

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

PROYECTO ELECTRÓNICO  
SEMESTRE 2024-2

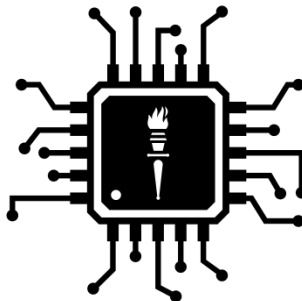
---

Informe final

**Diseño, implementación y caracterización de un actuador eléctrico propioceptivo para uso en robots de alta dinámica**

---

Estudiante(s): Bastián Nicolás Inostroza Sanzana  
Profesor guía: *José Rubén Espinoza Castro*



**Ingeniería Civil Electrónica**  
**Universidad de Concepción**

Fecha de entrega: 5 de diciembre de 2024

# Contenidos

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| <b>1</b>   | <b>Introducción .....</b>                  | <b>3</b>  |
| <b>2</b>   | <b>Diseño Conceptual.....</b>              | <b>4</b>  |
| <b>2.1</b> | <b>Requisitos de diseño .....</b>          | <b>4</b>  |
| <b>2.3</b> | <b>Materiales preliminares.....</b>        | <b>4</b>  |
| <b>2.4</b> | <b>Engranaje planetario.....</b>           | <b>6</b>  |
| <b>3</b>   | <b>Diseño en Detalle .....</b>             | <b>10</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Diseño mecánico en Fusion 360 .....</b> | <b>10</b> |
| <b>4</b>   | <b>Implementación.....</b>                 | <b>11</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Pruebas experimentales .....</b>        | <b>11</b> |
| <b>4.2</b> | <b>Caracterización .....</b>               | <b>13</b> |
| <b>4.3</b> | <b>Posibles mejoras .....</b>              | <b>15</b> |
| <b>5</b>   | <b>Conclusiones .....</b>                  | <b>16</b> |

# 1 Introducción

En este último tiempo, el avance de los robots y la inteligencia artificial han sorprendido hasta su público más fanático con grandes innovaciones en temas de programación, hardware, sistemas de control, sensores o lo que se tratará en este documento, sus actuadores eléctricos.

En simples palabras un actuador dentro del entorno robótico ayuda a controlar el movimiento y a crear acciones precisas en los robots. Son básicamente la unión entre distintos enlaces mecánicos para el movimiento, analógicamente a un ser vivo, serían las **articulaciones** de esté, las que precisamente les dan los grados de libertad.

Dentro de los tipos de actuadores robóticos más comunes se encuentran los de tipo **hidráulicos**, los cuales transforman la energía de un fluido en un trabajo mecánico por lo tanto tienden a tener una alta densidad de fuerza y alta robustez a los impactos, ya que las cargas de impacto se distribuyen sobre la gran superficie de los canales hidráulicos, en lugar de, por ejemplo, varios dientes de engranajes pequeños. Luego están los **actuadores elásticos en serie (SEA)** cuyo funcionamiento es tomar un motor eléctrico convencional de alto engranaje y agregar un resorte y sensores de desplazamiento de resorte en la salida. El torque de torsión en la articulación se puede medir en la salida midiendo la deflexión del resorte y, de manera equivalente, el torque de torsión de salida se puede controlar controlando la deflexión del resorte. Finalmente, dentro de los actuadores que han cobrado mayor popularidad en este último tiempo, son los actuadores **eléctricos propioceptivos**, donde se puede lograr simultáneamente un alto torque, velocidad, robustez a los impactos externos y un control de posición bastante efectivo, muy usado en robots con patas como los de la serie Cheetah creados por el MIT o los robots Cassie de la empresa Agility Robotics. Además de las buenas características de rendimiento, también son relativamente simples en comparación con otras técnicas de actuación, tanto en términos de diseño mecánico como de control. Cada actuador utiliza normalmente un motor **DC Brushless** que requiere solo un sensor de posición (en el rotor del motor eléctrico). El control de torque se logra mediante el control de corriente del motor y el control de posición se logra usando un pequeño imán radial, el cual codifica la posición angular del eje de salida. Estos actuadores, cuando accionan patas ligeras de baja inercia, permiten un control propioceptivo rápido de las fuerzas de reacción del suelo. Si bien el rendimiento de estos actuadores es excepcional, también son caros, ya que se diseñan sin tener en cuenta el costo y cada componente es personalizado y se fabrica en pequeñas cantidades.

