



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE MECATRÓNICA

**DISEÑO DE UN MECANISMO DE MOVILIDAD PARA UN ROBOT
CUADRÚPEDO**

Trabajo de titulación previo a la obtención
del título de Ingeniero en Mecatrónica

AUTOR: CHRISTIAN MARCELO ASTUDILLO CUADRADO
TUTOR: ING. DIEGO RENE URGILÉS CONTRERAS
COTUTOR: ING. MONICA ALEXANDRA ROMERO SACOTO

Cuenca – Ecuador

2023

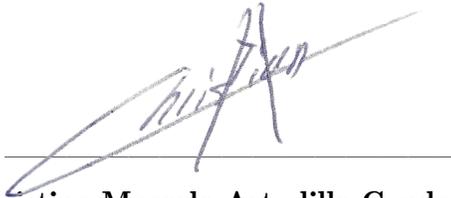
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Christain Marcelo Astudillo Cuadrado con documento de identificación N° 0107581449 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Ciudad, 18 de julio 2023

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Christain Marcelo Astudillo Cuadrado', is written over a horizontal line.

Christian Marcelo Astudillo Cuadrado
0107581449

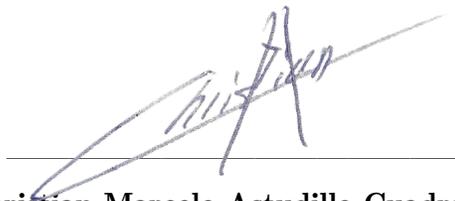
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Yo, Christian Marcelo Astudillo Cuadrado con documento de identificación N° 0107581449, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto Técnico: "Diseño de un Mecanismo de Movilidad para un Robot Cuadrúpedo", el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Ciudad, 18 de julio 2023

Atentamente,



Christian Marcelo Astudillo Cuadrado

0107581449

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Diego Rene Urgilés Contreras con documento de identificación N° 0104431374, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO DE UN MECANISMO DE MOVILIDAD PARA UN ROBOT CUADRÚPEDO, realizado por Christian Marcelo Astudillo Cuadrado con documento de identificación N° 0107581449, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Ciudad, 4 de agosto 2023

Atentamente,



Ing. Diego Rene Urgilés Contreras

0104431374

Dedicatoria

Christian Astudillo

El presente proyecto de titulación está dedicado:

A Dios, quien ha sido mi guía y fortaleza para llevar a cabo cada una de las metas que me he propuesto.

A mis padres Patricio y Adriana, quienes con su cariño, paciencia, esfuerzo y apoyo incondicional me han permitido llegar a cumplir mis objetivos trazados. Gracias por siempre ser mi pilar e inculcar en mí constancia, valentía y esfuerzo.

A mi hermana Adriana , quien en los buenos y malos momentos ha estado junto a mi, soportando mis locuras, con quien me he comparado no para mal sino para bien ya que ellas es la primera en ser mi guía como hermana mayor.

Finalmente, dedico a las personas que formaron parte del proceso y me brindaron su apoyo de una u otra forma.

Agradecimientos

Christian Astudillo

Agradezco principalmente a Dios por permitirme llegar a cumplir esta meta tan anhelada y por brindarme salud, fuerza e impartirme sabiduría a lo largo del proceso.

Agradezco profundamente a mis padres que, gracias al cariño recibido, apoyo, paciencia y comprensión ha sido posible lograr cada una de las metas que me he propuesto, gracias a mi madre por estar siempre dispuesta a acompañarme, guiarme y apoyarme en cada situación, y en cada larga jornada de estudio, en las que su compañía, consejos, además, de siempre cuidarme cuando me enfermaba, también mencionar su gran paciencia hacia mi persona, gracias a mi padre que siempre está dispuesta a prestar su atención, opinar y brindar consejo, tampoco puedo olvidar su compañía los noches de estudio y en esta aventura llamada vida.

Me gustaría además agradecer a mi Tutor de Proyecto de Titulación Ing. Diego Urgilés, a quien admiro; por su esfuerzo y dedicación brindados al actual trabajo de titulación. Sus orientaciones, conocimientos y su paciencia han sido esenciales para culminar con el presente.

También quiero agradecer a Ing. Mónica Romero, Ing. Iván Escandón, Ing. Edy Ayala, quienes han estado prestos para solventar cualquier duda presentada y brindar sugerencias.

No puedo olvidar de agradecer a esos amigos con los cuales he compartido grandes memorias, retos y dificultades, aunque sé que nuestro tiempo juntos en la universidad fue efímero espero seguir manteniendo estos lazos tan fuertes muy mucho tiempo.

Este documento fue realizado enteramente en L^AT_EX

Índice

Certificado de responsabilidad y autoría del trabajo de titulación	I
Certificado de cesión de derechos de autor del trabajo de titulación a la Universidad Politécnica Salesiana	II
Certificado de dirección del trabajo de titulación	III
Dedicatoria	IV
Agradecimientos	V
Resumen	XIII
Abstract	XIV
1. Introducción	1
2. Problema	1
2.1. Antecedentes	1
2.2. Descripción del problema	2
2.3. Importancia y alcances	2
2.4. Delimitación	2
2.4.1. Espacial o geográfica	2
2.4.2. Temporal	3
2.4.3. Sectorial o institucional	3
2.5. Problema General	3
2.6. Problemas Específicos	3
3. Objetivos	4
3.1. Objetivo General	4
3.2. Objetivos Específicos	4
4. Hipótesis	4
4.1. Hipótesis General	4
4.2. Hipótesis Específicas	4

5. Marco Teórico	5
5.0.1. Revisión y análisis bibliográfico y documental:	6
6. Marco metodológico	13
6.1. Establecimiento de los parámetros iniciales para el diseño mecánico y electro- mecánico para un dispositivo de movilidad de un robot cuadrúpedo	13
6.1.1. Revisión bibliográfica	14
6.1.2. Necesidades, Requerimientos y Métricas	15
6.1.3. Grados de libertad	19
6.1.4. Parámetros iniciales	23
6.2. Propuesta del diseño mecánico y electromecánico para un dispositivo de movi- lidad para un robot cuadrúpedo	25
6.3. Árboles de decisión y matrices de combinación	26
6.4. Simulación del diseño mecánico y electromecánico para un dispositivo de movilidad para un robot cuadrúpedo	51
7. Resultados	60
7.1. Parámetros establecidos para el diseño mecánico y de sistema electromecánico para un robot cuadrúpedo	60
7.2. Diseño mecánico y electromecánico para un robot cuadrúpedo	65
7.3. Resultados de la simulación del diseño mecánico y de sistema electromecánico para un robot cuadrúpedo	70
8. Conclusiones	71
9. Recomendaciones	72
Referencias	74
ANEXOS	75
Anexo A: Matriz de Consistencia Lógica	75

Lista de Tablas

- 1. Calculo estabilidad 11
- 2. Tabla decisión dimensiones. 30
- 3. Tabla de motores. 35
- 4. Tabla recopilatoria de Torque en diferentes tamaños de rueda. 40
- 5. Tabla de parámetros iniciales de extremidad inferior. 42
- 6. Tabla de parámetros iniciales de extremidad inferior. 43
- 7. Tabla de parámetros iniciales de Manipulador. 46
- 8. Matriz de consistencia 76
- 9. Variable dependiente 77

Lista de Figuras

1.	Secuencia marcha	6
2.	Calculo estabilidad	7
3.	Proyecto solo 12.	8
4.	Mini Cheetah	12
5.	Mini Cheetah Actuador incorporado	12
6.	Esquema de Extremidad inferior.	20
7.	Esquema de Extremidad superior de manipulación.	21
8.	Esquema de Extremidad superior y manipulador.	24
9.	Esquema de Extremidad inferior.	25
10.	Árbol de decisión accionamiento.	27
11.	Árbol de decisión para Dimensionamiento.	28
12.	Árbol decisión para diseño de extremidades inferiores.	32
13.	Diagrama de extremidad inferior.	39
14.	Diagrama de esfuerzos en rueda.	40
15.	Diagrama de eslabonamiento extremidad inferior.	41
16.	Diagrama de eslabonamiento extremidad superior.	43
17.	Código de matlab para eslabonamiento en Extremidad superior.	44
18.	Diagrama de eslabonamiento manipulador.	45
19.	Diagrama de eslabonamiento de manipulador extendida.	45
20.	Propuesta de esquemático de ESC (Controlador de velocidad Electrónico).	50
21.	Esquema de simulación extremidad inferior	52
22.	Gráfica de trayectoria generada sin control.	53
23.	Sólidos generados en Simulink.	54
24.	Esquema de simulación extremidad superior	55
25.	Gráfica de trayectoria generada sin control.	56
26.	Sólidos generados en simulink.	56
27.	Simulación de esfuerzos regular.	57
28.	Simulación de esfuerzos de sobre carga.	58
29.	Simulación de esfuerzos en el manipulador.	59
30.	Simulación de esfuerzos en el manipulador carga máxima.	60
31.	Sistema Principal.	61
32.	Subsistema accionamiento.	62
33.	Subsistema tracción.	63

34.	Subsistema tracción mediante rueda sueca.	64
35.	Subsistema Manipulación.	64
36.	Robot Cuadrúpedo.	65
37.	Módulos de cuerpo principal.	66
38.	Núcleo de Transición	67
39.	Extremidad inferior.	68
40.	Sistema de Manipulación.	69
41.	Base para la extremidad Superior.	70
42.	Código en MATLAB para extremidad inferior de forma simbólica.	78
43.	Código en MATLAB para extremidad inferior de forma numérica.	79
44.	Código en MATLAB para extremidad inferior para generar gráfica.	80
45.	Gráfica de eslabonamiento de la extremidad inferior.	81
46.	Código en MATLAB para superior de forma simbólica.	81
47.	Código en MATLAB para extremidad superior de forma numérica.	82
48.	Código en MATLAB para extremidad superior para generar gráfica.	83
49.	Gráfica de eslabonamiento de la extremidad superior.	84
50.	Código en MATLAB para el manipulador de forma simbólica.	85
51.	Código en MATLAB para el manipulador de forma numérica.	86
52.	Código en MATLAB para Manipulador para generar gráfica.	87
53.	Gráfica de eslabonamiento del Maniulador.	88
54.	PLANO CUERPO DERECHO.	89
55.	PLANO CUERPO IZQUIERDO.	90
56.	PLANO ESTRUCTURA NÚCLEO.	91
57.	PLANO TAPA NÚCLEO.	92
58.	PLANO TAPA CUERPO.	93
59.	PLANO PATA SIMPLE.	94
60.	PLANO GOMA ANTIDESLIZANTE.	95
61.	PLANO BASE PINZA.	96
62.	PLANO BASE BRAZO.	97
63.	PLANO ENGRANAJE MOTOR 2.	98
64.	PLANO ENGRANAJE MOTOR	99
65.	PLANO BANDEJA.	100
66.	PLANO PINZA FLEXIBLE.	101
67.	PLANO ENGRANAJE 21.	102
68.	PLANO SOPORTE 2.	103

69.	PLANO SOPORTE.	104
70.	PLANO POLEA SÍNCRONA 11.	105
71.	PLANO POLEA SÍNCRONA 21.	106
72.	PLANO POLEA SÍNCRONA 22.	107
73.	PLANO POLEA SÍNCRONA 23.	108
74.	PLANO SHAFT.	109
75.	PLANO EJE BRAZO.	110
76.	Hoja de datos transistor IGBT.	111
77.	Hoja de datos Opto-acoplador.	112
78.	Hoja de datos Opto-acoplador.	113
79.	Especificaciones mecánicas del Motor.	114
80.	Especificaciones eléctricas del Motor.	115
81.	Valores de consumo del Motor.	116
82.	Hoja de datos del actuador lineal.	117

Resumen

La investigación actual se centra en la creación de un mecanismo que permita que un robot cuadrúpedo se mueva. El objetivo principal del proyecto es desarrollar una solución práctica y duradera al problema de la movilidad de los robots cuadrúpedos. Para lograr esto, se ha realizado una revisión completa de la literatura existente sobre el tema. Esto ha permitido contextualizar el problema y establecer las bases teóricas necesarias para el desarrollo del proyecto. Se han obtenido resultados satisfactorios en términos de eficiencia y estabilidad del mecanismo de movilidad propuesto porque el trabajo se ha desarrollado con rigurosidad y metodología científica.

Palabras clave: Mecanismo de movilidad, Robot cuadrúpedo,.

Abstract

The goal of current research is to develop a system that will enable quadruped robots to move. The major goal of the project is to create a workable and long-lasting solution to the issue of quadruped robots' movement. and long-lasting answer to the quadruped robots' movement issue. To do this, a thorough examination of the A thorough analysis of the body of knowledge on the issue has been done. This has made it possible for us to contextualize the issue and provide the theoretical framework required for the project's creation. project. Because the study was performed with rigor and scientific technique, satisfactory findings in terms of the efficiency and stability of the suggested proposed mobility mechanism have been attained. scientific process.

1. Introducción

En la Universidad Politécnica Salesiana, el objetivo principal de esta investigación es la construcción de un robot cuadrúpedo capaz de realizar movimientos de desplazamiento. Los robots cuadrúpedos han demostrado ser muy prometedores en varias aplicaciones a lo largo de la historia de la robótica, y queremos seguir investigando en este campo. En la actualidad, los robots cuadrúpedos están experimentando avances sustanciales en la investigación; algunos ejemplos son el Spot de Boston Dynamics, que ha demostrado ser beneficioso en la inspección inteligente.

El objetivo de este proyecto es cerrar la brecha de investigación en robótica cuadrúpeda en la Universidad Politécnica Salesiana. Se propone crear un prototipo de robot cuadrúpedo que pueda navegar por edificios universitarios para investigar cómo puede utilizarse en procedimientos de inspección inteligentes.

Dado que se utilizará como material didáctico para estudiantes de mecatrónica, esta investigación tiene importancia tanto académica como práctica. Les proporcionará una hoja de ruta sobre cómo integrar conceptos mecánicos, eléctricos y de control en el diseño y desarrollo de robots.

El proyecto se llevará a cabo en el campus de la Universidad Politécnica Salesiana en la ciudad de Cuenca, tendrá una delimitación física. También se decidirá un rango temporal, que se prevé que abarque desde marzo hasta agosto de 2023. Además, se concentrará en el campo de la educación, particularmente en el nivel de educación superior.

2. Problema

2.1. Antecedentes

En la evolución en el área de la robótica se han desarrollado diferentes tipos de robots, para este proyecto se tomará la rama de los cuadrúpedos. A partir de que en 1970 se desarrollase el primer robot móvil en la universidad de Standford. 3 años mas tarde, en 1973 se presento a Wabot-1, el primer robot bípedo que abriría una nueva área con el potencial de solucionar los inconvenientes presentes en los robots con ruedas. Desde aquel instante

se han seguido intentando encontrar maneras de mejorar características como la destreza o percepción de los robots móviles, que les permitiesen expandir sus probables aplicaciones, actualmente existe un destacado desarrollo en el área de cuadrúpedos robots siendo uno de los mas representativos el spot de Boston Dynamics uno de los primeros en comercializar este tipo de tecnología, actualmente existen varias compañías con un producto similar con un enfoque hacia la inspección inteligente mejorando los procesos en esta área. Existen además compañías que comercializan este tipo de robots cuadrúpedos para un uso mas recreativo o para el área académica con enfoque investigativo.

2.2. Descripción del problema

Actualmente la Universidad Politécnica Salesiana no cuenta con una línea de investigación en el desarrollo de un robot cuadrúpedo capaz de realizar movimientos de desplazamiento, los robots cuadrúpedos corresponden a sistemas mecatrónicos que pueden ser aplicados en soluciones industriales, el presente proyecto busca ampliar el campo de investigación en el área de la robótica y automatización industrial generando un prototipo de robot cuadrúpedo que tenga la capacidad de desplazamiento por los espacios de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, buscando además, su implementación en procesos de inspección inteligente.

2.3. Importancia y alcances

La investigación presenta una alternativa como material didáctico que servirá como guía en la enseñanza de la aplicación de los conceptos mecánicos, electrónicos y de control para los estudiantes de la carrera de mecatrónica; su alcance es una propuesta de diseño que se lo elaborará como trabajo de titulación.

2.4. Delimitación

El problema de estudio se delimitará en las siguientes dimensiones:

2.4.1. Espacial o geográfica

Este proyecto se desarrollará en la Universidad Politécnica Salesiana en el Campus El Vecino: Calle Vieja 12 - 30 y Elia Liut.

2.4.2. Temporal

El tiempo estimado para el desarrollo del proyecto de titulación es el estipulado en los meses de marzo – agosto del 2023 con un total de 240 horas, como lo indica la reglamentación de titulación.

2.4.3. Sectorial o institucional

La propuesta del trabajo de titulación está inmerso dentro del sector educativo en un tercer nivel de preparación, dentro de la Universidad Politécnica Salesiana.

2.5. Problema General

- ¿Cual es el diseño idóneo de un mecanismo de movilidad para un robot cuadrúpedo para realizar actividades de desplazamiento por los espacios de la Universidad Politécnica Salesiana ?

2.6. Problemas Específicos

- ¿Se podrá establecer los parámetros iniciales para el Diseño de un mecanismo de movilidad para un robot cuadrúpedo para realizar actividades de desplazamiento por los espacios de la Universidad Politécnica Salesiana?
- ¿Es posible realizar el diseño mecánico de un mecanismo de movilidad para un robot cuadrúpedo capaz de realizar actividades de desplazamiento por los espacios de la Universidad Politécnica Salesiana?
- ¿Es factible proponer un diseño electromecánico de un mecanismo de movilidad para un robot cuadrúpedo capaz de realizar actividades de desplazamiento por los espacios de la Universidad Politécnica Salesiana?

