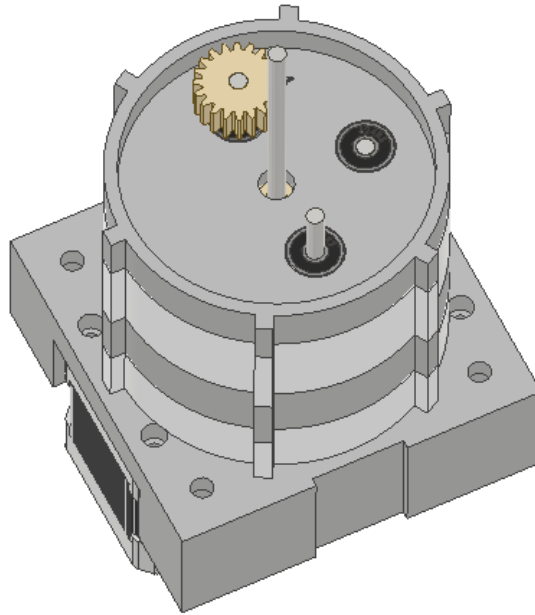


Figura 22: Cuarta etapa del GDL4

El sistema planetario es de una etapa, en la cual la entrada son los planetas y la salida es la corona. La corona se colocó a presión dentro de un rodamiento 61811, esto para evitar los esfuerzos de fricción entre esta y la carcasa. Definiendo la cantidad de dientes basándose en la reducción deseada y la restricción de espacio, se utilizó la ecuación (5) para obtener los diámetros primitivos de ambos engranajes y por lo tanto obteniendo el módulo de estos, puesto que la distancia entre centros ya estaba dada por los ejes provenientes de la segunda etapa.

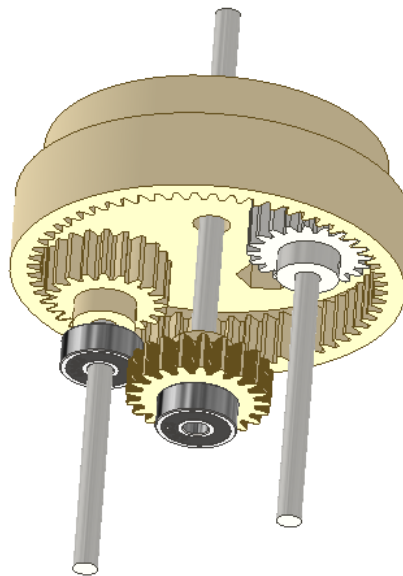


Figura 23: Sistema planetario y salida del GDL4

Calculadora de dimensiones (en mm)			
Módulo (m)	0.9		
	Sol	Planeta	Corona
Número de dientes (Z)	20	20	60
Diámetro primitivo	18.00	18.00	54.00
Diámetro externo	19.80	19.80	55.80
Diámetro interno	15.75	15.75	51.75
Distancia entre centros de planetas y Sol	18		

Cuadro 18: Dimensiones de sistema planetario GDL4

Utilizando la ecuación descrita en al Cuadro 19, se calculó una reducción de velocidad de 1.33:1 en nuestro sistema planetario. Al tomar las reducciones de todas las etapas, se tiene una reducción final de 5.33:1.

Tipo 4		
Entrada	Salida	Fijo
Planetas	Corona	Sol
$i = \frac{W_3}{W_1} = 1 + \frac{Z_1}{Z_2}$		
Velocidad angular de planetas	93.75	
Número de dientes de Sol	20	
Número de dientes de Corona	60	
Relación de reducción	1.33333333	
Velocidad angular de planetas	70.3125	