Este informe describe el desarrollo de un actuador modular de alto rendimiento y bajo costo, inspirado en los actuadores del Mini Cheetah del MIT, diseñado para robots con patas y alta dinámica. Los robots con patas presentan desafíos en la actuación debido a las múltiples y a veces contradictorias demandas de rendimiento, como el torque específico, que es crucial para que el robot pueda soportar su propio peso.

Además, la alta velocidad del actuador es esencial para movimientos rápidos, recuperación de perturbaciones y maniobras explosivas como saltos. También es importante la alta capacidad de aceleración, ya que, sin un torque adecuado frente a la inercia, gran parte del esfuerzo del actuador se destinaría a mover sus propios componentes en lugar de al robot.

Cumplir con estas exigencias de manera individual puede ser sencillo, pero lograr un equilibrio entre todas ellas simultáneamente es un reto importante en el diseño de estos sistemas.

## 2 Diseño Conceptual

Como se mencionó anteriormente, el objetivo de este informe es documentar el diseño y desarrollo de un actuador económico, fácil de implementar, de alto torque y alta velocidad. Para ello se dará a conocer en esta sección tanto los cálculos teóricos de transmisión, como los requisitos mínimos de diseño en lo práctico (materiales) y en el rendimiento. Cabe destacar que se simplificarán ciertos cálculos mecánicos propios de esta área como el análisis de elementos finitos, esfuerzos mecánicos, estimaciones de pérdidas por cargas, debido a la limitación de conocimiento propio de la electrónica.

### 2.1 Requisitos de diseño

Debido a que este actuador será utilizado para el desarrollo de un robot bípedo dentro del Departamento de Ingeniería Eléctrica (DIE), no solo se busca reducir lo más posible su peso y tamaño, si no que además, por las limitaciones propias del diseño del robot, el actuador debe ser capaz de levantar de manera eficiente el peso completo del robot más un 10% extra de peso, considerando que el robot en un futuro tendrá aplicaciones que requieran un movimiento explosivo en pocos instantes de tiempo, como por ejemplo el impulsar su cuerpo para subir una escalera.

Aunque no se ha definido a ciencia cierta las especificaciones oficiales del robot bípedo, se proyecta una masa entre los 5 a 7 [kg] con una altura de 40 [cm] aproximadamente desde el piso hasta la cadera. En base al conocimiento previo, se pueden proyectar los requisitos ideales del actuador en la siguiente tabla.

| Parámetros              | Valor ideal    |
|-------------------------|----------------|
| Masa                    | $< 700 [g]$    |
| Torque máx.             | $\geq 23 [Nm]$ |
| Corriente a torque máx. | $\leq 22 [A]$  |
| Torque continuo         | $\geq 12 [Nm]$ |
| Corriente continua      | $\leq 7 [A]$   |

*Figura 1: Tabla de parámetros objetivos del actuador*

Observando estos parámetros y recordando las condiciones iniciales del robot, se orientará el diseño hacia la reducción de masa, ya que al disminuir esta, el actuador requerirá menos corriente realizando el mismo torque.

### 2.3 Materiales preliminares

Como se mencionó en la sección anterior, los actuadores eléctricos propioceptivos comúnmente se implementan utilizando motores DC Brushless, ya que estos ofrecen una buena relación potencia-peso, cualidad sumamente importante para el diseño de cualquier robot que requiera poca inercia y alta respuesta dinámica, además al ser sin escobillas tienen menos fricción interna y eso conlleva a un menor mantenimiento. Siguiendo este concepto, se utilizará un motor DC Brushless de la marca *Eaglepower* utilizado en drones de agricultura, los cuales necesitan alta potencia mecánica y buena respuesta dinámica, características necesarias también para nuestro actuador robótico. Este modelo

de motor, a diferencia de algunos motores Brushless, este cuenta con su rotor en la carcasa y esta última tiene incorporado un eje, como se muestra en la figura 2.

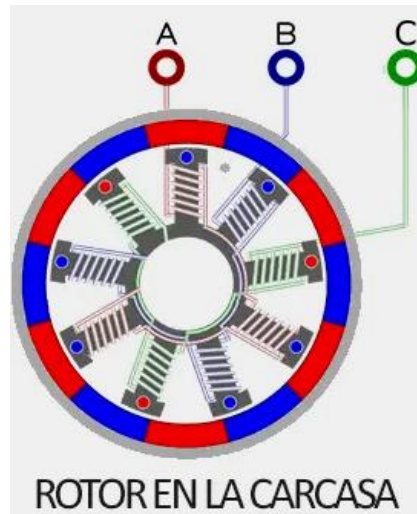


Figura 2: Tipo de conexión motor BLDC con rotor en la carcasa

Al poseer este tipo de estructura, facilita el diseño mecánico ya que es mucho más fácil diseñar piezas mecánicas como un sistema de engranajes para una carcasa que cuenta con mayor superficie, a diseñar un sistema para un pequeño eje que gira.