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

- Diseñar un mecanismo de movilidad para un robot cuadrúpedo que pueda desplazarse por los espacios de la Universidad Politécnica Salesiana.

3.2. Objetivos Específicos

- Establecer los parámetros iniciales para el diseño de un mecanismo de movilidad para un robot cuadrúpedo que realice actividades de desplazamiento por los espacios de la Universidad Politécnica Salesiana.
- Realizar el diseño mecánico de un mecanismo de movilidad para un robot cuadrúpedo que realice actividades de desplazamiento por los espacios de la Universidad Politécnica Salesiana.
- Proponer un diseño electromecánico para un mecanismo de movilidad para un robot cuadrúpedo que pueda desplazarse por los espacios de la Universidad Politécnica Salesiana.

4. Hipótesis

A continuación se presentan las hipótesis de investigación planteadas para la investigación:

4.1. Hipótesis General

- El diseño de un mecanismo de movilidad para un robot cuadrúpedo le permitirá realizar actividades de desplazamiento en los espacios de la universidad politécnica salesiana.

4.2. Hipótesis Específicas

- Se establecerá los parámetros iniciales para el diseño de un mecanismo de movilidad para un robot cuadrúpedo para realizar actividades de desplazamiento por los espacios de la Universidad Politécnica Salesiana.

- Se realizara el diseño mecánico de un mecanismo de movilidad para robot cuadrúpedo que realice actividades de desplazamiento por los espacios de la Universidad Politécnica Salesiana.
- Se propondrá diseño electromecánico para un mecanismo de movilidad para un robot cuadrúpedo que realice actividades de desplazamiento por los espacios de la Universidad Politécnica Salesiana.

5. Marco Teórico

El desarrollo de plataformas robóticas móviles fue una fundamental área de investigación en las ultimas décadas, a partir de que en 1970 se desarrollase el primer robot móvil en la universidad de Standford. 3 años mas tarde, en 1973 se presento a Wabot-1, el primer robot bípedo que abriría una nueva área con el potencial de solucionar los inconvenientes presentes en los robots con ruedas. Desde aquel instante se han seguido intentando encontrar maneras de mejorar características como la destreza o percepción de los robots móviles, que les permitiesen expandir sus probables aplicaciones(Martín, 2021).

En la situación de los robots cuadrúpedos, las primordiales líneas de desarrollo para el control de los movimientos que permiten la locomoción se podrían hacer el resumen de en las próximas: el andar estático, en el cual el equilibrio estática del robot se destaca, y el andar dinámico, que usa la inestabilidad a su favor para lograr el desplazamiento, principalmente mas rápido.

Aunque los robots con ruedas son eficientes en el consumo eléctrico y muestran un control subjetivamente sencillo, estuvieron limitados a su uso en ambientes controlados, y terrenos primordialmente planos, disminuyendo de manera considerable la proporción de sitios en los cuales tienen la posibilidad de utilizar.

Sin embargo, imitando la arquitectura locomotora de los animales, los robots con patas muestran el potencial de poder navegar en un rango de terrenos mas variado y prácticamente toda el área solida de la tierra. Esto amplia el rango de aplicación de los robots en sitios que en la actualidad no se pueden ayudar de su uso (Martín, 2021).

5.0.1. Revisión y análisis bibliográfico y documental:

Se realizó una investigación para fundamentar el sustento de este proyecto.

Locomoción en cuadrúpedos:

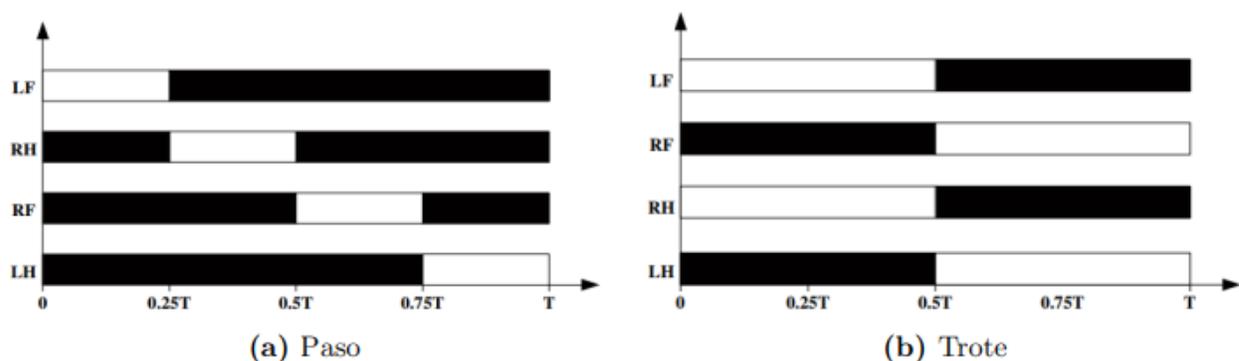
El andar estático ha sido uno de los primeros procedimientos implementados en los robots con patas gracias a su sencillez en relación con otros procedimientos dinámicos. En esta situación, continuar una serie de sencillas pautas es suficiente para lograr la locomoción en terrenos planos.

El punto clave es el mantenimiento del Centro de masa en el polígono que conforman los aspectos de apoyo de las patas en el suelo, lo cual garantiza la igualdad del sistema. El margen de seguridad es la distancia entre la proyección, el centro de gravedad corporal sobre el suelo y los lados de polígono de soporte (Tsai, 1983).

Según lo que analiza (Wen, Wang, Chen, y Zhang, 2012) la locomoción de animales cuadrúpedos proponen una forma de reproducir las secuencias de movimiento de las patas según la posición del pie y el tipo de movimiento deseado: paso, trote o galope. como se puede observar en la Figura 1

Figura 1

Secuencia marcha.



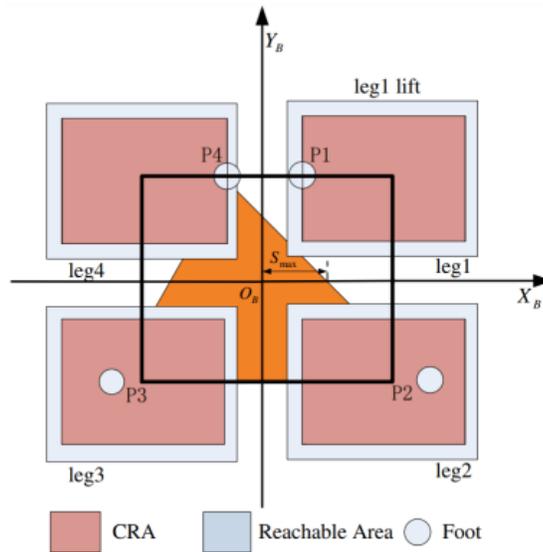
Nota: Se observa las diferentes secuencias de marcha en cuadrúpedos (Wen y cols., 2012).

Gracias a esto se explica de manera general la implementación de la marcha en varios

tipos de robots, consecuentemente obteniendo el modelo cinemático directo e inverso del robot además proponen una forma de diseñar la marcha con un margen de estabilidad (Figura 2) de modo que el robot pueda avanzar sin perder el equilibrio.

Figura 2

Calculo estabilidad.



Nota: Calculo de la estabilidad longitudinal a partir de la posición de los puntos de apoyo Martín (2021).

Proyecto SOLO 12

La principal fuente de inspiración de este proyecto es la iniciativa SOLO 8 que se originó en un esfuerzo por construir un módulo actuador de bajo costo y baja complejidad utilizando Motores sin escobillas que se puede utilizar para construir diferentes tipos de robots controlados por diferente par de troque con impresión en 3D y componentes listos para usar. Sus extensiones, se pueden utilizar para construir robots con patas o Manipuladores (Griminger y cols., 2020).

La locomoción dinámica de robots con patas en entornos reales plantea problemas en términos de eficiencia computacional, estimación de estado y robustez del control frente a perturbaciones externas y obstáculos inesperados. En los últimos años se han demostrado tanto en bípedos y cuadrúpedos, aunque algunos rendimientos se limitan a suelos planos,

dependen en gran medida de dinámicas del sistema (Léziart, Flayols, Grimminger, Mansard, y Souères, 2021).

Figura 3

Proyecto solo 12.



Nota: Según Initiative (2023), se muestra una imagen del robot cuadrúpedo de la Open Dynamic Robot Initiative.

Para conseguir un movimiento más rápido, el robot debe utilizar patrones de marcha dinámicos, como el trote, el galope o el salto. Dinámico requiere un complicado control dinámico del robot y un buen diseño mecánico. Durante el movimiento dinámico, el robot es más sensible a las perturbaciones en comparación con el movimiento de equilibrio estático. Por lo tanto, el cuadrúpedo no es estable durante la marcha.

Se han realizado muchas investigaciones para conseguir que el cuadrúpedo sea estable durante la fase de caminar. Algunas investigaciones intentaron generar trayectorias sensores para equilibrar el robot.

Es importante controlar las caderas de las patas de apoyo y la colocación de los pies para recuperar el equilibrio. Por otro lado, el patrón de marcha también contribuye significativamente a la estabilidad del robot. De esta manera, la selección del patrón de marcha es importante para diferentes terrenos o diferentes situaciones para conseguir una marcha estable (Sutyasadi y Parnichun, 2015).

Necesidad del robot

El enfoque que se va a dar a este proyecto requiere cumplir con una serie de necesidades de autonomía por ello se propone que el robot tenga la capacidad de manipular en diferentes intervenciones como lo son botones, puertas, entre otros además de tener la capacidad de superar ciertos obstáculos como lo son terrenos irregulares, escaleras, pasillos concurridos, ascensores y sobretodo espacios como los laboratorios presentes en la Universidad Politécnica Salesiana por ello se requiere identificar correctamente estas necesidades.

Para solucionar la falta de motricidad para las actividades antes mencionadas se propone que el diseño mecánico del cuadrúpedo cuente con un brazo antropomorfo el cual le permite manipular su entorno, además cuente con una serie de actuadores y sensores que le permita comprender su entorno consecuentemente tome decisiones para solucionar los obstáculos que se le presente.

Otro parámetro a tener en cuenta son sus dimensiones tanto como el área que ocupara como su alto, por ello es importante realizar una serie de preguntas como que tanto debe ser para que en conjunto de su cuerpo con su brazo pueda tener la medida adecuada para manipular una puerta o botón de ascensor, que ancho debe ocupar para atravesar por una puerta, que tan largo debe ser para no descompensar el centro de masa en una marcha o galope dentro de los espacios de la Universidad Politécnica Salesiana.

Con respecto a la manipulación de las cargas máximas permitidas se debe considerar que la estructura mecánica pueda soportar los esfuerzos generados por el propio peso del robot y una carga máxima establecida dependiendo de la aplicación del mismo, también se debe tomar en cuenta el centro de masa se encuentre situado dentro de las zonas de equilibrio caso contrario causaría defectos en la marcha llegando a dañar el robot.

Criterios de dimensionamiento

Respecto al tipo de actuación, los robots se pueden separar principalmente en dos grupos, los robots de actuación hidráulica y los de actuación eléctrica. En el grupo de los robots con actuación hidráulica, podemos mencionar al robot de BigDog de Boston Dynamics que es alimentado mediante un generador de combustión interna, es capaz de transportar 150 kg de carga en condiciones controladas. Sus actuadores encargados de la locomoción están acompañados por sensores de posición y fuerza, con los que ejecuta el control por par de torque (Raibert, Blankespoor, Nelson, y Playter, 2008).

La energía hidráulica presenta una mayor potencia que la eléctrica, también presenta una serie de desventajas, como su complejidad de diseño o necesitar un mayor mantenimiento que la energía eléctrica se pueden destacar.

Los motores eléctricos con una baja pérdida de energía permiten obtener medidas de par con mayor facilidad, debido a la baja impedancia mecánica en el medio; encontramos los actuadores hidráulicos en serie, que pueden acoplarse a un sistema en presencia de un alto par. Este tipo de actuador debe llevar un elemento en serie, que puede ser un muelle, con el que medir el par de reacción ejercido sobre el mecanismo, a partir de la deformación de dicho elemento (Semini y cols., 2011).

En la energía eléctrica, una de las consideraciones en el diseño es la optimización del consumo energético, ya que afecta en la autonomía del robot. Una forma para aumentar la eficiencia energética, se proponen cuatro principios de diseño: motores de alta densidad de par, transmisión de baja impedancia, electrónica que permita la regeneración de energía y patas con baja inercia. Esto considerando que se producen pérdidas de energía en los actuadores, pérdidas en la transmisión y pérdidas en la interacción con el entorno (Seok y cols., 2013).

En la tabla 1 se presenta un breve resumen de la energía disponible para el accionamiento de los actuadores necesarios para un robot cuadrúpedo.

Tabla 1*Calculo estabilidad.*

<i>Tipo de Accionamiento</i>	Complejidad	Descripción
<i>Energía Hidráulica</i>	Alta	Presenta una mayor potencia que la energía eléctrica, pero requiere un diseño más complejo y un mayor mantenimiento.
<i>Actuadores Hidráulicos en Serie</i>	Alta	Son utilizados en sistemas que requieren un alto par. Se emplean elementos en serie, como muelles, para medir el par de reacción ejercido sobre el mecanismo.
<i>Energía Eléctrica</i>	Baja	Requiere una optimización del consumo energético para aumentar la eficiencia y la autonomía del robot. Considera principios de diseño como motores de alta densidad de par, transmisión de baja impedancia, electrónica para la regeneración de energía y patas con baja inercia.

El ultimo diseño del MIT Cheetah es el robot llamado Mini Cheetah, de pequeñas dimensiones. con un peso de 9 kg para un tamaño de 40 cm de distancia entre las patas delanteras y traseras, utiliza los mismos actuadores en todas las articulaciones en la figura 4. Para transmitir el par a la rodilla utilizan una correa dentada con una reducción suplementaria de 1.55:1. Como actuadores emplean un motor sin escobillas con una reductora planetaria (6:1) que la lleva incorporada en el interior del motor, consiguiendo un diseño compacto con alta densidad de par. También incorpora el controlador del motor con un sensor de posición. como se observa en la figura 5 (Katz, Di Carlo, y Kim, 2019).

Figura 4

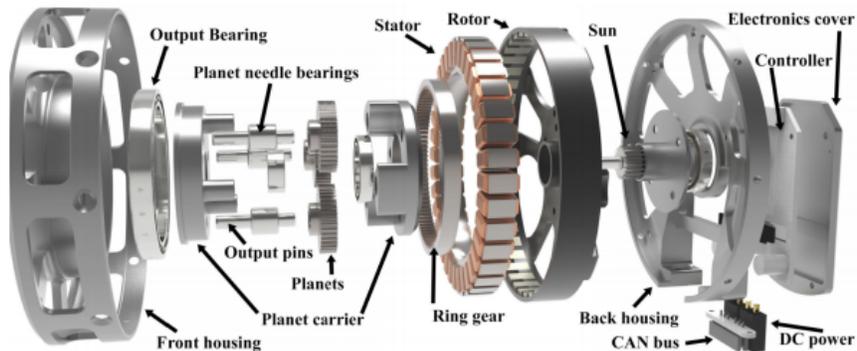
Mini Cheetah.



Nota: Robot Mini Cheetah y diseño de una pata (Katz y cols., 2019).

Figura 5

Mini Cheetah Actuador incorporado.



Nota: Actuador incorporado (Katz y cols., 2019).

Con este diseño, el robot obtiene una gran flexibilidad: el abductor puede rotar 120 grados en ambos sentidos, el hombro ± 270 grados y la rodilla ± 155 grados, pudiendo doblar esta en ambos sentidos. Las pruebas realizadas muestran un trote a 2.45m/s en ambos sentidos, y desplazamiento lateral a 1 m/s. También muestran que es capaz de ejecutar backflips,

demostrando gran agilidad y capacidad de resistencia a impactos (Katz y cols., 2019).

Propuesta de solución: Con la recopilación de de la información antes mencionada se propone que con este diseño responderá como primera instancia al desarrollo tecnológico de una manera integral que permita profundizar la investigación en la robótica de cuadrúpedos con aplicación industrial, en segunda instancia el diseño que se desarrolle podrá ser utilizado para una futura implementación.

Otro punto a recalcar es la aplicación futura ya que con este proyecto resultara posible fomentar el desarrollo de plataformas de mayor complejidad para la inspección inteligente con aplicaciones además de sistemas de control que permitan estas acciones.

6. Marco metodológico

6.1. Establecimiento de los parámetros iniciales para el diseño mecánico y electromecánico para un dispositivo de movilidad de un robot cuadrúpedo

El método empleado en el estudio para recabar y analizar la información para el diseño mecánico y electromecánico de un dispositivo de movilidad de un robot cuadrúpedo fue una combinación de investigación bibliográfica y simulaciones.

- Definición de los requerimientos y especificaciones del dispositivo de movilidad, basados en las necesidades del robot cuadrúpedo y en las consideraciones de diseño
- Investigación bibliográfica para recopilar información sobre los parámetros y características de dispositivos de movilidad similares, y sobre los conceptos fundamentales de la cinemática y dinámica de robots cuadrúpedos
- Selección de los materiales y componentes necesarios para el diseño, considerando los requerimientos y especificaciones definidos
- Simulación del comportamiento del dispositivo de movilidad mediante software de simulación, utilizando modelos matemáticos y físicos para validar y optimizar el diseño

- Construcción de un prototipo del dispositivo de movilidad para realizar pruebas experimentales y validar las simulaciones
- Análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones y pruebas experimentales, y ajuste del diseño si es necesario

Los instrumentos, equipos, dispositivos, materiales y otros empleados en la recolección de la información incluyeron software de simulación (Autodesk Inventor), herramientas de diseño asistido por computadora (Autodesk Inventor), materiales como distintos filamentos para fabricación aditiva, sensores y actuadores.