Cuadro 19: Reducción de sistema planetario GDL4

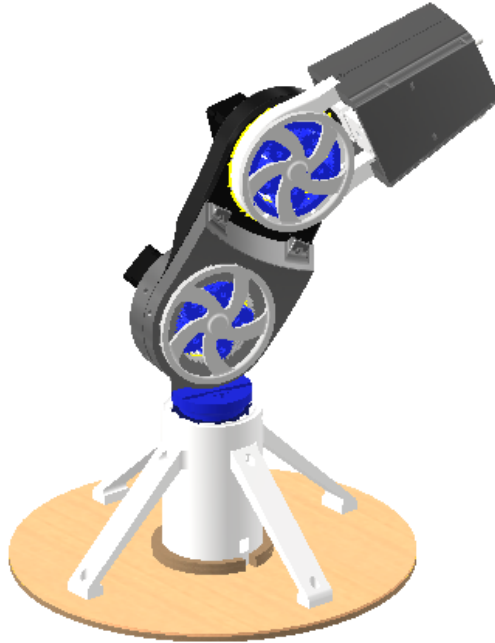


Figura 24: Brazo nuevo ensamblado

Al modificar todos los grados de libertad, se ensamblaron las piezas y se fabricaron, obteniendo un brazo de 4 grados de libertad completamente funcional. Se colocaron tapas a las cajas planetarias del GDL2 Y GDL3, con el propósito de que el ensamblaje entre los eslabones se mantuviera fijo durante el uso del brazo.

Pruebas de repetibilidad

Para realizar las pruebas de repetibilidad, se utilizó el brazo completamente ensamblado, incluyendo los grados de libertad superiores, para analizar el comportamiento con la carga completa del brazo. Se grabaron los grados de libertad en movimiento utilizando una cámara, para analizar los videos posteriormente en el software Tracker. Se realizaron 10 iteraciones por GDL. Con los datos obtenidos del análisis de video, se calculó la desviación estándar y el porcentaje de variación para obtener un porcentaje de repetibilidad, el cual nos indicó que tan preciso es el grado de libertad.

Las ecuaciones utilizadas para realizar este procedimiento fueron obtenidas en el libro de estadística de Martínez [11], el cual nos indica cómo obtener la media aritmética [8], desviación estándar [9] y porcentaje de variación [10]. Puesto que lo que se busca es un valor numérico que nos indique la confiabilidad de nuestros sistemas y el coeficiente de variación es el opuesto a esto, podemos deducir la ecuación para el coeficiente de confiabilidad como la ecuación [11].

$$\bar{x} = \frac{\sum X_i}{N} \quad (8)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{x})^2}{N}} \quad (9)$$

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (10)$$

$$CC = 1 - CV \quad (11)$$

11.1. Primer grado de libertad

Para analizar el primer grado de libertad, se colocaron dos marcas en la base, ambas formando un ángulo de 90 grados con respecto al centro. Se colocó el primer grado alineado con la primera marca y se midió el tiempo que le tomo para llegar a la segunda marca. Como se mencionó anteriormente, se repitió el mismo procedimiento 9 veces más, utilizando la misma posición de cámara, la misma posición del brazo y la misma velocidad en el GDL. Al realizar la 10 iteraciones se realizaron los cálculos con las ecuaciones mencionadas anteriormente, las cuales nos dieron los resultados descritos en la Cuadro 20.

Pruebas de repetibilidad y exactitud - GDL1			
Ángulo medido	90°		
Corrida	Tiempo	Grados por segundo	RPM
1	8.008	11.23876124	1.87312687
2	8.041	11.19263773	1.86543962
3	7.774	11.57705171	1.92950862
4	7.808	11.52663934	1.92110656
5	7.808	11.52663934	1.92110656
6	7.941	11.33358519	1.88893087
7	7.841	11.47812779	1.9130213
8	7.774	11.57705171	1.92950862
9	7.875	11.42857143	1.9047619
10	7.774	11.57705171	1.92950862
Media		11.44561172	1.90760195
Desviación estándar		0.14362023	0.02393671
Porcentaje de variación		1.25%	
Porcentaje de confiabilidad		98.75%	

Cuadro 20: Resultados de repetibilidad GDL1

Con los tiempos obtenidos, calculamos la velocidad angular de cada iteración y se realizaron los cálculos con base en estos. Se tuvo una velocidad angular promedio de 1.9076 ± 0.0239 RPM, con lo cual se calcula un porcentaje de variación de 1.25 % y un porcentaje de confiabilidad de 98.75 %.

11.2. Segundo y tercer grado de libertad

Para el segundo y tercer grado de libertad se empleó el mismo método de análisis, el cual consistía en analizar los videos por un tiempo determinado y obtener la diferencia entre los ángulos iniciales y finales con respecto a un eje determinado por la posición del brazo. Los resultados de los cálculos para ambos grados de libertad están descritos en los cuadros 21 y 22.

