
Diseño y prototipado de una articulación de un robot Cheetah

Robótica móvil: Diseño mecánico y de movimiento de la pierna trasera derecha de un robot Cheetah.

Autores:

Daniel Felipe Cantor
Valentina Cruz De Paula
Julián Felipe Medina
Juan Camilo Olaya
Miguel Angel Segura

Profesor:

Ricardo Ramirez
Fernando Rodriguez Mesa
David Diaz
Juan Rincón

Asignatura:

Proyecto Aplicado en Ingeniería

Universidad Nacional de Colombia
Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica
Bogotá, Colombia
2023-III

Contents

1 Resumen	4
2 Equipo de trabajo	4
2.1 Integrantes	4
2.2 Contrato Social	4
2.3 Bitácoras	4
3 Introducción	4
4 Formulación y descripción del problema	5
4.1 Objetivos	6
4.1.1 General	6
4.1.2 Específicos	6
5 Requerimientos	6
5.1 Requerimientos del cliente	8
5.2 Alcances	8
6 Metodología	8
7 Diseño Conceptual	9
7.0.1 Diseño de Estructura	9
7.1 Diseño de Acoplos	11
7.2 Diseño de Sistema de Control	11
7.2.1 ROS	11
7.2.2 Raspberry PI	11
7.2.3 Jetson	12
7.3 Arduino	12
7.4 Motores	13
7.5 Manufactura de la pierna	13
7.6 Ensamble	14
8 Diseño en Detalle	14
8.1 Análisis por cálculos	14
8.1.1 Estática de la estructura	14
8.1.2 Sistema de Transmisión de Potencia	20
8.1.3 Diseño del eje	22
8.1.4 Creación de rutinas de movimiento	23
8.1.5 Perfiles de movimiento	27
8.1.6 Dimensionamiento de los motores	29
8.1.7 Inercia reflejada	30
8.1.8 Torque máximo	31

8.2	Análisis por herramientas computacionales	33
8.2.1	Estructura	33
8.2.2	Análisis dinámico	35
8.2.3	Análisis de esfuerzos y deformación.	37
8.2.4	Optimización del material	42
8.3	Conjunto Electrónico	42
8.4	Control	46
8.4.1	Definición del Control y posiciones	46
8.5	Comunicaciones y programación	47
8.5.1	Protocolo CAN	47
8.5.2	Arduino	48
8.5.3	ROS	49
8.6	Implementación rutinas en el control	50
9	Pruebas	51
9.1	Plan de verificación	51
9.2	Plan de Validación	54
10	Resultados	54
11	Reflexión del proceso	55
11.1	Reflexión grupal	55
11.2	Reflexión individual	55
12	Planos	56
13	Anexos	56
13.1	Certificaciones OnShape	57
13.2	Evaluación de cliente	57
14	Referencias	58

1 Resumen

El desarrollo del prototipo de la pierna del robot Cheetah incluyó varias etapas clave. Primero, se llevó a cabo el cálculo de un atril como estructura de soporte. Luego, se realizó una cuidadosa selección de materiales para los eslabones y acoplos de la pierna. Los tornillos fueron elegidos por su facilidad de ensamblaje y desensamblaje. Además, se llevaron a cabo análisis estáticos y dinámicos exhaustivos tanto de las piezas individuales como de la estructura en su conjunto. Finalmente, se implementaron tres rutinas de movimiento (caminata, trote y galope) que pueden ejecutarse mediante un control diseñado específicamente para este propósito.

2 Equipo de trabajo

2.1 Integrantes

El presente proyecto es realizado por estudiantes de últimos semestres del departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica de la Universidad Nacional de Colombia, entre ellos se encuentran 1 estudiante de Ingeniería Mecánica y 4 estudiantes de Ingeniería Mecatrónica, quienes tienen como propósito aportar sus conocimientos en diferentes disciplinas para el diseño, construcción y control de la articulación del robot Cheetah.

El proyecto está dirigido para un docente de la misma Universidad, Dr. Ricardo Ramírez Heredia.

2.2 Contrato Social

El contrato social cuenta con los compromisos adquiridos por todos los integrantes del grupo, así como también las penalizaciones frente a algunas faltas. Este documento fue aprobado por cada integrante, y tiene sus respectivas firmas como evidencia. En el siguiente anexo se puede hacer la lectura de dicho contrato. Contrato Social

2.3 Bitácoras

Así mismo, se llevó a cabo un seguimiento y una recopilación de los avances, aportes, problemas, soluciones y reuniones que se presentaron a lo largo del desarrollo de este proyecto. En el siguiente anexo se encuentran las actas del equipo realizadas por cada reunión realizada. Bitácoras

3 Introducción

En el presente documento, se detallan todos los aspectos cruciales a considerar en el desarrollo del prototipo de un robot Cheetah, un proyecto propuesto por el profesor Ricardo Emirio Ramirez. Los puntos abordados incluyen los requerimientos, tanto del cliente como

los establecidos por el grupo, las etapas de diseño (diseño conceptual y diseño de detalle), los cálculos correspondientes, los análisis estáticos y dinámicos aplicados a las piezas y estructuras, las pruebas del prototipo, así como cualquier otro complemento o información adicional que se considere importante.

4 Formulación y descripción del problema

El proyecto es una propuesta dada por el profesor Ricardo Emirio Ramirez Heredia, en el cual se busca diseñar un prototipo de una pierna de robot cheetah (figura 1). El fin del prototipo es ser usado como ejemplo de desarrollo de robótica de la Universidad Nacional de Colombia.

La necesidad de lograr interrelacionar diferentes ramas de conocimiento para dar solución a un problema o para evolucionar tecnológicamente, es uno de los principales enfoques de la humanidad. Por lo tanto, el siguiente proyecto propuesto consiste en diseñar y poner en funcionamiento una articulación robótica, similar a la de un robot Cheetah, robot cuadrúpedo.

Cabe resaltar, que el "Cheetah" fue desarrollado por el MIT (Instituto Tecnológico de Massachusetts). Este robot fue diseñado para imitar la agilidad y velocidad del guepardo, uno de los animales más rápidos del mundo.

Características clave del robot Cheetah del MIT incluyen:

- Diseño Biomimético: El robot Cheetah está diseñado para imitar la anatomía y el movimiento de un guepardo, aprovechando las características naturales de este felino para lograr una locomoción eficiente.
- Locomoción Cuadrúpeda: Similar a un guepardo, el robot Cheetah se mueve en una forma cuadrúpeda, utilizando patas robóticas para correr y maniobrar.
- Velocidad y Agilidad: El enfoque principal del robot Cheetah es alcanzar velocidades significativas y demostrar agilidad en su movimiento, replicando las habilidades de un guepardo en términos de aceleración y velocidad máxima.
- Aplicaciones Potenciales: Estos robots de alta velocidad y movilidad podrían tener aplicaciones en diversos campos, desde la exploración autónoma hasta tareas de búsqueda y rescate en entornos difíciles.

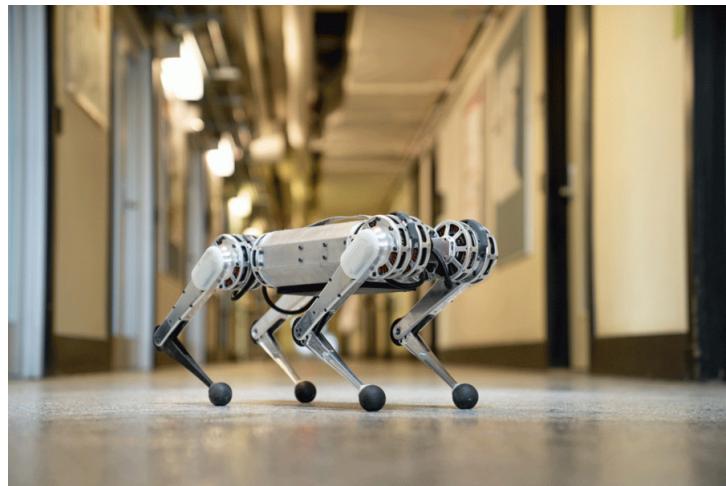


Figure 1: Robot Cheetah MIT

4.1 Objetivos

4.1.1 General

Diseñar un prototipo ligero de una pierna móvil de un robot Cheetah capaz de emular rutinas de movimiento, para que pueda ser utilizado en futuros trabajos académicos y de investigación de la Universidad Nacional de Colombia.

4.1.2 Específicos

- Emular tres rutinas de movimiento con una pierna Cheetah diseñada.
- Seleccionar la estructura más óptima que permita la estabilidad del mecanismo en voladizo.
- Diseñar un mecanismo que sea fiel a los criterios de masa, inercia, y torque para obtener un mejor control de posición.
- Proponer perfiles suavizados de movimiento para las rutinas a implementar.
- Generar una comunicación entre las señales de control y los motores a través del protocolo CAN.

5 Requerimientos

Los requerimientos se resumieron en las siguientes cajas

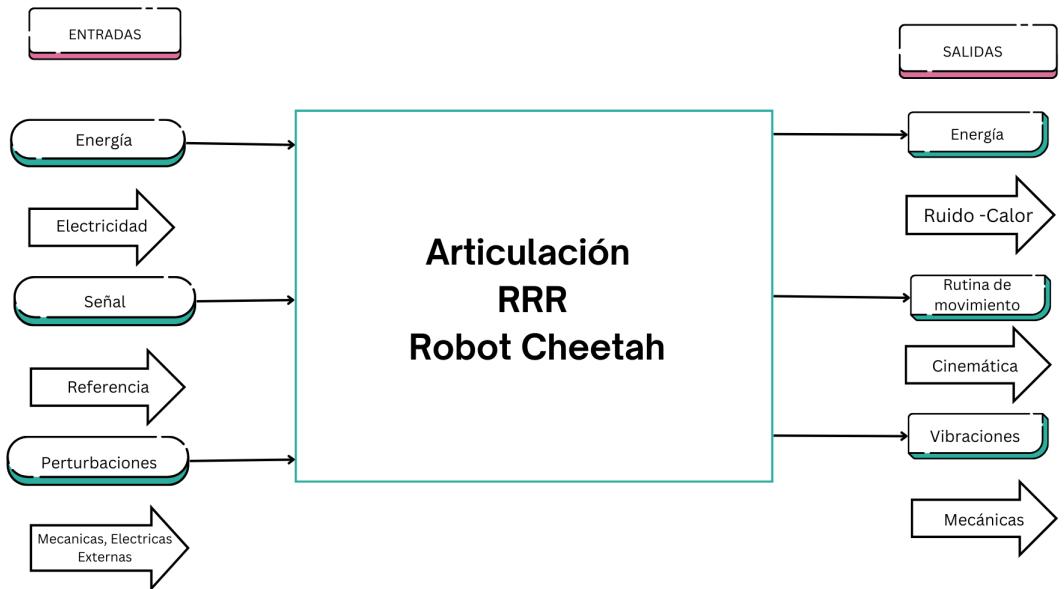


Figure 2: Caja Negra

En la figura 2 se define como entradas para la pierna robótica: la energía eléctrica, señales de control y perturbaciones, y a su vez se define como salida: energía, una rutina de movimiento, y vibraciones.

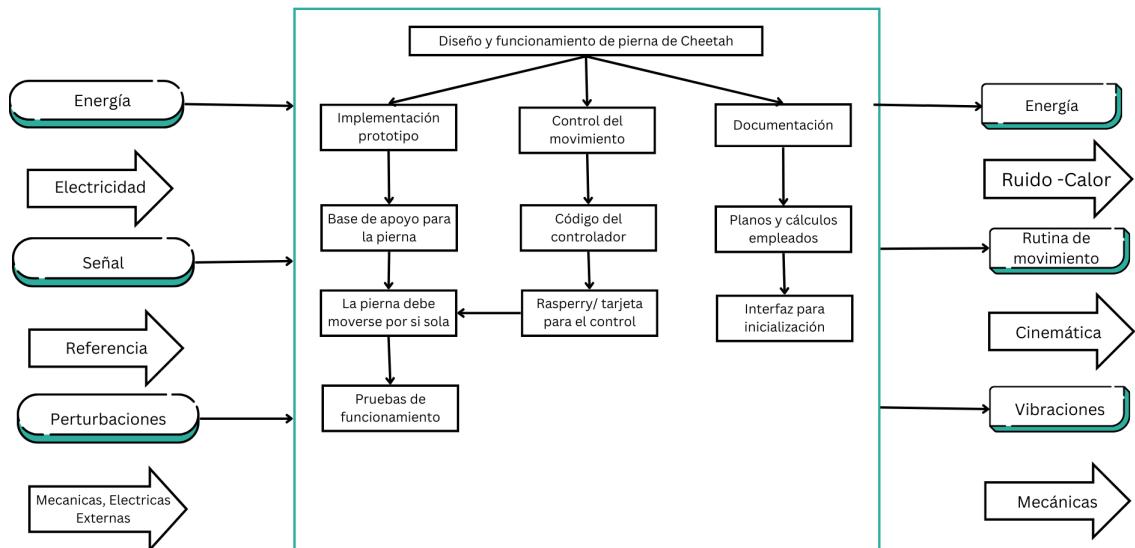


Figure 3: Caja Gris

En la figura 3 se presenta la caja gris, en la cual se definen de 3 los subsistemas a implementar, los cuales son resumidos en la implementación de prototipo (mecánica), el control de movimiento (controlador) y la documentación.

5.1 Requerimientos del cliente

El cliente proporcionó los siguientes requerimientos para contemplar tanto en el desarrollo como en el resultado:

- El prototipo final debe ser estético.
- El prototipo debe realizarse con los motores dados.
- La pierna debe estar en voladizo.
- Debe ser un prototipo fácil de transportar.
- La pierna debe ser capaz de seguir 3 rutinas de movimiento.
- El prototipo no puede superar los 80x80x80cm de volumen.

5.2 Alcances

Ya con los objetivos y los requerimientos definidos, se generan los siguientes alcances:

- Se propone obtener un diseño del mecanismo a implementar, teniendo en cuenta, los grados de libertad (serán tres), el material de prototipado, y los correspondientes análisis de desgaste y fatiga en las piezas de diseño.
- El enfoque del proyecto será el diseño y el control de movimiento de una articulación de un robot Cheetah.
- Diseñar y simular tres rutinas de movimiento: caminar, correr y galopar.

6 Metodología

Para el desarrollo del proyecto, el equipo de trabajo generó su propia metodología de diseño. Esta consta de 4 apartados:

- **Requerimientos:** En donde se incluyen los objetivos del proyecto, tanto general como específicos y las restricciones dadas por el cliente.
- **Diseño:** La etapa de diseño incluye las variables del proceso, el diseño conceptual, el diseño de detalle, cálculos, diseño por selección y la optimización del diseño.
- **Manufactura:** La idea de esta etapa es empezar una vez ya el diseño esté finalizado en su totalidad, incluye selección de procesos, materiales y las pruebas de funcionamiento.
- **Documentación:** Se busca que sea transversal a todo el diseño, donde se recopile información y la documentación de cálculos, simulaciones, ensambles, etc.

La metodología en su totalidad se encuentra en el siguiente anexo: Cronograma

7 Diseño Conceptual

En este apartado se comprenderán los análisis realizados para el diseño conceptual del prototipo a implementar. Para ello fue necesario hacer una previa investigación, encontrando alternativas que se adaptaran a las capacidades del equipo de trabajo, a los recursos económicos y a los requerimientos del cliente. A continuación se presentan las alternativas propuestas para la estructura, los acoples, y el sistema de control.

7.0.1 Diseño de Estructura

En un principio, se generaron diferentes bocetos para aclarar las ideas de la estructura y del mecanismo:

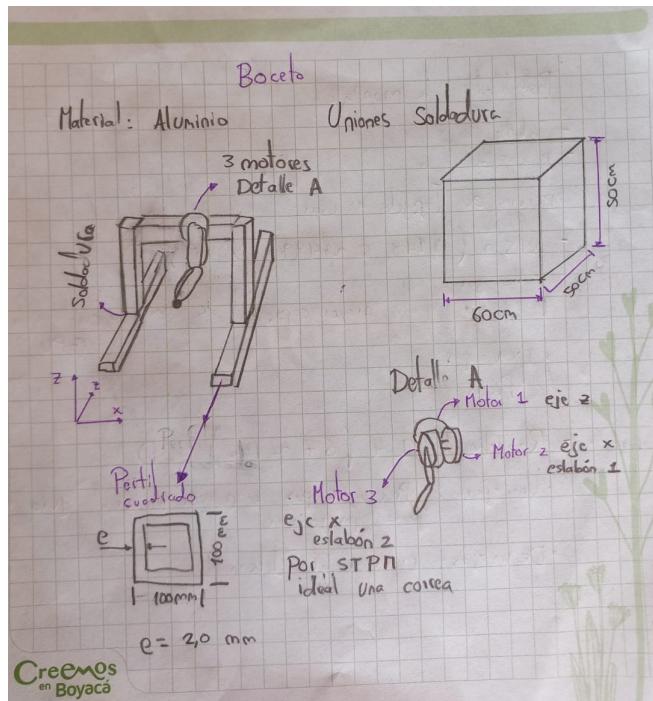


Figure 4: Boceto 1

En el boceto de la figura 4 se propone una alternativa para la estructura de tipo cancha, esta sería ensamblada con perfiles cuadrados y posee un STPM con correa.