6.1.1. Revisión bibliográfica

La prueba de algoritmos avanzados de control y aprendizaje en sistemas robóticos puede ser difícil debido al alto costo y complejidad del hardware, así como a los costos de mantenimiento.

Además, los sistemas robóticos son difíciles de comparar entre sí y muchos no están disponibles en el mercado. Para avanzar en la investigación académica, se necesitan plataformas robóticas de bajo costo y fácilmente reproducibles que permitan la implementación de hardware, firmware y middle-ware asequibles. Los planos de código abierto para estas plataformas, como algunos robots de bajo costo, pueden ser una solución viable.(Grimminger y cols., 2020)

También se analiza las aplicaciones del aprendizaje por refuerzo en la manipulación robótica, como la manipulación de objetos, la navegación autónoma y el control de robots humanoides.

Además, se discuten los desafíos actuales y las limitaciones del aprendizaje por refuerzo en la manipulación robótica, como la necesidad de grandes conjuntos de datos, la falta de generalización y la dificultad de garantizar la seguridad.

En robótica, la locomoción y la manipulación son dos aspectos importantes que se complementan. Mientras que la manipulación implica mover objetos en el espacio de trabajo, en la locomoción, el robot se mueve en un entorno fijo.

Ambos aspectos requieren del estudio de actuadores y mecanismos que generen y apliquen fuerzas de manera adecuada. Además, tanto la locomoción como la manipulación enfrentan cuestiones similares como la estabilidad, las características del contacto y el tipo de entorno en el que operan.

En resumen, la base científica de ambas áreas de la robótica se centra en el estudio de cómo generar y aplicar fuerzas de manera efectiva para lograr los objetivos deseados:

- estabilidad
- número y geometría de los puntos de contacto
- centro de gravedad
- estabilidad estática/dinámica
- inclinación del terreno
- características del contacto
- tamaño y forma del punto/trayectoria de contacto
- ángulo de contacto
- rozamiento
- tipo de entorno
- estructura
- medio (por ejemplo, agua, aire, suelo blando o duro)

6.1.2. Necesidades, Requerimientos y Métricas

A continuación se establecen necesidades y requerimientos necesaria a tomar en cuenta para el proceso del diseño.

- Desplazamiento en terreno irregular
- Movilidad en terreno regular

- Movilidad en espacio estrechos
- Capacidad de evadir obstáculos
- Manipulación de manijas
- Fuerza necesaria en manipulación
- Mantenibilidad
- Fácil remplazo de piezas
- Peso final liviano
- Tamaño final del dispositivo compacto
- Dispositivo robusto
- Sencilla programación
- Consumo energético óptimo
- Seguridad eléctrica
- Conexión eléctrica flexible
- Sencillo control
- Fácil limpieza
- Apto para el cambio dinámico del ambiente
- Comunicación segura para el controlador
- Autonomía mínima necesario para la realización de actividades limitadas

A continuación se establecen métricas necesaria a tomar en cuenta para el proceso del diseño.

- **Tamaño puerta estándar:** El tamaño estándar de una puerta es de 82.5 cm, por lo cual el dispositivo debe tener un tamaño menor para el correcto desplazamiento.

- **Altura de puerta tamaño estándar:** La altura estándar de una puerta es de 203cm, cuanto a la altura del dispositivo de ser coherente en la relación a las necesidades entonces se debe relacionar a las siguientes métricas.

- **Tamaño estándar de manija de puerta:** En este caso existen varios tipos de manijas nos centraremos en los grupos más importantes los cuales son de manijas jaladeras y manijas redondas las cuales oscilan entre tamaños de 0.635cm a 5.08cm dependiendo su modelo.

- **Altura estándar de manija de puerta:** Aquí se hace referencia a la altura donde está posicionada la manija en la puerta que en la medida estándar es de 91cm.

- **Tamaño escalón estándar:** Nos referimos a tamaños cuan ancho es el escalón estándar que va desde 80cm a 100cm en diferentes ambientes como pueden ser en un hogar o en edificios con escaleras diseñadas para un gran fulo de personas.

- **Altura estándar de escalón:** Según la aplicación con la cual se diseñe la escalera las medidas están dentro de los siguientes rangos: Exteriores 14-16 cm, Edificios públicos 16-17 cm, En viviendas 17-18 cm, En maquinaria 10-25 cm.

- **Mantenibilidad:** Nos referimos como mantenibilidad al tiempo en que el elemento falla, el número de reparaciones y el tiempo de reparación su magnitud está en tiempo puede ser hora sobre número de fallas.

- **Sistema de acople de fácil ensamble:** Cuando se habla de fácil ensamble nos referimos a utilizar sistemas rígidos de acople que utilizan tornillos según las normativas vigentes además de uso de tolerancias necesarias para su construcción.

- **Consumo energético óptimo:** El consumo está dado por W/hora donde este ocupa lo necesario para realzar su actividad de locomoción.

- **Rigidez mecánica:** Nos referimos a la capacidad de un objeto de resistir la deformación cuando se aplica una fuerza que esta medida en N/m^2 .
- **Robustez en el sistema:** Se refiere a la cualidad de mantenerse involuto a las perturbaciones exteriores que puedan dar fallos en el sistema la manera de medir se basa en los grados de certificación IP.
- **Torque:** Es una medida de la fuerza que se aplica en un objeto para hacerlo girar alrededor de un punto fijo, que se mide en Nm.
- **Velocidad:** Magnitud física que describe la rapidez con la que un objeto se mueve en una dirección determinada medida en m/s o km/h.
- **Aceleración:** Medida de la rapidez con la que un objeto cambia su velocidad en una dirección determinada medida en m/s^2 .
- **Control de motor DC:** Es la acción o el efecto de poder decidir sobre el desarrollo de un proceso o sistema modificando cierta variables para obtener el resultado deseado su media es dependiendo de la variable controlada y la cantidad de error respuesta de sistema.
- **Computo:** Se puede definir como la cantidad de tiempo que se necesita para procesar y analizar la información recopilada por los sensores de un robot y tomar decisiones basadas en esa información. Se puede medir utilizando métricas como el tiempo de ciclo, que es el tiempo necesario para completar una serie de tareas de control y procesamiento de datos.
- **Sensorización:** El sensado de sensores en robótica se refiere a la capacidad de los sensores de un robot para recopilar información del entorno en el que se encuentra y proporcionarla al sistema de control del robot. la forma e medir depende de la precisión, que se refiere a la exactitud de la información recopilada por los sensores, y la tasa de muestreo, que mide la frecuencia con la que los sensores recopilan información.
- **Sistema flexible:** se refiere a su habilidad para ajustar y modificar su comportamiento en respuesta a cambios en el entorno o en las tareas asignadas. Esto implica que el robot tiene la capacidad de aprender y ajustarse a nuevas situaciones y entornos de manera efectiva y eficiente.

- **Desplazamiento:** distancia total recorrida por un robot mientras se mueve de un punto a otro. Medida en metros.
- **Área de trabajo:** El área de trabajo se puede utilizar como una métrica para evaluar la eficiencia y capacidad de un robot para llevar a cabo tareas específicas en un entorno determinado. Medido en m^3 .

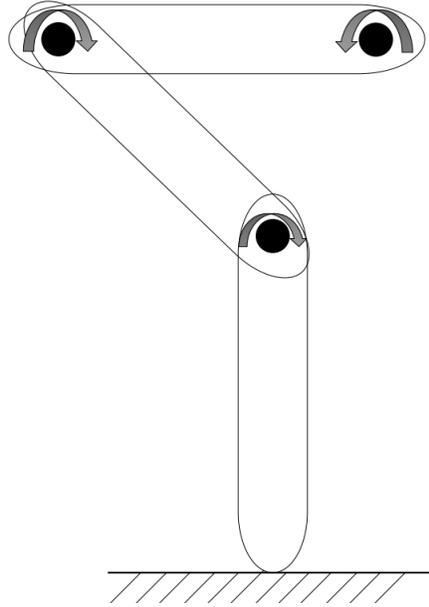
Para verificar y validar la información obtenida se utilizara el método científico, que consiste en la formulación de hipótesis, la recolección de datos, la realización de pruebas y experimentos, y la interpretación de los resultados. Se aplicara conceptos de la cinemática y dinámica de robótica, así como las normas y estándares relacionados con el diseño y fabricación de dispositivos mecánicos y electromecánicos.

6.1.3. Grados de libertad

Para el calculo de de grados de libertad se usa el criterio de Chebychev-Grübler-Kutzbach se utiliza para determinar la cantidad de grados de libertad de una cadena cinemática compuesta por cuerpos rígidos que están acoplados mediante restricciones mecánicas. A estos cuerpos rígidos también se les conoce como eslabones. Además, este criterio también se le llama fórmula de movilidad, ya que permite calcular el número de parámetros necesarios para definir la configuración de un eslabón, basándose en el número de eslabones, articulaciones y el grado de libertad en cada articulación (Angeles, 2013).

Figura 6

Esquema de Extremidad inferior.



Nota: Extremidad inferior con sus sentido de giro en sus articulaciones.

$$DOF = \lambda(n - j - 1) + \sum i f_i \quad (1)$$

Donde:

λ : DOF del espacio de trabajo

n : Numero de eslabones, incluyendo la base

j : Numero de articulaciones

f_i : Grados de libertad permitidos en a articulación i

En el caso de esta extremidad se calcula que:

$$DOF = \lambda(n - j - 1) + \sum i f_i \quad (1)$$

Donde:

$$\lambda: 2$$

$$n: 4$$

$$j: 3$$

$$f_i: 1$$

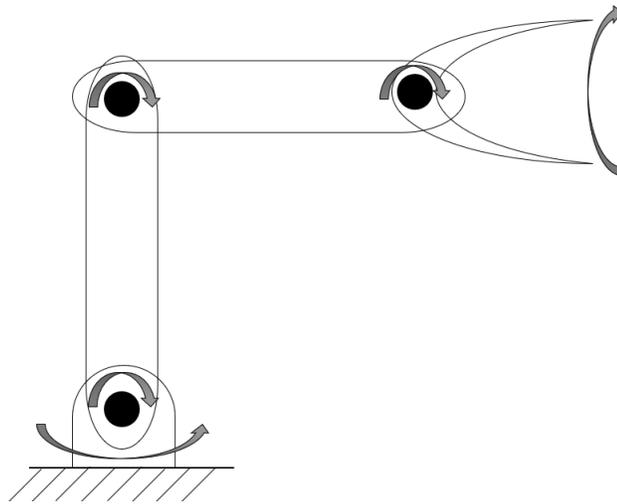
$$i: 3$$

$$DOF = 3(4 - 3 - 1) + 3$$

$$DOF = 3$$

Figura 7

Esquema de Extremidad superior de manipulación.



Nota: Extremidad superior con sus sentido de giro en sus articulaciones.

En el caso de esta extremidad se calcula que:

$$DOF = \lambda(n - j - 1) + \sum i f_i \quad (1)$$

Donde:

$$\lambda: 2$$

$$n: 6$$

$$j: 5$$

$$f_i: 1$$

$$i: 5$$

$$DOF = 3(6 - 5 - 1) + 5$$

$$DOF = 5$$

En el caso de un robot móvil multipata, se debe plantear la cuestión de la coordinación de las patas para la locomoción, o control de la marcha. El número de patas depende de la siguiente ecuación.

$$N = (2 \cdot K - 1)! \quad (2)$$

Donde:

N : Número posibles de marcha

K : Número de patas

Como se ha mencionado la marcha es una secuencia de movimientos coordinados de elevar las patas en trayectorias definidas que permitan el desplazamiento. Ahora se calcula el número de marchas posibles con los siguientes datos.

$$N = (2 \cdot K - 1)! \quad (2)$$

Donde:

$$K: 4s$$

$$N = 5040 \quad (3)$$

Tomando en cuenta este resultado no todas estas combinaciones son posibles ya que podrían ser impedidas por su geometría o por causar inestabilidad al sistema causando que el equilibrio de robot sea afectado dando un comportamiento no deseado (Siegwart, Nourbakhsh, y

Scaramuzza, 2011).

6.1.4. Parámetros iniciales

Entre los datos concretos y características especiales de los procesos, se incluyen las restricciones utilizadas en las simulaciones, como la carga máxima soportada, la velocidad de desplazamiento y la capacidad de maniobra en terrenos irregulares. También se consideraron factores como la resistencia a la corrosión y la durabilidad de los materiales utilizados en el diseño.

Parámetros específicos

- Velocidad de desplazamiento de 3 a 5 km/h en modo cuadrúpedo
- Velocidad de desplazamiento de 4 km/h en modo tracción por rueda
- Carga máxima que puede soportar el cuerpo 5kg
- Fuerza necesaria en el manipulador de 3 a 5 Nm
- Carga máxima en manipulador 1kg
- Material para manufactura Filamento de impresión 3D PLA
- Material para manufactura Filamento de impresión 3D PETG

Primeras ideas de diseños

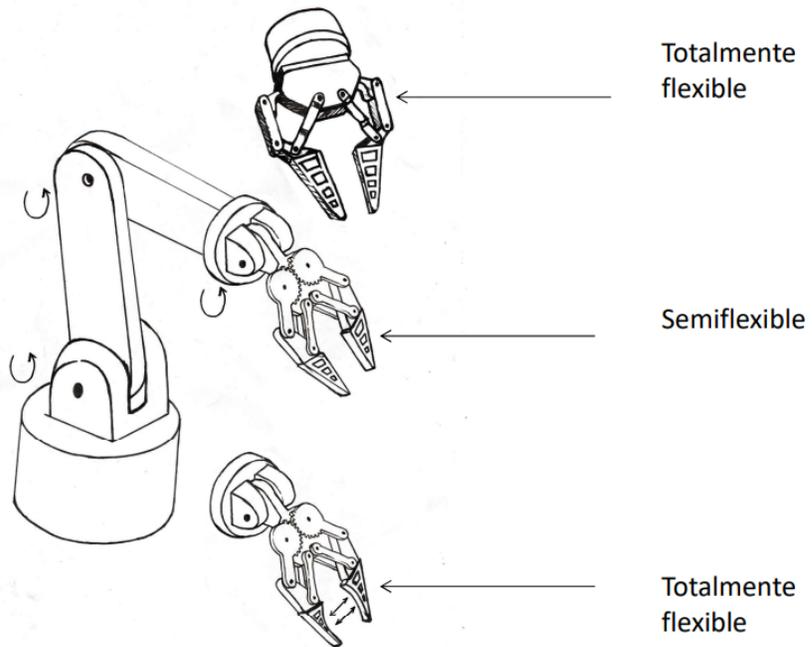
Para reducir los riesgos y aumentar la eficacia del proceso de desarrollo, la fase de diseño preliminar es esencial.

Ofrece una base fiable para hacer selecciones informadas y determinar las especificaciones esenciales para el diseño final. Además, los diseños preliminares permiten que las partes beneficiarios aporten sus ideas y revisiones antes de invertir grandes recursos en la implementación.

Como se muestra en la Figura 8 se encuentran tres diseños preliminares del manipulador.

Figura 8

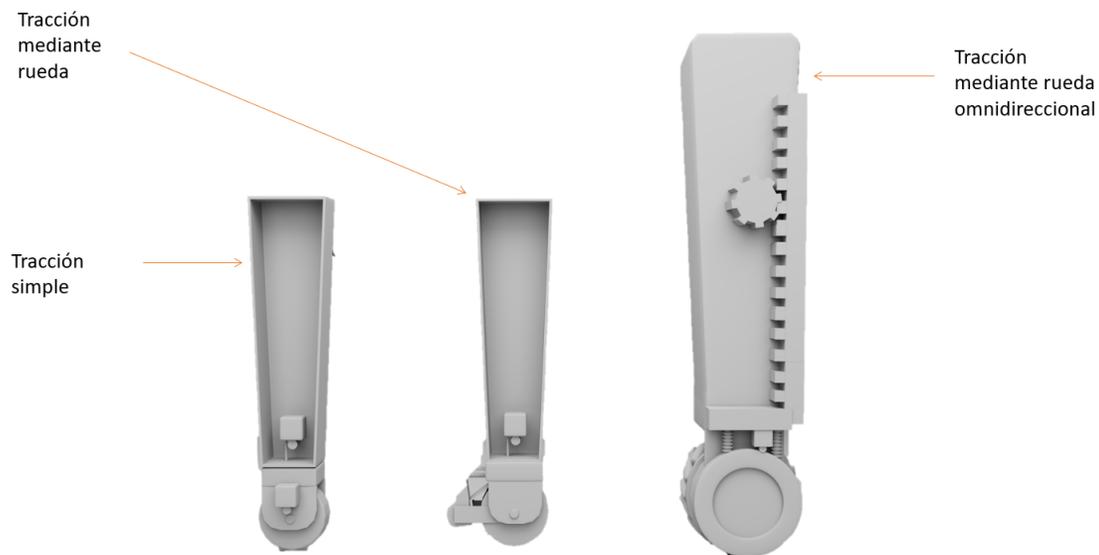
Esquema de Extremidad superior y manipulador.



Como se muestra en la Figura 9 se encuentran tres diseños preliminares de extremidad de tracción inferior.

Figura 9

Esquema de Extremidad inferior.



6.2. Propuesta del diseño mecánico y electromecánico para un dispositivo de movilidad para un robot cuadrúpedo

El método empleado en el estudio para la propuesta del diseño mecánico y electromecánico para un dispositivo de movilidad de un robot cuadrúpedo fue una combinación de investigación bibliográfica, revisión de literatura respecto a simulaciones y pruebas experimentales; para ello se definen puntos claves que guiarán el proceso de diseño:

- Definición de los requerimientos y especificaciones del dispositivo de movilidad, basados en las necesidades del robot cuadrúpedo y en las consideraciones de diseño.
- Investigación bibliográfica para recopilar información sobre los parámetros y características de dispositivos de movilidad similares, y sobre los conceptos fundamentales de la cinemática y dinámica de robots cuadrúpedos.
- Selección de los materiales y componentes necesarios para el diseño, considerando los requerimientos y especificaciones definidos.