Luego, para controlar tanto velocidad como posición del actuador, se utiliza un driver de la marca Makerbase basado en el firmware ODRIVE. Este driver cuenta con diferentes periféricos de comunicación e incluye un sensor de posición AS5047P.

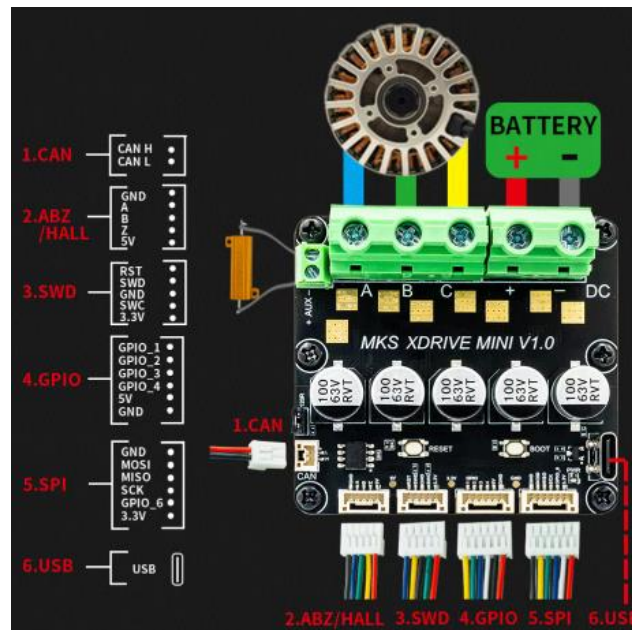


Figura 3: Diagrama electrónico de MKS Xdrive MINI

Estos 2 componentes son el corazón y cerebro de nuestro actuador, sin embargo, el actuador no estaría completo sin un sistema que amplifique la potencia mecánica y torque a la salida, ya que sin esto, le exigiríamos demasiada corriente al motor, provocando un desgaste muy prematuro. Para lograr esto, se implementa el conocido sistema de engranajes planetarios, el cual se detallará más adelante. Este sistema mecánico utilizado en un sin número de aplicaciones, gana popularidad por su rápido diseño y manufactura.

A continuación, se mencionan la lista de materiales preliminares a utilizar para la fabricación de nuestro actuador robótico.

|                                   |
|-----------------------------------|
| Motor BLDC Eaglepower 90KV LA8308 |
| Controlador Makerbase Xdrive MINI |
| Filamento PLA (1 [kg])            |
| Pernos M2, M2.5, M3 y M4          |
| Tuerca de inserción M2, M2.5 y M3 |
| Tuercas y golillas                |
| Rodamientos                       |
| Imán radial 6x2.5mm               |

*Figura 4: Lista de materiales*

Con la promesa del motor Eaglepower utilizado en grandes drones agrícolas, se espera lograr un excelente rendimiento sin mayor gasto energético.

## 2.4 Engranaje planetario

El sistema de engranajes planetarios es un componente clave en este diseño, ya que permite amplificar el torque generado por el motor BLDC y, al mismo tiempo, reducir la velocidad angular de salida, lo que resulta crucial para las exigencias de un actuador robótico de alta dinámica. Este mecanismo es ampliamente utilizado debido a su capacidad para soportar altas cargas de torque de manera eficiente en un diseño compacto y robusto.

En términos funcionales, un engranaje planetario consiste en un engranaje central (conocido como "sol"), varios engranajes periféricos ("planetas") montados en un portaplanetas ("carrier"), y un engranaje anular externo ("corona"). Esta disposición permite que las cargas se distribuyan entre múltiples puntos de contacto, lo que minimiza el desgaste mecánico y maximiza la durabilidad.

Para comenzar en el diseño de un engranaje planetario, es necesario entender primero como las velocidades tangenciales y angulares se relacionan en el cálculo de cada engranaje.

A partir de la figura 5 podemos ver que, la velocidad tangencial en el centro del engranaje está dada por,

$$V = \omega \cdot r$$

Luego, en un punto exterior del engranaje este será simplemente 2 veces  $V$ .