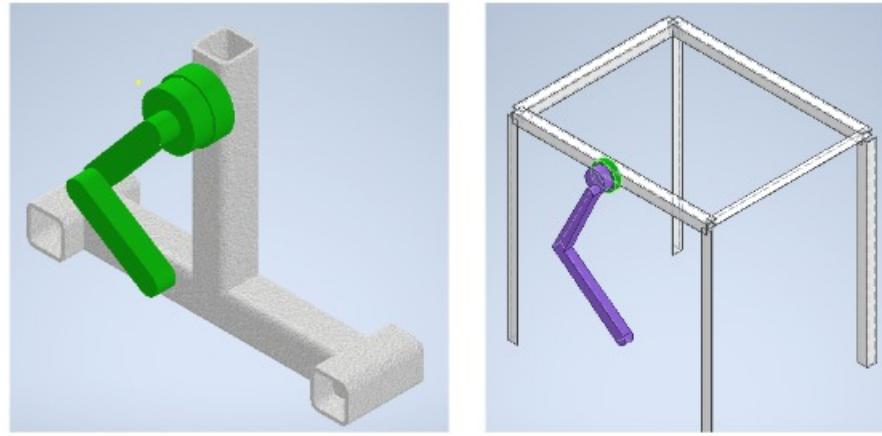


Figure 5: Boceto 2

El boceto de la figura 5 presenta 2 propuestas para la estructura, una tipo atril y una tipo caja, con la pierna del cheetah sujetada de un extremo.

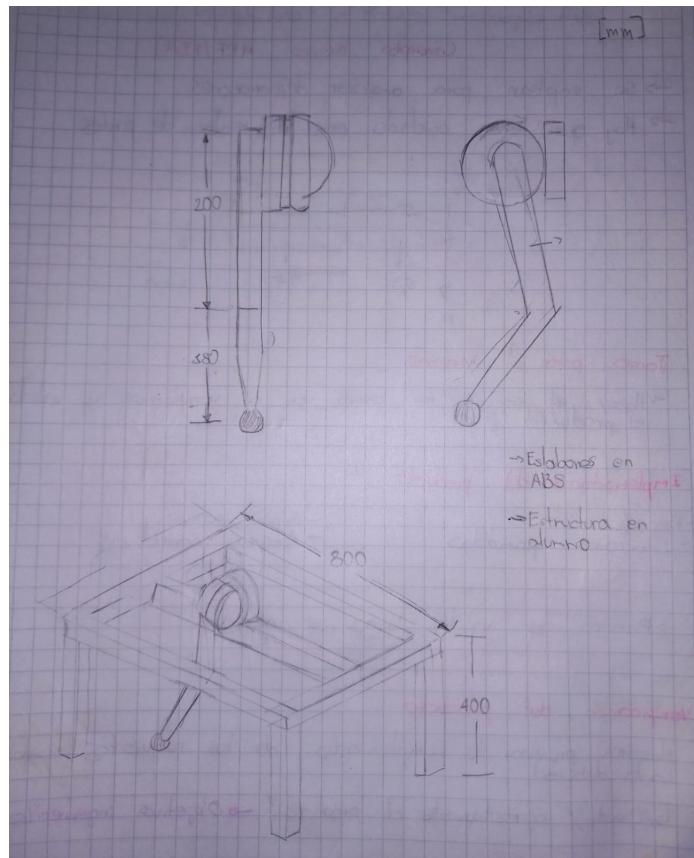


Figure 6: Boceto 3

El boceto de la figura 6 da una propuesta para la estructura tipo caja pero, sujetando a la pierna de un eslabón adicional ubicado en medio de la caja.

Como se logra evidenciar, en las imágenes anteriores, todos los bocetos contaban con 2 eslabones, por lo que la verdadera diferencia radicó en que tipo de estructura se definiría para soportar el mecanismo en voladizo. Por lo que evaluaron diferentes alternativas en la

estructura: tipo caja o mesa, una cancha y una tipo atril.

Finalmente se seleccionó la estructura tipo atril por 2 razones, el costo de los perfiles (dado que se requiere menos material) y la facilidad de ensamblaje y de transporte.

7.1 Diseño de Acoples

El diseño de los acoples se propuso teniendo en cuenta 2 requerimientos:

- Facilidad de ensamble.
- Que permitiera la configuración de los motores en caso de ser necesario. (Dejar un vacío en su diseño para poder hacer las conexiones de cables),

7.2 Diseño de Sistema de Control

Una vez identificadas algunas de las alternativas y teniendo en cuenta tanto los requerimientos del cliente como la adquisición de equipos (reducción de costos), se determina hacer uso en la parte del control de movimiento una Raspberry PI para la conexión a ROS, y para hacer posible la ejecución del envío de instrucciones para que los motores ejecuten el movimiento.

Así mismo, el arduino es necesario, por facilidad de conexión del módulo CAN presente en los motores a usar (servomotores GIM8108-6). Debido a cuestiones económicas se implemento el diseño con un arduino UNO.

Para este subsistema es necesario definir algunos conceptos claves para introducir más al lector acerca de la selección realizada.

7.2.1 ROS

ROS (Robot Operating System) es un conjunto de bibliotecas y herramientas de software de código abierto diseñado para facilitar el desarrollo de software para robots.

7.2.2 Raspberry PI

Una Raspberry Pi es una serie de pequeñas computadoras de placa única desarrolladas por la Raspberry Pi Foundation. Algunas de sus características son:

- Tamaño compacto: Las Raspberry Pi son pequeñas y tienen aproximadamente el tamaño de una tarjeta de crédito.
- Puertos de entrada/salida (I/O): Incluyen puertos GPIO (Entrada/Salida de propósito general) que permiten la conexión de sensores, actuadores y otros dispositivos.
- Puertos USB: Para conectar periféricos como teclados, ratones, cámaras, etc.
- Conexión de red: A través de Ethernet o, en modelos más recientes, también mediante Wi-Fi.

- Tarjeta SD: Utilizada para almacenar el sistema operativo y datos.
- Puerto HDMI: Para conectar a monitores y televisores.
- Procesador y memoria: Varían según el modelo, pero generalmente son lo suficientemente potentes para tareas básicas de informática.

7.2.3 Jetson

Son tarjetas de desarrollo, creadas por NVIDIA, conocidas comúnmente como NVIDIA Jetson. Estas plataformas están diseñadas específicamente para aplicaciones de inteligencia artificial (IA) y aprendizaje profundo en sistemas embebidos, como robots, vehículos autónomos, cámaras de seguridad inteligentes,etc. Algunas de sus características son:

- GPU Integrada: Las Jetson están equipadas con potentes unidades de procesamiento gráfico (GPU) de NVIDIA, lo que permite la aceleración de tareas de aprendizaje profundo y visión por computadora.
- Arquitectura de GPU: Utilizan la arquitectura de GPU NVIDIA CUDA, que está optimizada para cargas de trabajo paralelas y aceleración de cálculos matriciales, fundamentales para muchas aplicaciones de aprendizaje profundo.
- Módulos y Placas: Las Jetson están disponibles en forma de módulos embebidos y placas de desarrollo. Los módulos son diseñados para integrarse en sistemas embebidos más grandes, mientras que las placas de desarrollo son utilizadas para prototipado y pruebas.
- Soporte de Redes Neuronales: Están optimizadas para ejecutar y acelerar redes neuronales profundas (DNN), lo que las hace ideales para tareas de inferencia de aprendizaje profundo en tiempo real.
- Conectividad y Puertos: Incluyen una variedad de puertos para facilitar la conectividad, como puertos USB, Ethernet, HDMI, entre otros, dependiendo del modelo.

7.3 Arduino

Arduino se refiere a una plataforma de hardware y software de código abierto que se utiliza para el desarrollo de proyectos electrónicos.

Arduino proporciona placas de desarrollo con microcontroladores y un entorno de desarrollo integrado (IDE, por sus siglas en inglés) que facilita la programación de estas placas. La placa de desarrollo típica de Arduino incluye un microcontrolador, puertos de entrada/salida (E/S), y pines que permiten la conexión de sensores, actuadores y otros componentes electrónicos.

7.4 Motores

Para la puesta en marcha de los motores, fue necesario entender su funcionamiento y realizar una extensiva investigación, donde gracias a diferentes manuales encontrados, fue posible determinar que los motores cuentan con una ecuación de control incorporada en su firmware. La ecuación es la siguiente:

$$\text{Torque de Referencia} = kp \cdot \text{Error de Posición} + \text{Torque} + kd \cdot \text{Error de Velocidad}$$

- **Error de Posición:** Mide la discrepancia entre la posición deseada y la posición actual del motor.
- **Error de Velocidad:** Representa la diferencia entre la velocidad deseada y la velocidad actual del motor.
- **Término Proporcional (kp):** Ajusta el torque en proporción al error de posición, dictando la fuerza necesaria para alcanzar la posición deseada.
- **Término Derivativo (kd):** Modifica el torque basándose en la velocidad del motor, contribuyendo a la estabilidad del sistema.
- **Término de Torque:** Permite ajustes adicionales de torque, considerando factores externos o fuerzas inesperadas.

7.5 Manufactura de la pierna

Para la manufactura de los acoplos y los eslabones de la pierna de cheetah se propusieron las siguientes alternativas:

- **PETG:** El PETG es un termoplástico transparente y resistente, conocido por su durabilidad y facilidad de impresión 3D. Se utiliza comúnmente en la fabricación de piezas resistentes y transparentes.
- **PLA:** El PLA es un bioplástico derivado de recursos naturales como el maíz. Es fácil de imprimir en 3D, biodegradable y se utiliza ampliamente para prototipos y proyectos creativos.
- **ABS:** El ABS es un termoplástico resistente y duradero, conocido por su tenacidad y capacidad de resistir altas temperaturas. Se utiliza en impresión 3D y en la fabricación de piezas robustas.
- **Aluminio:** El aluminio es un metal ligero y resistente con una alta conductividad térmica y eléctrica. Se utiliza en una variedad de aplicaciones, desde construcción hasta fabricación de componentes electrónicos debido a su versatilidad.
- **Acero:** El acero es una aleación de hierro y carbono, con propiedades mecánicas superiores. Es ampliamente utilizado en la construcción, fabricación de automóviles, herramientas y maquinaria debido a su resistencia y durabilidad.

Dado lo anterior, se generó una tabla de selección (tabla 1) con el fin de escoger un material para el prototipo, basándose en características como la resistencia y la facilidad de manufactura para crear diferentes geometrías en las piezas.

En la tabla, se observa que el plástico PETG se destaca por su facilidad de impresión 3D, su resistencia, su viabilidad para generar prototipos resistentes y por la disponibilidad del material.

7.6 Ensamble

Según los materiales propuestos, se realizó la siguiente tabla de selección según algunas opciones para el ensamblaje

Como se puede observar en la tabla 2 para cada material se decide ensamblaje por tornillos dada la facilidad de ensamblaje, de manufactura y transporte del prototipado.

8 Diseño en Detalle

En este apartado se comprenderán los análisis de ingeniería realizados para la selección del diseño final de la articulación robótica. Esta se dividió en dos: análisis por cálculos y análisis por herramientas computacionales.

8.1 Análisis por cálculos

Siguiendo la metodología planteada para el desarrollo de la articulación robótica fue necesario realizar diferentes análisis por cálculos ingenieriles, entre ellos se encuentran los análisis estructurales, análisis del sistema de transmisión de potencia, análisis del diseño de un eje, análisis de las rutinas a implementar y análisis de dimensionamiento del motor. Cabe resaltar que cada una de las subsecciones mostradas a continuación posee una **memoria de cálculo** encontrada en los anexos o en el siguiente hipervínculo Memorias de cálculos.

8.1.1 Estática de la estructura

El diseño final de la estructura principalmente se llevó a cabo a partir del análisis estático, esto es debido a que la articulación robótica debe permanecer en voladizo por lo que la estructura debe ser la que proporciona la estabilidad a este mismo. A través de este análisis se identificaron las dimensiones de la estructura con las que se generaría dicho equilibrio estático.

Para el cálculo estático se suponen tres fuerzas de magnitud diferente en el lugar donde se ubica la pierna. Se toma cada motor como un cuerpo independiente que produce un peso, adicional de los dos eslabones y otros elementos (STPM, elementos de sujeción y acoplos).

Material	Facilidad de Impresión 3D	Resistencia	Aplicaciones	Disponibilidad
PETG	Alta	Alta	Prototipos resistentes y transparentes	Buena disponibilidad
PLA	Alta	Media	Prototipos y proyectos creativos	Amplia disponibilidad
ABS	Media	Alta	Piezas robustas y resistentes a altas temperaturas	Disponibilidad común
Aluminio	N/A	Muy Alta	Estructuras ligeras y conductoras	Amplia disponibilidad
Acero	N/A	Muy Alta	Construcción, automóviles, maquinaria	Amplia disponibilidad

Table 1: Comparación de Materiales para un Prototipo con Disponibilidad

Tipo de Ensamble	Material Recomendado	Facilidad de Ensamble/Desensamblaje
Tornillos	PETG	Moderada
Unión Adhesiva	PLA	Fácil
Soldadura	Acero	Difícil

Table 2: Tipos de Ensamble, Materiales Recomendados, Facilidad de Ensamble/Desensamblaje

A continuación se muestra el diagrama de cuerpo libre del conjunto, teniendo en cuenta una fuerza equivalente total para el apoyo.

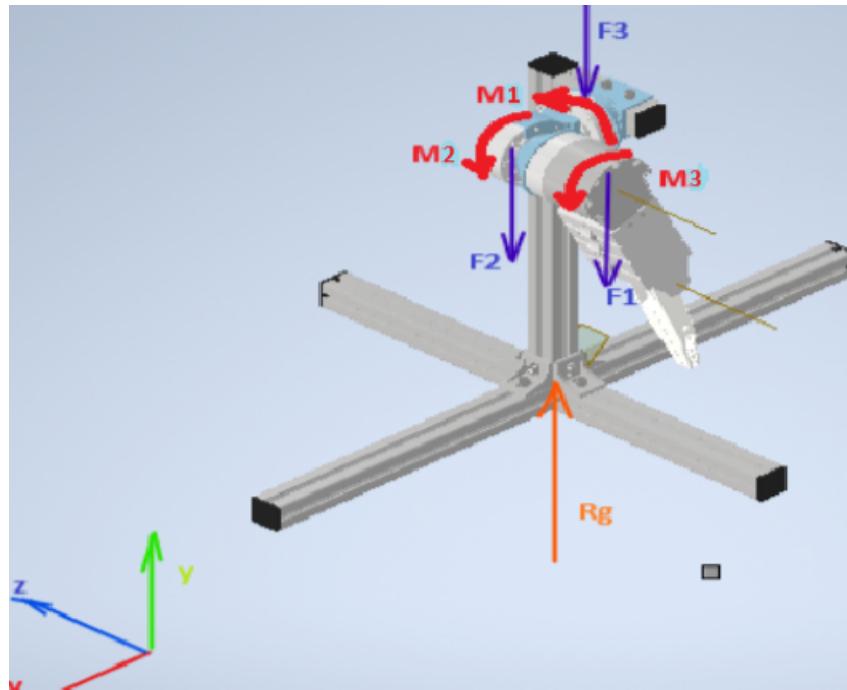


Figure 7: DCL ensamble articulación.

Cabe resaltar que se tiene en cuenta tanto el peso, como también el torque máximo de cada uno de los motores, los cuales se trabajan como par momentos para este análisis. Los valores a utilizar fueron los siguientes:

$$F1 = 13.46N$$

$$M1 = 7.62Nm$$

$$F2 = 7.06N$$

$$M2 = 7.62Nm$$

$$F3 = 7.62$$

$$M3 = 7.62Nm$$

Dado que en la primera etapa de la metodología (diseño conceptual) resultaron tres

posibles alternativas para la estructura (atril, cancha, y mesa), se modelaron en el Software Robot Structural Analysis las tres opciones con variaciones en sus dimensiones, siempre intentando cumplir una estabilidad estática.

Lo anterior se realizó con el objetivo de poder generar una matriz de decisión en la cual se pudiera calificar las diferentes opciones con una visión más amplia de los resultados que se podían obtener.