- Diseño conceptual del dispositivo de movilidad, utilizando software de diseño asistido por computadora (Autodesk Inventor) para generar modelos virtuales.
- Análisis del diseño mediante simulaciones, utilizando software de simulación (Autodesk Inventor) para evaluar el comportamiento del dispositivo de movilidad en diferentes escenarios.
- Diseño detallado del dispositivo de movilidad, incluyendo la selección de motores, sensores y otros componentes, y la generación de planos y especificaciones para la fabricación.
- Construcción del prototipo del dispositivo de movilidad y realización de pruebas experimentales para validar el diseño y la funcionalidad del dispositivo.
- Análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones y pruebas experimentales, y ajuste del diseño si es necesario.

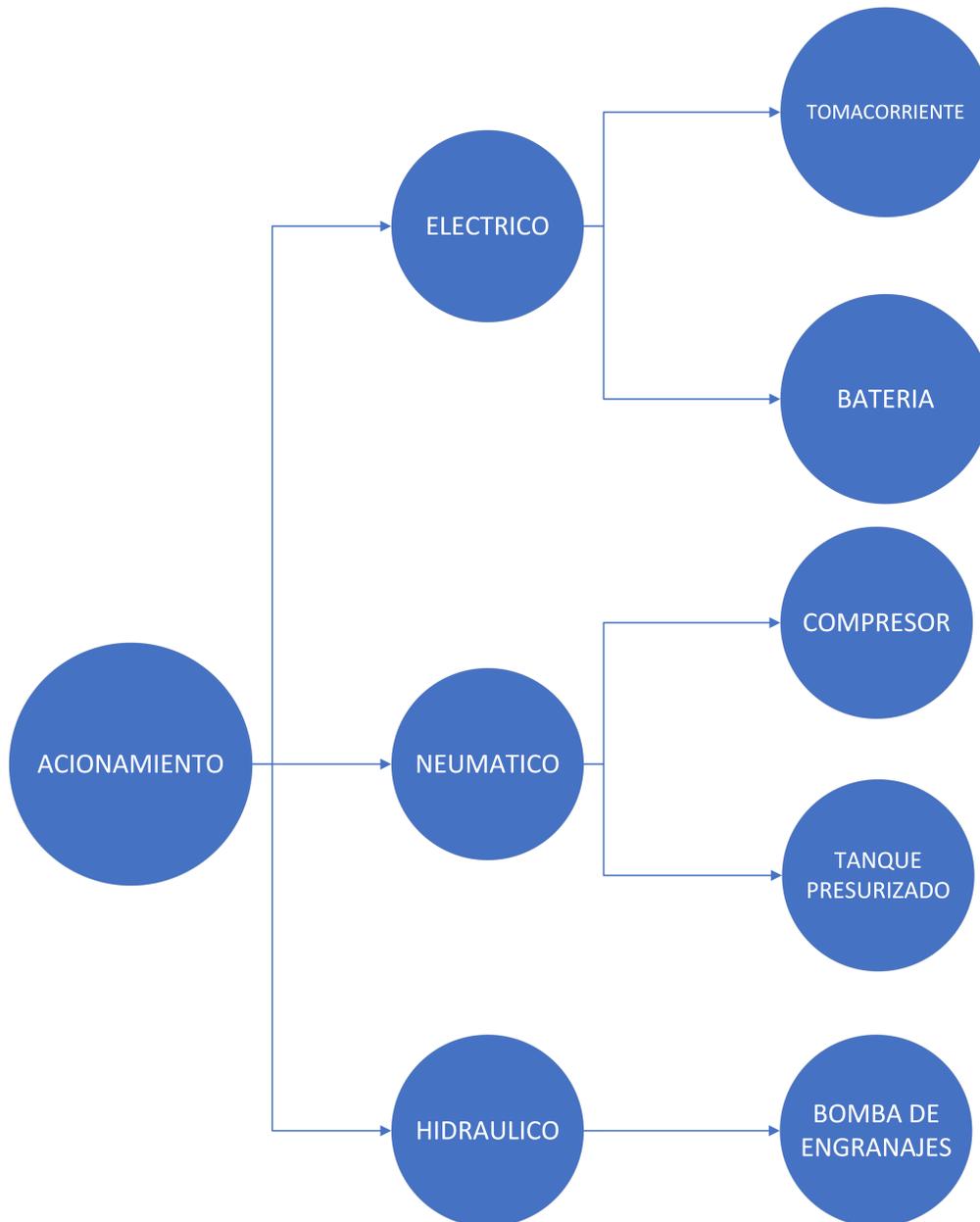
6.3. Árboles de decisión y matrices de combinación

Los instrumentos, equipos, dispositivos, materiales y otros empleados en la recolección de la información incluyeron software de diseño asistido por computadora (Autodesk Inventor), software de simulación (Autodesk Inventor Nastran), materiales como aleaciones de aluminio y acero inoxidable, motores, sensores y actuadores.

Como se muestra en la Figura 10 se dan todas las posibles opciones de accionamiento para el dispositivo de movilidad de un robot cuadrúpedo.

Figura 10

Árbol de decisión accionamiento.



Como se muestra en la Figura 11 se indican todas las necesidades para definir adecuadamente el dimensionamiento de los dispositivos.

Figura 11

Árbol de decisión para Dimensionamiento.



El diseño de un robot eficiente y funcional requiere tener en cuenta una serie de consideraciones físicas para garantizar su adecuado desplazamiento y operación en diversos entornos. Estas consideraciones se reflejan en métricas relacionadas con las dimensiones y características físicas del robot, las cuales son fundamentales para asegurar su movilidad, maniobrabilidad y adaptación a diferentes estructuras y elementos presentes en su entorno.

Tabla 2*Tabla decisión dimensiones.*

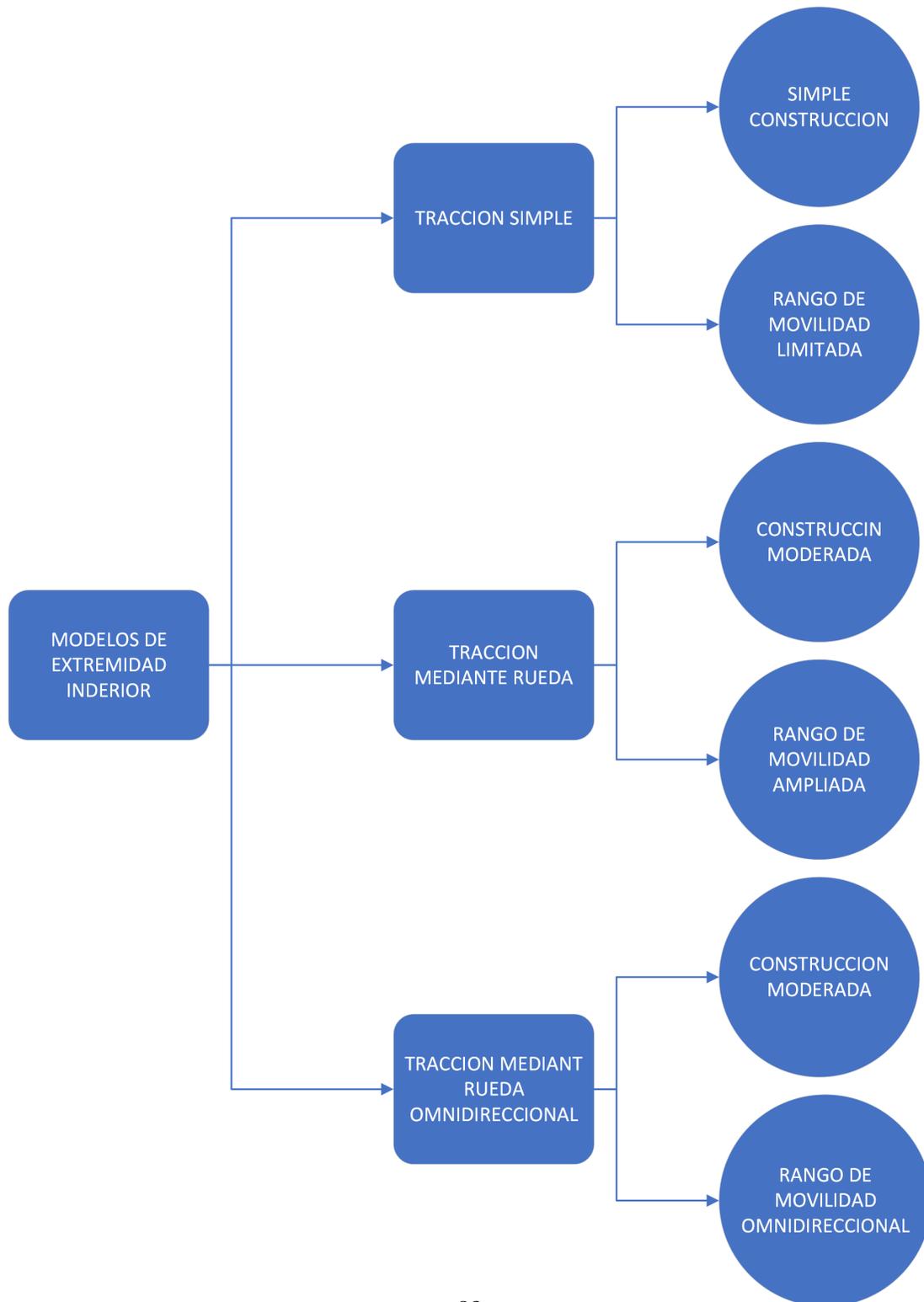
Métrica	Descripción	Decisión
Tamaño puerta estándar	El tamaño del dispositivo debe ser menor que 82.5cm	Si el tamaño del dispositivo es menor que 82.5 cm, se cumple la métrica. Si no, no se cumple.
Altura de puerta tamaño estándar	La altura del dispositivo debe ser coherente con la altura estándar de la puerta (203 cm)	Si la altura del dispositivo es coherente con la altura estándar de la puerta, se cumple la métrica. Si no, no se cumple.
Tamaño estándar de manija de puerta	El dispositivo debe ser compatible con los diferentes tamaños de manijas (jaladeras y redondas) que oscilan entre 0.635cm a 5.08cm dependiendo del modelo	Si el dispositivo es compatible con los diferentes tamaños de manijas, se cumple la métrica. Si no, no se cumple.
Altura estándar de manija de puerta	La altura del dispositivo debe ser coherente con la altura estándar de la manija en la puerta (91cm)	Si la altura del dispositivo es coherente con la altura estándar de la manija en la puerta, se cumple la métrica. Si no, no se cumple.
Tamaño escalón estándar	El dispositivo debe ser compatible con los diferentes tamaños de escalón que van desde 80cm a 100cm en diferentes ambientes.	Si el dispositivo es compatible con los diferentes tamaños de escalón, se cumple la métrica. Si no, no se cumple.
Altura estándar de escalón	La altura del dispositivo debe ser coherente con la medida estándar del escalón en el ambiente donde se utilizará	Si la altura del dispositivo es coherente con la medida estándar del escalón en el ambiente donde se utilizará, se cumple la métrica. Si no, no se cumple.
Mantenibilidad	El dispositivo debe tener un tiempo de falla, número de reparaciones y tiempo de reparación coherente con la necesidad del usuario	Si el tiempo de falla, número de reparaciones y tiempo de reparación del dispositivo es coherente con la necesidad del usuario, se cumple la métrica. Si no, no se cumple.
Sistema de acople de fácil ensamble	El dispositivo debe utilizar sistemas rígidos de acople que utilizan tornillos según las normativas vigentes además de usar tolerancias necesarias para su construcción	Si el dispositivo utiliza sistemas rígidos de acople que utilizan tornillos según las normativas vigentes y usa tolerancias necesarias para su construcción, se cumple la métrica. Si no, no se cumple.
Consumo energético óptimo	El dispositivo debe tener un consumo energético que ocupe lo necesario para realizar su actividad de locomoción	Si el dispositivo tiene un consumo energético que ocupa lo necesario para realizar su actividad de locomoción, se cumple la métrica. Si no, no se cumple.
Rigidez mecánica	El dispositivo debe tener la capacidad de resistir la deformación cuando se aplica una fuerza medida en N/m	Si el dispositivo tiene una baja rigidez al momento de soportar una carga no debe de deformarse Si no, no se cumple.

El diseño de un robot cuadrúpedo requiere tomar decisiones fundamentales en cuanto a las extremidades inferiores que se utilizarán.

Las extremidades son un componente crucial que determina la estabilidad, movilidad y capacidad de navegación del robot en diferentes tipos de terrenos y situaciones. En este contexto, se puede utilizar un árbol de decisión para analizar y seleccionar las extremidades inferiores más adecuadas para el robot, considerando diversos factores y criterios específicos.

Figura 12

Árbol decisión para diseño de extremidades inferiores.



Para el accionamiento de las extremidades es requerido un motor eléctrico de corriente directa este mismo convierte la energía eléctrica en energía mecánica a través de la interacción de campos magnéticos. El cual consiste en una armadura, que es el componente móvil del motor, y un campo magnético generado por un imán permanente o por electroimanes. La dirección del flujo de corriente a través de la armadura se invierte periódicamente para mantener la rotación continua del motor.

El principio fundamental que gobierna el funcionamiento de un motor de corriente directa es la Ley de Faraday de la inducción electromagnética, que establece que un campo magnético variable induce una fuerza electromotriz en un conductor que atraviesa ese campo.

A continuación, se presentan algunas de las ecuaciones matemáticas fundamentales asociadas con los motores eléctricos de corriente directa:

Fuerza electromotriz (fem): La fem inducida en la armadura del motor se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$E = N \cdot B \cdot L \cdot \omega \quad (4)$$

- E es la fem inducida en voltios.
- N es el número de vueltas de la armadura.
- B es la densidad del flujo magnético en teslas.
- L es la longitud efectiva del conductor en metros.
- ω es la velocidad angular de la armadura en radianes por segundo.

Torque (T): El torque producido por el motor está relacionado con la fem y la corriente eléctrica mediante la siguiente ecuación:

$$T = k_t \cdot I \quad (5)$$

Donde:

- T es el torque en Newton-metro.
- K_t es la constante de torque del motor en Newton-metro por amperio.

- I es la corriente eléctrica en amperios.

Velocidad angular (ω): La velocidad angular de la armadura está relacionada con la diferencia de tensión aplicada (V) y la resistencia interna (R) del motor mediante la siguiente ecuación:

$$\omega = (V - I \cdot R) / K_w \quad (6)$$

Donde:

- (ω) es la velocidad angular en radianes por segundo.
- V es la tensión aplicada en voltios.
- R es la resistencia interna del motor en ohmios.
- K_w es la constante de velocidad angular del motor en radianes por segundo por voltio.

Es fundamental tener en cuenta que estos cálculos son simplificaciones y pueden variar en función de la complejidad del motor y de los factores de diseño exclusivos.

Toda esta información es recopilada de Malvino, Bates, y cols. (1991) y de Malea y Balaguer (2004).

En el campo de la tecnología mecánica, los motores eléctricos desempeñan un papel fundamental en la propulsión de robots. Existen diversos tipos de motores eléctricos, y dos de los más comunes son los motores de corriente continua (CC) con escobillas y los motores sin escobillas.

Estos motores presentan notables contrastes en cuanto a diseño, funcionamiento y aspectos destacados. En esta reacción, vamos a hablar de los contrastes entre los motores de corriente continua con escobillas y los motores sin escobillas, y nos centraremos en las razones por las que la utilización de motores sin escobillas es útil en la conducción de robots cuadrúpedos.

Vamos a tomar como fundamentos la eficacia vital, la resistencia, el control de precisión y la ejecución, y destacar cómo estos componentes contribuyen a avanzar en el movimiento y las capacidades de los robots cuadrúpedos. La comprensión de los puntos de interés de los motores sin escobillas en este entorno es fundamental para el plan ideal y la mejora de los marcos mecánicos avanzados.

Como se muestra en la Tabla 3 denotamos parámetros fundamentales de la diferencia entre los motores con y sin escobillas.

Tabla 3

Tabla de motores.

Diferencia entre motor DC con escobillas y motor sin escobillas				
Funcionamiento	Desgaste y mantenimiento	Eficiencia	Control y rendimiento	Uso en robots cuadrúpedos
En un motor con escobillas, la conmutación se realiza mediante el contacto mecánico de las escobillas y el conmutador.	Los motores DC con escobillas tienen mayor desgaste y requieren reemplazo periódico de las escobillas.	Los motores sin escobillas son generalmente más eficientes, tienen menor pérdida de energía y generan menos calor.	Los motores sin escobillas ofrecen un control de velocidad más preciso y una respuesta más rápida.	El uso de motores sin escobillas en robots cuadrúpedos proporciona mayor eficiencia energética y menor necesidad de mantenimiento.
En un motor sin escobillas, la conmutación se realiza electrónicamente mediante un controlador.	Los motores sin escobillas tienen menor desgaste y requieren menos mantenimiento.	Los motores con escobillas tienen mayor pérdida de energía debido al desgaste mecánico y la fricción.	Los motores con escobillas tienen una respuesta más limitada y menos precisión en el control de velocidad.	Los motores sin escobillas ofrecen un control de precisión y un rendimiento mejorados en términos de carga, velocidad y maniobrabilidad.