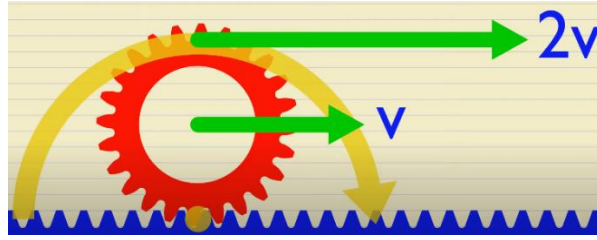


Figura 5: Velocidades tangenciales dentro de un engranaje

Por ende, para un sistema de engranajes planetarios típico de 3 planetas como se muestra en la figura 6. Podemos deducir que la velocidad de salida  $V_c$  (velocidad del carrier o portaplanetas) y la velocidad tangencial del sol serán,

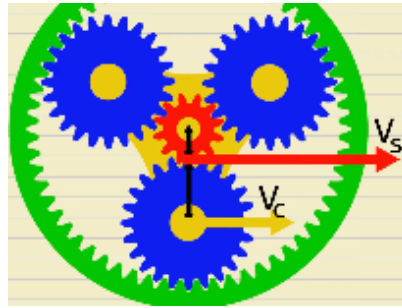


Figura 6: Velocidades tangenciales en un sistema de engranajes planetarios de 3 planetas

$$V_c = \omega_c(r_s + r_p)$$

$$V_s = \omega_s r_s$$

Pero también sabemos que en el punto donde impacta el engranaje solar, al igual como deducimos anteriormente, la velocidad tangencial es 2 veces la del carrier, por lo tanto, podemos llegar a la siguiente relación,

$$V_s = \omega_s r_s = 2V_c = 2\omega_c(r_s + r_p)$$

Con esto, podemos comenzar con el diseño de nuestro sistema de engranajes planetarios. Si buscamos una relación entre la velocidad de salida con la de entrada (carrier con sol respectivamente) obtenemos,

$$\frac{\omega_s}{\omega_c} = \frac{2r_s + 2r_p}{r_s}$$

Sin embargo, si revisamos la figura 7, podemos notar que el radio de los planetas se puede calcular como,

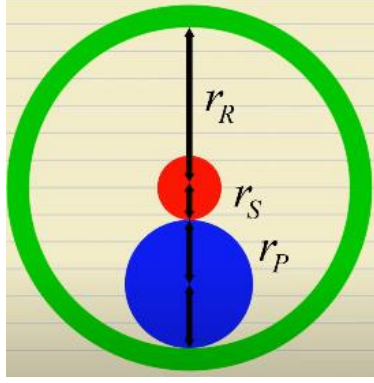


Figura 7: Radios de corona, sol y planetas

$$r_r = r_s + 2r_p$$

$$2r_p = r_r - r_s$$

Así, reemplazando obtenemos,

$$\frac{\omega_s}{\omega_c} = \frac{2r_s + 2r_p}{r_s} = \frac{2r_s + r_r - r_s}{r_s} = 1 + \frac{r_r}{r_s}$$

Luego, el radio de cada engranaje es proporcional a su número de dientes, así tenemos la siguiente relación de transmisión,

$$i = \frac{\omega_s}{\omega_c} = 1 + \frac{Z_r}{Z_s}$$

Además, para que calce cada engranaje de manera simétrica se debe cumplir que,

$$\frac{Z_r + Z_s}{N_p} = N^\circ \text{ entero}$$

Donde  $N_p$  corresponde al número de planetas. Finalmente, el número de dientes de un engranaje se puede calcular como,

$$Z = m \cdot d_0$$

Donde  $m$  corresponde al módulo del engranaje el cual es una magnitud que indica el tamaño de un piñón y  $d_0$  a su diámetro primitivo.

De esta manera, si utilizamos una configuración clásica de 3 planetas y tomamos una relación de transmisión común 1:9 utilizada en diferentes actuadores robóticos, tal que por cada vuelta que realiza el carrier en la salida, la entrada o engranaje solar realiza 9 vueltas. Esta relación corresponde normalmente al de una caja reductora, para aumentar el torque y disminuir su velocidad. La relación de transmisión  $i$  es finalmente el número de vueltas que se desea amplificar o disminuir.