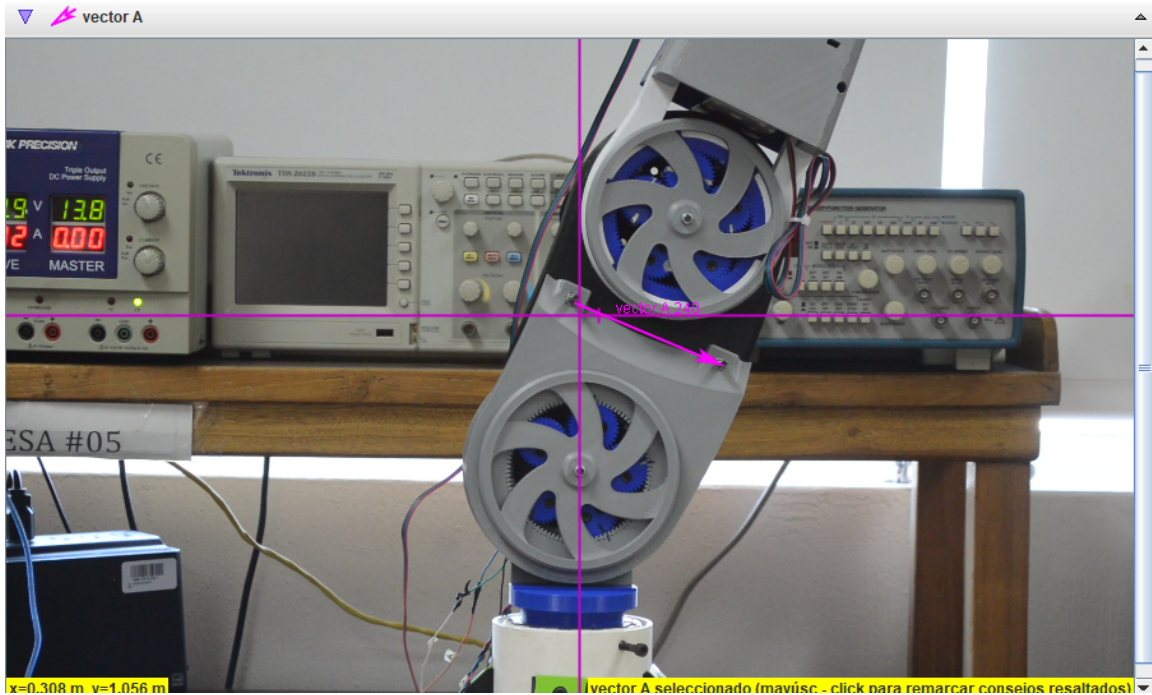


Figura 25: Análisis de video de repetibilidad GDL2

Datos ▼ vector A ▼			
t (s)	x (m)	y (m)	θ
0.000	1.021	0.000	0.0°
10.000	0.929	-0.396	-23.1°

Figura 26: Datos de video de repetibilidad GDL2

La medición de los ángulos se realizó utilizando vectores, los cuales eran dados por dos puntos físicos del brazo, en este caso los tornillos de ensamblaje entre el eslabón 2 y 3. El tiempo de análisis empezaba cuando el vector generado por estos dos puntos, tenía un ángulo de 0 grados con respecto al eje X de la imagen, como se observa en la Figura 25 y terminaba a los 10 segundos, como se observa en la Figura 26. Luego de calcular la diferencia entre los ángulos se ingresaron a una hoja de cálculo para procesar los datos.

Pruebas de repetibilidad y exactitud - GDL2			
Tiempo medido	10		
Corrida	Ángulo	Grados por segundo	RPM
1	-23.1	-2.31	-0.385
2	-23.9	-2.39	-0.39833333
3	-23.9	-2.39	-0.39833333
4	-23.3	-2.33	-0.38833333
5	-23.9	-2.39	-0.39833333
6	-23.5	-2.35	-0.39166667
7	-23.5	-2.35	-0.39166667
8	-23.9	-2.39	-0.39833333
9	-23.8	-2.38	-0.39666667
10	-22.9	-2.29	-0.38166667
Media		-2.357	-0.39283333
Desviación estándar		0.037133393	0.0061889
Porcentaje de variación		1.58%	
Porcentaje de confiabilidad		98.424548443882500%	