Materiales

PLA (ácido poliláctico), es un polímero termoplástico que se utiliza ampliamente en diversas aplicaciones debido a sus propiedades y características específicas. Aquí tienes un detalle técnico a fondo del PLA:

Estructura física: El PLA pertenece a la familia de los poliésteres alifáticos y está compuesto principalmente por ácido láctico. Su estructura química está formada por unidades repetitivas de ácido láctico, que a su vez constan de un grupo ácido (-COOH) y un grupo hidroxilo (-OH).

Densidad: La densidad del PLA varía según el grado y el procesamiento, pero típicamente oscila entre 1.2 y 1.4 g/cm³. Es más denso que muchos otros polímeros comunes, como el polietileno de alta densidad (HDPE) o el polipropileno (PP).

Propiedades: El PLA exhibe una combinación de propiedades mecánicas, térmicas y ambientales que lo hacen adecuado para diversas aplicaciones. Algunas de sus propiedades clave incluyen:

- **Biodegradabilidad:** Es uno de los polímeros biodegradables más ampliamente utilizados y se considera ambientalmente amigable. Puede descomponerse en dióxido de carbono (CO₂) y agua bajo condiciones adecuadas de compostaje.
- **Rigidez:** El PLA tiene una rigidez comparable a la de algunos plásticos convencionales, como el poliestireno (PS). Sin embargo, es más rígido que otros polímeros biodegradables, como el ácido poliglicólico (PGA) o el polihidroxibutirato (PHB).
- **Resistencia térmica:** El PLA tiene una temperatura de transición vítrea (T_g) alrededor de 60-65°C. Esto significa que el material puede ablandarse y deformarse bajo cargas térmicas moderadas. Por encima de la T_g, el PLA exhibe propiedades más cauchoides.

Aplicaciones: El PLA se utiliza en una amplia gama de aplicaciones, que incluyen:

- **Envases y embalajes:** El PLA se utiliza en la fabricación de envases desechables, como vasos, platos y cubiertos, debido a su biodegradabilidad y transparencia.
- **Impresión 3D:** El PLA es uno de los materiales más populares para la impresión 3D debido a su facilidad de uso, su amplia disponibilidad y su capacidad para producir piezas con buena resistencia y acabado superficial.

PETG (tereftalato de polietileno glicol modificado). A continuación se presenta un análisis técnico superficial de este material:

Estructura física: El PETG es un copolímero amorfo que se deriva del tereftalato de polietileno (PET) mediante la adición de un modificador de glicol. Su estructura química consiste en unidades repetitivas de tereftalato de polietileno combinadas con grupos glicol (-OCH₂CH₂O-).

Densidad: La densidad del PETG varía según el grado y las condiciones de procesamiento, pero generalmente se encuentra en el rango de 1.27 a 1.34 g/cm³. Es más denso que el PLA pero menos denso que el PET.

Propiedades: El PETG posee varias propiedades notables que lo hacen adecuado para diversas aplicaciones. Algunas de sus características clave:

- **Transparencia y brillo:** El PETG es transparente y tiene un brillo similar al vidrio. Esto lo hace popular en aplicaciones donde se requiere una buena claridad visual.
- **Resistencia mecánica:** El PETG exhibe una resistencia mecánica mejorada en comparación con el PET estándar. Tiene una mayor resistencia al impacto y a la tracción, lo que lo hace más duradero y resistente a la deformación.
- **Resistencia química:** El PETG es resistente a una amplia gama de sustancias químicas, incluidos ácidos y bases diluidas. Esto lo hace adecuado para aplicaciones que requieren resistencia química.

Aplicaciones: El PETG se utiliza en diversas aplicaciones, que incluyen:

- **Envases y embalajes:** Debido a su transparencia, resistencia y propiedades de barrera, el PETG se utiliza en botellas, recipientes de alimentos, envases para cosméticos, entre otros.
- **Impresión 3D:** El PETG es un material popular en la impresión 3D debido a su facilidad de impresión, durabilidad y resistencia a los impactos. También ofrece una mejor resistencia térmica en comparación con el PLA.

Rueda omnidireccionales, Es un tipo de rueda diseñada específicamente para permitir el movimiento en cualquier dirección sin necesidad de girar o cambiar la orientación del vehículo o robot en el que se utiliza. Estas ruedas son muy populares en aplicaciones como robots móviles, vehículos autónomos, plataformas industriales y sistemas de transporte automatizado.

La característica principal de una rueda omnidireccional es que tiene una disposición especial de rodillos o rodamientos en su perímetro, lo que le permite moverse en cualquier

dirección sin requerir un cambio en la dirección de rotación. Por lo general, estas ruedas cuentan con rodillos dispuestos en un ángulo de 45 grados respecto al eje de rotación central. Esto permite que la rueda pueda deslizarse lateralmente o moverse en diagonal cuando se aplican fuerzas en diferentes direcciones (Siegwart y cols., 2011).

En cuanto a los tamaños comerciales de las ruedas omnidireccionales, existen varias opciones disponibles en el mercado para adaptarse a diferentes aplicaciones y requisitos. Estos tamaños se suelen especificar en términos de diámetro y ancho de la rueda.

Los tamaños más comunes de las ruedas omnidireccionales varían desde aproximadamente 50 mm hasta 200 mm de diámetro. Las dimensiones más pequeñas suelen utilizarse en robots móviles de menor escala, como robots educativos o plataformas de exploración, mientras que las dimensiones más grandes se emplean en aplicaciones industriales y vehículos de mayor tamaño.

El ancho de las ruedas omnidireccionales también puede variar dependiendo de la aplicación. Algunas ruedas tienen un ancho similar al diámetro, mientras que otras pueden ser más estrechas o más anchas según las necesidades específicas de la plataforma o vehículo en el que se instalan.

Por otra parte, para verificar y validar la información obtenida se aplicaron conceptos de la cinemática y dinámica de robots cuadrúpedos, así como las normas y estándares relacionados con el diseño y fabricación de dispositivos mecánicos y electromecánicos.

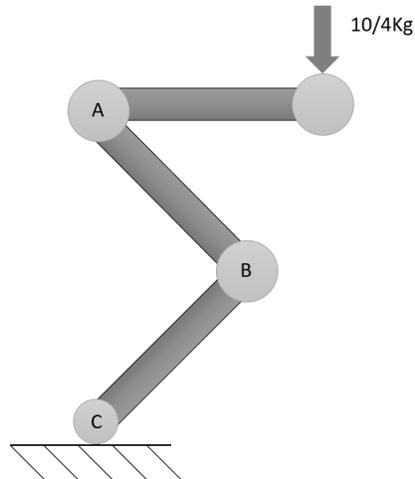
Calculo de momentos En las extremidades inferiores se calcularan los momentos generados en cada articulación para saber que fuerzas actúan en el sistema. sabiendo que

$$\sum M = 0 \tag{7}$$

Donde los punta A y B son las articulaciones que nos interesa tener saber el momento generado para dimensionar los actuadores, mientras tanto el punto C es el contacto con el suelo como se muestra en la siguiente Figura 13

Figura 13

Diagrama de extremidad inferior.



Sabiendo las distancias entre las articulaciones siendo de 230mm además de realizar las operaciones correspondientes para obtener las distancias necesaria para el calculo de momentos teniendo como resultado:

$$\sum M_A = 0 M_A = 5.64Nm \quad (8)$$

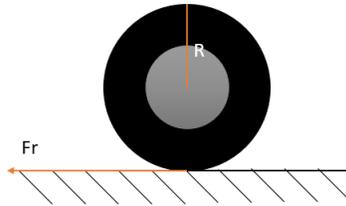
$$\sum M_B = 0 M_B = 2.67Nm \quad (9)$$

Como se observa en las ecuaciones 6 y 7 el torque máximo generado es de 5.64Nm dando como resultado un parámetro necesario para el dimensionamiento, para ello en el diagrama 14 se muestra como actuan las fuerzas.

Además otro calculo importante es el torque necesario para mover el robot en forma de tracción mediante rueda.

Figura 14

Diagrama de esfuerzos en rueda.



Sabiendo que el peso máximo con carga llega a los 10 Kg cada rueda llevara una cuarta parte teniendo en cuenta los diferentes diámetros de ruedas presentes en el mercado se calcularan con los diámetros de 60mm, 75 mm, 100mm y 127 mm entonces:

$$F_{max} = u \cdot N \quad (10)$$

Sabiendo que N es igual que $m \cdot g$ donde m representa la masa y g representa la gravedad además u es la representación del coeficiente de fricción que tiene un valor aproximado de 0.6 para este caso de análisis, por ende:

$$F_{max} = u \cdot m \cdot g \quad (11)$$

Remplazando datos los resultados los que se muestran en la siguiente tabla

Tabla 4

Tabla recopilatoria de Torque en diferentes tamaños de rueda.

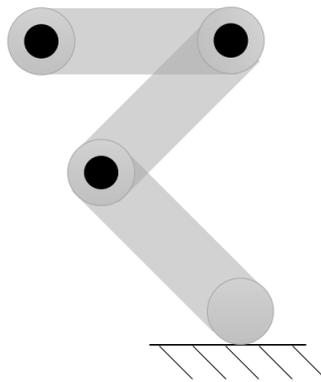
Diámetro	F_{max}
60mm	0.44
75mm	0.55
100mm	0.73
127mm	0.93

Para realizar los cálculos se reviso el libro de Norton (2016) donde se pueden observar los criterios tomados para la elaboración de estos modelos.

Ahora se calcula la cinemática directa de las diferentes partes del dispositivo empezando por la extremidad inferior como se muestra en la Figura 15.

Figura 15

Diagrama de eslabonamiento extremidad inferior.



Según este diagrama simplificado podemos aplicar el método de cinemática directa de Denavit Hartenberg siguiendo el algoritmo podemos saber que las condiciones iniciales son:

Tabla 5

Tabla de parámetros iniciales de extremidad inferior.

Descripción	Notación	Magnitud	Unidades
Longitud eslabón 1	a1	230	mm
Longitud eslabón 2	a2	230	mm
Longitud eslabón 3	a3	230	mm
Longitud eslabón	a4	230	mm
Ángulo de giro Junta 1	q1	180	°
Ángulo de giro Junta 2	q2	135	°
Ángulo de giro Junta 3	q3	270	°
Distancia entre ejes 1-2	d1	50	mm
Distancia entre ejes 2-3	d2	50	mm
Distancia entre ejes 3-4	d3	50	mm

Una vez identificado los parámetros iniciales se procede a construir las matrices de transformación homogénea de Denavit Hartenberg logrando como resultado la cinemática directa de esta extremidad como se denota en la siguiente matriz

$$\begin{bmatrix} \cos(q1 + q2 + q3) & -\sin(q1 + q2 + q3) & 0 & a2 \cdot \cos(q1 + q2) + a1 \cdot \cos(q1) + a3 \cdot \cos(q1 + q2 + q3) \\ \sin(q1 + q2 + q3) & \cos(q1 + q2 + q3) & 0 & a2 \cdot \sin(q1 + q2) + a1 \cdot \sin(q1) + a3 \cdot \sin(q1 + q2 + q3) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Si se usa la forma simplificada seria $\begin{pmatrix} a2 \cdot \cos(q1 + q2) + a1 \cdot \cos(q1) + a3 \cdot \cos(q1 + q2 + q3) \\ a2 \cdot \sin(q1 + q2) + a1 \cdot \sin(q1) + a3 \cdot \sin(q1 + q2 + q3) \\ d1 + d2 + d3 \end{pmatrix}$,

siendo la primera fila representa las coordenadas en X y por consiguiente la segunda fila coordenadas en Y, además la tercera fila es el desplazamiento en z siendo la separación entre eslabones.

Cabe recalcar que el método Denavit Hartenberg utilizado es una variación de Rodriguez (s.f.).

Ahora el cálculo de eslabonamiento de la extremidad superior seguimos el proceso anterior por ello nuevamente realizamos la tabla de parámetros iniciales con la guía del dibujo

simplificado 16.

Figura 16

Diagrama de eslabonamiento extremidad superior.

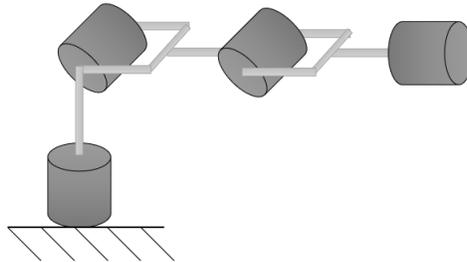


Tabla 6

Tabla de parámetros iniciales de extremidad inferior.

Descripción	Notación	Magnitud	Unidades
Longitud eslabón 1	a1	230	mm
Longitud eslabón 2	a2	230	mm
Longitud eslabón 3	a3	230	mm
Longitud eslabón 4	a4	230	mm
Ángulo de giro Junta 1	q1	90	°
Ángulo de giro Junta 2	q2	0	°
Ángulo de giro Junta 3	q3	0	°
Ángulo de giro Junta 4	q4	235	°
Distancia entre ejes 1-2	d1	50	mm
Distancia entre ejes 2-3	d2	50	mm
Distancia entre ejes 3-4	d3	50	mm

Una vez identificado los parámetros iniciales se procede a construir las matrices de transformación homogénea de Denavit Hartenberg logrando como resultado la cinemática directa de esta extremidad como se denota en el siguiente código generado en matlab 17.

Figura 17

Código de matlab para eslabonamiento en Extremidad superior.

```
syms a2 a3 q1 q2 q3 q4 q5 d1 d2 d3 d4 A1 A4
%MTH_DH(Theta,d,a,alfa)
A01=MTH_DH_GA(q1,d1,0,A1)
A12=MTH_DH_GA(q2,d2,a2,0)
A23=MTH_DH_GA(q3,d3,a3,0)
A34=MTH_DH_GA(q5,d4,0,A4)

T04=A01*A12*A23*A34
simplify(T04)
```

Dado que el resultado es demasiado inmenso no se lo puede ilustrar correctamente para ello en el Anexo C donde se enseña el código generado en matlab para ayudar a comprender los cálculos.

Procederemos con el cálculo de eslabonamiento de la parte flexible del actuador antes de esto se mencionara el efecto Finray.

El efecto Fin-Ray, también conocido como efecto Finno-Rayleigh, ocurre cuando un objeto sumergido en un fluido, como un pez o una aleta, presenta una serie de protuberancias alargadas y flexibles, conocidas como aletas o aletillas, dispuestas de manera regular a lo largo de su superficie. Este efecto ha sido estudiado extensamente en el campo de la biomimética y se ha demostrado que tiene sentido para el diseño mecánico de una variedad de estructuras y dispositivos (Stewart y cols., 2020).

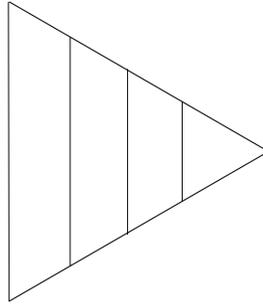
La estructura Fin-Ray es una configuración geométrica presente en aletas flexibles inspiradas en el efecto Fin-Ray. Consiste en una serie de eslabones alargados y flexibles que se extienden desde una base común, similar a las aletas de los peces. En su diseño, se deben considerar la longitud, forma y rigidez de los eslabones, así como una distribución adecuada a lo largo del eje central para optimizar la eficiencia y estabilidad del sistema. Además, el material utilizado debe ser lo suficientemente flexible para permitir la deformación en respuesta a la fuerza aplicada hacia un objeto (Ali, Zhanabayev, Khamzhin, y Mussin, 2019).

En la Figura 18 se muestra la forma general de la estructura para una garra flexible basa

el efecto antes mencionado.

Figura 18

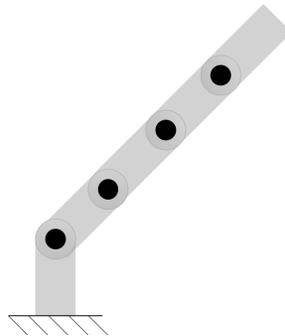
Diagrama de eslabonamiento manipulador.



Mientras que la la Figura 82 se muestra el eslabonamiento de la estructura antes mencionada con esto se llevara acabo la siguiente calculo de eslabonamiento.

Figura 19

Diagrama de eslabonamiento extremidad superior.



Iniciando el procedimiento con los parámetros del sistema

Tabla 7

Tabla de parámetros iniciales de Manipulador.

Descripción	Notación	Magnitud	Unidades
Longitud eslabón 1	a1	10	mm
Longitud eslabón 2	a2	10	mm
Longitud eslabón 3	a3	10	mm
Longitud eslabón	a4	10	mm
Ángulo de giro Junta 1	q1	0	°
Ángulo de giro Junta 2	q2	0	°
Ángulo de giro Junta 3	q3	0	°
Ángulo de giro Junta 4	q4	0	°
Distancia entre ejes 1-2	d1	0	mm
Distancia entre ejes 2-3	d2	0	mm
Distancia entre ejes 3-4	d3	0	mm

Aplicando el algoritmo de D-H obtenemos la siguiente matriz.

$$\begin{bmatrix} \cos(q2 + q3 + q4 + q5) & -\sin(q2 + q3 + q4 + q5) & 0 & a4 \cdot \cos(q2 + q3 + q4 + q5) + a2 \cdot \cos(q2 + q3) + a1 \cdot \cos(q2) + a3 \cdot \cos(q2 + q3 + q4) \\ \sin(q2 + q3 + q4 + q5) \cdot \cos(q1) & \cos(q2 + q3 + q4 + q5) \cdot \cos(q1) & -\sin(q1) & \cos(q1) \cdot (a4 \cdot \sin(q2 + q3 + q4 + q5) + a2 \cdot \sin(q2 + q3) + a1 \cdot \sin(q2) + a3 \cdot \sin(q2 + q3 + q4)) \\ \sin(q2 + q3 + q4 + q5) \cdot \sin(q1) & \cos(q2 + q3 + q4 + q5) \cdot \sin(q1) & \cos(q1) & \sin(q1) \cdot (a4 \cdot \sin(q2 + q3 + q4 + q5) + a2 \cdot \sin(q2 + q3) + a1 \cdot \sin(q2) + a3 \cdot \sin(q2 + q3 + q4)) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Cálculo de motores

Una vez obtenido los datos de Fuerza necesario se hizo una revisión de lo motores existentes en el mercado y basándose en el proyecto solo 8 se opto por elegir un motor de la misma familia de productos siendo la serie de Antigravity de la marca T-MOTOR modelo MN008 KV400.