Luego, debido a las dimensiones físicas del motor, si consideramos un módulo de 1 [mm] y un diámetro primitivo de 96 [mm], obtenemos que el número de dientes exteriores en la corona debe ser de 96 dientes, con esto podemos despejar el número de dientes del sol, obteniendo así:

$$9 = 1 + \frac{96}{Z_s}$$

$$Z_s = 12$$

Obteniendo el número de planetas como,

$$Z_r = Z_s + 2Z_p$$

$$Z_p = \frac{Z_r - Z_s}{2} = 42$$

Luego validamos su relación geométrica para que cada planeta esté simétricamente espaciado,

$$\frac{Z_r + Z_s}{N_p} = \frac{96 + 12}{3} = 36$$

Al ver que obtenemos un número entero, podemos concluir que nuestro sistema de engranajes planetarios estará conformado por las siguientes especificaciones:

- $Z_r = 96$
- $Z_s = 12$
- $Z_p = 42$
- $m = 1 [mm]$
- $i = 9$

Con esto, podemos continuar con el diseño 3D del sistema, teniendo en cuenta las consideraciones iniciales en particular el módulo, que define gran parte del espacio.

### 3 Diseño en Detalle

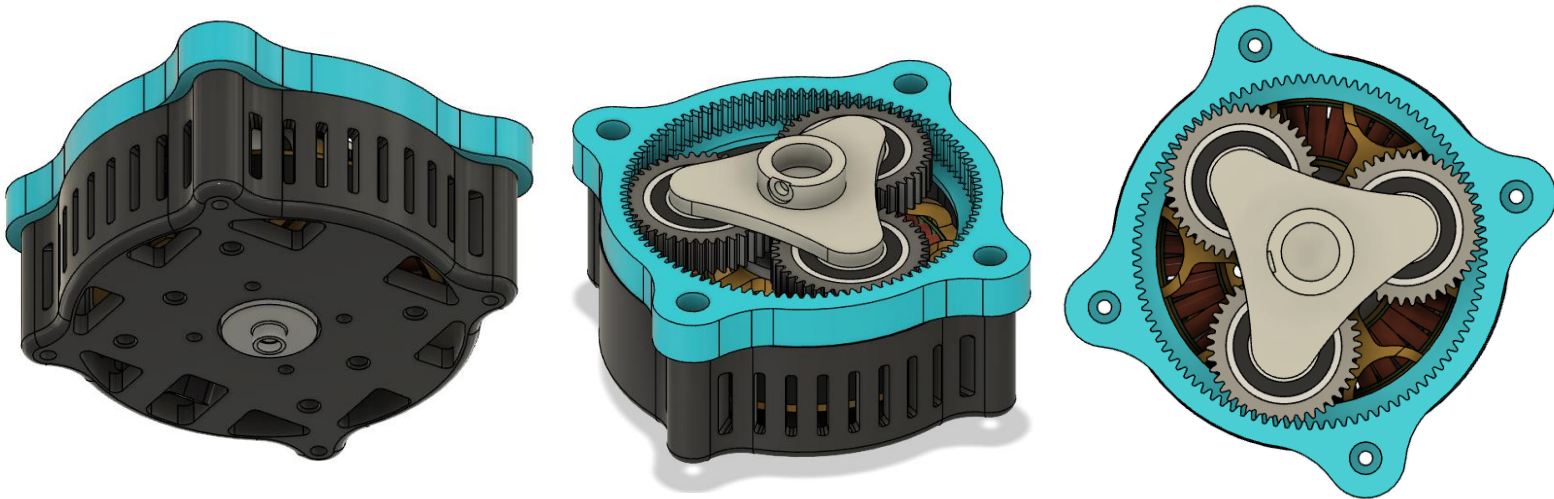
Una vez terminado el diseño en teoría, se opta como implementación, construir el sistema de engranajes planetarios mediante impresión 3D utilizando PLA, debido a su rapidez de fabricación, fácil uso y bajo costo económico.

Antes de imprimir se debe usar algún software de modelación 3D para generar los archivos correspondientes.

#### 3.1 Diseño mecánico en Fusion 360

Se opta por el software Fusion 360 de Autodesk para el diseño de todas las piezas en 3D, esto ya que la Universidad de Concepción cuenta con licencias de este tipo de productos, además que este programa es de fácil uso, contiene mucha documentación en internet e incluye funciones rápidas para la creación de engranajes.

Se han desarrollado alrededor de 6 versiones en 3D, sin embargo, después de largas semanas de trabajo y constante iteración, se obtuvo el siguiente modelo de actuador robótico.