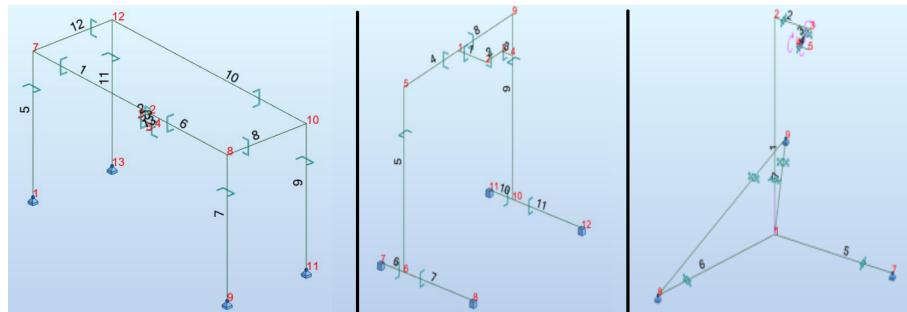


Figure 8: Alternativas estructura

Con ello, se obtuvo la siguiente matriz de decisión, en la que la opción 1 a 4 son tipo mesa, la opción 5 tipo cancha y la 6 tipo atril. Se elige como definitiva la opción de atril para la estructura.

Característica	Importancia	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Opción 4	Opción 5	Opción 6
Estabilidad	7	1	1	1	1	1	1
Resistencia estructural	6	1	1	1	1	1	1
Resistencia a pandeo	3	1	1	1	1	0	0
Costo (cantidad de material)	5	-1	-1	-1	-1	0	1
Ensamblaje	2	1	1	1	1	1	1
Estética	4	-1	0	0	1	1	1
Fácil de desplazar	1	-1	0	0	0	1	1
Resultados		8	13	13	17	20	25

Figure 9: Matriz de decisión para definir forma de estructura

Una vez ya definida la forma de la estructura se procede a proponer dimensiones para

ella, e iterar con el objetivo de obtener mejores resultados en las fuerzas de las reacciones. Las dimensiones finales quedan de la siguiente manera:

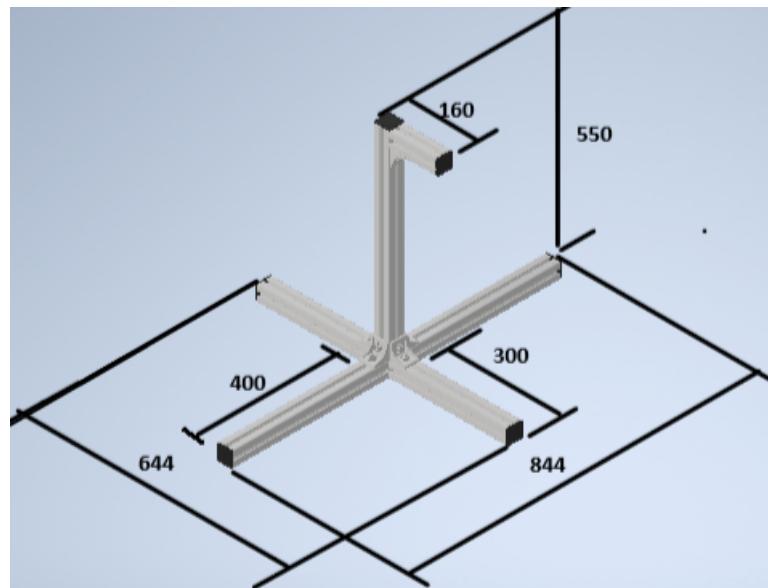


Figure 10: Dimensiones en mm estructura

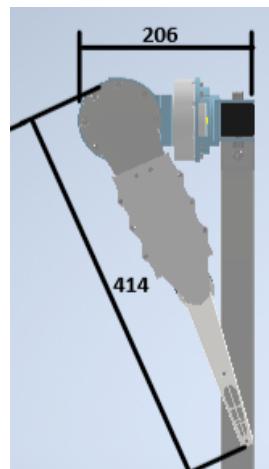


Figure 11: Dimensiones en mm estructura vista lateral

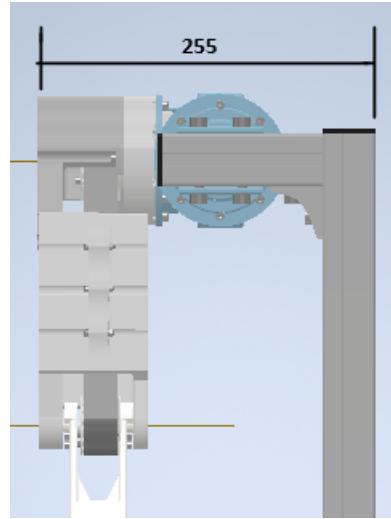


Figure 12: Dimensiones en mm estructura vista frontal

Para solucionar el problema estático se parte encontrando la reacción equivalente en la base, y se compara con los arrojados por el Software computacional.

$$RG = 27.5917N$$

Node/Case	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (Nm)	MY (Nm)	MZ (Nm)
1/ 1	-0,00	-0,00	27,59	-4,03	-17,17	0,00
Case 1	DL1					
Sum of val.	-0,00	-0,00	27,59	-4,03	-17,17	0,00
Sum of reac.	-0,00	-0,00	27,59	-4,03	-17,17	0,00
Sum of forc.	0,0	0,0	-27,59	4,03	17,17	0,0
Check val.	-0,00	-0,00	0,00	0,00	-0,00	0,00
Precision	2,65203e-11	7,54420e-23				

Figure 13: Reacción equivalente por Herramienta Computacional

Y posteriormente, encontrando las ecuaciones desde la base que hacen el sistema determinado para desarrollarlo.

$$\sum F \rightarrow RG - F_1 - F_2 - F_3 = 0$$

$$\sum M_x \rightarrow M_{F1x} + M_{F2x} + M_{F3x} + M_{R1x} + M_{R2x} + M_{R3x} = 0$$

$$\sum M_y \rightarrow M_{F1y} + M_{F2y} + M_{F3y} + M_{R1y} + M_{R2y} + M_{R3y} = 0$$

Se obtiene como mejor resultado lo siguiente. Para una descripción más detallada del proceso realizado, se puede observar la memoria de cálculo correspondiente. Anexo estática de estructura

$$R1 = 2.9838N$$

$$R2 = 37.1124N$$

$$R3 = -12.5044N$$

Se revisan los cálculos teóricos con los que arroja el software computacional, y se comprobó que los resultados son similares salvo una pequeña precisión atribuida al manejo de cifras significativas.

Node/Case	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (Nm)	MY (Nm)	MZ (Nm)
7/ 1	-0,00	0,00	2,98	0,00	0,0	0,00
8/ 1	-0,00	0,00	36,83	-0,00	-0,00	-0,00
9/ 1	0,00	-0,00	-12,23	-0,00	0,00	-0,00
Case 1	Caso inicial					
Sum of val.	-0,00	0,00	27,59	0,00	-0,00	0,00
Sum of reac.	-0,00	0,00	27,59	-4,03	-17,17	0,00
Sum of forc.	0,00	0,00	-27,59	4,03	17,17	0,00
Check val.	-0,00	0,00	-0,00	-0,00	-0,00	0,00
Precision	1,59212e-10	3,15981e-20				

Figure 14: Valores de reacciones sin masa incluida

Es importante resaltar que este cálculo no está teniendo en cuenta la masa de los perfiles, al implementarla existirían más reacciones hacia abajo por lo que la fuerza R3 se volvería menos negativa, razón por la cual, se toma como efectivo el resultado obtenido. Sin embargo, desde este punto también se plantea la opción de utilizar un contrapeso en alguna de las reacciones (reacción con magnitud más pequeña) para contrarrestar esos valores de reacciones indeseados.

Para el material de la estructura se propone utilizar perfiles CNC TSLOT por la facilidad que tienen para ensamblar, y también por costos económicos y fácil adquisición de ellos.

Se analiza la estructura, ahora teniendo en cuenta el peso de esta, y se obtienen mejores resultados con el uso de un perfil de dimensiones 40x40. Se evidencia que ya se obtiene valores positivos en cada una de las reacciones.

Node/Case	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (Nm)	MY (Nm)	MZ (Nm)
7/ 1	-0,00	0,00	21,28	0,00	-0,00	-0,00
8/ 1	-0,00	0,00	51,57	0,00	0,00	0,00
9/ 1	0,00	-0,00	1,99	-0,00	0,00	0,00
Case 1	Caso inicial					
Sum of val.	-0,00	0,00	74,85	0,00	0,00	-0,00
Sum of reac.	-0,00	0,00	74,85	-4,33	-17,35	0,00
Sum of forc.	0,00	-0,00	-74,85	4,33	17,35	0,00
Check val.	-0,00	0,00	-0,00	-0,00	-0,00	0,00
Precision	7,28834e-11	2,72589e-20				

Figure 15: Valores de reacciones con masa incluida

8.1.2 Sistema de Transmisión de Potencia

En el diseño seleccionado interviene un sistema de transmisión de potencia, el cual está implementado para el eslabón inferior, esto es debido a que en el diseño se contempla que

los tres motores a utilizar (tres grados de libertad) estarán fijos, es decir, sobre el lomo del cuadrúpedo.

La razón de este diseño también se atribuye a los efectos del peso, si se coloca el motor dos en la rodilla, el motor tres también deberá ser capaz de mover tanto los dos eslabones como el segundo motor, lo que implicaría a futuro mayor dificultad para proporcionar un buen desempeño en el control de movimiento de las rutinas de la pierna robótica.

Se determinó por utilizar Sprockets (ruedas dentadas), debido a que es el STPM recomendado para el control de movimiento. Se utilizan generalmente para dar más precisión en la posición puesto a que evita el deslizamiento. Por ello, para esta transmisión de potencia se seleccionó el uso de correas dentadas, y su diseño se realizó por selección a través del catálogo de Intermec.

La selección de las ruedas dentadas se hace a través de la potencia y velocidad del motor, y la distancia entre centros que separará a las dos poleas.

Según el datasheet del motor dado por el cliente, los valores de potencia y velocidad máxima son los siguientes.

$$P = 125W = 0.1672HP$$

$$V_{max} = 350$$

Y se plantea una distancia entre centros de:

$$C = 220mm$$

Con los datos anteriores, se selecciona los siguientes elementos que compondrán el STPM. Para una mayor descripción de este procedimiento, se puede revisar la memoria de cálculo correspondiente. Anexo STPM

- Número de dientes y paso de la polea motriz: **14L**
- Número de dientes y paso de la polea impulsada: **14L**
- Distancia entre centros final: **219 mm**
- Designación de la correa:
- 225L
- Ancho de la correa: **1 in**

Cabe resaltar que las ruedas dentadas seleccionadas son el resultado final después de iteraciones, ya que uno de los requerimientos necesarios, era que el diámetro de las ruedas no superaran los 50 mm puesto a que se debía acoplar al eje del motor.

Referencia	14L100
No. Dientes	14
D _e	41,7
D _f	48
Diseño	P1F
Eje estándar	9,52
Eje Máximo	19,05
F	31,8
D _m	28
L	45
D _l	-
Ref flanque	#54-48.37.F1.5
Peso kg	-

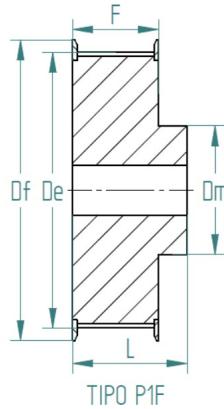


Figure 16: Dimensiones rueda dentada 14L100

8.1.3 Diseño del eje

Se debe diseñar un eje que permita hacer una unión entre los eslabones y el sistema de transmisión de potencia. Para ello, se tienen en cuenta algunos parámetros de diseño como la Potencia, la Velocidad y el Torque máximo.

$$P = 125W$$

$$V = 350RPM$$

$$T_{max} = 3.41Nm$$

Así mismo, se determinan las cargas sobre el eje, y con ello la gráfica de esfuerzos alternaentes. Cabe resaltar que las cargas que experimenta el eje son los pesos de los eslabones y la carga axial que genera la polea.

Se propone ubicar dos rodamientos en los extremos (reacciones), dado que es el lugar donde se ubicará el primer eslabón, el cual únicamente se mueve por el torque del motor.

$$F_{axialPolea} = 213.1539N$$

Por consiguiente, se genera el siguiente diagrama de cuerpo libre, se analiza estáticamente y se encuentra la gráfica de vector cortante y Momento Flector.

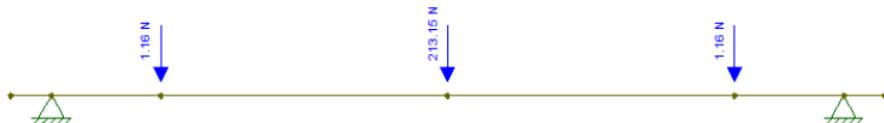


Figure 17: Diagrama de cuerpo libre

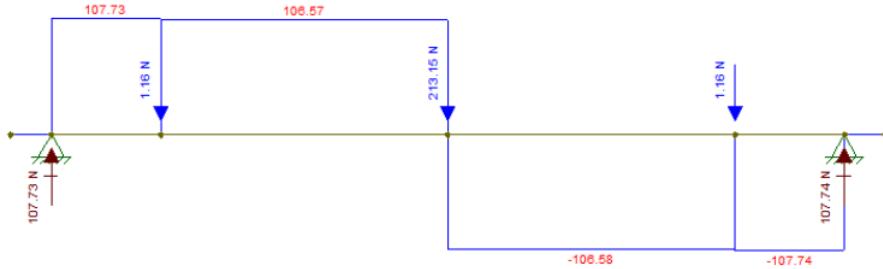


Figure 18: Diagrama de Vector Cortante

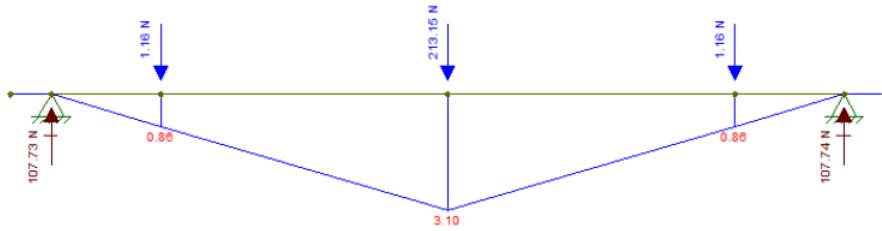


Figure 19: Diagrama de Momento Fletor

Otra consideración tomada en cuenta para el cálculo del eje a fatiga, es un ciclo de vida infinito. Finalmente, se obtiene un diámetro igual a 8.8114 mm. Para mayor detalles del cálculo de fatiga del eje, se puede consultar la memoria de cálculo correspondiente. Anexo Eje por fatiga

Sin embargo, el diámetro del eje se normaliza a una dimensión 10.6 mm puesto a que es el diámetro con el que viene la polea (rueda dentada) por defecto. Por otro lado, al ser la sección de estudio la que presenta el momento flector más grande, se puede asumir que los otros diámetros también deberán ser como mínimo ese valor.

Por tanto, se seleccionan rodamientos de bolas SKF, referencia 699z de 9 mm de diámetro interno y un grosor de 6 mm.

8.1.4 Creación de rutinas de movimiento

Uno de los objetivos de este proyecto es poder emular rutinas de caminado, trote y galope de un animal cuadrúpedo. Para ello, se estudió el movimiento ejercido por estos animales y se extrajo posiciones claves, con el fin de generar curvas de interpolación para definir el trayecto completo de cada una de las rutinas.

Es importante mencionar que todas estas rutinas se manejarán sobre el plano xy, razón por la cual se pretende involucrar únicamente el movimiento de dos de los tres motores. El primer motor funcionará solo para darle altura a las rutinas, por lo que no se tiene en

cuenta para la generación de estas trayectorias.

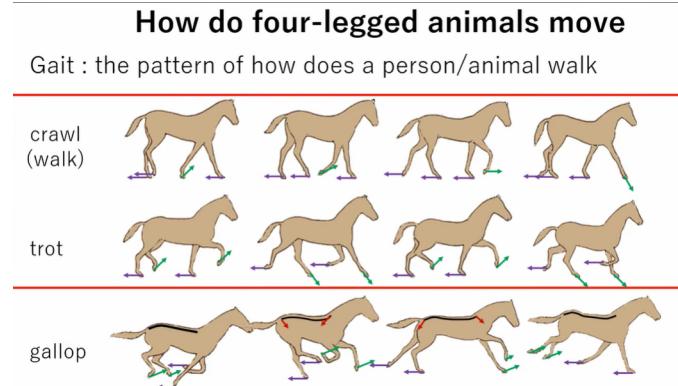


Figure 20: Movimiento de trayectorias en un animal cuadrúpedo

Por lo tanto, se obtienen las siguientes trayectorias para cada una de las rutinas obtenidas. Así mismo, se comenta que fueron modificadas para evitar tener la menor cantidad de perfiles bruscos en la posición, velocidad y aceleración.