Los motivos que llevaron a la selección de motor fueron principalmente su peso, voltaje de funcionamiento y torque generado especificados en su datasheet.

Otro de lo motivos por seleccionar un motor de este tipo fue la disponibilidad del mercado ya que moto reductores que lleguen a ofrecer mayor cantidad de torque son varias veces mas costosos además de su peso el cual afectaría el comportamiento del sistema comparado a este modelo tiene menor precio lo cual facilitaría su construcción.

Teniendo así en cuenta que el torque máximo generado es de 0.78Nm con un consumo de 24v a 32.83A además de 6860rpm, como se sabe el torque máximo presente en la articulación es de 5.64Nm así requiriendo el motor un sistema de transición que aumente el torque.

Prosiguiendo con el cálculo de transmisión lo mas factible seria transmisión mediante poleas

siguiendo la normativa DIN 7721 T5 para ello vamos a utilizar la siguientes relaciones.
Relación de transmisión:

$$T = W_2/W_1 = Z_1/Z_2 \quad (12)$$

Diámetros y números de Dientes:

$$D_2/D_1 = Z_2/Z_1 \quad (13)$$

Diámetro y Numero de revoluciones:

$$D_1 \cdot W_1 = D_2 \cdot W_2 \quad (14)$$

Diámetro y Numero de dientes:

$$D_1/D_2 = Z_1/Z_2 \quad (15)$$

Diámetro y Velocidad de rotación:

$$D_1 \cdot W_1 = D_2 \cdot W_2 \quad (16)$$

Números de dientes y velocidad de rotación:

$$Z_1 \cdot W_1 = Z_2 \cdot W_2 \quad (17)$$

Torque y radio:

$$t_1/t_2 = r_2/r_1 \quad (18)$$

Con la ayuda del CAE y saber las limitaciones de construcción por medio de la Impresión 3D y generar varios modelo que sean factibles implementar se llevo a la conclusión que la transmisión debe tener una relación de la polea motor a la conducida de 3.33 y de la polea conducida a la polea de articulación de 5 dando como resultado compacto de transmisión.

Disponibilidad energética

A la hora de dimensionar las baterías para robots móviles, hay que tener en cuenta varios factores. He aquí algunos puntos importantes:

- **Requisitos de potencia del robot:** La capacidad de la batería debe ser suficiente para alimentar los motores, sensores y otros componentes del robot durante el tiempo de funcionamiento necesario.
- **Limitaciones de peso y tamaño:** La batería debe ser lo suficientemente compacta y ligera para adaptarse a las limitaciones de diseño del robot.
- **Química de la batería:** Las distintas químicas de las baterías tienen densidades de energía, velocidades de descarga y duraciones diferentes. La elección de la composición química de la batería debe basarse en los requisitos específicos del robot.
- **Rango de temperaturas:** La batería debe poder funcionar dentro del rango de temperaturas del entorno del robot. Las temperaturas extremas pueden afectar al rendimiento y la vida útil de la batería.
- **Tiempo de carga:** La batería debe poder cargarse en un tiempo razonable para minimizar el tiempo de inactividad del robot.
- **Sistema de gestión de la batería:** Un sistema de gestión de la batería puede mejorar su eficiencia y aumentar su vida útil supervisando y controlando los procesos de carga y descarga de la batería.

Teniendo en cuenta estos factores, los diseñadores pueden seleccionar una batería que cumpla los requisitos de potencia del robot y que, al mismo tiempo, sea práctica y eficiente. Así que, contando que el modelo tendrá 21 motores brushless con un consumo máximo de 17A a 24v y el tiempo de funcionamiento deseado es de un cuarto de hora.

Lo ideal sera baterías multi-celdas de Lipo pero en el mercado estas baterias no existen por ende el valor comercial de la batería mas cercana al voltaje deseado es de 22.2V hasta 10000 mAh en 6s (seis celdas) por ende para dimensionar correctamente la esta batería se debería tener en cuenta el consumo medio de las diferentes secuencia de accionamiento tanto la carga máxima como prueba en vacío.

Como dictan las leyes de kirchhoff específicamente, la de corriente:

$$\sum_{K=1}^n \vec{I}_k = 0 \quad (19)$$

Podemos dar un valor de consume según el datasheet aproximado de 5A por motor en la secuencia de tracción cuadrúpedo siendo 12 motores en total dando un resultado de 60A.

Mientras que en la tracción mediante ruedas actuarían los 12 motores para mantener una posición fija. Para permitir este tipo de tracción además se le añade 4 motores los cuales el consumo aproximado puede llegar a ser 5A ya que el accionamiento es inicial por el mismo modelo de motor dando un resultado de 80A.

Mientras que en el accionamiento de la extremidad superior y su manipulador son 4 motores con su consumo medido de 5A donde resultado de 20A.

Entonces como se denota anteriormente el consumo para cada secuencia también podría variar dependiendo de la carga sujeta a estos por ende el consumo energético aumentaría como no se tiene datos del comportamiento de estos motores con respecto a una carga no se puede dar un valor con respecto a este estado por ello solo se tomara en cuenta el funcionamiento en vacío donde el resultado total de consumo de 100A en consumo medio.

Ahora el tiempo deseado de funcionamiento es de un cuarto de hora por ello se multiplica el consumo medio por el tiempo deseado dando una potencia de 25Wh.

Tomando el valor de referencia de la batería antes mencionada su potencia es de 2.222Wh requiriendo así una cantidad de 10 batería si se agrega el peso de cada batería que es aproximadamente 1kg el peso total sería de 10kg siendo inviable el uso de dicha batería.

Entre los datos concretos y características especiales de los procesos, se incluyen las restricciones utilizadas en las simulaciones, como la carga máxima soportada, la velocidad de desplazamiento. También se consideraron factores como la resistencia a la corrosión y la durabilidad de los materiales utilizados en el diseño.

Controlador de velocidad Electrónico

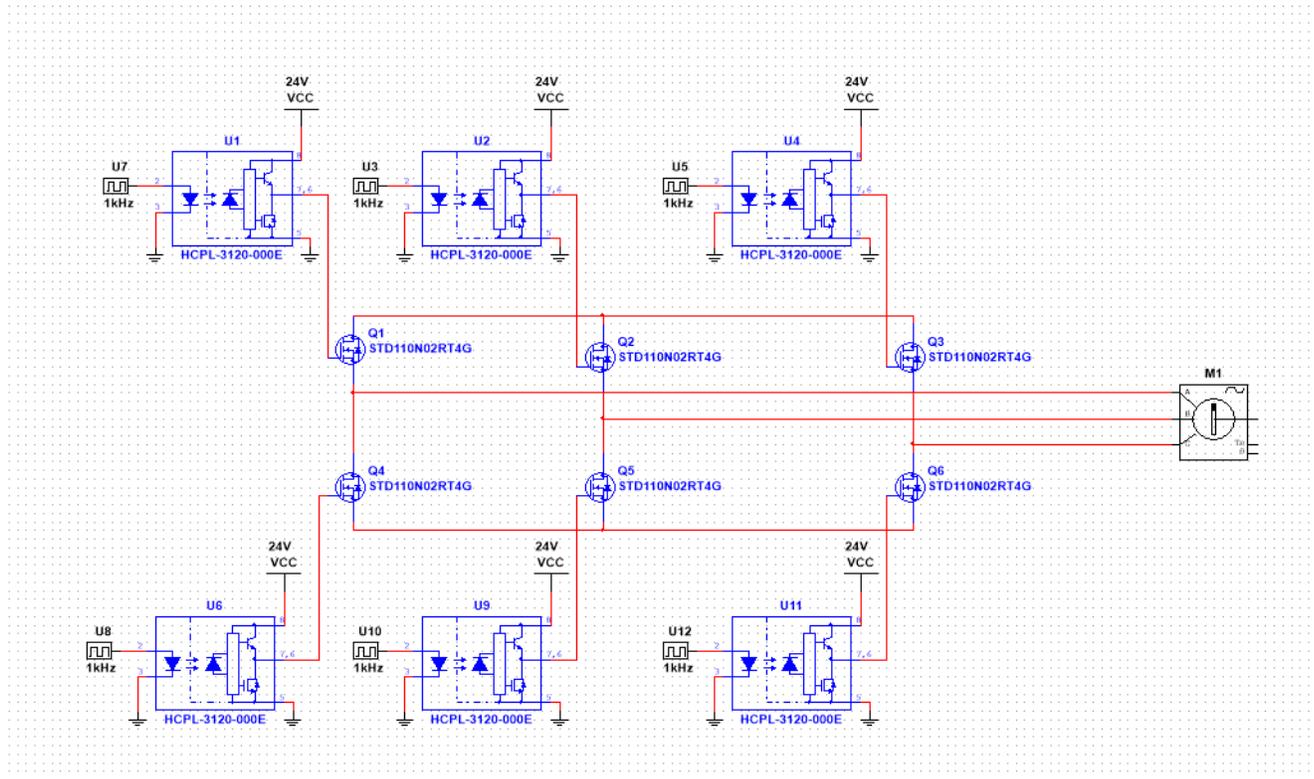
Un controlador electrónico de velocidad (ESC, por sus siglas en inglés) de un motor de corriente continua sin escobillas (BLDC) es un dispositivo utilizado para controlar la velocidad y dirección de un motor BLDC. El ESC actúa como un intermediario entre el motor BLDC y el sistema de control, como un microcontrolador.

El ESC utiliza técnicas de modulación de ancho de pulso (PWM) para controlar la velocidad del motor BLDC. Al variar el ciclo de trabajo de la señal PWM, se ajusta la cantidad de energía entregada al motor, lo que a su vez regula la velocidad de rotación.

siguiendo como base para el diseño del ESC Mehmood, Abid, Khan, Khan, y Mustafa (2021) se puede proponer este ESC para el sistema electromecánico el cual se baso en los parámetros especulados anteriormente tanto de voltaje como amperaje.

Figura 20

Propuesta de esquemático de ESC (Controlador de velocidad Electrónico).



Nota: Esquemático de propuesto para ESC .

los elementos que conforma este ESC son:

- Power MOSFET 24V 110A 4.6 mOhm Single N-Channel DPAK STD110N02RT4G.
- 2.5 Amp Output Current IGBT Gate Drive Optocoupler HCPL-3120-000E

Todos los elementos seleccionados fueron directamente tomados de la biblioteca del programa NI MULTISIM con el mismo que se realizo el esquemático.

Otro de los elementos implicados en el modelo electromecánico es un sensor tipo encoder con rueda codificada AEDM-5810-Z12 encoder kit utilizado en el proyecto solo 8.

6.4. Simulación del diseño mecánico y electromecánico para un dispositivo de movilidad para un robot cuadrúpedo

El objetivo de este estudio fue simular el diseño mecánico y electromecánico de un dispositivo de movilidad para un robot cuadrúpedo. El método utilizado para recopilar y analizar la información consistió en los siguientes pasos:

- Identificación de los requisitos del dispositivo de movilidad: se definió el objetivo de la simulación y se establecieron los requisitos del dispositivo de movilidad para el robot cuadrúpedo.
- Diseño mecánico: se diseñó el mecanismo de movimiento del dispositivo de movilidad, se seleccionaron los materiales y se determinaron las dimensiones del dispositivo.
- Diseño electromecánico: se diseñó el sistema eléctrico y electrónico necesario para controlar el movimiento del dispositivo.
- Simulación: se utilizó un software de simulación para verificar el diseño mecánico y electromecánico del dispositivo de movilidad.
- Análisis de resultados: se analizaron los resultados de la simulación y se realizaron ajustes en el diseño en caso de ser necesario.

Los instrumentos, equipos y materiales utilizados en este estudio incluyeron software de diseño mecánico y electromecánico, herramientas de modelado 3D, materiales para construir el dispositivo de movilidad, sensores y actuadores.

En cuanto a los datos concretos y características especiales del proceso, se establecieron restricciones en la simulación para asegurar que el dispositivo de movilidad fuera compatible con el resto del robot cuadrúpedo y se tomaron en cuenta consideraciones de seguridad y eficiencia en el diseño del dispositivo.

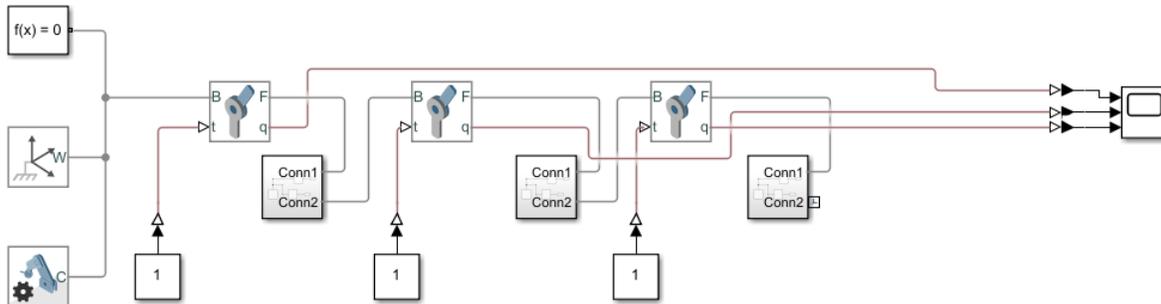
Trayectorias Generadas por las Geometrías.

En la generación de trayectorias se va a comprobar el área de trabajo de cada articulación ya que en este momento no se va abarcar el tema del control de cada una de las articulaciones por ende con las matrices obtenidas se puede denotar si cumple el área de trabajo generada.

Primeramente se simula el comportamiento de la extremidad inferior con 1Nm en cada junta de revolución como se lo demuestra en la Figura 21.

Figura 21

Esquema de simulación extremidad inferior.

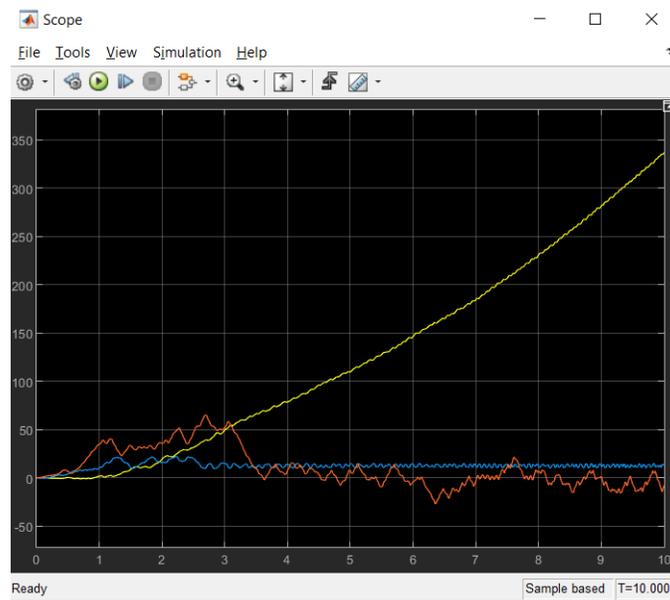


Nota: Esquema de simulación extremidad inferior realizada en Simulink.

Las trayectorias generadas bajo estas condiciones se indican en el la Figura 22.

Figura 22

Gráfica de trayectoria generada sin control.



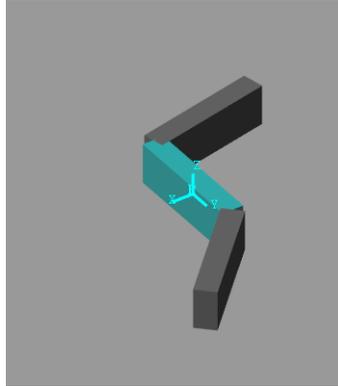
Nota: Gráfica de trayectoria generada sin control.

Como se puede observar la trayectoria generada esta en la función de la junta por ello en ausencia de control el accionamiento de estas independientemente crea esta curva cuanto menos curiosa.

En la Figura 23 se muestra cual es la forma de los sólidos que se tomaron como base para la simulación.

Figura 23

Solidos generados en Simulink.

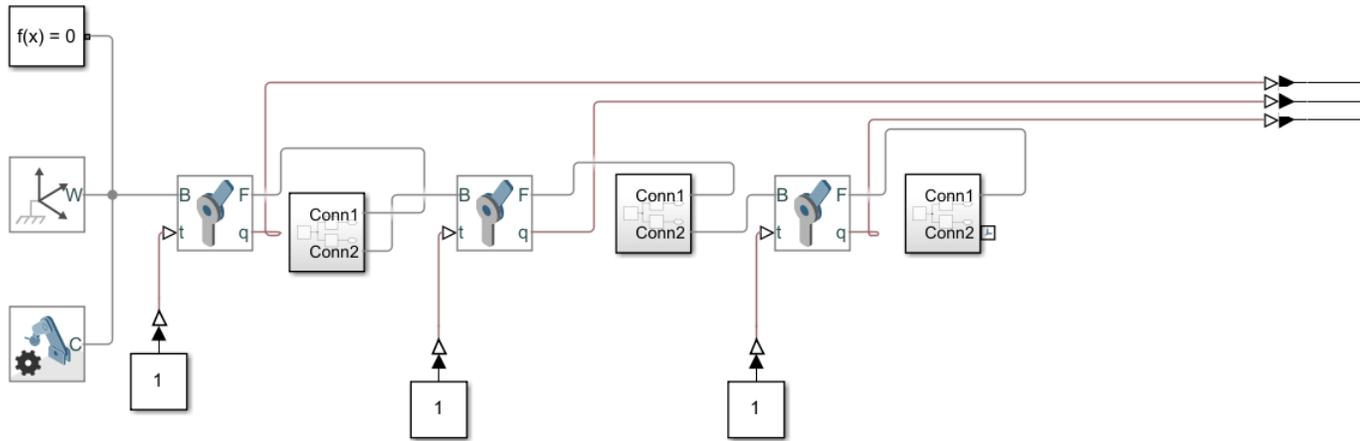


Nota: Solidos generados en Simulink con medidas reales.