*Figura 8: Vista trasera, vista frontal y vista superior del actuador robótico*

Como se puede ver, esta versión de actuador preliminar cuenta con una corona que se une a la carcasa del motor mediante 4 pernos M4 de 50mm de largo y utiliza un portaplanetas o carrier tipo triangular con el fin de reducir espacio y masa. Además, la salida final del actuador, en este caso será una polea dentada metálica, la cual girará una correa en simultáneo con el actuador, permitiendo así las articulaciones de una pierna.

## 4 Implementación

Antes de caracterizar el actuador y obtener todos sus parámetros, es necesario conocer los parámetros del motor por sí solo, así saber sus limitaciones físicas.

### 4.1 Pruebas experimentales

Para conocer estas limitaciones y características físicas del motor, se realizan diferentes pruebas para medir torque máximo y corriente.

De un motor de corriente continua como lo es nuestro motor BLDC de la marca Eaglepower, sabemos que el torque está dado por:

$$T = k\phi I_a = k_T I_a$$

Donde  $k_T$  corresponde a la constante de torque del motor e  $I_a$  a la corriente de armadura.

Así, utilizando una celda de carga para medir fuerza (kg) y generando un torque con el eje del motor conectado a una palanca, se puede deducir el torque obtenido considerando la aceleración de gravedad y la distancia entre el eje con el punto de apoyo. Realizando las siguientes pruebas.

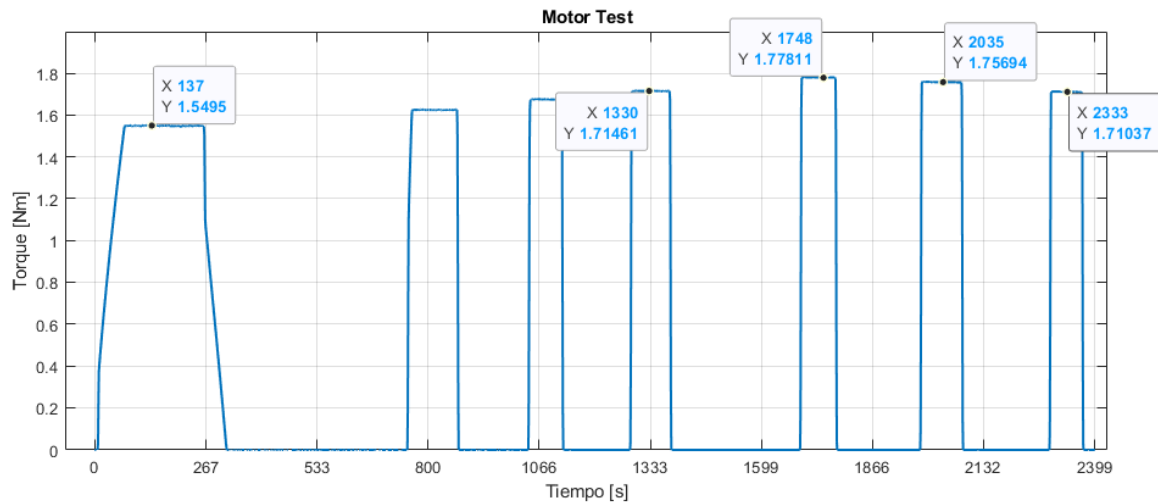


Figura 9: Mediciones de torque

Sin consideramos los siguientes puntos de máximo torque con sus respectivas corrientes medidas:

- 1.5 [Nm]  $\rightarrow$  3.6 [A]
- 1.72 [Nm]  $\rightarrow$  4.1 [A]
- 1.78 [Nm]  $\rightarrow$  4.17 [A]
- 1.76 [Nm]  $\rightarrow$  4.17 [A]
- 1.71 [Nm]  $\rightarrow$  4.2 [A]

Antes de proceder a calcular las constantes de torque es importante acotar que cuando se realizaron las pruebas, estas corrientes medidas fueron solo el comienzo y luego fue aumentando gradualmente aún cuando el torque se mantenía, deduciendo así que se alcanzó la curva de saturación del motor,

llegando a su torque máximo. De esta manera la constante de torque promedio a partir de las pruebas es.

$$k_{T_{mean}} = \frac{T}{I_a} \approx 0.42 \left[ \frac{Nm}{A} \right]$$

Con este parámetro sumamente importante de un motor, podemos saber a priori como se comportará ante diferentes esfuerzos de torque y saber cuanta corriente aproximada consumirá. Además de tener una idea de cuanto torque se amplificará una vez implementado el actuador.

