

# **Sistema de control para robot continuo paralelo para seguimiento de objetos a altas velocidades**

Santiago Usme Martínez

Proyecto de grado

Pregrado en Ingeniería Electrónica

*Asesores*

Fredy Enrique Segura Quijano

Jonathan Camargo Leyva

Alvaro Uriel Achury Florian



**Universidad de  
los Andes**  
Colombia

**Facultad de  
Ingeniería**

Departamento de Ingeniería Electrónica

Universidad de los Andes

Bogotá D.C., Colombia

Diciembre, 2024

A mis pacientes padres y hermana, fuente de mi motivación diaria.

“No basta dar pasos que un día puedan conducir hasta la meta, sino que cada paso ha de ser una meta, sin dejar de ser un paso.”

Johann P. Eckermann.

## Abstract

A parallel continuous robot (PCR) is a device controlled by “tendons” which are usually flexible rods or filaments. By combining all the tensions from each of the tendons, a specific shape or a desired position in the device is achieved. Another valuable ability these devices have is they can get to positions where the end-effector (tip, or end of the manipulator) usually cannot go to in other types of robots. This is called redundancy. The quantity and distance between these segments will vary the concavity of the device curves by the bending or tensioning of its tendons. These tendons can vary in diameter and length for different specific desired functions.

Normally, robotic manipulators have basic degrees of freedom based on rotations and/or linear movements that simplify the design or the expected work of the robot. In this case, there is a robot with multiple degrees of freedom, most of which are non-linear, which allows for more complex and compound movements to be performed easily. This also implies that changes in the position of the robot can be performed at higher speeds. For this project we seek to implement and/or redesign the prototype developed in Josué Licona's degree project *Design of a portable control platform for rod-driven continuum parallel robots* [1] to obtain as a result a robot of the same nature that can move a camera and follow objects at high speeds. For this it is also necessary to design an adequate control system (Hardware and software). This project will be developed hand in hand with the degree project of the mechanical engineering department *Prototype of a two-segment parallel continuous robot actuated by rods for tracking objects at high speeds* by the same author.

## Agradecimientos

Me gustaría agradecer primero y nuevamente a mi familia. Padre, madre, hermana, por ustedes he logrado mucho más de lo que nunca me creí capaz. Este proyecto de grado, al igual que su proyecto en paralelo del departamento de ingeniería mecánica, son fruto de un gran esfuerzo no solo mío sino de muchas personas que colaboraron y pusieron su semilla para completarlo. Agradezco a Josué Licona por darme la oportunidad de retomar este gran proyecto y ofrezco de la misma forma la mano a quien quiera seguirlo a continuación ya que siempre se puede mejorar. De igual manera quiero agradecer también a mis asesores que me acompañaron en todo este arduo proceso. Por último, pero no menos importante, quiero agradecer también a Daniel Alvarez y Sergio Oliveros por aportar su conocimiento, tiempo y experiencia en la generación de códigos y algoritmos tanto para el control de los motores como para la segmentación y filtrado de imágenes.

## Tabla de contenido

<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
Sobre el problema .....	1.a
Caracterización del problema.....	1.b
Variables, términos y definiciones globales.....	1.c
<b>Marco teórico .....</b>	<b>2</b>
Trabajos anteriores .....	2.a
Dispositivos similares .....	2.b
<b>Objetivos.....</b>	<b>3</b>
Objetivos generales.....	3.a
Objetivos específicos.....	3.b
<b>Metodología .....</b>	<b>4</b>
Trabajo conjunto .....	4.a
Proceso de diseño .....	4.b
Bitácora e identificación de hitos .....	4.c
Ensamble electrónico .....	4.d
Ensamble Mecánico .....	4.e
Aspectos de seguridad y prevención .....	4.f
Seguridad eléctrica .....	f.i
Seguridad mecánica .....	f.ii
Configuración de los motores.....	f.iii
Modelo dinámico .....	4.g
Sistema de control relativo .....	4.h
<b>Resultados .....</b>	<b>5</b>
Caracterización del prototipo inicial .....	5.a
Pruebas globales.....	a.i
Pruebas específicas .....	a.ii
Construcción del prototipo final.....	5.b

Caracterización del motor escogido .....	b.i
Pruebas específicas .....	b.ii
Pruebas globales .....	b.iii
Comparación de prototipos.....	5.c
<b>Conclusiones.....</b>	<b>6</b>
<b>Trabajos futuros y recomendaciones .....</b>	<b>7</b>
<b>Referencias .....</b>	<b>8</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>9</b>
Configuración de los motores .....	9.a

## 1. Introducción

### a. Sobre el problema

Un robot continuo paralelo es un dispositivo controlado mediante “tendones” que usualmente son varillas o filamentos flexibles. Mediante la combinación de todas las tensiones de cada uno de los tendones se consigue una forma específica o una posición deseada en el dispositivo. Otro de los factores que definen la formas que pueden tomar estos dispositivos o las posiciones a las que debe llegar el *end-effector* (punta, o final del manipulador) son los segmentos que tenga. La cantidad y distancia entre estos segmentos va a variar la concavidad de las curvas que pueda tomar el dispositivo mediante la flexión o tensión de sus tendones. Estos tendones pueden variar de diámetro y longitud para diferentes funciones específicas deseadas.

Normalmente los manipuladores robóticos cuentan con grados de libertad basados en rotaciones y/o movimientos lineales que simplifican el diseño o la labor esperada del robot. En este caso se tiene un robot de múltiples grados de libertad siendo la mayoría no lineales lo que permite realizar movimientos compuestos más complejos con mayor facilidad. Esto también implica que los cambios de posición del robot pueden realizarse con mayores velocidades. Para este proyecto se busca rediseñar el prototipo desarrollado en el proyecto de grado de Josué Licona *Prototipo de un robot continuo paralelo de dos segmentos actuado por varillas para clasificación de pelotas multicolores* [1] para obtener como resultado un robot de la misma naturaleza que pueda mover una cámara y seguir objetos a altas velocidades. Para esto es necesario también diseñar un sistema de control (Hardware y Software) adecuado (Véase secciones 3. Caracterización del proyecto y 5.c Entregables). Este proyecto se va a desarrollar de la mano con el proyecto de grado del departamento de ingeniería mecánica *Robot continuo paralelo para seguimiento de objetos a altas velocidades* por el mismo autor.

### b. Caracterización del problema (Justificación)

Los robots continuos en paralelo se controlan mediante tensión y flexión de filamentos flexibles y su característica principal es su sistema tan simple y liviano ya que tiene pocas piezas móviles y de bajo volumen. Entre sus aplicaciones potenciales están los manipuladores robóticos, control de plataformas, robótica flexible, medicina, manufactura industrial, entre otros. Dada la baja complejidad mecánica y bajo peso de estos robots se ideó este proyecto con el objetivo de agregar un sistema de control relativo a altas velocidades para seguimiento de objetos en movimiento.

### c. Variables, términos y definiciones globales

**Tabla 1.** Variables y definiciones (modelo Cosserat). Tomadas como aparecen en [2].

Símbolo	Definición
$s$	Largo de sección de arco
$\mathbf{p}(t, s)$	Posición global en coordenadas cartesianas
$\mathbf{R}(t, s)$	Matriz de rotación respecto a la orientación del material
$\mathbf{u}(t, s)$	Vector de curvatura en el marco local
$\mathbf{q}(t, s)$	Velocidad lineal en el marco local
$\mathbf{v}(t, s)$	Tasa de cambio de velocidad con respecto al largo de la sección de arco
$\boldsymbol{\omega}(t, s)$	Velocidad angular respecto al marco local
$\rho$	Densidad del material
$A$	Área transversal
$\mathbf{f}$	Fuerza externa general distribuida
$\mathbf{m}(t, s)$	Momento interno respecto al marco global
$\mathbf{J}$	Matriz rotacional de inercia
$\mathbf{n}(t, s)$	Fuerza interna respecto al marco global
$\mathbf{l}(t, s)$	Momento externo general distribuido

A continuación, se presentan algunos términos relevantes junto con sus definiciones. Estas son mencionadas explícitamente para evitar confusiones dentro del marco del proyecto realizado y no buscan redefinir algún término ya existente ni corregir ningún material o autor previo.

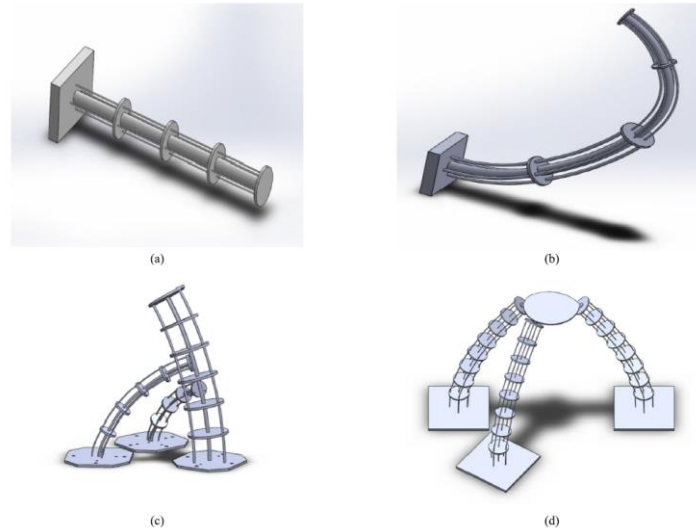
**Tabla 2.** Términos y definiciones relevantes.