Rutina de Caminado

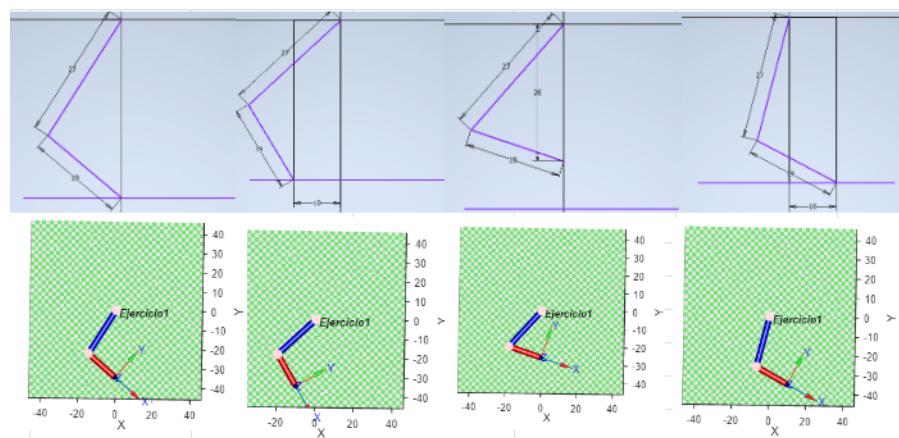


Figure 21: Posiciones para generar rutina de Caminado

Se realizan interpolaciones y se obtienen trayectos definidos por:

$$f(x) = -35$$

$$f(x) = -0.09x^2 - 26$$

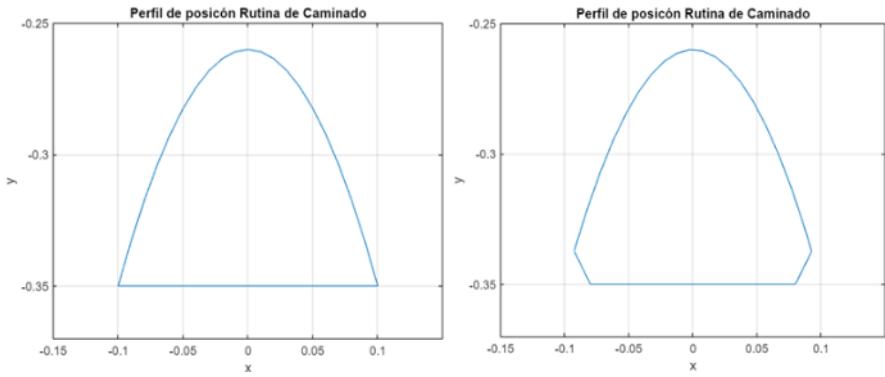


Figure 22: Trayectoria de la rutina de un paso caminado

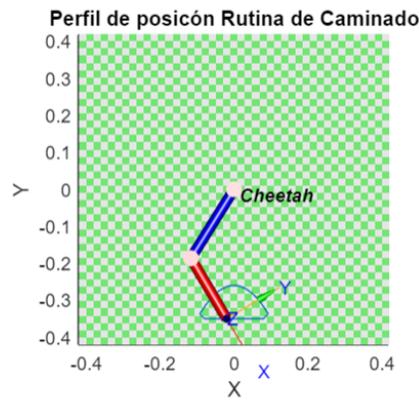


Figure 23: Robot 2R con rutina de paso

Rutina de Trote

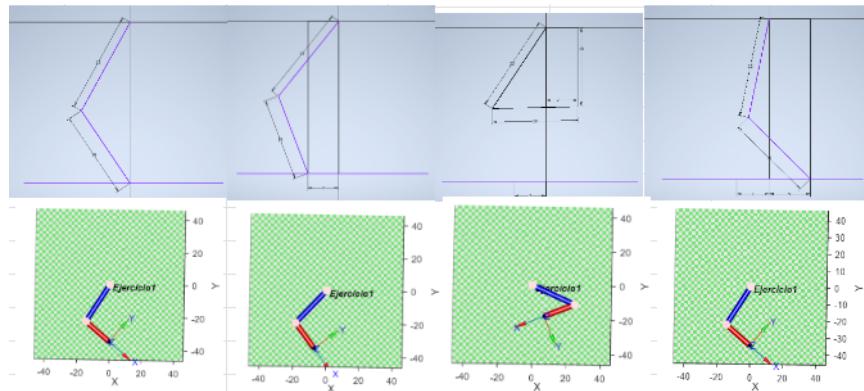


Figure 24: Posiciones para generar rutina de Trote

Se realizan interpolaciones y se obtienen trayectos definidos por:

$$f(x) = 1.2143x - 26.5$$

$$f(x) = -8.5x + 41.5$$

$$f(x) = -35$$

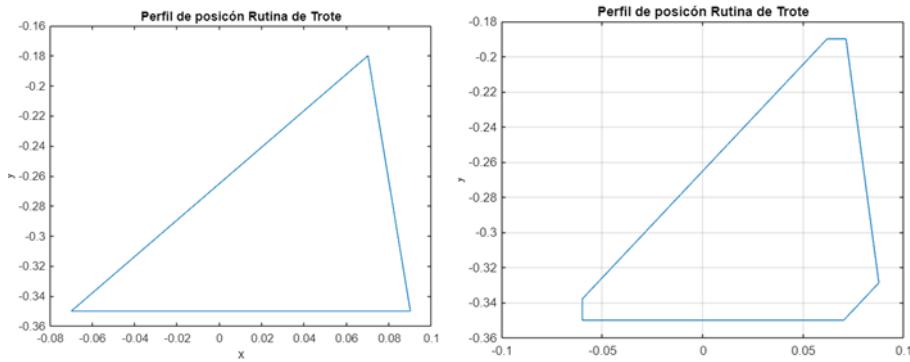


Figure 25: Trayectoria de la rutina de un paso de trote

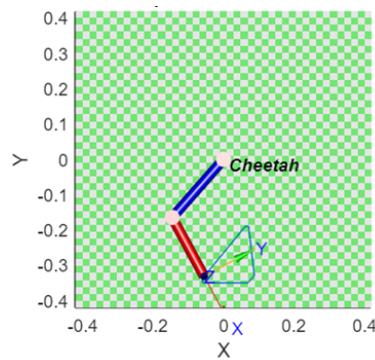


Figure 26: Robot 2R con rutina de paso

Rutina de Galope

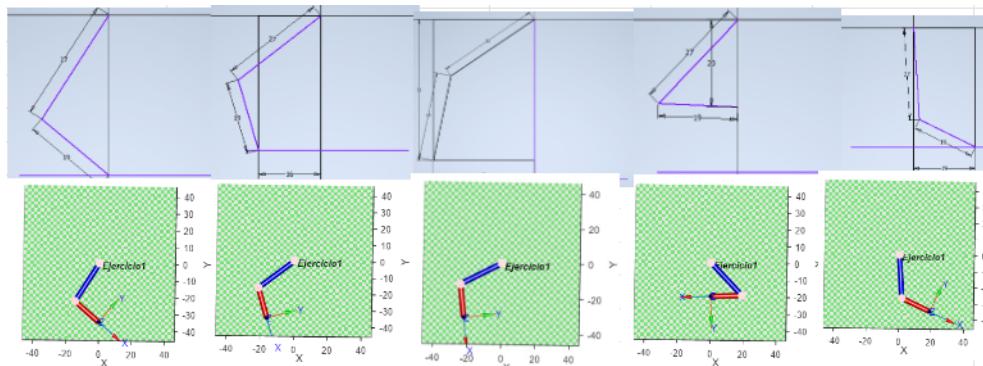


Figure 27: Posiciones para generar rutina de Galope

Se realizan interpolaciones y se obtienen trayectos definidos por:

$$f(x) = -0.0345x^2 - 0.1919x - 20$$

$$f(x) = -0.6667x - 45.6667$$

$$f(x) = -35$$

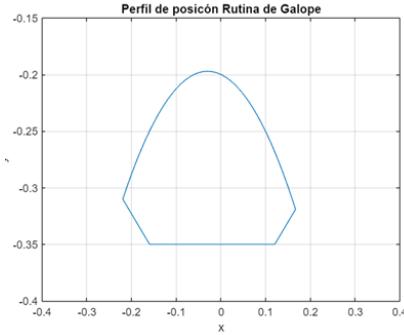


Figure 28: Trayectoria de la rutina de un paso de galope

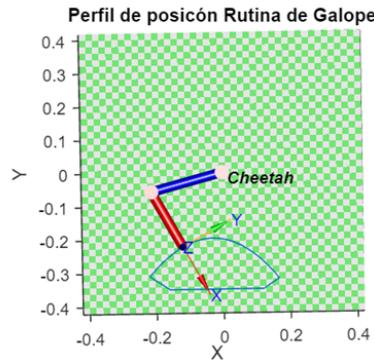


Figure 29: Robot 2R con rutina de paso

8.1.5 Perfiles de movimiento

Este proyecto tiene un enfoque de control de posición, razón por la cual, se parte de la definición de unas rutinas de movimiento. A través de ellas, se puede conocer el perfil de desplazamiento, el perfil de velocidad, y el perfil de aceleración que experimentará cada uno de los motores de esta configuración 2R.

Para hallar los perfiles, es necesario conocer el valor de desplazamiento de cada uno de los eslabones, al ser juntas rotacionales, se hablará de un desplazamiento angular (θ). En la sección anterior, se pudo visualizar que se conocen los puntos de coordenadas (x,y) que debe seguir la articulación robótica, por lo tanto, se realiza la cinemática inversa al mecanismo para conocer los valores angulares en términos de (x,y).

$$q_2 = \text{atan}2((\sqrt{1 - \cos(q_2)^2}), \cos(q_2))$$

$$q_1 = \text{atan}2(x, y) - \text{atan}2(l_2 \cdot \sin(q_2), l_2 \cdot \cos(q_2) + l_1)$$

$$\cos(q_2) = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}^2 - l_1^2 - l_2^2}{2 \cdot l_1 \cdot l_2}$$

Sin embargo, los perfiles de posición que se obtuvieron no fueron lo más suave posible, y es claro que para un buen control de movimiento siempre es preferible trabajar con

perfles del tipo s-curve para minimizar las sacudidas y reducir el estrés mecánico puesto a que el jerk logra minimizarse. Por lo tanto, se manipulan los perfles de desplazamiento de tal manera de representarlo por medio de polinomios de orden mayor para que las derivadas no den picos indeseados.

Se procuró por hacer curvas suavizadas lo más parecido posible al perfil original, con el fin de no dañar la rutina propuesta en un inicio. Y con ello, se presentan los perfles finales de cada una de las rutinas.

Rutina de Caminado

Para el motor número 1 se obtienen los siguientes perfles:

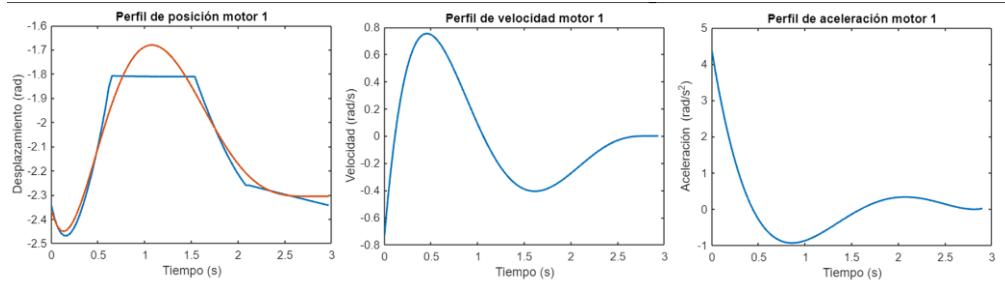


Figure 30: Perfiles de movimiento del motor 1 para la rutina de caminado

Para el motor número 2 se obtienen los siguientes perfles:

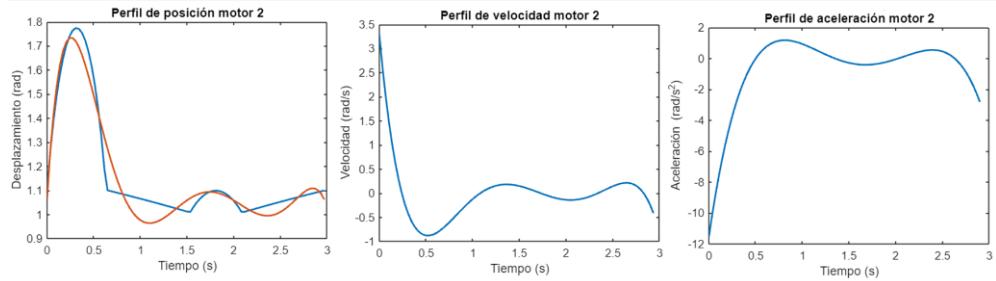


Figure 31: Perfiles de movimiento del motor 2 para la rutina de caminado

Rutina de Trote

Para el motor número 1 se obtienen los siguientes perfles:

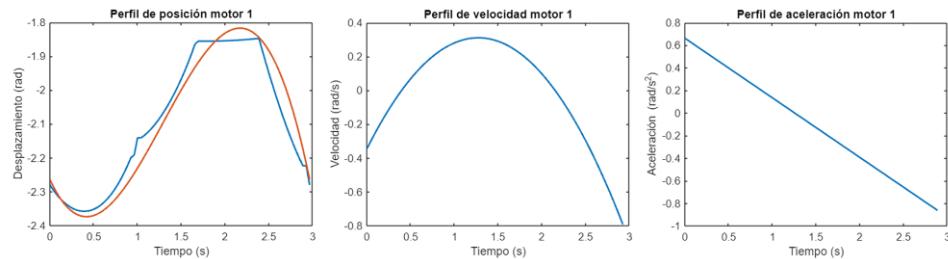


Figure 32: Perfiles de movimiento del motor 1 para la rutina de Trote

Para el motor número 2 se obtienen los siguientes perfiles:

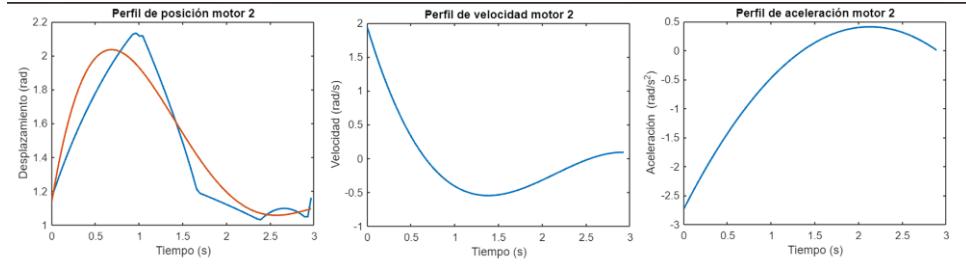


Figure 33: Perfiles de movimiento del motor 2 para la rutina de Trote

Rutina de Galope

Para el motor número 1 se obtienen los siguientes perfiles:

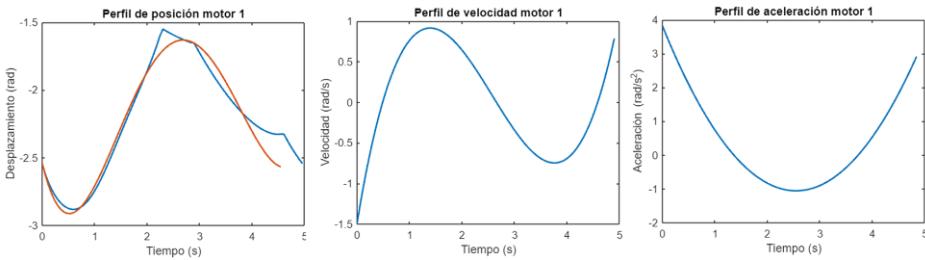


Figure 34: Perfiles de movimiento del motor 1 para la rutina de Galope

Para el motor número 2 se obtienen los siguientes perfiles:

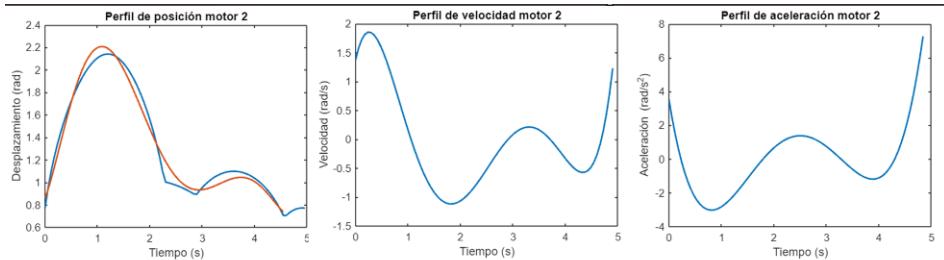


Figure 35: Perfiles de movimiento del motor 2 para la rutina de Galope

Estos perfiles son esenciales para poder dimensionar los motores a utilizar, debido a que el torque depende tanto de la masa, inercia, desplazamiento angular, velocidad angular y aceleración angular de cada uno de los eslabones.

8.1.6 Dimensionamiento de los motores

En este proyecto, el cliente Dr. Ricardo Ramírez Heredia, suministró desde un principio los motores para utilizar en el mecanismo. Por ello, se cuenta con 3 motores de referencia **GIM8108-6 SteadyWin**. Sin embargo, se realiza la revisión de esta selección por medio de cálculos de inercia, velocidad y torque máximos requeridos por las rutinas de movimiento.