A partir de las pruebas realizadas, se pudo determinar que el motor BLDC Eaglepower alcanza su torque máximo de **1.78 Nm** con una corriente de **4.17 A**, obteniendo una constante de torque promedio de  $k_T = 0.42 \left[ \frac{Nm}{A} \right]$ .

Este resultado es clave, ya que permite predecir el comportamiento del motor en condiciones de carga y ajustar el diseño del sistema de engranajes planetarios para satisfacer los requisitos de torque y velocidad necesarios. Al implementar la reducción de **9:1** mediante el engranaje planetario, el torque continuo en la salida del actuador se amplificará a aproximadamente:

$$T_{out} = 1.78 \cdot 9 = 16 [Nm]$$

Este resultado teórico indica que el actuador podrá cumplir con los requisitos de torque especificados en el diseño conceptual, permitiendo levantar eficientemente el peso del robot.

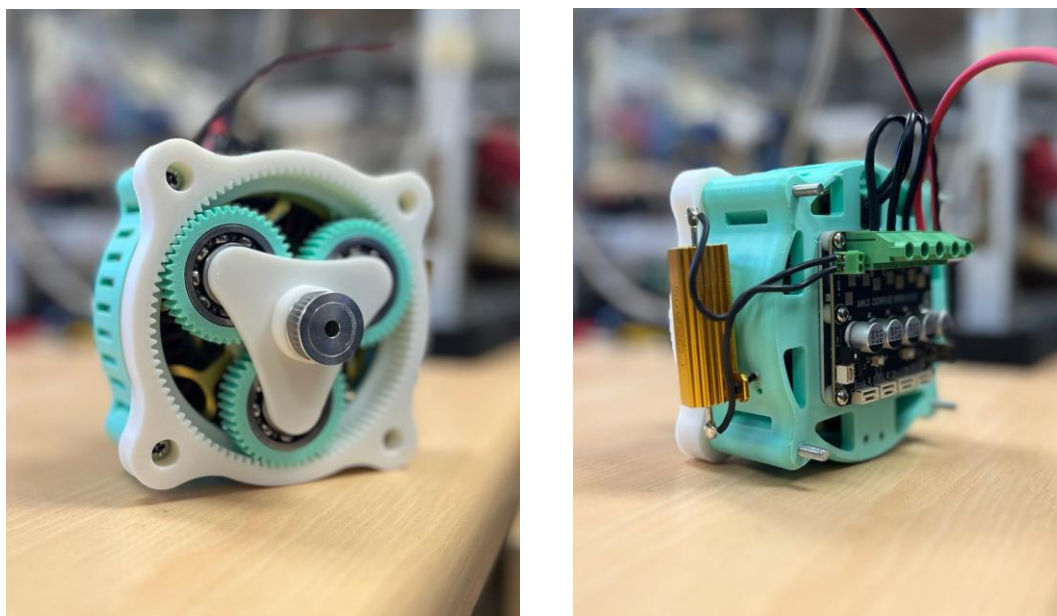
## 4.2 Caracterización

Debido a una posible desalineación del eje o falla en el control no se logró realizar las mismas pruebas de torque para el motor con actuador integrado. Sin embargo, se logró generar una tabla característica con información antes desconocida en muchos aspectos, que de igual manera logra aportar bastante información para futuros diseños en robots que cuenten con este actuador. La tabla de caracterización final es:

| Parámetros                | Motor Eaglpower    | Actuador robótico  |
|---------------------------|--------------------|--------------------|
| Masa                      | 336 [g]            | 735 [g]            |
| Diámetro                  | 92 [mm]            | 139 [mm]           |
| Ancho                     | 28.5 [mm]          | 101 [mm]           |
| KV                        | 90 [rpm/V]         | -                  |
| KT                        | 0.42 [Nm/A]        | -                  |
| Relación de transmisión   | 1:1                | 9:1                |
| Torque continuo máximo    | 1.78 [Nm]          | -                  |
| Corriente a torque máximo | $\sim 4.17$ [A]    | -                  |
| Voltaje de operación      | 22.2 [V]           | 22.2 [V]           |
| Resistencia interna       | 0.186 [ $\Omega$ ] | 0.186 [ $\Omega$ ] |

*Figura 10: Tabla de caracterización de motor y actuador robótico*

En base a estos datos se realizarán estudios más en detalle sobre la posible falla que afecta al motor para luego volver a medir el torque con actuador. No obstante, el actuador preliminar de futuros robots se puede apreciar en las siguientes figuras.