Mientras que para la extremidad superior varia un poco la forma de esta contando con un junta de revolución a 90 grados con respecto a eje Z des segundo eslabón como se puede ver en el diagrama de conexión en la figura 24.

Figura 24

Esquema de simulación extremidad inferior.

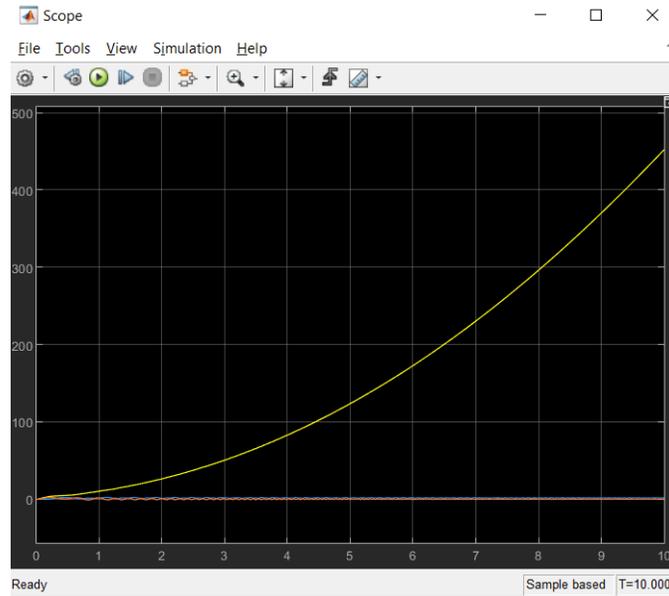


Nota: Esquema de simulación extremidad superior realizada en Simulink.

En estas condiciones las curvas generadas son 25.

Figura 25

Gráfica de trayectoria generada sin control.

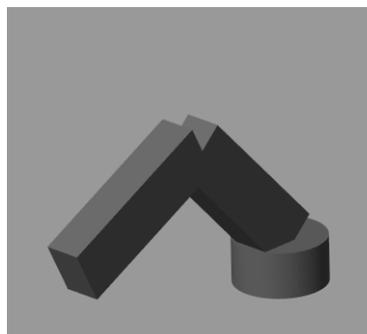


Nota: Gráfica de trayectoria generada sin control.

Finamente la forma con la que los solidos se tomaron en cuenta para esta simulación.

Figura 26

Solidos generados en simulink.



Nota: Solidos generados en simulink con medidas reales.

Como resultado se puede observar que los rango de trabajo se cumplen burdamente si algún tipo de control para ello en una siguiente fase se deberá analizar detenidamente como se debe controlar estos mecanismos.

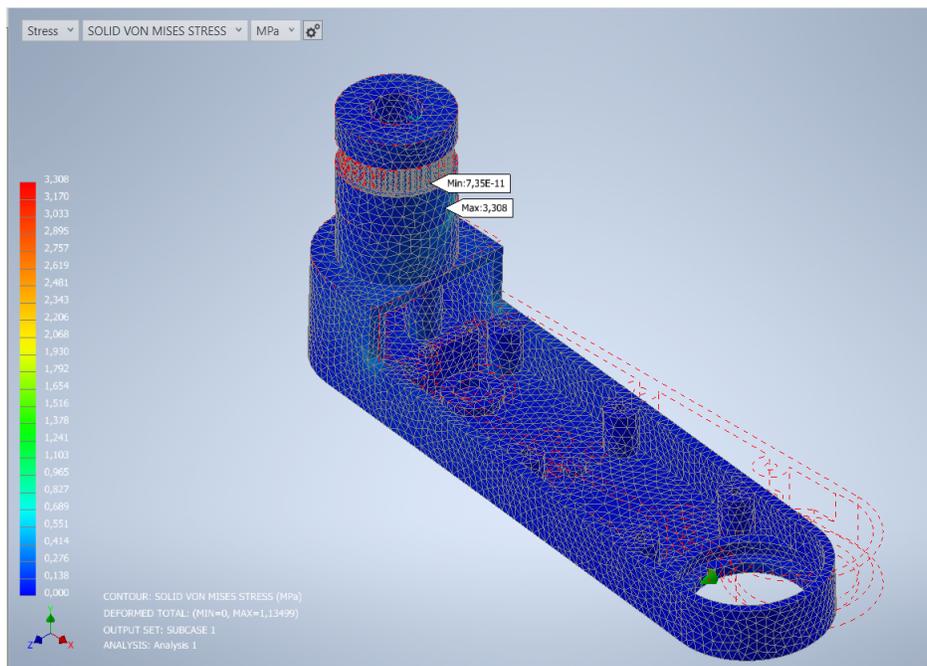
Simulación de esfuerzos.

Para la simulaciones realizadas se uso un mallado de 4mm para los elementos finito la cual es la mínima medida que se pudo realizar debido a las capacidades de computo que se obtuvo acceso recordando que estas simulaciones fueron realizadas en el software de Autodesk Inventor 2024 Nastran.

En esta primera simulación como se muestra en la 27 donde se una carga de 6Nm dando como resultado una índice de deformación aproximado de 3MPa siendo aceptable para que esta estructura asegure el funcionamiento de este dispositivo.

Figura 27

Simulación de esfuerzos regular.

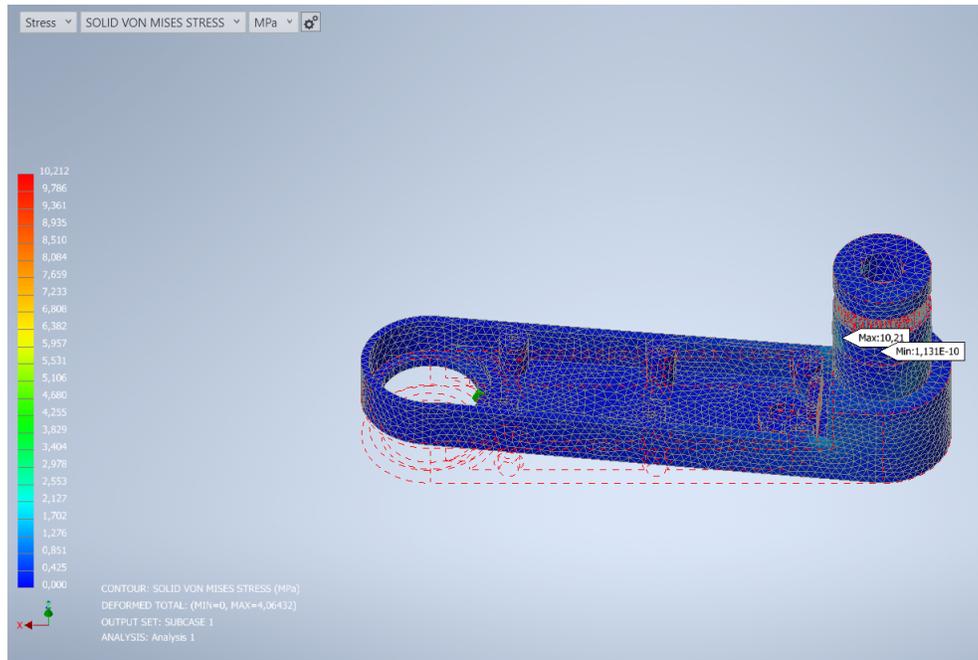


Nota: Simulación de esfuerzos con un carga regular.

En esta segunda se aplico una carga máxima admisible el cual es un aproximado de 25Nm

Figura 28

Simulación de esfuerzos de sobre carga.



Nota: Simulación de esfuerzos con un carga mayor a la permitida.

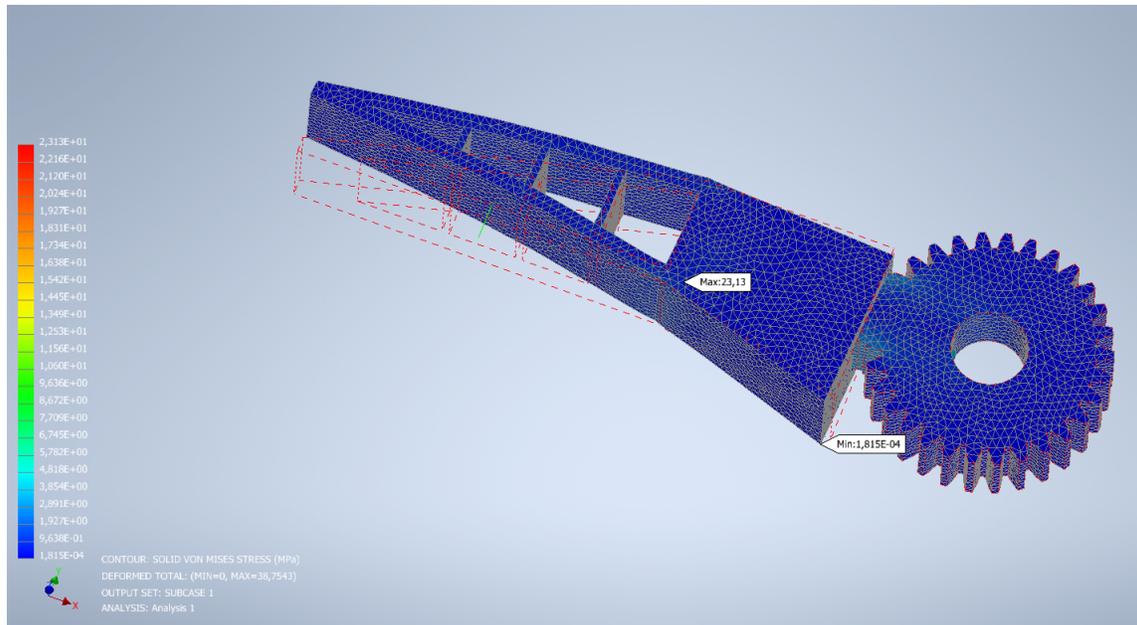
Para la simulación en manipulador la malla seleccionada fue de 1mm para cada elemento finito ya que el poder de computo lo permitió.

En esta primera simulación se tuvo que modificar un material flexible existente Cloruro de polivinilo - Flexible y sustituir los valores para que sean igual a TPU porque este material fue el seleccionado.

Como se observa en la Figura 29 el índice de deformación es de dos aproximadamente lo cual es admisible ya que el criterio elegido permite esta deformación para que el manipulador pueda deformarse para tomar ciertas formas las cuales se conveniente para sujetar o manipular el entorno.

Figura 29

Simulación de esfuerzos en manipulador.



Nota: Simulación de esfuerzos con un carga mayor a la permitida.

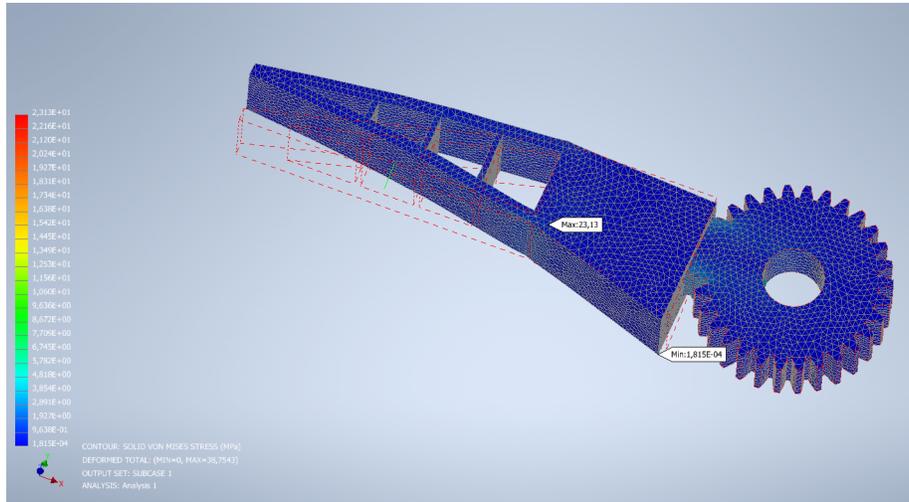
Para la simulación en el manipulador la malla seleccionada fue de 1mm para cada elemento finito ya que el poder de computo lo permitió.

En esta segunda simulación se uso el materia mencionado anteriormente.

Como se observa en la Figura 30 el índice de deformación es dos por diez a la uno lo cual es admisible ya que el criterio elegido permite esta deformación para que el manipulador pueda deformarse para tomar ciertas formas las cuales se conveniente para sujetar o manipular el entorno recordando que es el esfuerzo máximo permitido donde se asegura el correcto funcionamiento.

Figura 30

Simulación de esfuerzos en manipulador carga máxima.



Nota: Simulación de esfuerzos con un carga máxima permitida.

7. Resultados

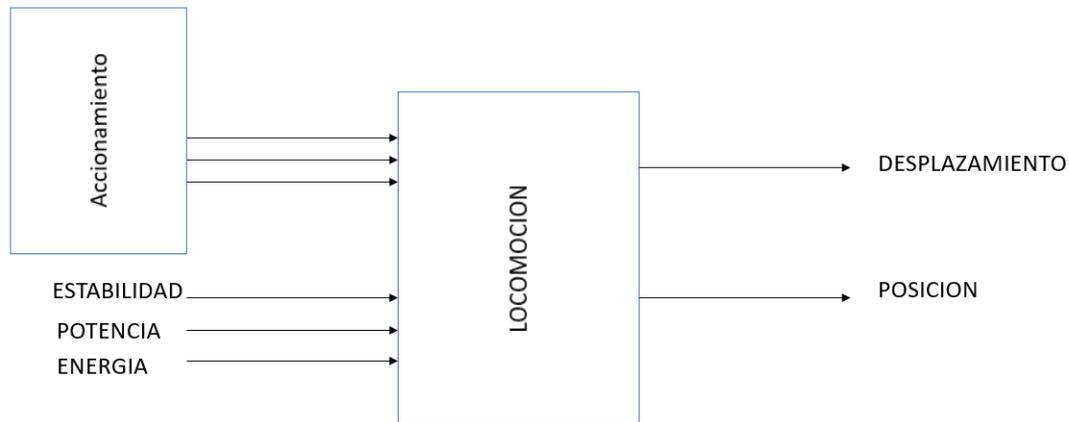
7.1. Parámetros establecidos para el diseño mecánico y de sistema electro-mecánico para un robot cuadrúpedo

El resultado principal de los parámetros establecidos surgieron subsistemas específicos que permiten comprender de mejor manera la interacción entre la diseños planteados con la finalidad del dispositivo.

En primera instancia el sistema general que se llamar a locomoción en el cual se tiene diferentes entradas como se indican el la Figura 31.

Figura 31

Sistema Principal.



Nota: Sistema principal del dispositivo de movilidad para un robot cuadrúpedo.

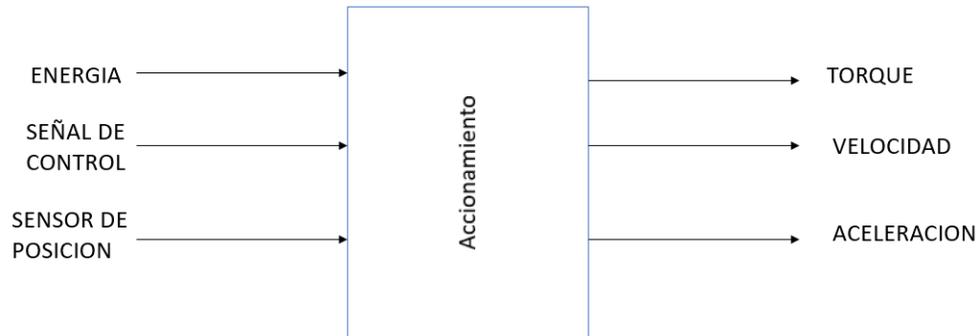
Como primeras entradas al sistema se tiene el accionamiento del dispositivo el cual es un subsistema con sus propias entradas y salidas, otras de las entradas es la Estabilidad que se refiere a la capacidad de mantener su centro de gravedad estable lo cual es esencial para mantener el equilibrio y evitar oscilación indeseadas.

Además en cuestión de disponibilidad energética destaca dos factores principales Potencia y Energía las cuales se refiere como potencia a la cantidad de voltaje y amperaje requerido para el accionamiento recayendo esta en las dimensiones de las fuente de energía necesaria. Mientras que a energía se refiere a las fuerzas necesaria para generar trabajo de manera mecánica, cabe recalcar que este sistema no esta libre de incertidumbres y perturbaciones.

El primer subsistema que se aborda es el accionamiento mostrado en la Figura 32 que se lo define como el motor dimensionado previamente que permite la movilidad de cada articulación de revolución que cuando son combinados genera trayectorias definidas dando así el desplazamiento.

Figura 32

Subsistema accionamiento.