Cuadro 21: Resultados de repetibilidad GDL2

Pruebas de repetibilidad y exactitud - GDL3			
Tiempo medido	10		
Corrida	Ángulo	Grados por segundo	RPM
1	22.2	2.22	0.37
2	22.3	2.23	0.37166667
3	22.4	2.24	0.37333333
4	22.3	2.23	0.37166667
5	22.3	2.23	0.37166667
6	22.1	2.21	0.36833333
7	22.2	2.22	0.37
8	22.2	2.22	0.37
9	22.3	2.23	0.37166667
10	22	2.2	0.36666667
Media		2.223	0.3705
Desviación estándar		0.011595018	0.0019325
Porcentaje de variación		0.52%	
Porcentaje de confiabilidad		99.478406743711900%	

Cuadro 22: Resultados de repetibilidad GDL3

En el segundo grado de libertad se calculó una velocidad angular media de 0.3928 ± 0.0062 RPM, con un porcentaje de variación de 1.58 % y un porcentaje de confiabilidad de 98.42 %. Para el tercer grado se calculó una velocidad angular media de 0.3705 ± 0.0019 RPM, un porcentaje de variación de 0.52 % y un porcentaje de confiabilidad de 99.48 %. Aunque todos los grados de libertad tengan un porcentaje de confiabilidad elevado, el tercer grado de libertad es que tiene el mayor porcentaje, esto se le atribuye a que este rota a una velocidad angular más baja comparado con el GDL1 y GDL4. Al mismo tiempo este utiliza menos torque que el GDL2, lo cual permite a la caja reductora trabajar con mayor precisión.

11.3. Cuarto grado de libertad

Para analizar el cuarto grado de libertad se utilizó un proceso similar a los grado de libertad anteriores, con la diferencia de que los vectores utilizados para obtener los ángulos estaban dados por la línea central del quinto eslabón del brazo, como se observa en la Figura 27.

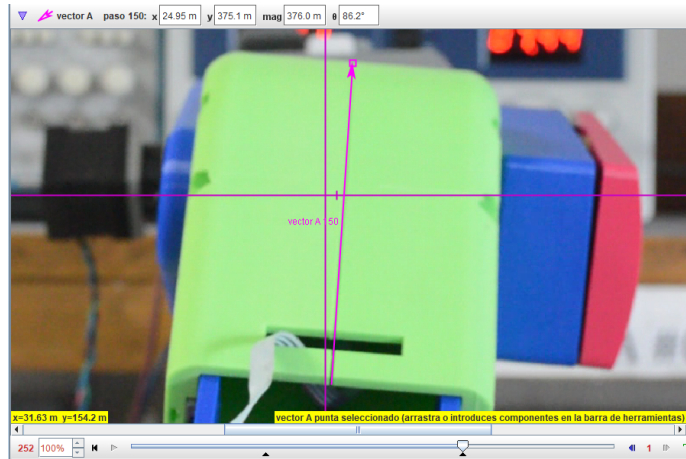


Figura 27: Análisis de video de repetibilidad GDL4

Pruebas de repetibilidad y exactitud - GDL4			
Tiempo medido	5		
Corrida	Ángulo	Grados por segundo	RPM
1	182.7	36.54	6.09
2	175.3	35.06	5.84333333
3	175.9	35.18	5.86333333
4	182.1	36.42	6.07
5	184.8	36.96	6.16
6	184.6	36.92	6.15333333
7	185.3	37.06	6.17666667
8	184.6	36.92	6.15333333
9	185.7	37.14	6.19
10	184.2	36.84	6.14
Media		36.504	6.084
Desviación estándar		0.762090692	0.12701512
Porcentaje de variación		2.09%	
Porcentaje de confiabilidad		97.91%	

Cuadro 23: Resultados de repetibilidad GDL4

Para este grado de libertad el tiempo utilizado fue de 5 segundos por iteración. Se calculó una velocidad angular media de 6.084 ± 0.127 RPM, con un porcentaje de variación de 2.09% y un porcentaje de confiabilidad de 97.91%.