8.1.7 Inercia reflejada

En el siguiente análisis, se calcula la inercia que posee el mecanismo, con el objetivo de revisar la selección del motor dada la inercia que requiere mover. Y porque es un dato necesario para llevar a cabo el cálculo de torque.

La "carga reflejada o aparente" es el valor de inercia total que el motor experimenta respecto a la carga que debe mover. Esta carga es fundamental puesto a que puede afectar ya sea el rendimiento o el desempeño de la respuesta del motor.

Se tendrá en cuenta lo siguiente:

- Motor 3: debe ser capaz de mover dos motores, los dos eslabones, dos acoplos y el STPM.
- Motor 2: debe ser capaz de mover un motor, los dos eslabones, dos acoplos y el STPM.
- Motor 1: debe ser capaz de mover el STPM, y el eslabón inferior.

Para llevar a cabo estos cálculos, es importante recordar la teoría de la inercia reflejada en el motor, teniendo en cuenta que se utilizó un Sistema de Transmisión de Potencia.

$$J_{ref} = J_{Pmotriz} + J_{correa} + J_{Pimpulsada} + J_{carga} + J_{acople}$$

$$J_{ref} = J_{Pmotriz} + \left(\frac{W_{correa}}{g \cdot n} \right) \cdot r_{polea}^2 + \frac{1}{n \cdot N^2} (J_{Pimpulsada} + J_{carga} + J_{acople})$$

La eficiencia (N) que se está trabajando es de 1 porque se tiene una relación de 1:1, y se propone una eficiencia porcentual (n) de 0.97.

Con lo anterior se encontró la inercia que experimenta cada uno de los motores. Para una descripción más detallada del procedimiento realizado, se puede observar la memoria de cálculo correspondiente. Anexo Inercia Reflejada

Motor	Inercia reflejada
1	0.0324 $kg \cdot m^2$
2	0.0264 $kg \cdot m^2$
3	0.0257 $kg \cdot m^2$

Table 3: Resultados de torque y velocidades máximas

8.1.8 Torque máximo

Se calcula el torque requerido en cada uno de los motores para ejecutar las rutinas de movimiento, se utilizó un análisis de dinámica Lagrangiana (Euler-Lagrange).

Nuevamente, similar a la situación presentada en las rutinas, el siguiente procedimiento se desarrollará como si se tuviera un mecanismo de 2R, esto para facilitar los cálculos y debido a que las rutinas se plantean únicamente sobre el plano xy.

Este análisis consiste en evaluar el Lagrangiano de cada uno de los eslabones a través de la energía cinética y potencial.

$$L = K - U$$

En donde, la energía cinética se divide en energía cinética de traslación (V) y energía cinética de rotación (ω); y la energía potencial, en energía gravitacional y en energía elástica (se tendrá en cuenta solo la gravitacional).

$$K_{traslación} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

$$K_{rotacional} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \omega^2$$

$$U_{gravitacional} = m \cdot g \cdot h$$

Una vez obtenido el Lagrangiano, es posible calcular el torque que requiere cada eslabón según su movimiento, esto se calcula de la siguiente manera:

$$\tau = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta}$$

$$\tau = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K_{total}}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial K_{total}}{\partial \theta} + - \frac{\partial U}{\partial \theta}$$

Se realizó un análisis de la ecuación anterior, y se obtuvo que el primer término se desglosa en aceleraciones angulares, en producto de velocidades de eslabones (Coriolis), y en velocidades angulares cuadradas (Aceleraciones Centrípetas).

Con lo anterior se encontró el perfil de torque de cada uno de los motores para las 3 diferentes rutinas. Para una descripción más detallada del procedimiento realizado, se puede observar la memoria de cálculo correspondiente. Anexo Lagrangiano

Rutina de caminado Se propone un tiempo de 3 segundos para un paso completo de esta rutina.

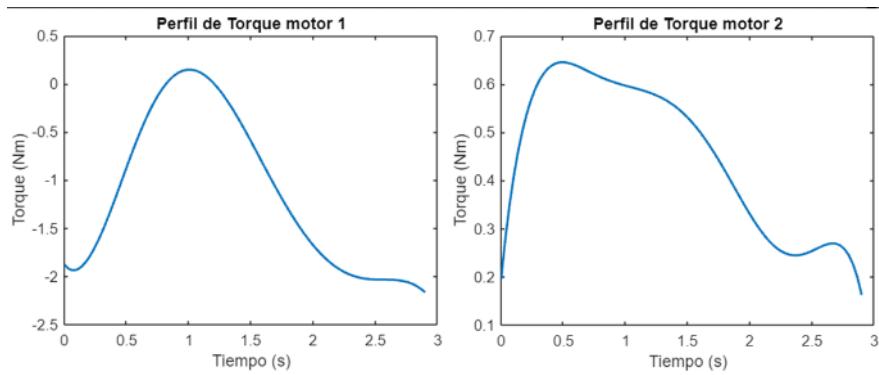


Figure 36: Perfiles de torque de para la rutina de Caminado

Rutina de Trote Se propone un tiempo de 3 segundos para un paso completo de esta rutina.

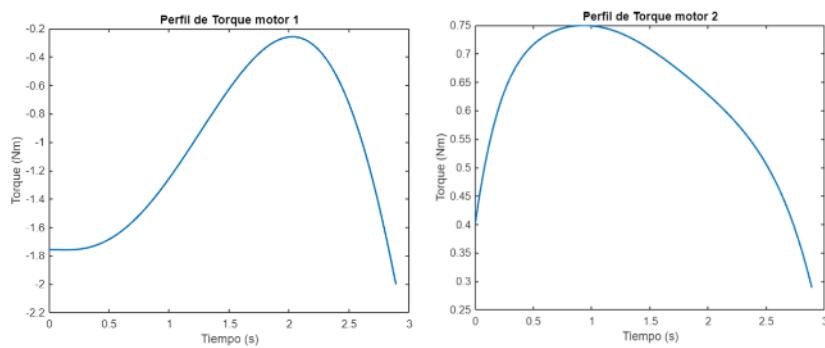


Figure 37: Perfiles de torque de para la rutina de Trote

Rutina de Galope Se propone un tiempo de 5 segundos para un paso completo de esta rutina.

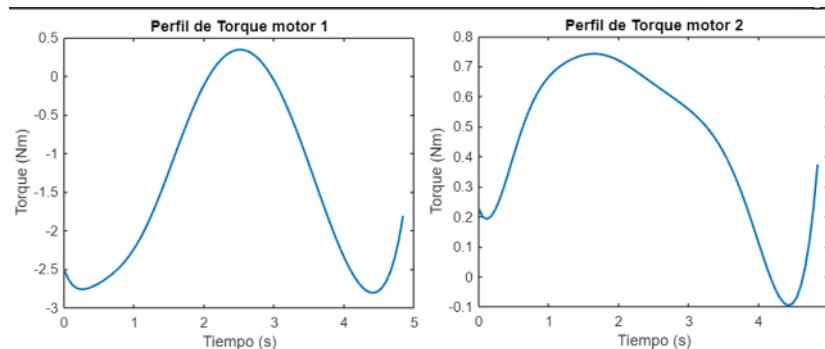


Figure 38: Perfiles de torque de para la rutina de Galope

Finalmente, se obtienen los siguientes valores de torque máximo y velocidad máxima necesaria para cada una de las rutinas en los dos motores del mecanismo 2R:

Rutina	τ Motor 1	τ Motor 2	ω Motor 1	ω Motor 2
Trote	2 Nm	0.74 Nm	7.56 RPM	18.45 RPM
Galope	2.80 Nm	0.74 Nm	14.21 RPM	17.67 RPM
Caminado	2.17 Nm	0.65 Nm	7.1922 RPM	31.39 RPM

Table 4: Resultados de torque y velocidades máximas

Con ello, se verifica la selección de los motores, puesto a que estos, según el datasheet, poseen un torque máximo de 7.62 Nm y una velocidad máxima de 350 RPM.

8.2 Análisis por herramientas computacionales

Por medio de herramientas computacionales, también fue posible analizar y proponer diferentes alternativas para definir el diseño final del prototipo. Se realizaron análisis dinámicos, análisis de resistencia de materiales, análisis de falla estática y por fatiga, y análisis de optimización de material.

8.2.1 Estructura

Se eligen perfiles CNC TSLOT 40x40, por lo que se modela toda la estructura en el Software Robotic Structural y se le implementa el perfil mencionado para obtener resultados más cercanos a la realidad (análisis incluyendo el peso de la estructura).

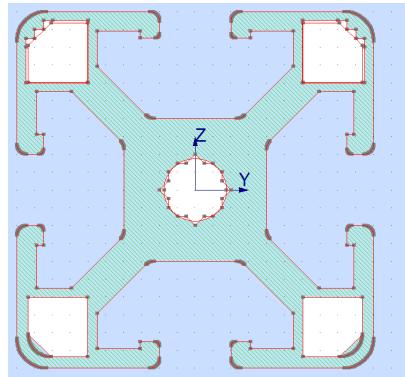


Figure 39: Perfil CNC TSLOT 40x40

Para el análisis de esta sección, se tuvo en cuenta también otros casos críticos de estudio (los peores) de la distribución de cargas, puesto a que como el mecanismo estará en movimiento no tendrá solo una configuración.

Se estudiaron 4 casos: el sentido del movimiento de todos los motores es positivo, el sentido del movimiento de solo los motores que están sobre el eje 'y' son negativos, el sentido de todos los motores es negativo, y el sentido del motor que está sobre el eje 'x' es negativo.

Por lo tanto, se obtiene los siguientes datos, de los cuales todos demuestran un equilibrio estático:

Node/Case	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (Nm)	MY (Nm)	MZ (Nm)
7/ 1	-0.00	0.00	39,28	0.00	-0.00	-0.00
8/ 1	-0.00	0.00	65,07	0.00	0.00	0.00
9/ 1	0.00	0.00	15,49	-0.00	0.00	0.00
Case 1		Caso inicial				
Sum of val.	-0.00	0.00	119,85	0.00	0.00	-0.00
Sum of reac.	-0.00	0.00	119,85	-4,33	-17,35	0.00
Sum of forc.	0.00	-0.00	-119,85	4,33	17,35	0.00
Check val.	-0.00	0.00	-0.00	-0.00	-0.00	0.00
Precision	3,78508e-11	3,75522e-20				

Figure 40: Caso de análisis con todos los torques positivos

Node/Case	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (Nm)	MY (Nm)	MZ (Nm)
7/ 2	-0.00	0.00	39,28	0.00	0.00	-0.00
8/ 2	-0.00	0.00	21,64	0.00	-0.00	0.00
9/ 2	0.00	0.00	58,93	0.00	0.00	0.00
Case 2		caso torques en y negativos				
Sum of val.	0.00	0.00	119,85	0.00	0.00	-0.00
Sum of reac.	0.00	0.00	119,85	-4,33	13,05	0.00
Sum of forc.	0.00	-0.00	-119,85	4,33	-13,05	0.00
Check val.	0.00	0.00	-0.00	-0.00	0.00	0.00
Precision	1,07477e-10	6,03831e-20				

Figure 41: Caso de análisis con torques que se encuentran en el eje y negativos

Node/Case	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (Nm)	MY (Nm)	MZ (Nm)
7/ 4	0.00	-0.00	69,77	0.00	-0.00	-0.00
8/ 4	0.00	-0.00	49,84	0.00	0.00	0.00
9/ 4	-0.00	-0.00	0,25	0.00	0.00	0.00
Case 4		caso torque x en negativo				
Sum of val.	-0.00	-0.00	119,86	0.00	0.00	0.00
Sum of reac.	-0.00	-0.00	119,86	10,91	-17,35	-0.00
Sum of forc.	0.00	-0.00	-119,86	-10,91	17,35	0.00
Check val.	-0.00	-0.00	-0.00	0.00	-0.00	-0.00
Precision	1,38133e-10	6,52727e-20				

Figure 42: Caso de análisis con torques los torques negativos

Node/Case	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (Nm)	MY (Nm)	MZ (Nm)
7/ 4	0.00	-0.00	69,77	0.00	-0.00	-0.00
8/ 4	0.00	-0.00	49,84	0.00	0.00	0.00
9/ 4	-0.00	-0.00	0,25	0.00	0.00	0.00
Case 4		caso torque x en negativo				
Sum of val.	-0.00	-0.00	119,86	0.00	0.00	0.00
Sum of reac.	-0.00	-0.00	119,86	10,91	-17,35	-0.00
Sum of forc.	0.00	-0.00	-119,86	-10,91	17,35	0.00
Check val.	-0.00	-0.00	-0.00	0.00	-0.00	-0.00
Precision	1,38133e-10	6,52727e-20				

Figure 43: Caso de análisis con torque en x negativo

De los resultados se concluyó el uso de un contrapeso de 45 N en la base, para proporcionar que la estructura fuera estable sin importar el caso en el que se encontrara. Finalmente, una vez obtenida la estabilidad en la estructura, se decide por agregar otra pata a la base, quedando entonces una estructura de 4 patas a 90° entre ellas.

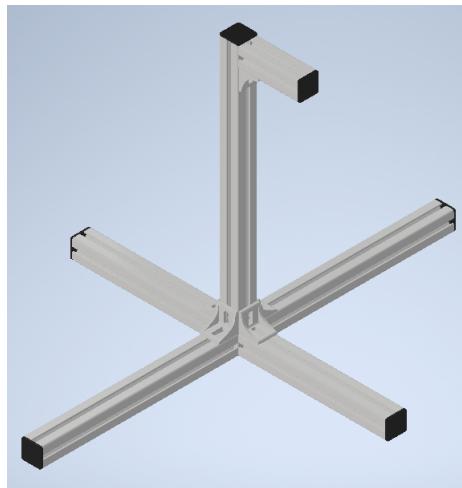


Figure 44: Diseño final de estructura

8.2.2 Análisis dinámico

Para poder revisar la resistencia de cada una de las piezas diseñadas, en este caso los acoplos, fue necesario realizar un análisis dinámico para identificar la máxima fuerza que iban a soportar durante la ejecución de algún movimiento por rutina.

El análisis realizado consistió en simular dinámicamente un movimiento de 180 grados (área de trabajo donde se moverán los eslabones para ejecutar las rutinas) en cada uno de los motores, y encontrar esa fuerza máxima que se presenta tanto en el acople que cada rotor mueve, como también en los demás acoplos. Cabe resaltar, que se adicionó también un torque de 7.62 Nm en cada rotor y la fuerza gravitacional.

A continuación se expone el perfil de movimiento dado para simulación, y las gráficas obtenidas de fuerzas en el eje 'x' y 'y' de cada uno de los acoplos que cada rotor mueve.

Para una mayor compresión se tiene:

- Motor 1: motor que va directamente ensamblado a la estructura.
- Motor 2: Motor intermedio, tiene acople perpendicular.
- Motor 3: Motor que tiene ensamblado en él los eslabones.
- Acople 1: Acople que une la estructura al motor 1.
- Acople 2: Acople perpendicular, une el motor 1 con el motor 2.
- Acople 3: Acople que va entre motores, une el motor 2 y el motor 3.