Término	Definición
<b>Extrusión</b>	Acción de empujar o halar de un objeto o sustancia a través de un agujero. En el caso de este proyecto esta acción se puede interpretar como actuar o empujar.
<b>Filamento/Alambre/ Tendón/Varilla</b>	Objeto de forma cilíndrica de largo múltiples veces mayor a su diámetro. Se llamará de estas formas al metal que actuará el movimiento del robot.
<b>end-effector</b>	Punta o final del manipulador robótico
<b>Paralelo (robot)</b>	Lo grados de libertad, individualmente, no dependen de otros directamente.
<b>Continuo (robot)</b>	La estructura es continua a lo largo de todos sus segmentos o nodos de tal manera que tiene la capacidad de formar curvas sin romperse o doblarse en gran magnitud.
<b>Estabilidad</b>	En este estudio se va a tomar el concepto de estabilidad como la capacidad del robot para mantenerse erguido, es decir, sin caerse debido a su peso o deformación extrema, a diferencia del concepto de estabilizable (estabilidad asintótica).
<b>Control global</b>	Sistema de control enfocado en el posicionamiento coordinado de un sistema global estático
<b>Control relativo</b>	Sistema de control enfocado en el posicionamiento coordinado de un sistema global variable con respecto al tiempo, es decir, su referencia puede estar en movimiento o estática.



## 2. Marco teórico

Para ilustrar lo que son robots del tipo continuo paralelo se van a mostrar diferentes robots de esta naturaleza y se describirán sus ventajas, desventajas y aplicaciones:



**Ilustración 1.** Diferentes configuraciones de robot continuo paralelo: a) sección única, b) múltiples secciones en serie y tubo concéntrico, c) secciones en serie/paralelo tipo soporte, d) co-manipulativo [2].

### Parallel Continuum Robots

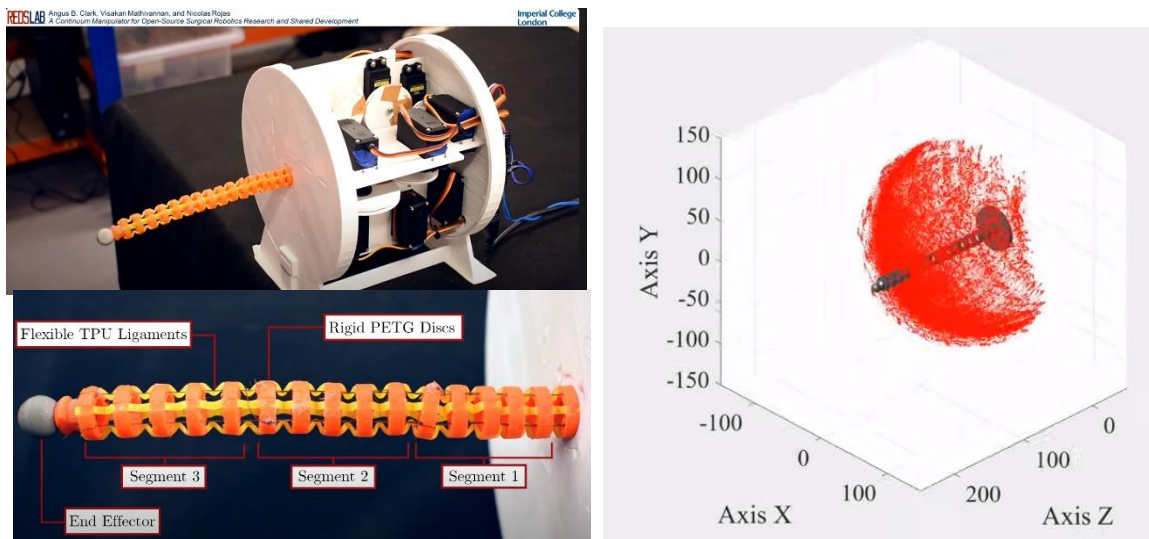


**Ilustración 2.** Modelo de plataforma de Stewart Gough de 6 grados de libertad [3].

La configuración del robot debe ser elegida con respecto al tipo de uso que se desea darle. En este caso se busca una estructura de movimiento rápido, es decir que no puede ser muy rígida ni pesar demasiado. Sin embargo, existen configuraciones que resaltan en lo contrario para aplicaciones de movimientos de precisión o para grandes cargas. Incluso se pueden utilizar múltiples robots para una misma aplicación como es el control de una superficie (configuración d) en la Ilustración 1.).

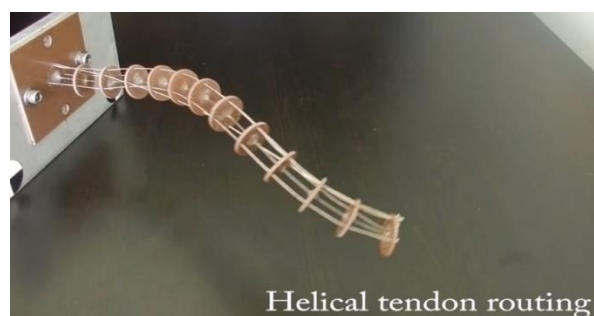
Una aplicación de las más usadas en la industria es la plataforma de Stewart Gough [3]. Lo más importante de este tipo de plataformas es su gran variedad de movimientos posibles y su capacidad de volver a su estado inicial o a deformarse sin alterar su funcionamiento. En un manipulador robótico lineal normalmente hay un gran volumen que ocupa el mismo robot y no se puede llevar al end-effector por ese espacio ya que podría afectarse el robot a sí mismo. Al deformarse, los grados de libertad de una plataforma de Stewart Gough pueden llevar un end-effector a una posición donde normalmente estaría el robot sin afectar a este. Esta es la principal ventaja de la deformación de los robots continuos paralelos. Es importante apreciar que necesita de 6 filamentos para tener sus 6 grados de libertad y, sin embargo, eso no es un factor que obstaculice la fabricación de prototipos a escala.

Otra opción popularmente usada en el mercado para usos médicos:



**Ilustración 3.** Robot continuo paralelo de 3 segmentos [4].

Este robot tiene la ventaja de que aprovecha gran parte de su volumen de acción y puede deformarse de manera rápida y precisa. Esto es muy útil para aplicaciones de precisión como lo que son cirugías asistidas. Esto da una idea de lo que podría ser un robot de múltiples secciones, podrían ser incluso 4 o 6 secciones y haría movimientos mucho más complejos y difíciles de controlar. Algunos robots continuo-paralelos no tienen todos sus filamentos alineados, sino que estos pueden ir cruzados de diferentes formas para deformar el robot en diferentes sentidos. Este es un ejemplo de eso:

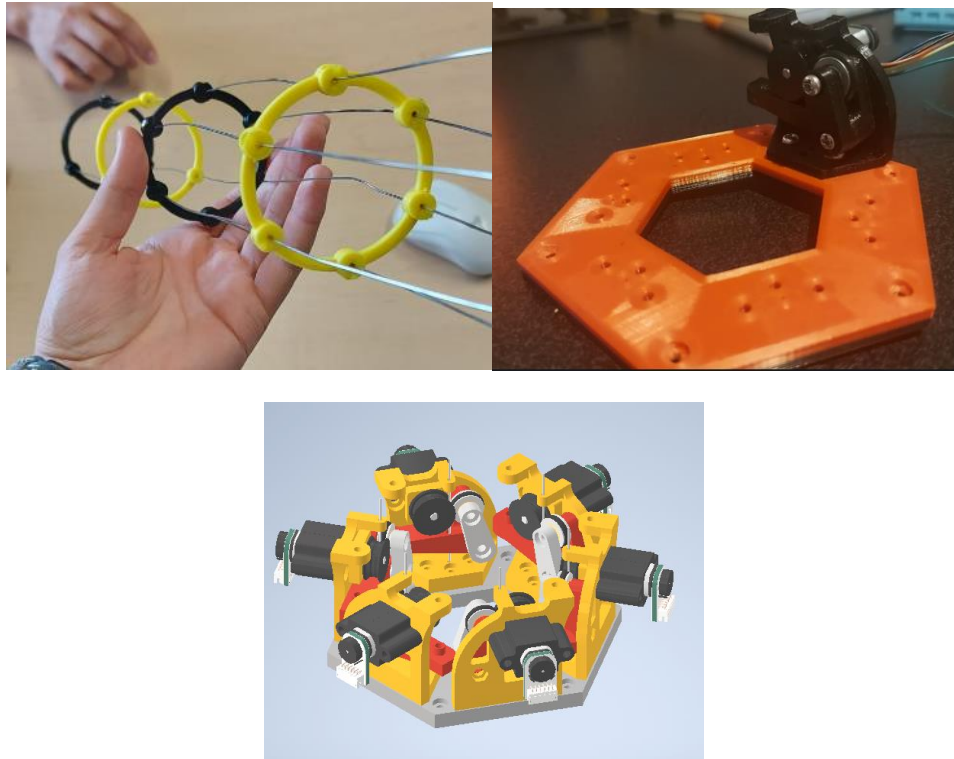


**Ilustración 4.** Robot continuo paralelo con filamentos cruzados de forma helicoidal. Tomado de [5].

### Trabajos anteriores (antecedentes locales)

Design of a portable control platform for rod-driven continuum parallel robots [1]:

Ya que este proyecto fue inspirado en un primer robot continuo paralelo es importante mostrar lo que fue este proyecto original de Josué Licona:



**Ilustración 5.** Ensamble de diferentes partes del robot (cuerpo y sistema de un extrusor) y modelo CAD con 6 extrusores. [1]

El sistema desarrollado por Josué Licona trata de un robot continuo paralelo de dos secciones donde ambas secciones son móviles telescópicamente. La ventaja de este robot es que se puede manipular su extensión en tiempo real y la ubicación del segundo segmento puede manipular la curvatura del robot dándole variabilidad de movimiento.