*Figura 11: Cara frontal y trasera del actuador robótico preliminar*

Como adelanto de futuros proyectos, a continuación se presenta imágenes del actuador robótico integrado con una primera versión de pierna que transmitirá el movimiento generado por el actuador.



*Figura 12: Cara frontal y trasera del actuador robótico preliminar*

Aunque no se lograron medir directamente los valores de torque del sistema integrado debido a posibles desalineaciones o fallas en el control, los datos obtenidos durante la caracterización del motor son fundamentales para futuros análisis. La tabla de caracterización refleja el comportamiento real del motor y del actuador preliminar, destacando la relación de transmisión 9:1 como clave para amplificar el torque sin exceder las limitaciones físicas del motor.

Este proceso no solo evidencia la viabilidad del diseño actual, sino que también permite identificar puntos críticos que deben mejorarse para obtener un sistema final más robusto y eficiente.

### 4.3 Posibles mejoras

Omitiendo la corrección del fallo identificado en el motor, las mejoras que se pueden implementar en futuras iteraciones son las siguientes:

- **Peso:** Reducir el peso del actuador optimizando las piezas impresas, utilizando materiales más ligeros como polímeros reforzados o aleaciones metálicas de bajo peso.
- **Velocidad:** Realizar pruebas dinámicas más precisas para medir la velocidad del sistema con diferentes cargas y verificar su rendimiento en escenarios de alta dinámica.
- **Dimensiones:** Reducir el tamaño de las piezas mecánicas para lograr un diseño más compacto y adecuado para robots de baja inercia.
- **Banco de pruebas:** Implementar un banco de pruebas con sensores en tiempo real de corriente, torque y velocidad, asegurando mediciones precisas y un montaje adecuado para minimizar desalineaciones.

Estas mejoras no solo optimizarán el rendimiento del actuador, sino que también facilitarán la integración del sistema en futuros proyectos robóticos.

## 5 Conclusiones

El desarrollo de un **actuador eléctrico propioceptivo** para robots de alta dinámica representó un desafío significativo, especialmente debido a la naturaleza mayormente **mecánica** del trabajo. Si bien la formación como estudiante de **Ingeniería Civil Electrónica** me ha dotado de conocimientos sólidos en sistemas eléctricos y de control, este proyecto me obligó a adentrarme en áreas que no son mi especialidad, como el diseño y modelado mecánico. Esto incrementó considerablemente el **tiempo invertido en iteraciones** y la necesidad de **autoaprendizaje**, haciendo que cada avance logrado en el diseño del sistema de engranajes planetarios fuese un logro aún más valioso.

Durante el proceso, se realizaron múltiples iteraciones y ajustes en el diseño de las piezas, las cuales fueron modeladas en **Fusion 360** y fabricadas mediante impresión 3D. Esta etapa requirió un **esfuerzo constante** para lograr la precisión necesaria en el ensamblaje y superar problemas como desalineaciones o tolerancias mecánicas.

Este proyecto no solo valida la viabilidad del actuador en aplicaciones de **robots bípedos** y otros sistemas de locomoción dinámica, sino que también abre nuevas posibilidades para su uso en escenarios donde la combinación de **alto torque, baja inercia y respuesta rápida** es crítica. Robots capaces de realizar tareas como **saltos explosivos**, recuperación de perturbaciones y maniobras rápidas podrían beneficiarse directamente de este tipo de actuador. Además, su diseño modular y económico lo hace ideal para aplicaciones en **robótica educativa**, prototipos de investigación y proyectos donde los recursos son limitados.

Como estudiante electrónico, enfrentar y superar estos retos mecánicos permitió adquirir habilidades interdisciplinarias que complementan mi formación. El proceso evidenció la importancia de integrar conocimientos de **diseño mecánico, modelado 3D y análisis estructural** en sistemas complejos. Estas competencias adicionales serán de gran valor en futuros desarrollos, permitiéndome abordar problemas desde una perspectiva más completa.

En conclusión, este proyecto no solo cumple con el objetivo de diseñar un actuador funcional, sino que también constituye una **base sólida** para mejoras futuras y aplicaciones en robótica avanzada. La experiencia adquirida en este proceso destaca la importancia de la perseverancia, el aprendizaje continuo y el trabajo interdisciplinario en la ingeniería moderna.