Motor 1

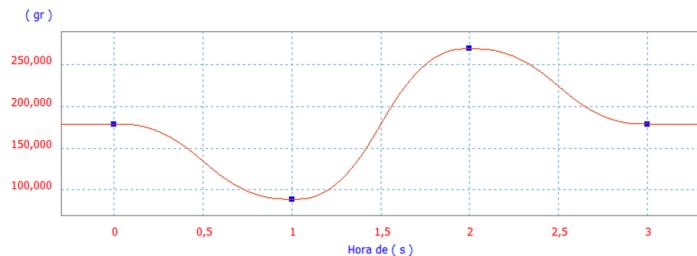


Figure 45: Perfil de movimiento para simulación dinámica en motor 1

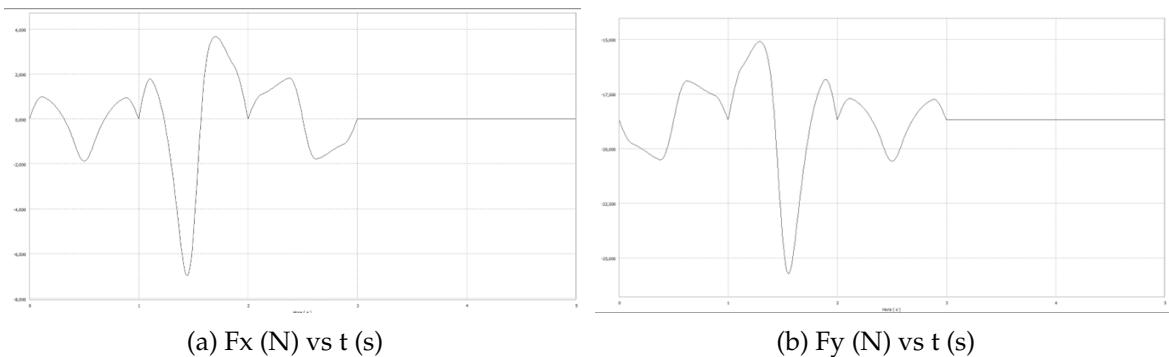


Figure 46: Gráficas de fuerzas en acople 1 obtenidas por simulación dinámica

Motor 2

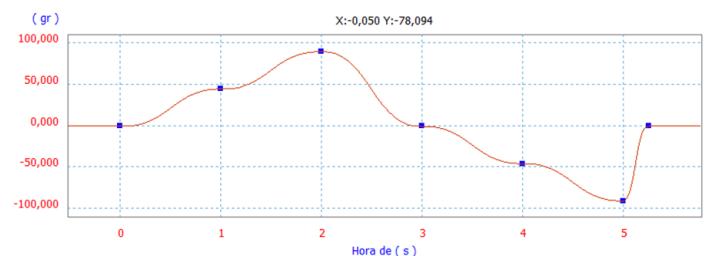


Figure 47: Perfil de movimiento para simulación dinámica en motor 2

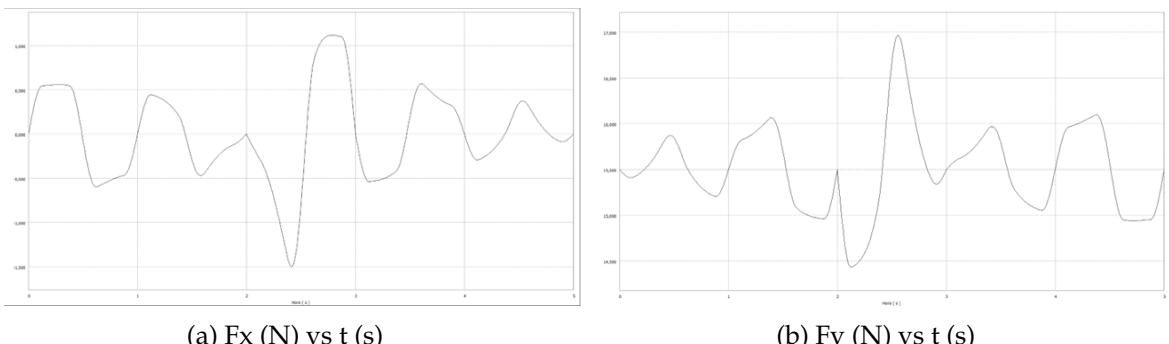


Figure 48: Gráficas de fuerzas en acople 2 obtenidas por simulación dinámica

Motor 3



Figure 49: Perfil de movimiento para simulación dinámica en motor 3

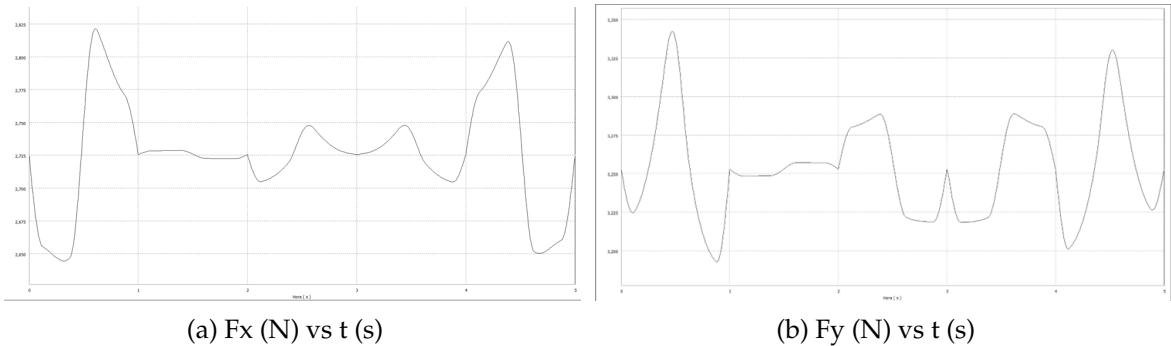


Figure 50: Gráficas de fuerzas en acople 3 obtenidas por simulación dinámica

Finalmente, se presenta la tabla de resultados que contiene las fuerzas máximas generadas por cada uno de los rotores en los diferentes acoplos. El motor 3 es el único que se realizó de manera independiente dada la complejidad de simular correctamente el STPM, sin embargo, para efectos compensatorios se multiplicará por un factor todas las fuerzas encontradas en el análisis de elementos finitos.

Fuerzas en acoplos por simulación Dinámica						
	Acople 1		Acople 2		Acople 3	
	Fx (N)	Fy (N)	Fx (N)	Fy (N)	Fx (N)	Fy (N)
Motor 1	-6.97471	-25.7234	0	21.5064	-	-
Motor 2	0	-20.1319	-1.5	16.969	-	-
Motor 3	-	-	-	-	2.8151	3.3422

Figure 51: Resultados de fuerzas máximas obtenidas por simulación dinámica

8.2.3 Análisis de esfuerzos y deformación.

Estructura

El ensamble final posee 3 acoplos que corresponden a cada uno de los motores, por lo que se realizó un análisis por finitos para identificar y verificar estáticamente los esfuerzos de Von Mises, la deformación y el factor de seguridad. Cabe resaltar que para estas sim-

ulaciones, se partió de las fuerzas máximas obtenidas por el análisis dinámico realizado previamente, no obstante, estas fuerzas se manipularon por un factor dado que se prefirió trabajar por encima del límite.

Se dará un nombre a cada uno de los acoplos, para poder identificar más fácilmente y para relacionarlo con su ubicación en el ensamble:

- **Acople motor- estructura:** Se refiere al acople que sostiene toda la pierna y la sujet a la estructura.
- **Acople perpendicular:** Se refiere al motor que sostiene a los 2 motores del movimiento simultaneo 2R presente en el ensamble.
- **Acople motor- motor:** Es el acople que une a ambos motores del movimiento en 2R.

Acople motor-estructura

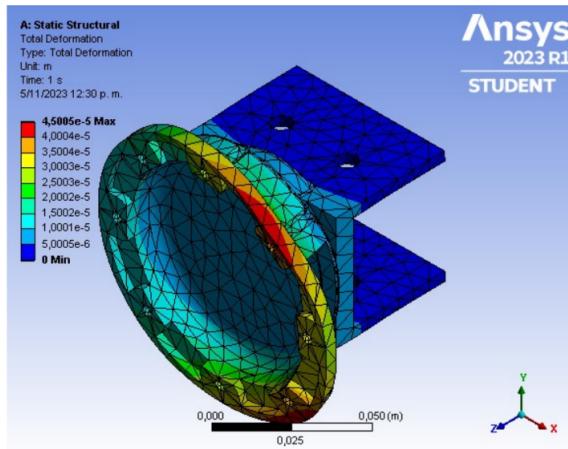


Figure 52: Deformaciones motor - estructura

En la figura 52 se muestra qué tanto se deformará el acople. Como se puede observar, sí hay presencia de deformaciones (las secciones amarillas y rojas de la imagen) pero en el orden de los milímetros.

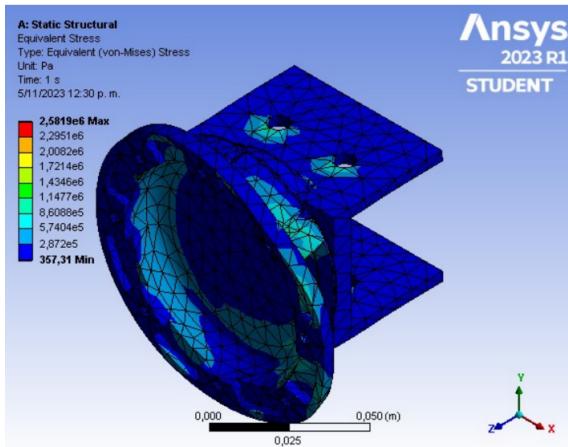


Figure 53: Von Misses motor - estructura

La figura 53 presenta qué tanto se deformará el acople. Se presentan deformaciones plásticas mínimas en las zonas donde se esperan concentradores de esfuerzos (las zonas de los tornillos por ejemplo).

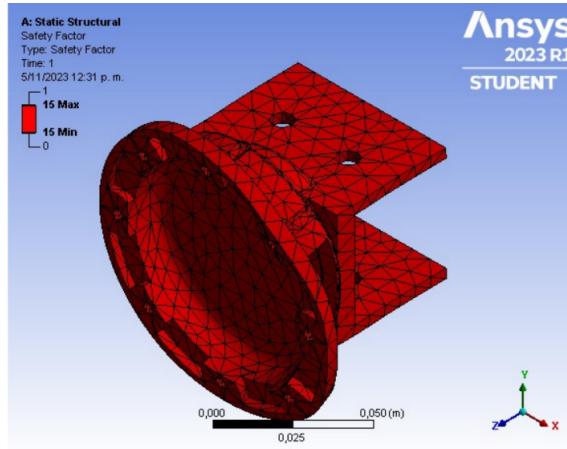


Figure 54: Factor de seguridad motor - estructura

Por ultimo, la figura 54 representa un factor de seguridad para el acople de más de 15. Por lo tanto se tiene que este acople soporta las fuerzas a las que será sometido.

Acople perpendicular

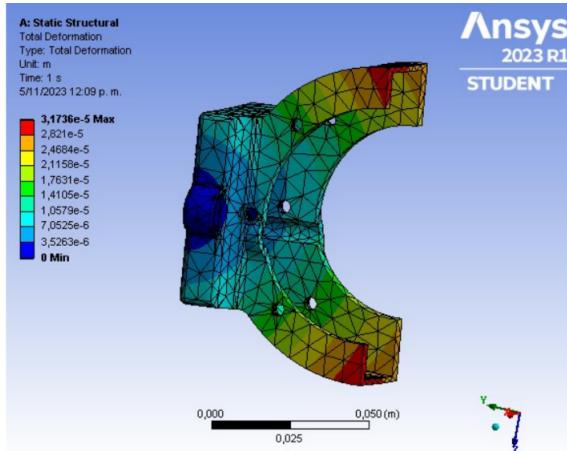


Figure 55: Deformaciones acople perpendicular

En las figura 55 se presentan deformaciones con puntos críticos en los extremos, no obstante estas deformaciones no son significativas, ya que se encuentran en el orden de los milímetros.

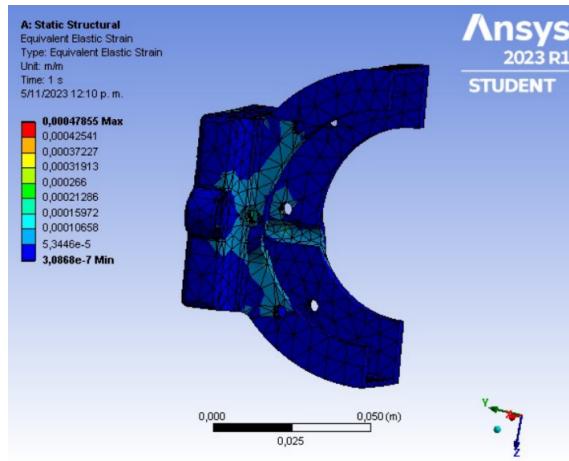


Figure 56: Von Misses acople perpendicular

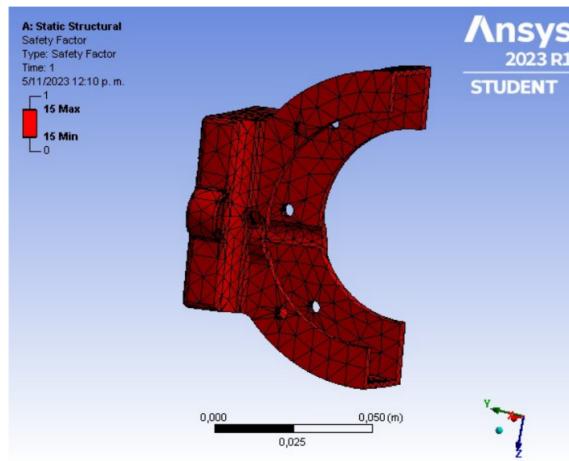


Figure 57: Factor de seguridad acople perpendicular

En la figura 56 se presentan deformaciones plásticas en las zonas de concentradores de esfuerzos también en el orden de los milímetros, mientras que en la figura 57 se presenta un factor de seguridad de 15, respecto a las fuerzas aplicadas. Por lo tanto se tiene la certeza que este acople soporta las fuerzas presentes en la estructura.

Acople Motor-motor

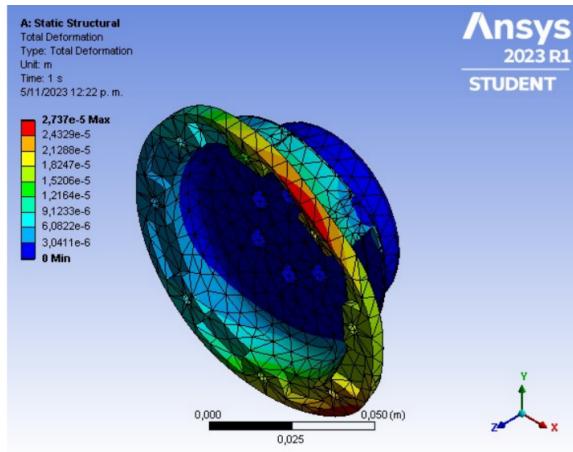


Figure 58: Deformaciones acople motor-motor

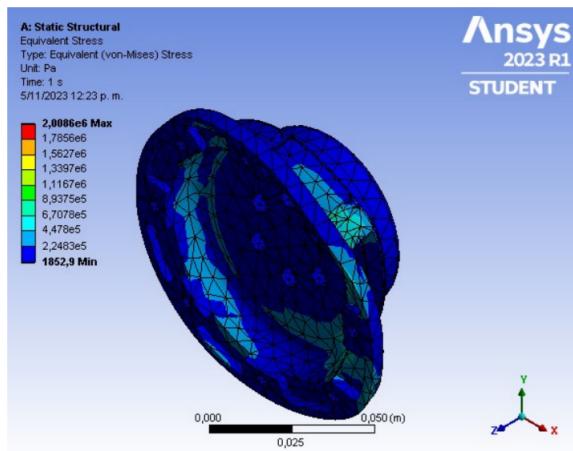


Figure 59: Von Misses acople perpendicular

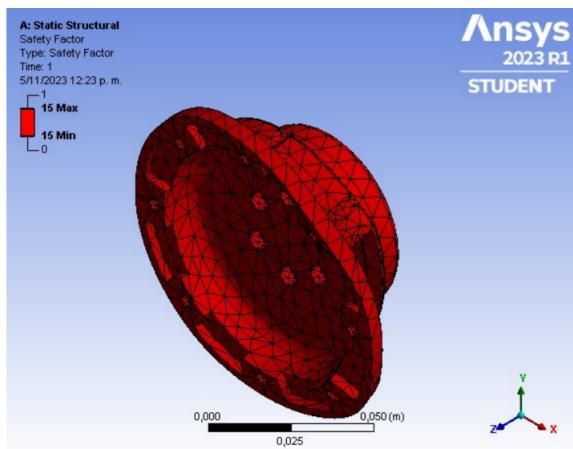


Figure 60: Factor de seguridad acople motor motor

Por último el análisis para el acople "motor- motor". Se tiene que la figura 58 presenta deformaciones en las zonas de los tornillos. La figura 59 muestra una deformación plástica

mínima en el acople y la figura 60 presenta un factor de 15 en el acople, de esta manera, se espera que este acople soporte las fuerzas que se le aplicarán.

Por lo tanto, se valida el diseño de los tres acoplos.

8.2.4 Optimización del material

Otro de los objetivos del proyecto, es poder diseñar los eslabones con la menor cantidad de material, es por ello que se le realizó una optimización de diseño al eslabón inferior, dado que es la única pieza que no posee restricciones en sus dimensiones.

Lo único que se precisó tener en cuenta, fue conservar la región que incluye los agujeros pasantes para ensamblar a la polea, es decir, la malla de optimización no generaría análisis en esa región para dar sus resultados.

A la simulación se le aplica un par de momento igual al torque del motor, y así mismo, la fuerza gravitacional. Con ello, se obtiene los siguientes resultados.

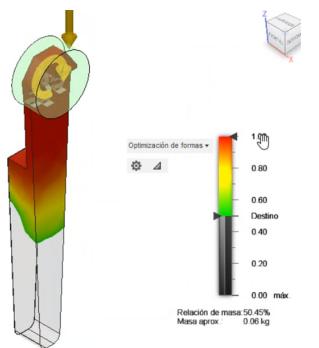


Figure 61: Malla de optimización de diseño para el eslabón inferior

Finalmente, se logra optimizar a la siguiente forma:

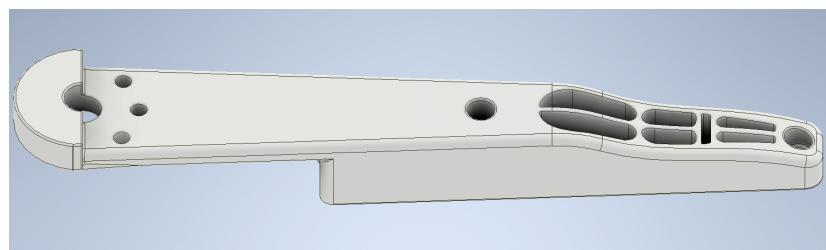


Figure 62: Diseño Final del eslabón inferior

8.3 Conjunto Electrónico

El primer punto a considerar fue la alimentación de los motores y su protección:

- Para alimentar la totalidad del sistema fue necesario contar con una fuente de 24V a 25A. Esto debido a que cada uno de los motores funciona a 24V - 7A, lo que llevaría a

un consumo total de 21A. La fuente cuenta con un pulsador de emergencia NO que al accionarse, bloquearía inmediatamente la alimentación de todo el sistema.