A continuous tendon-driven delta robot – The Dr. Otto Octavius Project [6]:

Dentro del trabajo realizado es importante recalcar que se utilizaron motores con la misma naturaleza que este proyecto en el proyecto de grado de Daniel Alvarez, donde se elaboró un robot tipo delta para asistencia robotizada en tiempo real. Este proyecto también usó un modelo de robot actuado por tendones solo que en vez de varillas utilizó uniones articuladas actuadas por guayas. Dentro de este proyecto se elaboraron múltiples códigos y algoritmos de la autoría de Daniel Alvarez que se utilizaron para el desarrollo del proyecto enunciado en este documento.



**Ilustración 6.** Ensamble real y modelo CAD del proyecto de grado de Daniel Alvarez [6]

### Dispositivos similares

En el área de automatización industrial se tienen muchos tipos de manipuladores automatizados encargados de realizar montajes, embalajes y con propósitos varios. Uno de ellos estos es un robot paralelo en delta utilizado para gran variedad de cosas: el Adept Quattro.



**Ilustración 7.** Robot industrial Adept Quattro. Usado para embalaje y montaje [7].

Las principales ventajas de este robot son los grados de libertad simples que tiene. A pesar de que solo tenga 3 grados de libertad, este robot es más que suficiente para la mayoría de las tareas deseadas y es de los más rápidos en el mercado debido a su estructura tipo delta. Gracias a esto puede llegar a velocidades de hasta 3 m/s.

### 3. Objetivos

#### a. Objetivos Generales

- A partir de cálculos, rediseñar un sistema previamente implementado para moverse a altas velocidades definiendo un rango de velocidades del robot según sus propiedades y características.
- Implementar un robot paralelo continuo para realizar mediciones de movimiento.
- Caracterizar la dinámica del robot continuo paralelo fabricado haciendo la medición y análisis de movimiento.

#### b. Objetivos Específicos

- Rediseñar e implementar un robot paralelo continuo controlable a altas velocidades (1 m/s) \* que pueda hacer seguimiento de objetos.

**Nota\*:** Esta velocidad objetivo fue tomada teniendo en cuenta la velocidad que alcanza a lograr fácilmente un robot de movimientos rápidos (tipo delta).

### 4. Metodología (desarrollo)

#### a. Trabajo conjunto

Este proyecto se va a desarrollar de la mano con el proyecto de grado del departamento de ingeniería mecánica *Prototipo de un robot continuo paralelo de para seguimiento de objetos a altas velocidades* por el mismo autor. El desarrollo de estos dos proyectos en paralelo implica el uso compartido de la estructura física, el sistema de control y el software desarrollados (entre otros) durante el periodo de diseño de ambos proyectos. A pesar de lo anterior se va a tener en cuenta cada proyecto de grado como independiente y los resultados se van a entregar de forma separada como parezca adecuado por el estudiante, los asesores y el departamento.

#### b. Proceso de diseño

El proceso de diseño se llevó a cabo mediante iteraciones de diseños y correcciones siguiendo el siguiente orden:

- Investigación: Recopilación de información sobre el sistema de control del robot y el software a usar.
- Construcción/ensamble del prototipo: Ensamblaje del hardware y/o implementación del software de control.
- Pruebas y evaluaciones: Realización de pruebas de funcionalidad, rendimiento y precisión.
- Análisis y documentación: Documentación del proceso y análisis de datos para mejoras en la siguiente iteración.

#### c. Bitácora e identificación y descripción de hitos

**Fase 1:** Investigación, cálculos teóricos, cotización y compras (Semana 1-2).

Durante esta fase se definió el modelo dinámico teórico para posicionamiento en el espacio y el cálculo del rango de velocidades posibles.

**Fase 2:** Caracterización del prototipo inicial (pruebas de movimiento) (Semanas 3-4).

Durante esta fase se realizaron diferentes pruebas, tanto globales como específicas, para analizar el comportamiento y hallar las fuentes de falla del prototipo inicial. Con esta información disponible se cotizaron y compraron los motores de altas velocidades para dimensionar el proyecto para su diseño y ensamble. Durante esta fase también se realizaron los diagramas de conexiones de potencia del robot.

**Fase 3:** Diseño y construcción del prototipo (sistema de control) (Semanas 5-9).

Durante esta fase se realizó la manufactura necesaria para la construcción del robot (fabricación de partes y ensamble). La mayoría de las partes, por no decir en su totalidad, se elaboraron mediante manufactura aditiva (impresión 3D en FDM) y se necesitó hacer múltiples versiones de la mayoría de las piezas.

**Fase 4:** Ensamble final y montaje electrónico (Semanas 9-12).

Durante esta fase se realizó y pulió el software a usar para el control de los motores y probó el montaje de cada motor para evaluar su funcionalidad y poder comparar los diferentes prototipos.

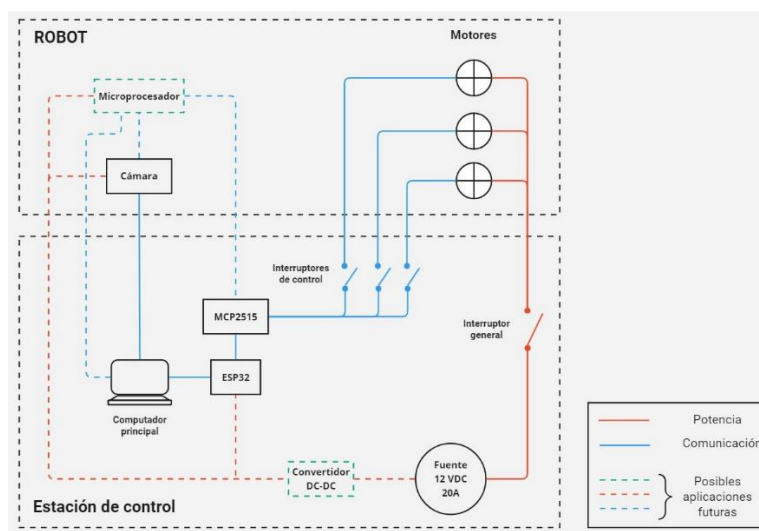
**Fase 5: Pruebas** de posicionamiento y evaluaciones de rendimiento (Semanas 13-15).

Durante esta fase se realizaron las pruebas finales del prototipo y se organizaron los datos para su análisis y presentación.

**Fase 6:** Análisis de datos, conclusiones y presentación final (Semana 16)

Esa fase fue totalmente dedicada a la organización de toda la información obtenida durante el proyecto, así como su entrega y su presentación ante la facultad de ingeniería de la universidad.

**d. Ensamble electrónico**

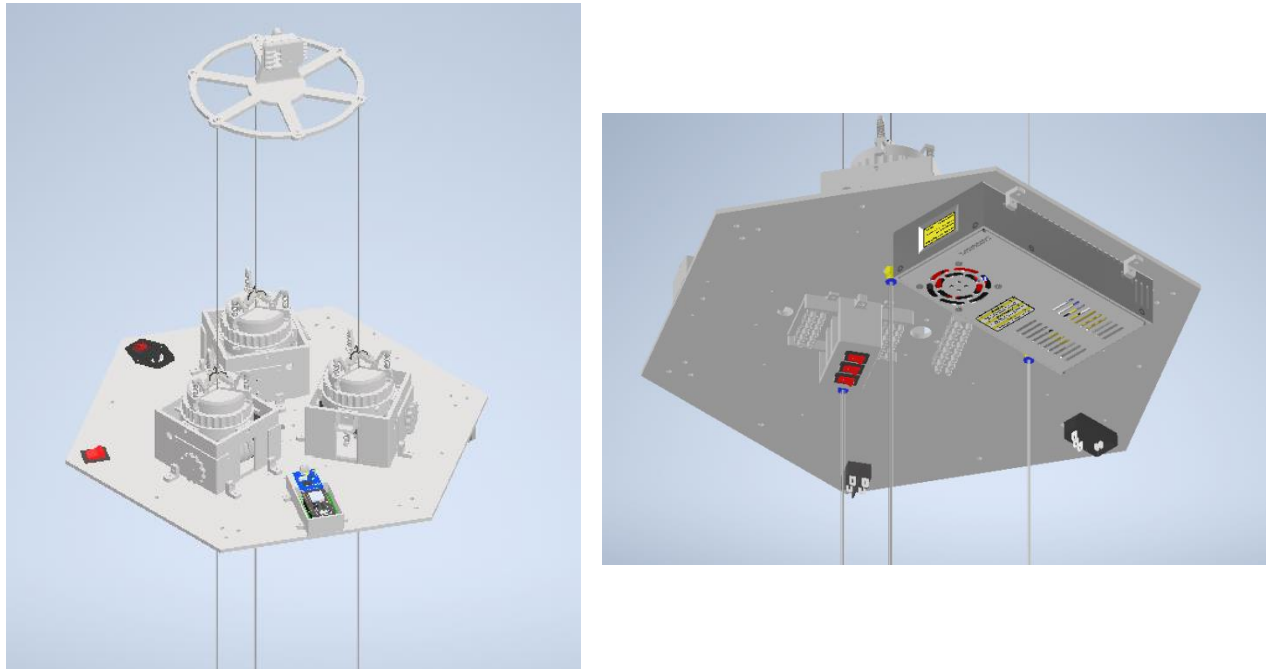


**Ilustración 8.** Diagrama de conexiones (potencia y comunicaciones).



Actualmente la totalidad del robot y la estación de control están unidas en una sola plataforma principal (a excepción del computador principal) sin embargo, se espera que en un futuro el robot pueda controlarse de forma autónoma (véase sección **7. Trabajos futuros y recomendaciones**). Todas las comunicaciones ilustradas son bidireccionales exceptuando la comunicación con la cámara, que funciona solamente en una dirección para enviar imágenes. Los motores están constantemente enviando mensajes de retroalimentación de movimiento e información de los sensores.