- Se diseñaron sistemas de reducción planetarios optimizados, los cuales fueron auto-bloqueantes, permitiendo una movilidad fluida del brazo, trabajando a una velocidad mayor a las iteraciones previas y cumpliendo con los requerimientos de tamaño y torque.
- Se diseñó un sistema de engranajes rectos que fue implementado junto a un rodamiento de empuje, el cual permitió tener una base fija, que evitara movimientos indeseados en operación y que soporta el peso del brazo completo, dando 360° de movimiento.
- La implementación y optimización de las cajas reductoras de los grados de libertad 2 y 3 mostraron un aumento de velocidad de al menos 2.7 veces mayor comparado con las cajas anteriores.
- Se obtuvo un mínimo de 97% de confiabilidad en los resultados de las pruebas de repetibilidad realizadas a todos los grados de libertad, demostrando que el brazo robótico y sus sistemas de transmisión son precisos y confiables, cumpliendo con los requerimientos de diseño.

CAPÍTULO 13

Recomendaciones

- Realizar revisiones de torque en los grados de libertad 2 y 3 al momento de realizar modificaciones en grados de libertad superiores, para asegurar de que cumplan con el torque mínimo requerido.
- Al momento de utilizar el brazo en un caso real, asegurarse de que los tornillos que aseguran el ajuste de balines estén colocados, ya que, aunque estos no son esenciales en su uso, evita pequeñas oscilaciones en la base.
- Para utilizar el brazo a su máxima velocidad, utilizar un código que permita disminuir el tiempo entre paso del motor a su mínimo.

-
- [1] Stryker, *Mako, Robotic-Arm Assisted Surgery*, 2020. dirección: <https://www.stryker.com/us/en/portfolios/orthopaedics/joint-replacement/mako-robotic-arm-assisted-surgery.html>.
- [2] H. G. D. W. C. Lumenta, “O-17-250 - Neuronavigation with the Brainlab Vector-Vision,” *Clinical Neurology and Neurosurgery 1997-jul vol. 99 iss. supp-S1*, vol. 99, supp-S1 jul. de 1997. DOI: [10.1016/s0303-8467\(97\)81761-1](https://doi.org/10.1016/s0303-8467(97)81761-1). dirección: libgen.li/file.php?md5=a0c4d29e35358228f583b7d31db584ba.
- [3] C. de Epilepsia y Neurología Funcional HUMANA, *Epilepsia - HUMANA*, 2021. dirección: <https://humanagt.org/epilepsia/>.
- [4] C. Jeacock-Cana, “Aplicación de ingeniería inversa para el estudio, diseño y comprobación de una reductora de engranajes planetarios,” *Universitat Politècnica de València*, vol. 1, 1 oct. de 2019. dirección: <http://hdl.handle.net/10251/129792>.
- [5] R. Lacasa, “DISEÑO DE UNA TRANSMISION PLANETARIA PARA UN VEHICULO DE FORMULA SAE,” Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales Universidad Politécnica de Madrid, 2019, págs. 5-16.
- [6] J. M. R. González, “CÁLCULO Y DISEÑO DE ENGRANAJES CONFORME A LA NORMA ANSI/AGMA 2101-D04,” en *PROYECTO FIN DE CARRERA*, Universidad Carlos III de Madrid, 2015, págs. 1-63.
- [7] bitfad, *PLA vs ABS. La comparativa definitiva 2020*, 2020. dirección: <https://bitfab.io/es/blog/pla-vs-abs/>.
- [8] Ultimaker, “Ficha de datos técnicos PLA,” Ultimaker, 2017, págs. 1-3.
- [9] C. L. de reductores, *Tipos de encoders y aplicaciones en motores*, 2020. dirección: <https://clr.es/blog/es/tipos-de-encoders-aplicaciones-motores/>.
- [10] V. Vullo, “Gear Trains and Planetary Gears,” 2020, págs. 695-772. DOI: [978-3-030-36502-8_13](https://doi.org/10.1016/j.mech.2020.08.013).
- [11] C. Martínez Bencardino, *Estadística y muestreo*, 13.^a ed. Ecoe Ediciones, 2012, ISBN: 9781449278496; 1449278493. dirección: libgen.li/file.php?md5=f90558af36a45c55fa8ce02562c2b

15.1. Archivos CAD

Link: <https://drive.google.com/drive/folders/1D1911xTDcSBmhMt8ITvODjqP93Bz8A4V>

15.2. Programación de motores

Link: <https://drive.google.com/drive/folders/1VV3QXJPM4KqV9FNpuc9LZT9zaWcjMmoj>