- El motor cuenta con la capacidad de absorber energía de vuelta, como una batería. Esto se puede considerar como una energía regenerativa la cual puede realizar daños en los capacitores si no se protege adecuadamente. Para ello se pueden utilizar un módulo de derivación.
- Fue necesario conectar una resistencia de entre 10 - 100 ohms para el sistema de pre-carga, pues siempre que se conecta la energía se genera un sobre pico que puede ser dos veces el valor del voltaje de entrada, esto con el fin de proteger la circuitería interna del motor.
- Solo se necesitaron conectar los cables de comunicación CAN entre los motores, pues no era necesario asignar una tierra en común. Para ello la alimentación contará con la circuitería interna para conectar las tierras entre ellos.
- Como los motores consumen 7A de corriente nominal, fue necesario contar con cable calibre 18AWG, para evitar problemas de sobrecalentamientos y posible derretimiento de los cables. Cada motor lleva en su linea un interruptor/switch para energizarlos de manera independiente.

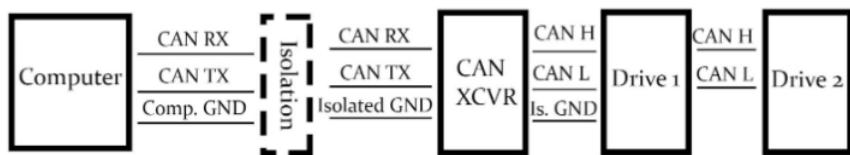


Figure 63: Disposición general de tierras para los motores

En el proceso de configuración inicial de los motores, se realizaron varias acciones para asegurar su correcto funcionamiento. Se contaba con varios puertos de comunicación y alimentación en el motor, cada uno con un propósito específico.

Primero, se verificó el estado del driver del motor utilizando una alimentación de 5V. Esta fase permitió confirmar que el driver del motor estaba en buenas condiciones. Luego, se conectó el motor a una fuente de alimentación de 24V, que suministraba la energía principal a todo el sistema. Si el motor estaba conectado a esta fuente de alimentación, no era necesario conectar la de 5V.

El puerto STLink estaba disponible para modificar y flashear el firmware interno del motor utilizando un ST-Link V2. Este puerto proporcionaba la capacidad de actualizar y personalizar el software interno del motor según las necesidades específicas. Su firmware se puede encontrar en la pagina del anexo 13.10 (permite su personalización) y la instrucción de como flashear el motor se encuentra en el anexo 13.11.

Además, se contaba con un puerto UART para la configuración interna del motor y un puerto CAN para el envío de señales y órdenes al motor. Estos puertos eran esenciales para ajustar y controlar diferentes parámetros del motor.

Para la configuración inicial, se conectó el motor a un módulo USB A TTL mediante la conexión UART. Este módulo actuó como un intermediario entre el motor y la computadora. Se utilizó un software como Teraterm o PUTTY para inicializar el proceso de configuración a través de este puerto UART.



Figure 64: Puertos de comunicación y alimentación del motor

Durante este proceso, se ajustó la alimentación del motor a 24V para realizar modificaciones en el setup. No se requería ninguna protección de energización específica para esta configuración.

COM11 - Tera Term VT

File Edit Setup Control Window Help

Commands:

```
m - Motor Mode
c - Calibrate Encoder
s - Setup
e - Display Encoder
z - Set Zero Position
esc - Exit to Menu
```

Commands:

```
m - Motor Mode
c - Calibrate Encoder
s - Setup
e - Display Encoder
z - Set Zero Position
esc - Exit to Menu
```

Configuration Options

prefix parameter	min	max	current value
b Current Bandwidth (Hz)	100	2000	1000.0
i CAN ID	0	127	1
n CAN Master ID	0	127	0
l Current Limit (A)	0.0	40.0	40.0
f FW Current Limit (A)	0.0	33.0	0.0
t CAN Timeout (cycles)(<0 = none)	0	1000000	0

To change a value, type 'prefix' 'value' 'ENTER'
i.e. 'b1000' 'ENTER'

Figure 65: Conexión serial de la configuración del motor

Dos modificaciones clave se realizaron en los motores durante este proceso:

1. Se asignó un CAN ID diferente para cada motor, asegurándose de que los identificadores CAN fueran únicos y no se superpusieran entre los diferentes motores. Estos identificadores CAN se asignaron en un rango del 1 al 3.
2. La corriente del motor se ajustó al máximo definido por el datasheet, estableciendo una corriente nominal de 7A. Este ajuste aseguró que los motores operaran dentro de los límites especificados por el fabricante.

Todo este proceso fue gracias a la documentación encontrada en Internet por la persona que desarrollo la tesis de los motores MIT Cheetah. [3][4]

```

File Edit Setup Control Window Help
Mechanical Angle: 17.157570 Electrical Angle: 0.213778 Raw: 13313
Mechanical Angle: 17.157570 Electrical Angle: 0.213778 Raw: 13312
Mechanical Angle: 17.157188 Electrical Angle: 0.205724 Raw: 13311
Mechanical Angle: 17.157959 Electrical Angle: 0.221831 Raw: 13314
Mechanical Angle: 17.158340 Electrical Angle: 0.229884 Raw: 13315
Mechanical Angle: 17.158722 Electrical Angle: 0.237938 Raw: 13316
Mechanical Angle: 17.157570 Electrical Angle: 0.213778 Raw: 13313
Mechanical Angle: 17.158340 Electrical Angle: 0.229884 Raw: 13315
Mechanical Angle: 17.157570 Electrical Angle: 0.213778 Raw: 13313
Mechanical Angle: 17.157959 Electrical Angle: 0.221831 Raw: 13314
Mechanical Angle: 17.157570 Electrical Angle: 0.213778 Raw: 13313
Mechanical Angle: 17.156807 Electrical Angle: 0.197671 Raw: 13310
Mechanical Angle: 17.158722 Electrical Angle: 0.237938 Raw: 13316
Mechanical Angle: 17.157188 Electrical Angle: 0.205724 Raw: 13311
Mechanical Angle: 17.157188 Electrical Angle: 0.205724 Raw: 13311
Mechanical Angle: 17.157570 Electrical Angle: 0.213778 Raw: 13312
Mechanical Angle: 17.157570 Electrical Angle: 0.213778 Raw: 13312
Mechanical Angle: 17.156807 Electrical Angle: 0.197671 Raw: 13310
Mechanical Angle: 17.157959 Electrical Angle: 0.221831 Raw: 13314
Mechanical Angle: 17.156425 Electrical Angle: 0.189617 Raw: 13309
Mechanical Angle: 17.159492 Electrical Angle: 0.254045 Raw: 13318
Mechanical Angle: 17.157570 Electrical Angle: 0.213778 Raw: 13313
Mechanical Angle: 17.156036 Electrical Angle: 0.181564 Raw: 13308
Mechanical Angle: 17.157188 Electrical Angle: 0.205724 Raw: 13311
Mechanical Angle: 17.158340 Electrical Angle: 0.229884 Raw: 13315
Mechanical Angle: 17.157570 Electrical Angle: 0.213778 Raw: 13312
Mechanical Angle: 17.157959 Electrical Angle: 0.221831 Raw: 13314
Mechanical Angle: 17.157188 Electrical Angle: 0.205724 Raw: 13311
Mechanical Angle: 17.157570 Electrical Angle: 0.213778 Raw: 13313
Mechanical Angle: 17.158722 Electrical Angle: 0.237938 Raw: 13316
Mechanical Angle: 17.158340 Electrical Angle: 0.229884 Raw: 13315
Mechanical Angle: 17.157959 Electrical Angle: 0.221831 Raw: 13314
Mechanical Angle: 17.157188 Electrical Angle: 0.205724 Raw: 13311
Mechanical Angle: 17.157570 Electrical Angle: 0.213778 Raw: 13313
Mechanical Angle: 17.159103 Electrical Angle: 0.245991 Raw: 13317
Mechanical Angle: 17.159103 Electrical Angle: 0.245991 Raw: 13317
Mechanical Angle: 17.157188 Electrical Angle: 0.205724 Raw: 13311
Mechanical Angle: 17.157570 Electrical Angle: 0.213778 Raw: 13313

```

Figure 66: Funcionamiento del encoder del motor vía comunicación serial

Una vez configurados los motores, se procedió a realizar la configuración electrónica y eléctrica de todo el sistema. El diagrama electrónico se encuentra en la figura 67. Algunas consideraciones a tener en cuenta para su ensamble se presentan a continuación:

- Consta de un modulo **MCP2515**, el cual permite que al Arduino la recepción y envío datos CAN, pues no cuenta con este bus de datos de forma nativa. Por lo que el modulo convierte datos de CAN a SPI y viceversa. Todos los motores van conectados a un único modulo, gracias a que el bus CAN permite la identificación por los IDs de cada uno.
- La conexión entre Arduino y RaspberryPi se realiza de forma serial por USB, mas adelante, en la sección de Comunicaciones y Programación se explora su conectividad
- Para evitar la necesidad de cables adicionales, se adquiere un modulo de regulación a 5V para que el Arduino y la RaspberryPi se puedan alimentar directamente de la fuente.

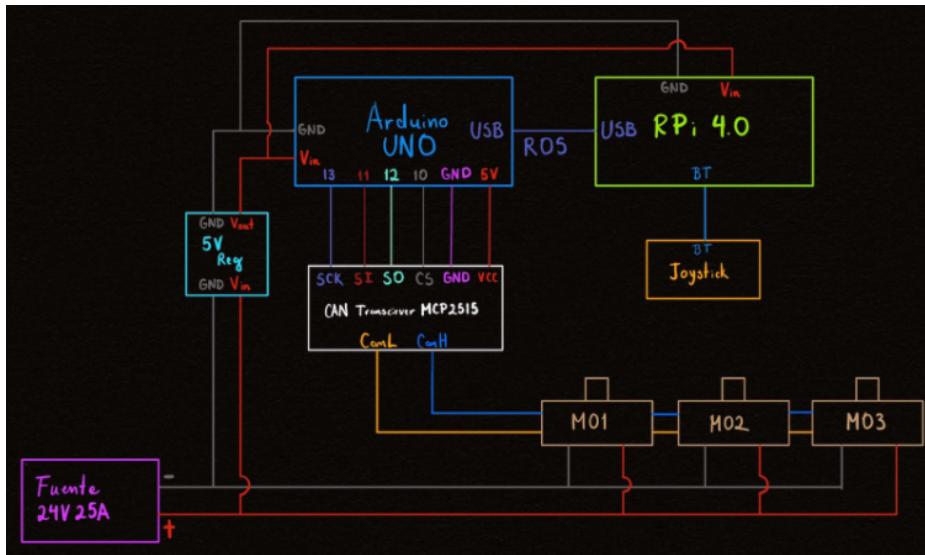


Figure 67: Diagrama eléctrico del sistema

- Es importante tener en cuenta todas las recomendaciones para la alimentación de los motores y sus respectivas protección y calibres de cable

8.4 Control

8.4.1 Definición del Control y posiciones

Retomando la ecuación obtenida de la documentación de los motores, se determinó que calcularía el torque de referencia basándose en la posiciones obtenidas de la cinemática inversa, por lo tanto en velocidad deseada y torque deseado no se inserto ningún valor.

$$\text{Torque de Referencia} = kp \cdot \text{Error de Posición} + \text{Torque} + kd \cdot \text{Error de Velocidad}$$

Para los valores del kp y el kd se determinaron valores específicos para cada motor. Estos valores se obtuvieron de forma experimental, pues no fue posible simularlos en Simulink debido a que no se contaba con la ecuación de la planta (entiéndase como la ecuación que determina la física de cada uno de los motores). Su elección se basó en la necesidad de precisión de cada motor, y la velocidad con la que cada uno alcanza la referencia. Con los valores de control y las posiciones deseadas, se procedió a realizar la programación de la comunicación.

Motor	kp	kd
Motor 1	10	10
Motor 2	15	15
Motor 3	20	20

Table 5: Valores de kp y kd para los motores.

8.5 Comunicaciones y programación

Toda la programación y configuración se pueden encontrar en el repositorio del proyecto en GitHub: https://github.com/jolayam/proyecto_PAI.

8.5.1 Protocolo CAN

El bus CAN opera a 1 MBaud (un millón de bits por segundo). El controlador del motor recibe 8 bytes de comandos y envía de vuelta 6 bytes de datos.

Estructura del Paquete de Comandos

El controlador utiliza un solo paquete para combinar 5 comandos, que son:

1. Comando de posición de 16 bits, escalado entre P_MIN y P_MAX en CAN_COM.cpp.
2. Comando de velocidad de 12 bits, escalado entre V_MIN y V_MAX en CAN_COM.cpp.
3. K_p de 12 bits.
4. K_d de 12 bits.
5. Alimentación anticipada de corriente de 12 bits.

En el controlador del motor, todos los comandos se suman para lograr el comando de par final.

Estructura del Paquete de Datos de Respuesta

El controlador del motor enviará los siguientes datos:

1. ID del motor de 8 bits.
2. Posición de 16 bits, escalada entre P_MIN y P_MAX en CAN_COM.cpp.
3. Velocidad de 12 bits, entre 0 y 4095, escalada entre V_MIN y V_MAX.
4. Corriente de 12 bits, entre 0 y 4095, escalada de -40 a 40 amperios, correspondiente a la corriente de fase máxima.

Estas 3 señales se empaquetan en los 6 bytes de la siguiente manera:

- Byte 0: ID del motor.
- Byte 1: Bits 15-8 de la posición.
- Byte 2: Bits 7-0 de la posición.
- Byte 3: Bits 11-4 de velocidad.
- Byte 4: Bits 3-0 de la velocidad y bits 11-8 de la corriente.
- Byte 5: Bits 7-0 de la corriente.

Comandos Especiales

- Entrar en el modo del motor: [0xFF, 0xFF, 0xFF, 0xFF, 0xFF, 0xFF, 0xFF, 0xFC]
- Salir del modo del motor: [0xFF, 0xFF, 0xFF, 0xFF, 0xFF, 0xFF, 0xFF, 0xFD]
- Restablecer el sensor de posición a cero (Zero Position Sensor): [0xFF, 0xFF, 0xFF, 0xFF, 0xFF, 0xFF, 0xFE]

8.5.2 Arduino

Como se menciono anteriormente, la utilización del Arduino UNO estaría centrada únicamente en la comunicación entre motores y RaspberryPi, no procesa ningún dato. Por ende se debía realizar la respectiva recepción de datos por medio de SPI con su respectivo desempaquetado (el modulo MCP2515 los transforma de CAN a SPI), para enviarlos a ROS por medio de comunicación serial USB; así como la recepción de datos de ROS y la transmisión hacia los motores con su debido empaquetado. A continuación se explica el código de forma resumida, se adjunta el código en los anexos 13.12 y se complementa con el repositorio en GitHub

1. Inclusión de Bibliotecas:

El código incluye las bibliotecas necesarias para la comunicación SPI, el manejo del controlador MCP2515 para CAN, y las bibliotecas de ROS.

2. Inicialización de Nodos y Variables:

Se inicializa un nodo ROS y se definen variables y estructuras para manejar los mensajes CAN y ROS, así como límites y valores para las variables de control y retroalimentación.

3. Definición de Suscriptores:

Se definen suscriptores ROS para los tres motores, cada uno con su propio callback para manejar los mensajes de control recibidos.

4. Inicialización y Configuración:

Se inicializa el sistema, incluyendo la inicialización del controlador CAN MCP2515 y la configuración de parámetros.

5. Bucle Principal:

El bucle principal realiza las siguientes acciones:

- (a) Empaque los comandos de control y los envía a través del bus CAN a los motores.
- (b) Lee mensajes CAN recibidos y los desempaquetan para obtener la retroalimentación del motor.

(c) Publica la retroalimentación de cada motor a través de ROS.

6. Funciones de Empaqueado y Desempaqueado:

Funciones para empaquetar los comandos de control y desempaquear los mensajes de retroalimentación, convirtiendo valores entre formatos de punto flotante y enteros sin signo.

7. Funciones de Modo del Motor:

Funciones para poner los motores en modo de operación o deshabilitarlos.

8. Publicación de Retroalimentación:

Se publica la retroalimentación de cada motor a través de ROS.