#### e. Ensamble mecánico



**Ilustración 9.** Modelo CAD 3D del ensamble general del sistema.

Todos los componentes del robot se encuentran anclados a una plataforma de MDF cortada a laser para su fácil transporte e instalación. No existe actualmente ninguna estructura aparte de esto para sostener el proyecto por lo que si se va a usar para alguna futura aplicación se recomienda diseñarle una base adecuada. Cabe destacar que los alambres usados en la aplicación final son de alambre enderezado de acero inoxidable AISI 302 de 1.5 mm de diámetro.

Si el presente lector desea conocer la metodología completa y el proceso de diseño mecánico u observar los planos correspondientes al diseño puede leer el proyecto de grado hermano este: *robot continuo paralelo para seguimiento de objetos a altas velocidades*.

#### f. Aspectos de seguridad y prevención

Dentro de los componentes del robot se encuentran múltiples elementos dedicados a la seguridad del usuario. Estos elementos, sean eléctricos o mecánicos, están dispuestos para un uso del robot sin manipulación directa de los alambres de acero o conexión manual de potencia. El ensamble de dichos componentes esta descrito en detalle en el proyecto de grado paralelo a este mencionado anteriormente.

### **i. Seguridad eléctrica**

La potencia principal del robot proviene de una fuente de poder de 12 VDC cuya entrada es un voltaje estándar de 120 VAC (60 Hz). Cada paso de esta conversión de voltaje al igual que sus debidos conectores y adaptadores está aislado para no dejar posibilidad de un corto circuito o contacto directo con la piel en caso de manipulación. El riesgo principal del robot en este aspecto realmente se puede dar por pérdidas de comunicación y/o errores de control que pueden ocasionar que el robot se mueva muy rápido y pueda golpear algo o a alguien a altas velocidades, especialmente dado su tamaño y largo alcance. Por esto están habilitados dos interruptores capaces de apagar totalmente el sistema en caso de emergencia: el interruptor de entrada de la fuente y el interruptor de salida de esta.

### **ii. Seguridad mecánica**

Dado que el movimiento del robot depende de extrusión de alambre a altas velocidades este puede significar un riesgo de penetración en la piel si el alambre se encuentra expuesto. Debido a esto se instaló un tubo de teflón transparente a la salida inferior de cada extrusor. Este tubo añade una capa gruesa de seguridad, sirve de guía constante para el alambre y permite ver la posición del alambre en todo momento por lo que es ideal para esta aplicación. Otra fuente de peligro mecánico es el interior de los extrusores. Dada las velocidades de movimiento y la fuerza de los motores y, teniendo en cuenta sus uniones internas, existe el riesgo de atrapamiento por lo que cada extrusor está debidamente aislado y asegurado.

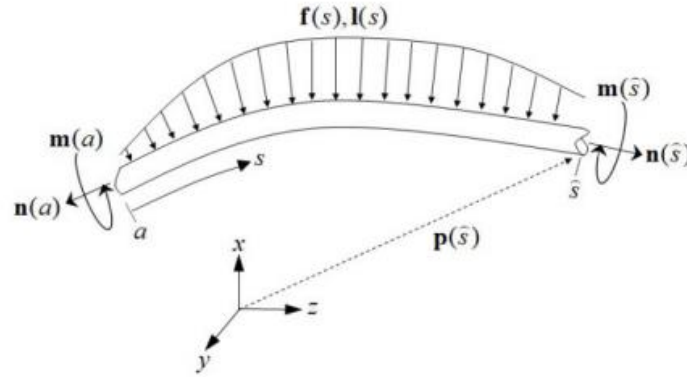
### **iii. Configuración de los motores**

Gracias a la tecnología de los motores usados estos pueden ser configurados para limitar su torque, corriente, velocidad y cuentan con sensores de temperatura. Esto permite una gran variedad de protecciones por software instantáneas y eficientes.

### **g. Modelo dinámico**

El modelo dinámico usado para el movimiento del robot es el modelo de Cosserat usado para parametrización de curvas o secciones de arco para aplicaciones de deformación acumulativa. En este proyecto solo se va a considerar la dinámica básica ya que su metodología matemática avanzada involucra métodos de solución de ecuaciones diferenciales por derivadas parciales que se salen del tema y propósito de este proyecto. El planteamiento considerado para este proyecto se planteó en el estudio de Janabi-Sharifi, Jalali y Walker [2] sobre el modelado dinámico de robots continuos actuados por tendones.





**Ilustración 10.** Sección arbitraria de un filamento desde  $a$  hasta  $s$ , sujeto a fuerzas  $f(s)$  y momentos  $l(s)$  en el tiempo  $t$  [2].

En el marco global de coordenadas la respuesta dinámica de un filamento según el modelo Cosserat es:

$$p_{,s} = Rv,$$

$$R_{,s} = R\hat{u},$$

$$q_{,s} = v_{,t} - q + v,$$

$$\omega_{,s} = u_{,t} - \hat{u}\omega,$$

$$n_{,s} = \rho AR(\hat{\omega}q + q_{,t}) - f,$$

$$m_{,s} = (\rho RJ\omega)_{,t} - \hat{p}_s n - l,$$

$$p_{,t} = Rq,$$

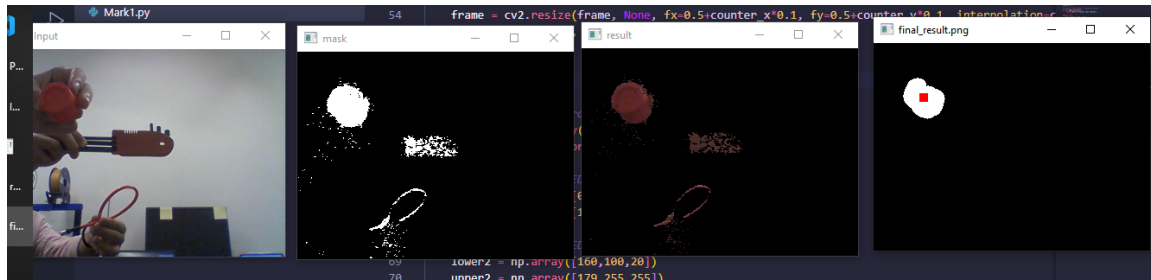
$$R_{,t} = R\hat{\omega}$$

Donde se asume que hay tensión constante a lo largo del tendón y la posición inicial (anclaje) de los tendones no cambia durante la deformación.

#### **h. Sistema de control relativo**

Para realizar el control relativo para seguimiento de objetos se desarrolló un código en Python que hace segmentación y filtrado de objetos por forma y color. Este código realiza un filtro HSV mediante la librería de OpenCV para posteriormente realizar un filtrado de ruido y elección de objetivo de seguimiento que cumpla con los requisitos. Actualmente el filtro de ruido filtra cualquier geometría que no sea de forma circular de cierto radio ingresado por parámetro. Este radio se puede cambiar en base a los requerimientos del objeto a seguir. Se calcula un centro de objeto tomando los píxeles diagonales extremos y se toma el centro geométrico, es decir, la distancia media entre los píxeles extremos. Esto se realiza en tiempo real mediante una cámara en el mismo procesador de donde se comunique el microcontrolador para que se puedan pasar datos por protocolo serial y hacer

un control Jacobiano simple. El algoritmo actual puede ser lento debido a todos los subprocessos que hace recorriendo cada imagen por lo tiene mucho potencial de mejora.



**Ilustración 11.** Funcionamiento del sistema de filtrado de imágenes con diferentes objetos

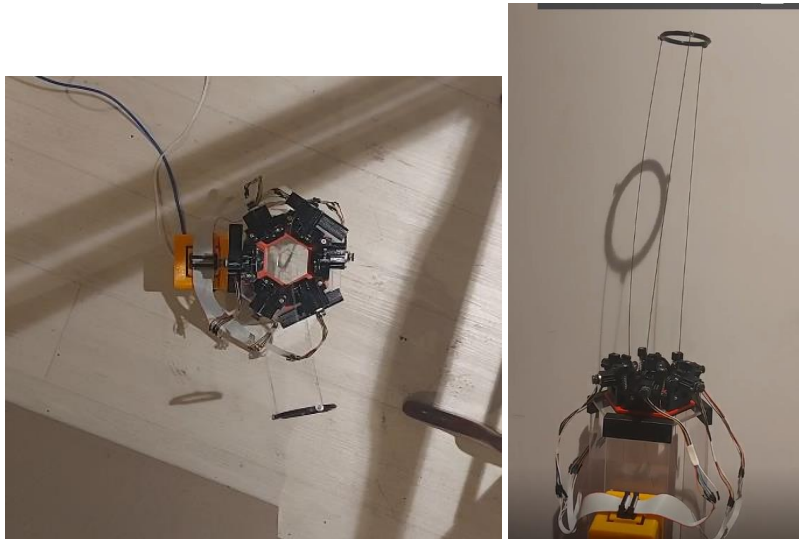
Como se puede ver en la **Ilustración 11**, el filtro toma solamente las geometrías de forma circular y que tengan un radio mínimo y después muestra el centro del objeto en rojo. Este filtrado debe suceder en tiempo real y debe comunicar constantemente las coordenadas del objeto a seguir para actuar el robot en dirección a esas coordenadas.

## 5. Resultados

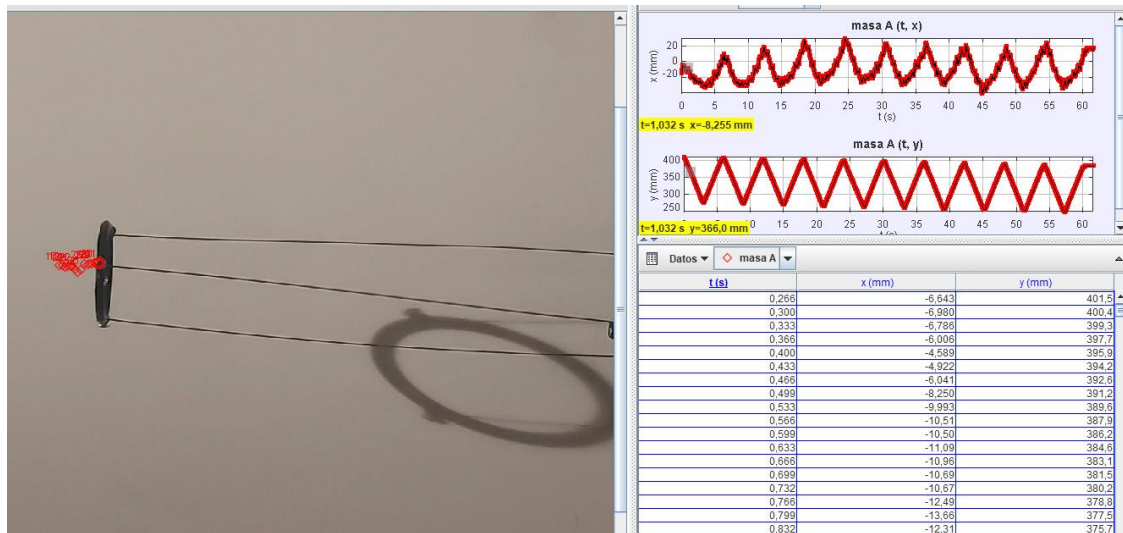
### a. Caracterización del prototipo inicial

Para dar inicio al proyecto se caracterizó primero el movimiento general del prototipo del proyecto de Josué Licona:

#### i. Pruebas globales



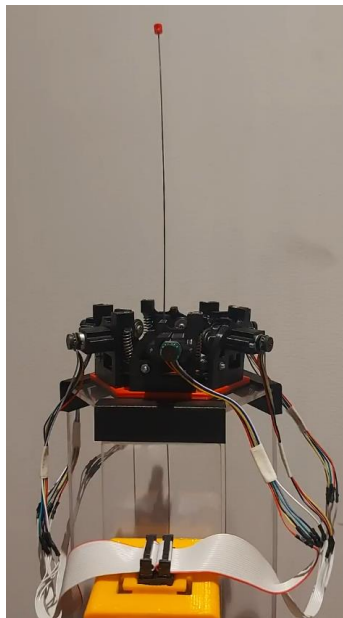
**Ilustración 12.** Prototipo inicial (Josué Licona [1]) desde varias perspectivas: vista superior (izquierda) y vista frontal (derecha).



**Ilustración 13.** Rastreo de posición mediante el software de Tracker.

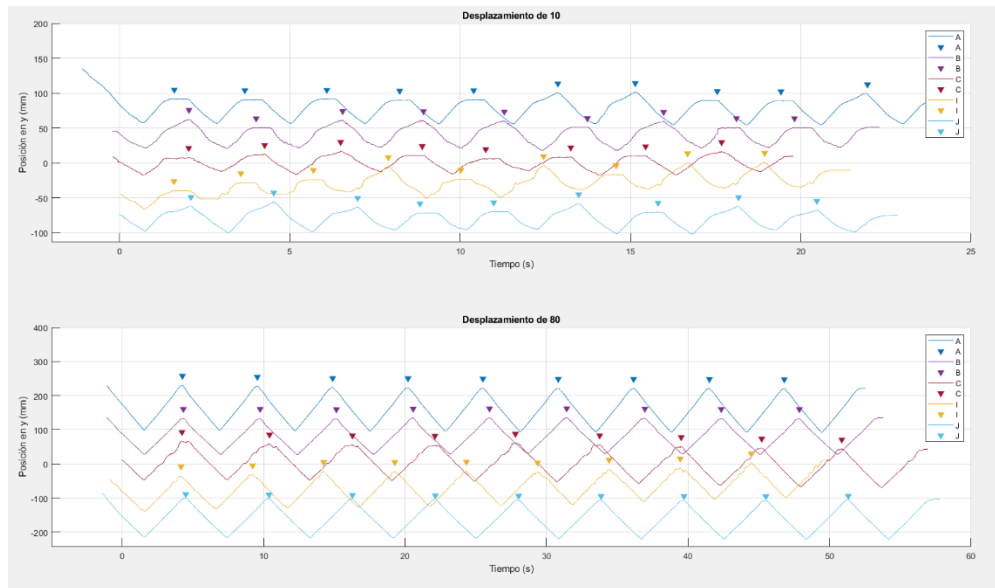
Mediante esta caracterización se pudo medir la velocidad global máxima, rango de movimiento, errores de comunicación y deslizamiento, entre otros, sin embargo, para concluir sobre el funcionamiento general y empezar a analizar cómo optimizarlo y/o cambiarlo con respecto a los objetivos del proyecto actual se decidió hacer pruebas específicas, que en este caso significa caracterizar cada sistema motor-extrusor por separado.

## ii. Pruebas específicas

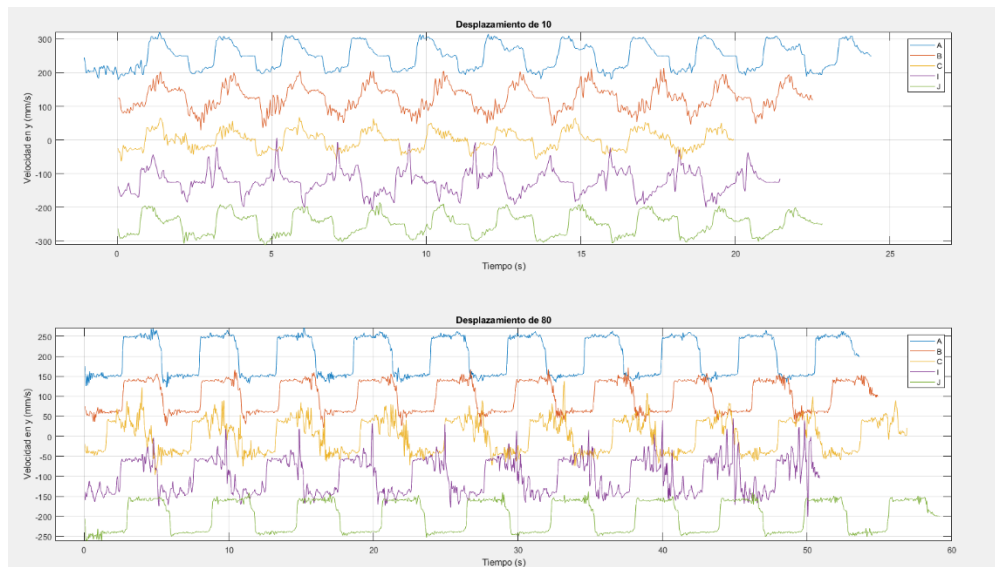


**Ilustración 14.** Prueba específica de un sistema motor-extrusor

De la misma forma con la que se evaluó el movimiento general del robot, se evaluó cada sistema extrusor por separado para observar su comportamiento individual y concluir sobre el origen de los diferentes fallos. Dentro de los fallos principales está el deslizamiento mecánico no deseado del filamento de metal que funciona como tendón en la estructura principal del robot. Debido a esto se midió el deslizamiento promedio en cada motor y se realizó su distribución de probabilidad. Adicionalmente se evaluó el comportamiento frecuencial de cada motor para determinar si presentaba algún componente que volvía volátil los resultados:

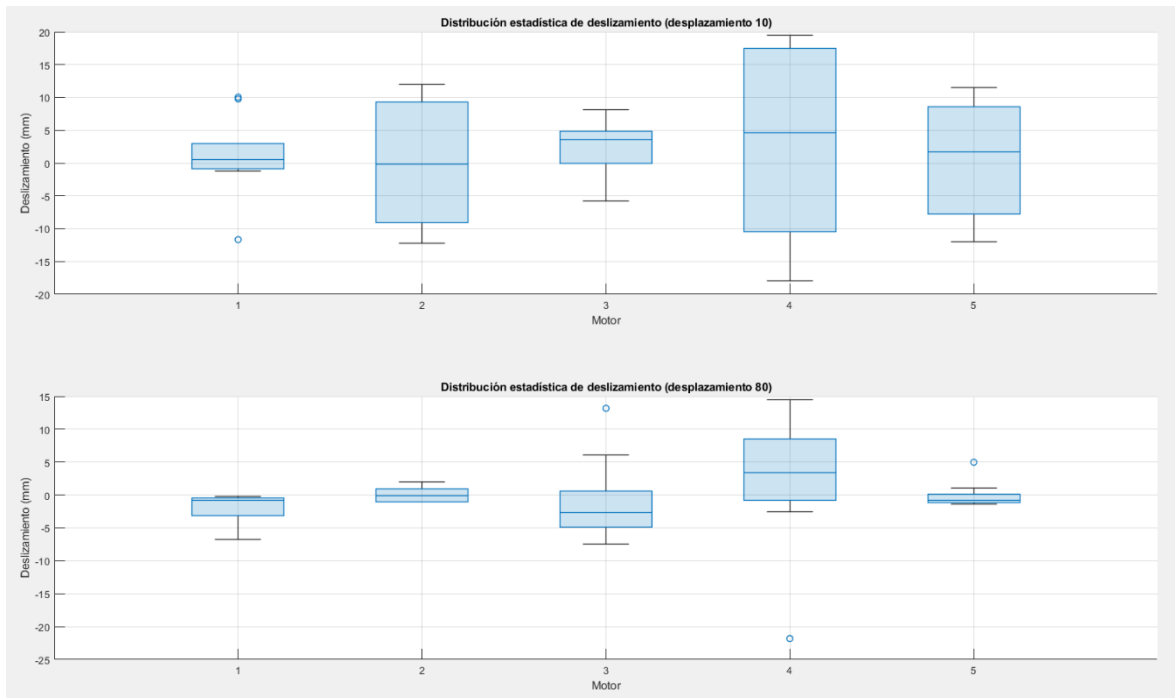


**Ilustración 15.** Posición en el eje y (vertical) de cada motor para dos pruebas de desplazamiento periódico: amplitud de 10 mm y de 80 mm.



**Ilustración 16.** Velocidad en el eje y (vertical) de cada motor para dos pruebas de desplazamiento periódico: amplitud de 10 mm y de 80 mm.

Los gráficos de cada motor están separados verticalmente para facilidad de análisis. Estos se deben entender como si estuvieran centrados en el eje vertical.



**Ilustración 17.** Distribución estadística de deslizamiento en [mm] por cada movimiento en los motores A, B, C, I y J respectivamente.

**Tabla 3.** Caracterización del prototipo inicial

Prototipo inicial	
Velocidad máxima medida (por motor)	Motor A: 98.79 mm/s Motor B: 77.44 mm/s Motor C: 137.42 mm/s Motor I: 144.24 mm/s Motor J: 63.50 mm/s Motor K: No funcional
Rango de movimiento	25 cm
Deslizamiento promedio (por movimiento) ± 3 desviaciones estándar	Motor A: 0.79 ± 6.57 mm Motor B: 0.05 ± 3.42 mm Motor C: 2.63 ± 19.55 mm Motor I: 3.42 ± 30.97 mm Motor J: 0.85 ± 6.05 mm Motor K: No funcional

Se identificó que existen tres principales problemas de movimiento en el sistema (por motor):

- Extrusor (mecanismo)
- Deformación y ductilidad del filamento

- Hardware (comunicaciones y conexiones)

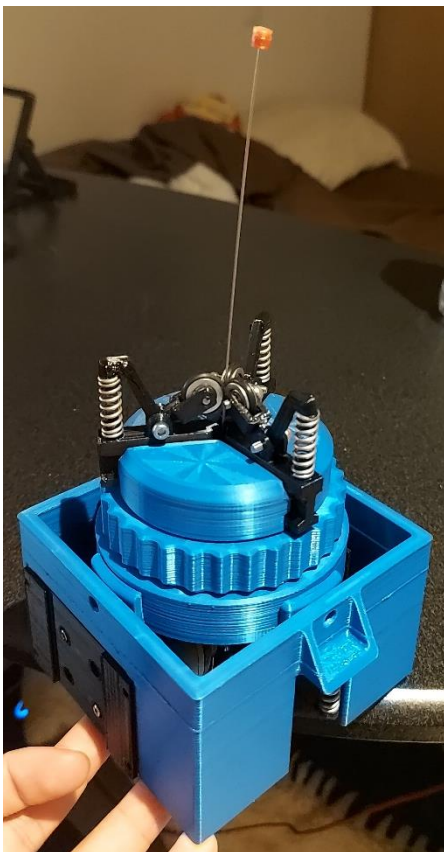
El sistema es mayormente sensible a los problemas mecánicos. En este caso se concluye que los mejores motores para exactitud, es decir menor deslizamiento, son los motores A y J. Se le podría atribuir una "calificación de calidad" a cada motor de manera arbitraria, sin embargo, se considera que no es necesario ya que se puede concluir sobre las fallas mecánicas primero:

La rueda de potencia anclada al eje principal del extrusor, al igual que gran parte del sistema, este impreso en 3D y contiene muchas fallas por ondulaciones. Esta rueda no está perfectamente centrada y se desvía fácilmente con el movimiento del filamento. Se espera poder generar un prototipo en metal o con mayores restricciones hacia el filamento.

El O-ring del rodamiento del extrusor suele proveer muy baja superficie de agarre por fricción al filamento por lo que tiene un anclaje muy variable y dependiente de la forma del filamento (hacia qué lado esta deformado).

El filamento se enderezará previamente a su uso y se usará un diámetro mayor para su aplicación final para evitar su deformación durante su uso.

## b. Construcción del prototipo final



**Ilustración 18.** Prototipo preliminar del prototipo (previo a su última versión).

### Cambios realizados para el nuevo prototipo

- Principalmente se requirió diseñar el siguiente prototipo con el objetivo de que admita varillas o filamento de múltiples diámetros para tener versatilidad y robustez si es necesario (para sostener la cámara y no se deforme tan fácil).
- Se simplificó el diseño a solamente 3 motores debido a la aplicación. No es necesario tener 6 grados de libertad para cumplir con los objetivos del proyecto. Los motores utilizados ahora serán más potentes y rápidos.
- Se diseñó el siguiente prototipo pensando en evitar el deslizamiento mecánico para aprovechar toda la potencia transmitida por los motores y poder implementar el sistema de control de manera adecuada.
- Se usó un microcontrolador ESP32 en vez de un Arduino.
- Se implementó un sistema de control y comandos propios de los motores.
- Ahora el sistema de control pasó a ser control relativo (seguimiento de objetos) en vez de control global (posicionamiento coordinado).
- Se incluyó una “perilla” o eje manual de extrusión para extruir el filamento manualmente y también sirve para observar el comportamiento del motor.
- Se diseñó un sistema modular para poder cambiar piezas con facilidad para adaptarse a posibles aplicaciones futuras.

### Motor seleccionado:

**Tabla 4.** Especificaciones técnicas del motor escogido.  
 Tomadas de myactuator.com

Modelo	Myactuator RMD-L-5010 35T
Protocolo de comunicación	CAN
Voltaje nominal	16 V
Corriente nominal	5.06 A
Torque nominal	0.26 Nm
Peso	135 g
Frecuencia de comunicación (CAN)	2kHz-1Mbps



**Ilustración 19.** Motor seleccionado. Tomada de myactuator.com

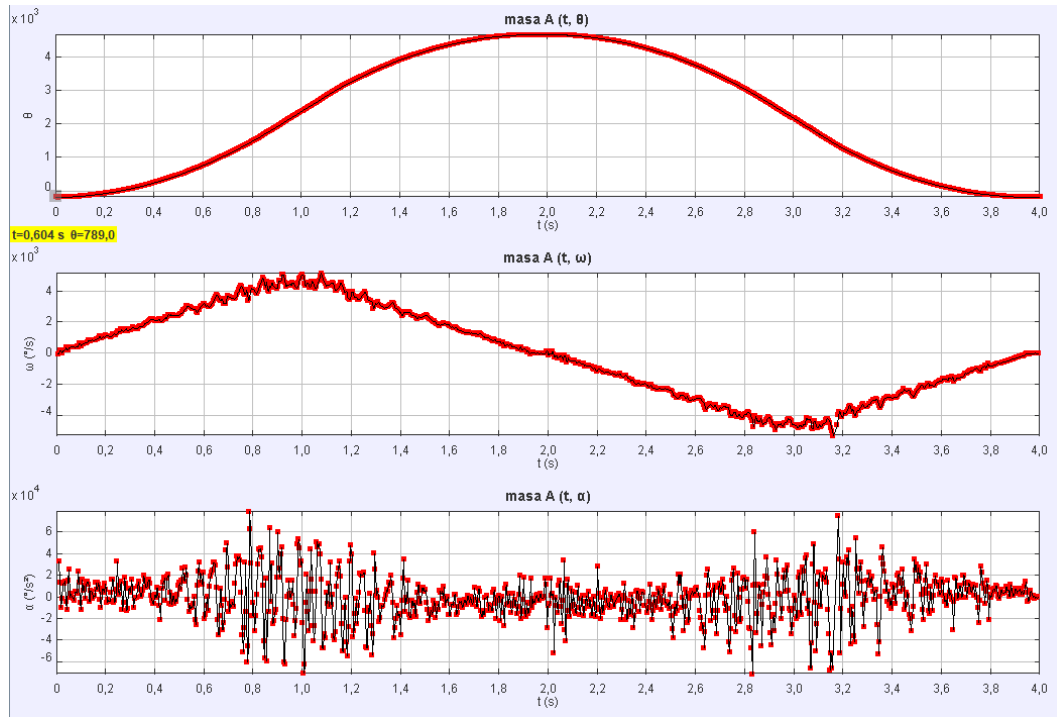
### i. Caracterización del motor seleccionado