9. Conversión de Tipos:

Funciones para convertir entre valores de punto flotante y enteros sin signo, ajustando los valores dentro de los límites especificados.

10. Bucle ROS:

Se utiliza el bucle de ROS para manejar la comunicación con nodos ROS y procesar mensajes.

8.5.3 ROS

Para el procesamiento de los datos, se optó por la utilización de ROS, esto justificado en las múltiples herramientas que posee el framework para robótica y sus posibilidades de escalabilidad para la implementación del Cheetah en su totalidad. Para el proyecto se utilizó ROS1 Noetic en su versión para Ubuntu 20.04. En el siguiente link se comparte el repositorio donde está alojado el sistema. Entrando más a detalle del desarrollo de la comunicación en ROS, se realizaron las siguientes implementaciones:

- Implementación de mensajes personalizados que contengan datos de posición, velocidad, torque y ID de cada motor
- Implementación de 3 subscribers y 3 publishers para envío y recepción de datos.
- Implementación de modulo ros_serial para comunicación serial por USB entre ROS (en la RaspberryPi4) y Arduino
- Diseño de código en Python para manejo y administración de las rutinas (el código se puede visualizar en el repositorio y en el anexo 13.12)

Este script en Python se para controlar los motores del robot. A continuación, se presenta una descripción general del código:

1. Inicialización del nodo ROS:

Se inicia un nodo ROS llamado "command_publisher". Un nodo en ROS es un proceso que realiza cálculos o ejecuta tareas específicas.

2. Publicadores de mensajes:

Se crean objetos de publicación para los motores 1, 2 y 3 en los temas “/motor1_control”, “/motor2_control” y “/motor3_control”. Estos publicadores enviarán mensajes del tipo MotorFeedback.

3. Listas de posiciones:

Se definen seis listas, las cuales contienen las posiciones de las 3 rutinas. Serán dos listas por cada rutina. Para el primer motor siempre se define una posición fija para que la pierna quede en posición vertical.

4. Bucle principal:

Se inicia un bucle que se ejecutará mientras el nodo no sea apagado.

5. Configuración de mensajes:

Se crean mensajes MotorFeedback con información de posición y se publican para los motores 2 y 3 utilizando las listas de posiciones definidas.

6. Finalización del bucle:

Se publican mensajes adicionales para fijar las posiciones de los motores 2 y 3 a un valor específico.

7. Frecuencia de bucle:

El bucle se ejecuta a una frecuencia de 2 Hz. Esta frecuencia se puede disminuir para que la articulación se mueva mas rápida, o viceversa.

Desde la RaspberryPi, en su implementación de ROS, fue posible validar las posiciones, velocidades y torques de cada uno de los motores en tiempo real, así como enviar datos individualmente a cada uno de los motores y enviar la totalidad de las 3 rutinas. Para mas detalle en el desarrollo de los publishers y los subscribers, y la implementación del modulo ros_serial, se recomienda consultar el repositorio.

8.6 Implementación rutinas en el control

Se caracterizó el motor y se pudo contemplar que las unidades del servomotor eran diferentes a las normalizadas, es decir, no estaban ni en radianes, ni en grados, ni en pasos de encoder.

Razón por la cual, por un método de ensayo y error, se logró identificar que media vuelta correspondía a una referencia de posición de 0.85. Es así, como se obtuvo la siguiente conversión.

$$1\text{ grado} = 2.38 \times 10^{-3} \text{ Servo}$$

$$1\text{ grado} = 0.01745 \text{ radianes}$$

Fue necesario implementar esa conversión en las diferentes rutinas diseñadas debido a que éstas estaban en unidades de radianes. Así mismo, a través de la caracterización

realizada a los servomotores se concluyó que el rango límite de movimiento para el motor 2 era de [0.1, 0.2], y el del motor 3 era de [0.04, 0.15], teniendo en cuenta estos rangos, se evitaban los movimientos indeseados en las pruebas y rutinas realizadas.

9 Pruebas

9.1 Plan de verificación

Como plan de verificación, se generaron 3 secciones a analizar, los requisitos mecánicos, los requisitos de control y los requisitos generales del sistema.

Esto puede observarse en las tablas 6, 7 y 8

Requisito	¿Cómo?	Aprobado
El mecanismo debe estar en una plataforma rígida que lo sostenga.	El análisis de finitos debe arrojar que cumple.	Aprobado
El mecanismo debe tener 3 grados de libertad (RRR).	La solución final debe ser un mecanismo 3R.	Aprobado
Los actuadores deben ser los que el cliente provee.	Se deben usar los GIM8106-6.	Aprobado
El material de los acoplos debe ser liviano y resistente.	Por análisis de elementos finitos y pensando las piezas.	Aprobado
El mecanismo debe cumplir con especificaciones de masa y rigidez estructural.	Cálculos y simulaciones con finitos.	Aprobado
El mecanismo debe ser alimentado por una fuente eléctrica.	Chequeo técnico de la fuente.	Aprobado
El mecanismo debe contar con un sistema de transmisión flexible.	Análisis y cálculos.	Aprobado
El proyecto debe proveer toda documentación referente al diseño y lista de materiales.	Chequeo técnico.	Aprobado
El mecanismo debe ser ergonómico.	Chequeo visual.	Aprobado
El control debe ser de lazo cerrado.	Utilizar los servomotores para las rutinas.	Aprobado
El sistema debe contar con una baja inercia.	Chequeo en simulación.	Aprobado
El diseño de la estructura debe estar optimizado para contener todos los elementos mecánicos y eléctricos.	Chequeo en las propuestas de solución, estas deben tener este requerimiento.	Aprobado

Table 6: Requisitos mecánicos

Requisito	¿Cómo?	Aprobado
La rutina de control contará con al menos un 60% de precisión al modelo ideal.		Aprobado
No deben existir vibraciones en el movimiento.		Aprobado
El sistema debe ser capaz de mitigar perturbaciones.	Chequeo por simulación.	Aprobado
La rutina de control de movimiento debe tener perfiles tipo S-curve.	Gráficas de las rutinas.	Aprobado
El control debe ser simultáneo entre 2 actuadores.	Pruebas del controlador.	Aprobado

Table 7: Requisitos mecánicos

Requisito	¿Cómo?	Aprobado
El sistema debe ser estéticamente agradable.	Chequeo visual.	Aprobado
El mantenimiento debe ser accesible al operador.	Al momento de realizar el ensamblaje.	Aprobado
Los motores deben garantizar tener el torque necesario para brindar el movimiento y la rapidez necesaria para el mecanismo.	Caracterización de los motores.	Aprobado
El sistema eléctrico debe garantizar elementos de seguridad tanto para el operario como para los motores eléctricos.	Debe incluir señales de advertencia, o demás indicadores, en caso de que se necesiten.	Aprobado

Table 8: Requisitos mecánicos

9.2 Plan de Validación

Para la validación se propone un proceso de comprobación de rutinas de trabajo, por consiguiente se propone que:

1. El mecanismo debe tener apariencia de pierna de un cuadrúpedo estéticamente.
2. El mecanismo, en términos operacionales, debe cumplir con las rutinas de trabajo establecidas. Estas buscan asemejarse al movimiento de una pierna de un cuadrúpedo. Esto conlleva a que la pierna debe moverse simulando el movimiento característico para caminar, correr y galopar.
3. El mecanismo y su base deben ser de tamaño óptimo para su fácil y cómodo transporte.
4. El sistema debe presentar rigidez, por lo tanto, debe comprobarse que la estructura sí ofrezca estabilidad al mecanismo independientemente de la rutina ejecutada.
5. El mecanismo debe mostrar un movimiento fluido por medio de los servomotores.

10 Resultados

Como resultado de este proyecto, se entrega un prototipo de una articulación robótica funcional con ejecución de tres rutinas de movimiento: caminata, trote y galope.

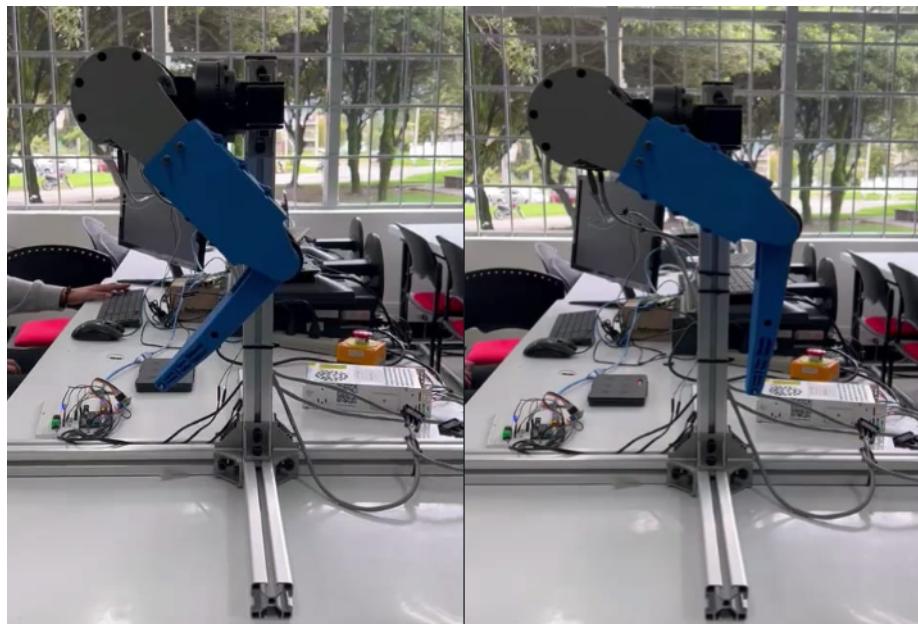


Figure 68: Funcionamiento del encoder del motor vía comunicación serial

El prototipo entregado se compone de una estructura de aluminio, tres servomotores, dos eslabones, un STPM (dos poleas dentadas, correa y un eje), un circuito electrónico, un botón de seguridad y una fuente de alimentación.

Por lo tanto, el resultado de este apartado de diseño se puede evidenciar también a través del prototipo físico y de la lista de materiales BOM, la cual recopila todo lo que se realizó y seleccionó para desarrollarlo.

Así mismo, en cuanto a resultados de control de movimiento, en los siguientes hipervínculos se puede evidenciar la ejecución de las tres rutinas: Caminata prueba de caminata, trote prueba de trote y galope prueba de galope, y también una comparación del Cheetah real con las rutinas obtenidas Comparación.

Para finalizar, se puede concluir que se obtuvo un cumplimiento de los objetivos propuestos en un principio, y que fue indispensable tener un equilibrio y una perspectiva integral para garantizar las propiedades mecánicas y las propiedades de control en el diseño.

11 Reflexión del proceso

11.1 Reflexión grupal

El proyecto representó un desafío considerable que requirió la aplicación de una amplia gama de conocimientos técnicos, teóricos e ingenieriles. A lo largo del desarrollo, se hizo evidente la necesidad de recordar y vincular conceptos previos en estática, dinámica, robótica, servomecanismos, diseño mecánico, métodos numéricos, programación y el manejo de software especializado, como Inventor y análisis finitos. Esta diversidad de conocimientos enriqueció nuestros análisis y fortaleció el enfoque multidisciplinario del proyecto.

A pesar de enfrentar diversos obstáculos durante el proceso, el equipo se mantuvo unido y comprometido para superarlos. El esfuerzo colectivo fue fundamental para el éxito del proyecto. La colaboración entre los miembros del equipo permitió resolver problemas de manera eficiente y alcanzar resultados satisfactorios. Nos sentimos orgullosos del trabajo realizado, de la entrega, y de la capacidad del equipo para mantenerse resiliente frente a los desafíos.

11.2 Reflexión individual

- **Daniel Cantor:** El proyecto me pareció muy interesante, el cual es muy sinérgico para un mecatrónico. Me pareció a su vez muy complejo, ya que a medida que encontrábamos soluciones a algún problema, aparecían más. Incluso, íbamos dandonos cuenta de que debíamos tener más consideraciones que las inicialmente planteadas.
- **Juan Olaya:** Fue un proceso muy retador, pues siento que fue un proyecto que aplica la mecatrónica en toda su totalidad. Se aprendieron nuevos conceptos a lo largo del proceso, incluso teniendo en cuenta que PAI es una materia donde se deben aplicar los conceptos aprendidos a lo largo del desarrollo del pregrado.

- **Valentina Cruz De Paula:** Gracias a este proyecto pude evidenciar lo integral que puede llegar a ser la Ingeniería Mecatrónica. En el transcurso de la carrera, se vieron diferentes materias muy diversas entre ellas, pero personalmente nunca había logrado comprender cómo podría relacionarse todos los conceptos entre sí para un resultado efectivo. Sin embargo, el diseño de esta articulación robótica produjo que todos nosotros fuéramos capaces de recordar, analizar, e implementar todo lo que en este tiempo hemos aprendido, y que finalmente fue un proceso muy interesante, bonito y del cual creo que nos podemos sentir orgullosos.
- **Julián Felipe Medina Veira:** Un reto desafiante, sin duda, sin embargo, logramos el objetivo del proyecto y de la materia, logrando integrar y consolidar los conocimientos técnicos, teóricos y prácticos que he podido aprender a lo largo de mi vida universitaria. Siento orgullo y satisfacción, pues el producto entregado cumple y va más allá con los estándares de calidad de la universidad. A mis compañeros les doy gracias por su trabajo, esfuerzo y perseverancia.
- **Miguel Angel Segura Figueroa:** Dadas las condiciones de la materia, en donde se desarrolla un trabajo interdisciplinario entre las dos carreras fue una desafío emocionante puesto que se pueden complementar bastante bien al momento de realizar un proyecto de este tipo. Algunas veces durante la marcha podemos aprender habilidades de los otros compañeros que comparten sus experiencias haciendo mas enriquecedora las vivencias durante el semestre de desarrollo del mismo.

12 Planos

Entre los planos realizados se encuentran: Planos de fabricación del prototipo, el plano del eje y la caja del sistema eléctrico y de control.(Pueden verse en la parte de anexos).

13 Anexos

1. Contrato social
2. Bitácoras
3. Descripción del problema
4. Cronograma
5. Metodología de diseño
6. Análisis estático acoples
7. Cálculos de estructuras
8. Memorias de cálculos.

9. Mecanismo en Matlab
 10. Cálculo estática de estructura
 11. Cálculo STPM
 12. Cálculo Eje por fatiga
 13. Cálculo Inercia Reflejada
 14. Cálculo dinámica lagrangiana y perfiles de mov.
 15. Lista de materiales
 16. Manual de ensamble
 17. Firmware de los motores
 18. Video Resultado Final
 19. Tutorial de programación del firmware de los motores
 20. Repositorio con programación
 21. Plan de verificación
 22. Requerimientos
 23. Certificados Onshape
 24. Evaluación del cliente
- Planos

13.1 Certificaciones OnShape

Los certificados de OnShape de los integrantes del proyecto se encuentran disponibles en la sección de anexos.

13.2 Evaluación de cliente

Se llevó a cabo la evaluación del cliente el día 20 de noviembre de 2023, la cual arrojó resultados altamente satisfactorios. Se evidenció el desempeño esperado en las áreas clave del proyecto, destacando especialmente los aspectos mecánicos, de diseño y de control. Este éxito es testimonio del compromiso y la dedicación del equipo.

En el siguiente anexo, se puede evidenciar la validación por parte del cliente, además de algunas sugerencias, recomendaciones o aspectos para destacar. Cabe resaltar que en este se encuentra su firma. Evaluación del cliente

14 Referencias

- [1] Héctor Rodríguez *Editor y periodista especializado en ciencia y naturaleza, Rodríguez, amp; Berg, E. van den.* (2022, June 30). *Mini Cheetah, El Primer Robot Acróbata.* www.nationalgeographic.com.es/ciencia/primer-robot-acrobata13973
- [2] Programador, E. S. D. (2022, September 22). *Que es un tcp en robótica industrial. El sitio del programador.* <https://elsitiodelprogramador.wordpress.com/2021/02/21/que-es-un-tcp-en-robotica-industrial>
- [3] Ben Katz. (2019). *Motor Drive Documentation.* https://docs.google.com/document/d/1dzNVzb1z6mqB3eZVEMyi2MtSngALHdgpTaDJIW_BpS4/edit
- [4] Barton Dring. (2020). *MIT Cheetah/ Research HobbyKing Robot Motor AKA SteadyWin V3.* https://docs.google.com/document/d/1dzNVzb1z6mqB3eZVEMyi2MtSngALHdgpTaDJIW_BpS4/edit
- [5] Barton Dring. (2020). *Hobby King Cheetah Motor Programming Instructions* <https://docs.google.com/document/d/14HLpJDV0MBez1FP9UIyuWOAR9XkmXL5tUZTvC5LI0m8/edit>
- [6] Raspberry Pi, breve guía, modelos y características <https://descubrearduino.com/breve-guia-de-la-raspberry-pi/>
- [7] Jetson, descripción y características <https://www.nvidia.com/es-la/autonomous-machines/>
- [7] ¿Qué es ROS? <https://openwebinars.net/blog/que-es-ros/>