De la misma forma que se caracterizaron los motores del prototipo inicial como un sistema completo motor-extrusor, para caracterizar este motor se instaló directamente en la versión final del extrusor diseñado (prototipo final, **Ilustración 22.**) y se llevó a su velocidad máxima. A pesar de no estar extruyendo alambre durante estas pruebas, el motor estuvo constantemente expuesto a fricción y una carga debido a todos los componentes de unión por contacto dentro del ensamble final. El motor se programó para rotar acelerando hasta llegar a su máxima velocidad y mantenerse a esa velocidad unos instantes previos a frenar totalmente y volver a acelerar en la otra dirección de la misma manera. Se determinó que el motor es totalmente capaz de llevar el prototipo a las velocidades necesarias, e incluso más allá, además de tener una comunicación muy rápida con el microcontrolador. Se espera que estas velocidades disminuyan en las pruebas específicas (extruyendo filamento) debido a que el torque disminuye a medida que aumenta la velocidad angular por lo que esta va a ser limitada para poder mantener la fuerza de agarre del extrusor y evitar deslizamientos. A continuación, están las mediciones correspondientes a las pruebas de caracterización del motor:

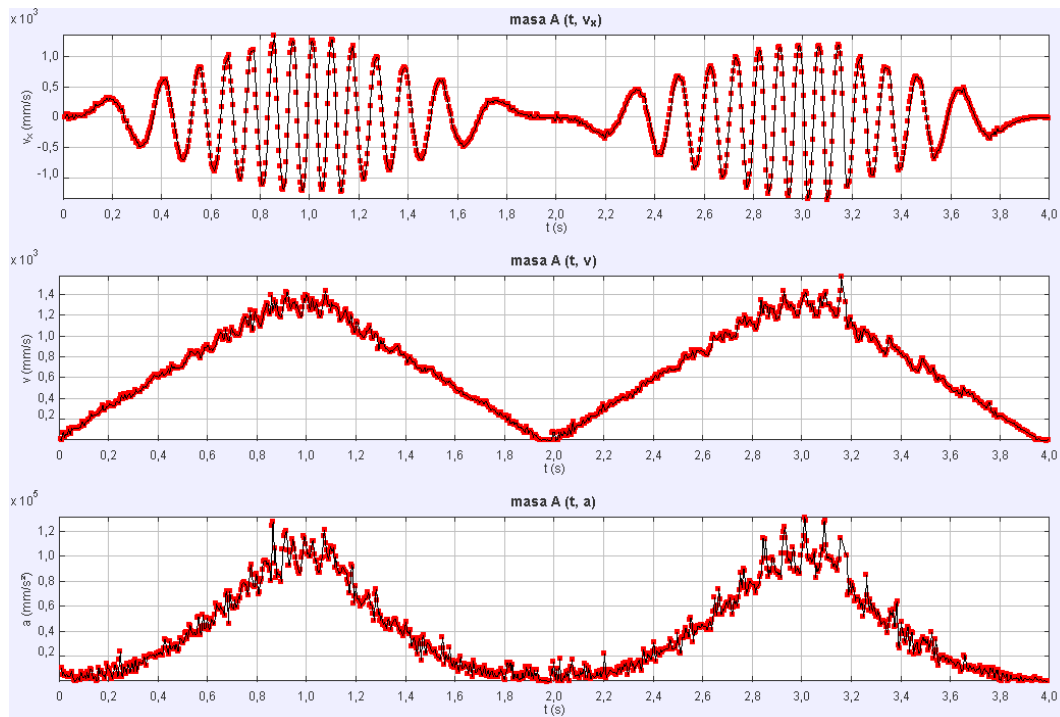
**Tabla 5.** Caracterización del motor seleccionado.

Motor instalado	
Velocidad angular máxima	5188 °/s
Velocidad lineal máxima	1579 mm/s
Aceleración angular máxima	79350 °/s <sup>2</sup>
Tiempo para velocidad máxima	900 ms





**Ilustración 20.** Ángulo de giro acumulado, velocidad y aceleración (angulares) del motor.



**Ilustración 21.** Posición en el eje x, magnitudes de velocidad y aceleración (lineales) del motor.



## ii. Pruebas específicas

En el caso de este prototipo no se realizaron “pruebas específicas” referentes a cada motor, sino que se separaron en las secciones de **5.b.i. Caracterización del motor seleccionado** y **5.b.ii. Pruebas específicas**. Siendo la caracterización del motor la evaluación sin filamento de su posible velocidad máxima y las pruebas específicas la velocidad máxima con extrusión de filamento. Para las pruebas específicas se realizó la misma prueba que con el primer prototipo: se colocó un filamento de 0.8 mm de diámetro a extruirse cíclicamente en ambas direcciones con un marcador en la punta para seguir su movimiento y caracterizar su desempeño.

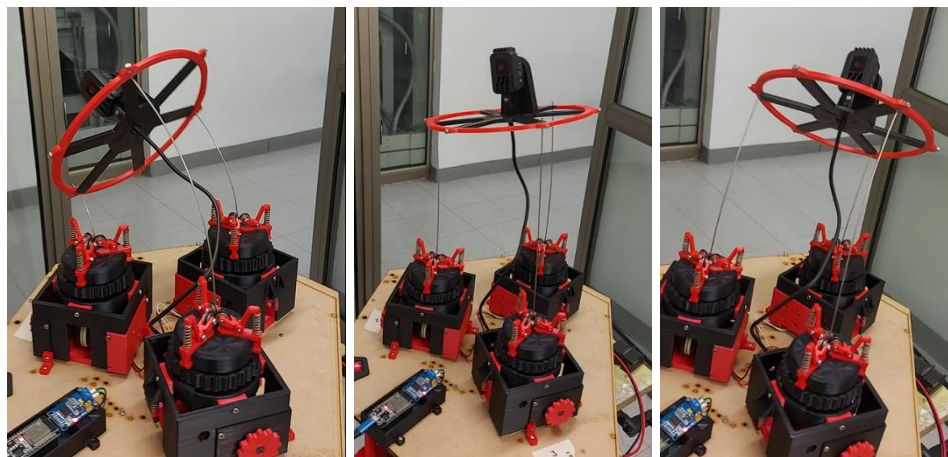
**Tabla 6.** Caracterización del prototipo final

Prototipo final	
<b>Velocidad lineal máxima</b>	Motor 1: 608.24 mm/s Motor 2: 428.00 mm/s Motor 3: 527.9 mm/s
<b>Rango de movimiento</b>	1 m (No comprobado)
<b>Deslizamiento promedio ± 3 desviaciones estándar</b>	Motor 1: $5.57 \pm 4.52$ mm Motor 2: $1.7 \pm 8.09$ mm Motor 3: $0.7 \pm 10.15$ mm



**Ilustración 22.** Prototipo final

## iii. Pruebas globales



**Ilustración 23.** Ensamble total del robot en diferentes posiciones.

El ensamble total del robot (**Ilustración 23.**) cumple con las características principales de un robot paralelo continuo y es capaz de moverse con respecto a sus 3 grados de libertad como era

esperado. A pesar de que por cronograma no se lograron evaluar pruebas dinámicas completas del ensamble final del prototipo se pudo evaluar que:

- El diámetro final seleccionado para el alambre (1.5mm) no es lo suficientemente rígido para extender el end-effector la distancia planeada, sin embargo, se puede cambiar fácilmente en un futuro.
- Los movimientos son fluidos y rápidos pero optimizables todavía en gran medida.
- Una sección o “aro” intermedio podría darle estabilidad al robot para alcanzar distancias o extensiones mayores.
- La cámara seleccionada no es adecuada para altas velocidades debido a su enfoque fijo y peso.
- El deslizamiento de los extrusores es adecuado ya que permite un gran agarre sobre el alambre dejando la posibilidad de deslizarse por exceso de tensión.
- Es necesario la instalación de un reconocimiento de posición constante para controlar y medir el deslizamiento. También se debería instalar un punto inicial de referencia como limitante de movimiento para evitar que los motores lleguen al tope del robot. Esto se podría lograr mediante finales de carrera o interruptores.

### **c. Comparación de prototipos**

El prototipo final llega a velocidades hasta 3 veces mayores que el prototipo inicial y presenta un deslizamiento menor en promedio y con variaciones mucho menores. De igual forma estas pruebas se realizaron con el mismo alambre con el que se hicieron las pruebas del otro prototipo por lo que se espera que estos resultados puedan mejorar si hacen pruebas con un alambre más recto o de mayor diámetro.

También se espera que con el ensamble de los tres extrusores al tiempo se mejoren drásticamente los resultados ya que sería más estable y el robot se podrá mover con varios motores incluso involucrando cierto efecto látigo debido a la flexión de los filamentos y el peso del end-effector. Otra posible mejora sería alimentar los motores con una fuente de 16V en vez de 12V mejorando así su potencia y eficiencia motor permitiendo mayores velocidades.

## **6. Conclusiones**

Teniendo en cuenta los resultados anteriormente enunciados se puede concluir que se lograron parcialmente los objetivos tanto generales como específicos ya que:

- Se rediseñó un sistema ya existente para moverse a altas velocidades manteniendo sus propiedades y características esenciales.
- Se implementaron diferentes componentes que componen un robot paralelo continuo para en un futuro realizar mediciones de movimiento global con el robot completo.
- Se caracterizó la dinámica y movimiento del robot mediante caracterizaciones específicas.
- Se lograron velocidades mayores a 1 m/s con los motores escogidos, programados y con carga así que es probable que el robot en un futuro alcance esas velocidades.

## 7. Trabajos futuros y recomendaciones

El diseño del prototipo se ha demoró bastante más de lo esperado y ha llevado un recorrido impredecible, sin embargo, los mecanismos actuales son cercanos a lo esperado y se espera que en futuros trabajos se pueda continuar con este gran proyecto. Dentro de lo que sería adecuado seguir sería el control completo del robot mediante la cámara y un reconocimiento más amplio de objetos mediante análisis de imágenes.

Este proyecto terminó siendo un conjunto de partes bastante grande siendo cada extrusor un ensamble con más de 30 partes sin contar tornillos, pero precisamente por eso es que es posible cambiar alguna parte si es necesario para adaptarse a una gran variedad de proyectos y/o necesidades. Si se desea se podría replantear el diseño para optimizarlo y fusionar diferentes piezas para que el ensamble final involucre menos tornillos y/o uniones.

En el inicio del proyecto se evaluó también la posibilidad de diseñar movimientos autónomos del robot mediante la instalación de un microprocesador interno que capte y analice la información de la cámara. Esta posibilidad queda abierta a un posible futuro proyecto y es totalmente viable sin añadirle demasiada complejidad al robot como se puede ver en la **Ilustración 8**.

Actualmente la distancia entre los extrusores está dada principalmente por su gran tamaño. Esto afecta directamente el comportamiento del robot debido al gran radio que ahora posee el cuerpo principal de los alambres. No se implementó ningún sistema para reducir este radio, sin embargo, se planteó la posibilidad de ubicar los actuadores en una posición angulada hacia el centro y redireccionar los alambres mecánicamente con una curvatura que permita su deformación y extrusión sin afectar el comportamiento del robot. También se evaluó la posibilidad de redireccionar los alambres por abajo del prototipo para reducir su altura máxima, facilitar su instalación y considerar nuevas aplicaciones.

Así como se mencionó en la sección **5.b.iii. Pruebas globales** (prototipo final), un gran punto de inicio para un siguiente rediseño de este robot puede ser la instalación de finales de carrera y sensores adicionales de posición de filamento para controlar el deslizamiento. Adicional a esto se podría añadir sensores inerciales como una IMU (Unidad de Medición Inercial) con un filtro de Kalman para tener un sistema de control global robusto.

Gracias a este proyecto se logró comprender el valor de motores de precisión como lo son los Myactuator. Estos motores pueden ser aprovechados de mejor forma que lo que realmente han logrado, sería útil estudiarlos y explotarlos en su totalidad ya que son una obra de ingeniería única al igual que el protocolo CAN.

## 8. Referencias

- [1] J. Licona Mármol, Design of a portable control platform for rod-driven continuum parallel robots, Bogotá D.C., Colombia: Universidad de los Andes, 2024.
- [2] J.-S. FARROKH, A. JALALI y I. D. WALKER, Cosserat Rod-Based Dynamic Modeling of Tendon-Driven Continuum Robots: A Tutorial, Toronto, Canada: IEEE Access, 2021.
- [3] REACH Laboratory, «Parallel Continuum robots,» University of Tennessee, Tennessee, 2023.
- [4] A. B. Clark, V. Mathivannan y N. Rojas, «A continuum Manipulator for Open-Source Surgical Robotics Research and Shared Development,» Imperial REDS Lab, London, 2021.
- [5] REACH Robotics Lab, «General Tendon Routing in Continuum Robots,» University of Tennessee, Tennessee, 2014.
- [6] D. A. A. Vanegas, A CONTINUOUS TENDON-DRIVEN DELTA ROBOT - THE DR. OTTO OCTAVIUS PROJECT, Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes, 2024.
- [7] EL EMPAQUE, «Robot paralelo para embalaje y montaje, Quattro,» EL EMPAQUE, 2022.

## 9. Anexos

### a. Configuración de motores

Los motores seleccionados se controlan mediante un intercambio de comandos hexadecimales enviados a través del conversor SPI-CAN conectado al microcontrolador ESP32. Estos comandos incluyen una gran variedad de opciones, parámetros e identificadores. En general, cada comando enviado debe llevar un identificador (ID) y 8 datos hexadecimales. El primer dato hexadecimal dicta la función del comando enviado y el resto de los 8 datos da información sobre este. Finalmente, la mayoría de los comandos (no todos) tienen una respuesta en forma de mensaje de parte del motor como retroalimentación del comando y vienen con un identificador de respuesta similar y respectivo al identificador de envío.

Esto es importante a la hora de configurar los motores ya que su configuración de fábrica implica una dirección (ID) ya definida (normalmente 0x141) y una opción llamada CANID FILTER deshabilitada. Para controlar múltiples motores individualmente se debe asignar un identificador diferente a cada motor y habilitar la opción de CANID FILTER (en ese orden). Este proceso se debe realizar por cada motor a usar: debe energizarse el motor seleccionado y solamente debe estar en conexión de comunicación tal motor o sino todos los motores conectados se reconfigurarán. Para simplificar este proceso se instalaron los interruptores de comunicaciones que se ven en la **Ilustración 8**, y están ubicados por debajo del ensamble total. También se dispuso de un código separado para la configuración de los motores ya que, mientras que no se reinicien los motores por comando, este proceso solo se debe realizar una vez y los motores guardaran su configuración.

En este caso se ocuparán las primeras direcciones posibles dentro de las especificaciones de los motores:

- **Motor 1:** ID = 0x141, por ende, ID (respuesta) = 0x241
- **Motor 2:** ID = 0x142, por ende, ID (respuesta) = 0x242
- **Motor 3:** ID = 0x143, por ende, ID (respuesta) = 0x243
- **TODOS** (mensajes globales): ID = 0x300, ID (respuesta) = 0x24x (depende del motor)

### Procedimiento

- Subir el código llamado **motor\_config.ino** al microcontrolador ESP32
- Energizar el/los motores: En el montaje usado para el prototipo final se energizan todos al tiempo.
- Verificar que solamente un motor tenga conexión a comunicaciones. En el prototipo final esto se verifica en los interruptores de comunicaciones.
- Conectar alguna consola serial para comunicarse con la ESP32.
- Reiniciar la ESP32 y verificar la inicialización del conversor SPI-CAN MCP2515 y la correcta comunicación por consola. Debe aparecer el mensaje de: “MCP2515 Initialized Successfully!” y se debe esperar al mensaje de: “Robot listo”.
- Se debe mandar por consola el número del motor que se desea configurar. Ejemplo: 1 (para el motor 1).
- Observar que el motor se haya configurado exitosamente observando la respuesta del motor por consola (debe mostrar el ID de respuesta asignado) y viendo si se está moviendo el motor en ambas direcciones.

Los códigos usados tanto para la cámara como para el microcontrolador ESP32 se encuentran en el repositorio de GitHub: [github.com/susme2020/PCR\\_GP](https://github.com/susme2020/PCR_GP)

La configuración de los motores esta basada en la información del manual principal de usuario tomada de la página oficial de Myactuador: RMD-L Motor Motion Protocol V3.9-240415 (también se encuentra en el repositorio anterior).

Dentro de este manual se encuentra la estructura de los mensajes hexadecimales tanto de envío como de respuesta y los comandos de control. Entre estos comandos se usaron principalmente los siguientes:

**Tabla 7.** Comandos CAN básicos para uso del motor

Comando	Identificador de comando	Páginas	Descripción
<b>Shutdown</b>	0x80	44-45	Apaga el motor en caso de emergencia o para deshabilitarlo rápidamente.
<b>Stop</b>	0x81	45	Se usa principalmente para frenar el motor, con otros comandos también se puede frenar (por ejemplo: enviando un comando con velocidad 0) sin embargo este es el

			adecuado para frenar totalmente sin forzar el motor.
<b>Speed Closed-loop Control Command</b>	0xA2	49-50	Se usa principalmente para hacer girar el motor a cierta velocidad ingresada como parámetro e incluye el sistema de control con aceleración.
<b>System Reset</b>	0x76	68-69	Reinicia el motor a las opciones de fábrica o “default”.
<b>Function Control Command (CANID Filter)</b>	0x20	82-83	Tiene muchos usos. En este caso solo se usa para habilitar la opción del CANID Filter.
<b>CANID Setting Command</b>	0x79	87-88	Configura el ID del motor

---