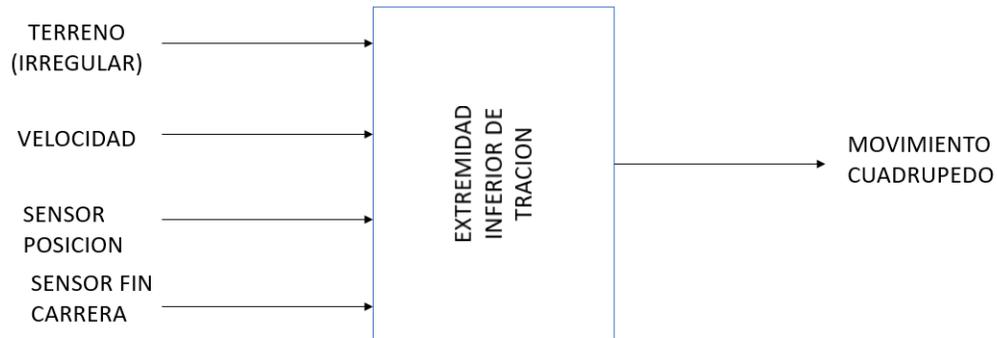


Nota: Subsistema accionamiento del dispositivo de movilidad para un robot cuadrúpedo.

Para el segundo de subsistemas se menciona una parte importante de la locomoción siendo esta mediante tracción de un extremidad inferior don la variable mas importante es el tipo de siendo aplicable para terreno irregular, otra de las entradas es la velocidad en la que se mueve el accionamiento dando así es desplazamiento. además de contra con un sensor de posición para poder saber la ubicación en el tiempo con el cual se puede brindar algún tipo de control, además se presentar un fin carrera el cual da la información si la extremidad este o no apoyada en el suelo.

Figura 33

Subsistema tracción.

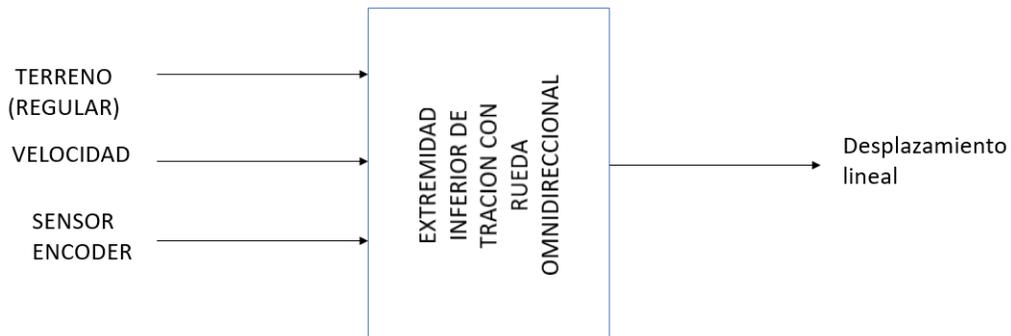


Nota: Subsistema tracción del dispositivo de movilidad para un robot cuadrúpedo.

Para este tercer subsistemas se tiene las entradas similares a antes mencionadas para la subsistemas 2 por ello comparte la entrada de terreno el cual es aplicable solamente en regular ya que la diferencia radica en la tracción que en esta situación de mediante rueda sueca, además comparte las señales de velocidad y sensor de posición.

Figura 34

Subsistema tracción mediante rueda sueca.

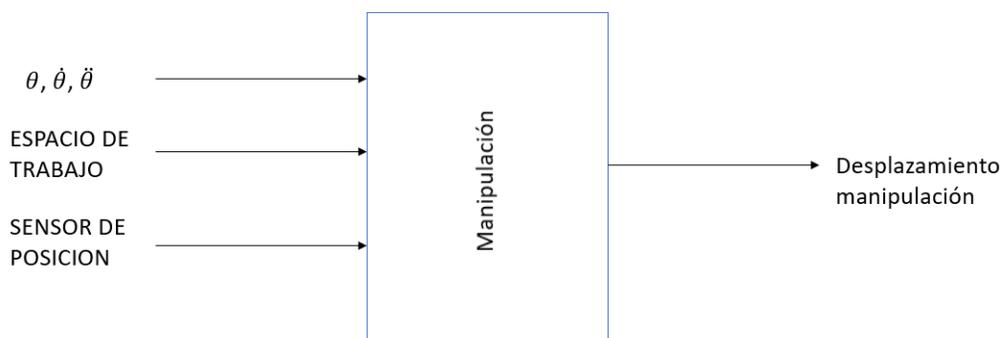


Nota: Subsistema tracción mediante rueda sueca del dispositivo de movilidad para un robot cuadrúpedo.

Finamente en la manipulación se obtiene la primera entrada que son posición velocidad y aceleración además aparece el ambiente de trabajo el cual es necesario para poder llevar acabo ciertas acciones, también se tiene la señal de posición que no es la misma que la antes mencionada ya que esta hace referencia al accionamiento.

Figura 35

Subsistema Manipulación.



Nota: Subsistema Manipulación del dispositivo de movilidad para un robot cuadrúpedo.

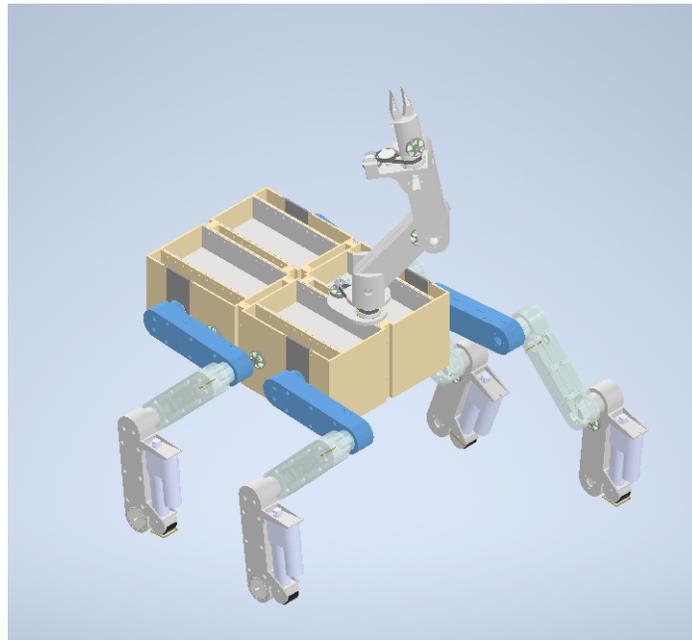
7.2. Diseño mecánico y electromecánico para un robot cuadrúpedo

Como principal resultado generado es el diseño mecánico del dispositivo de movilidad para un robot cuadrúpedo el consta de diferentes subconjuntos ya que uno de los criterios era la mantenibilidad además de asegurar su modularidad.

Como se presenta en la Figura 36 es el diseño para el primer prototipo para su manufactura mediante la impresión 3D.

Figura 36

Robot Cuadrúpedo.

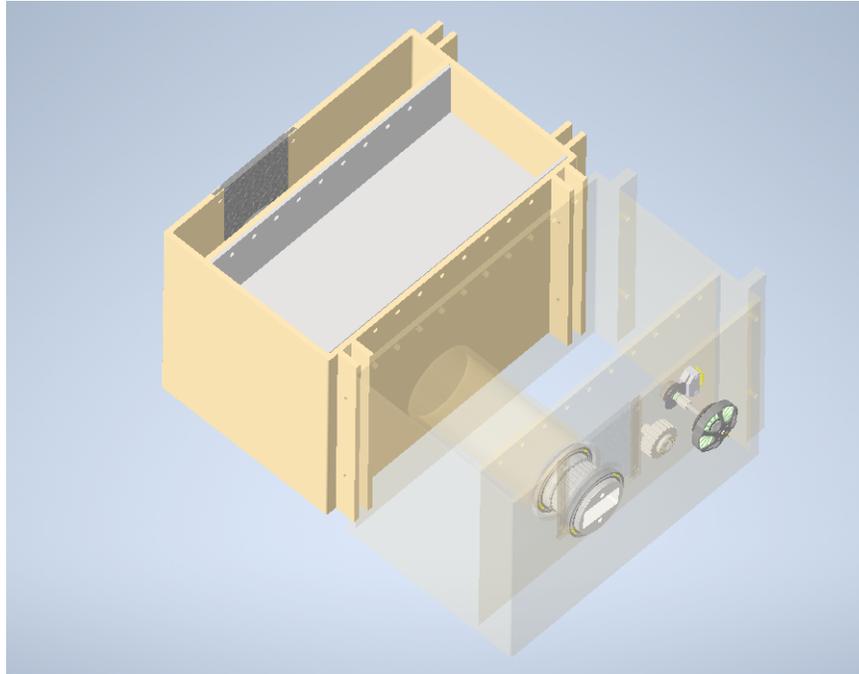


Nota: Ensamble principal del Robot Cuadrúpedo

En la Figura 37 se muestra los módulos de cuerpo principal tanto su parte derecha como izquierda donde también podemos encontrar una bandeja donde de podría instalar en un futuro sus respectivos controladores.

Figura 37

Módulos de cuerpo principal.

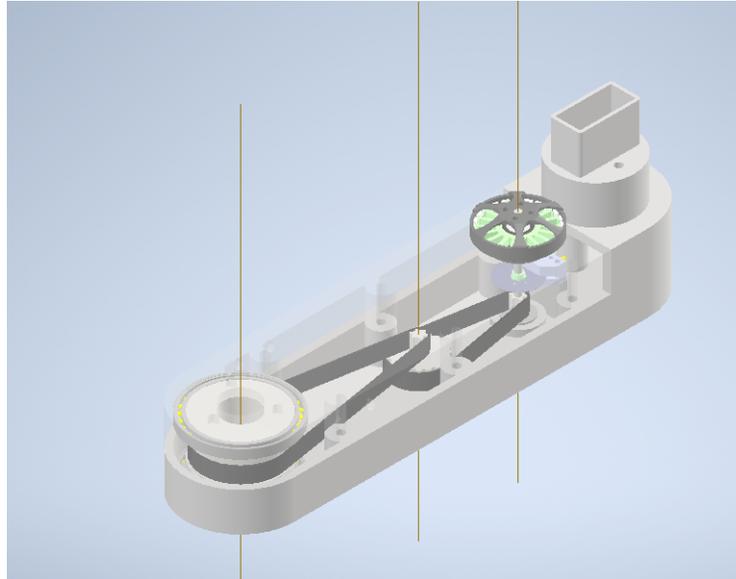


Nota: Módulos de cuerpo principal.

El núcleo de transmisión es el módulo más importante ya que este conjunto es el que más veces se repite a lo largo del dispositivo siendo el alma de la locomoción lo podemos observar en la Figura 38.

Figura 38

Núcleo de Transición

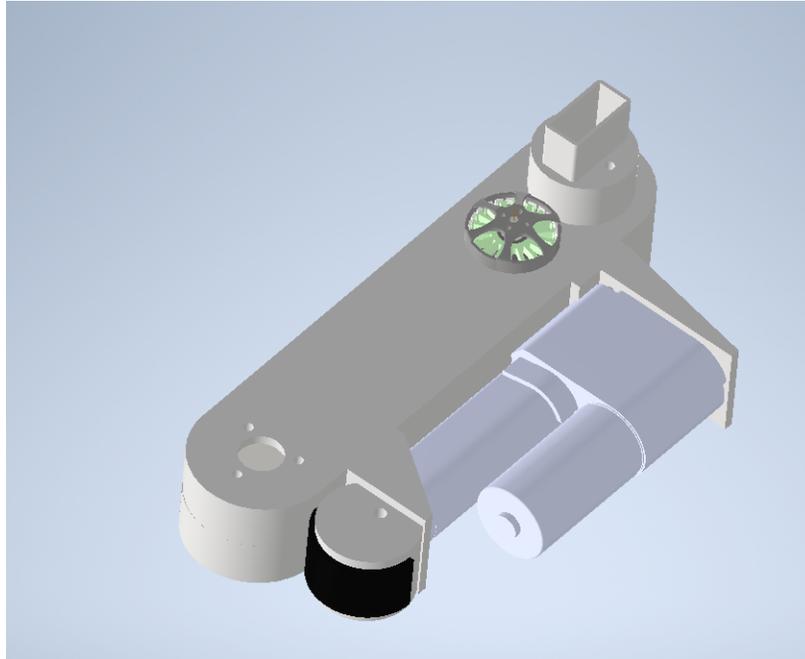


Nota: Núcleo de Transición corazón para la locomoción que puede generar.

La extremidad inferior con sus dos modos de tracción que se a explicado anteriormente se puede observar en la Figura 39 donde esta es la que junto a núcleo de transmisión llevan acabo la locomoción.

Figura 39

Extremidad inferior.

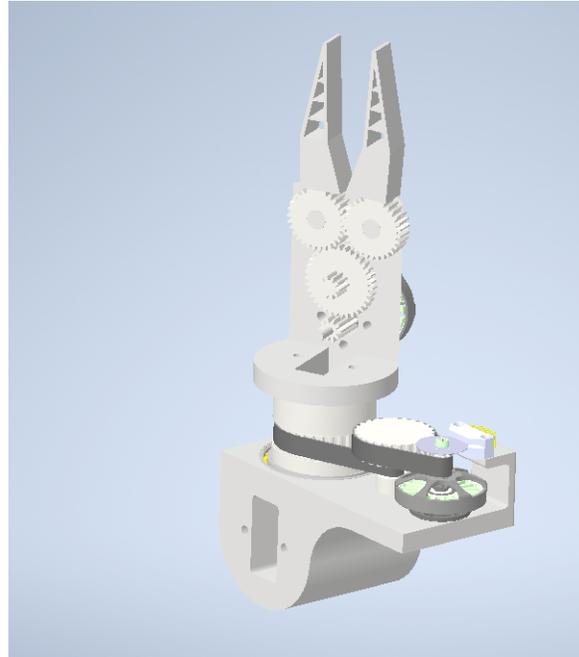


Nota: Extremidad inferior con sus dos modalidades tracción simple o mediante rueda sueca.

Con el sistema de manipulación se pretende poder manejar diferentes objetos como son las manijas de las puertas u otro objetos.

Figura 40

Sistema de Manipulación.

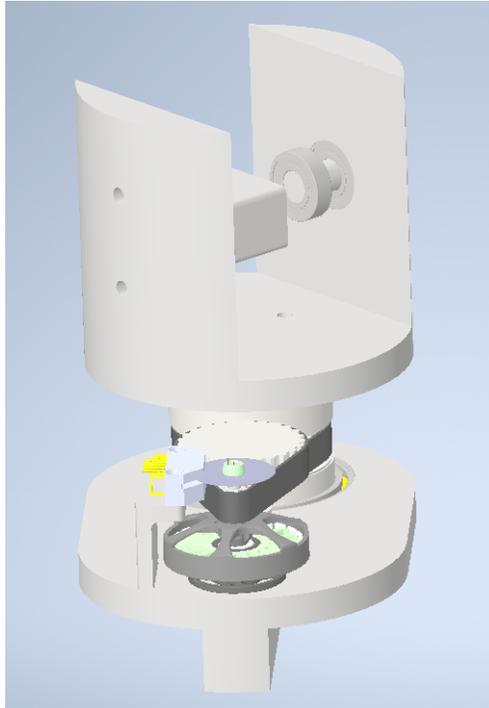


Nota: Sistema de Manipulación son su pinza flexible y su parte rígida.

Finalmente el ultimo diseño se trata de la base de la extremidad superior la cual permite sostener y conectar con el cuerpo principal la cual puede ser acoplado en diferentes posiciones dependiendo la necesidad.

Figura 41

Base para la extremidad Superior.



Nota: Base para la extremidad Superior.

7.3. Resultados de la simulación del diseño mecánico y de sistema electro-mecánico para un robot cuadrúpedo

Como parte de la validación del diseño mecánico se puede considerar satisfactoria la selección del material PET G, encontrado en la librería de Autodesk Inventor 2024. Al exponer, en una simulación, al cuadrúpedo a los esfuerzos mecánicos propios de su funcionamiento se determinó que la deformación máxima alcanzada esta dentro de los rangos aceptables.

Sin embargo, al considerar un proceso de manufactura de deposición de filamento realizado por una impresora 3D se pueden esperar alteraciones en los resultados debido a la variabilidad de densidad del material.

Aunque con la simulación de trayectorias solo se pudo comprobar las área de trabajo en un pequeño aporte para una siguiente fase donde se deberá prestar atención al control de estos

mecanismos además de delimitar según las restricciones mecánicas presentes en este diseño.

8. Conclusiones

Gracias a una revisión exhaustiva de la literatura acerca del tema planteado y consultas a expertos en el tema, se ha conseguido definir parámetros iniciales para el diseño de robot cuadrúpedo para realizar actividades de desplazamiento entre los espacios de la Universidad Politécnica Salesiana; siendo estos parámetros las dimensiones de las puertas de las oficinas; Así como en el desarrollo se fue obteniendo parámetros más específicos enfocados a la mantenibilidad, modularidad, estabilidad, recursos energéticos, robustez mecánica.

Por otra parte, es importante indicar que los parámetros específicos mayormente son cualitativos donde se tuvo en cuenta diferentes tipos de criterios mencionado a lo largo del desarrollo siendo punto de convergencia la manufactura aditiva de materiales termoplásticos que por su naturaleza brindan una gran flexibilidad a la hora de su construcción e implementación.

La propuesta de diseño ha dado resultados satisfactorios al definir un diseño electromecánico para un robot cuadrúpedo con consideraciones en eficiencia y estabilidad. Esto se ha logrado gracias al desarrollo riguroso y utilización de la metodología científica, donde se especifica principalmente los torques generados por los actuadores resultado así en el tipo de motor brushless de modelo Antigravity MN5006 KV450 y como actuador lineal resulto en el modelo de LINEAR ACTUATOR LIGHT DUTY SERIES de la marca Pololu en su versión de 2 pulgadas 24v. En caso de los sensores como fin carrera se opto por un pulsante de 12mm para Arduino el cual se ajusta la necesidad tanto en forma como tamaño adecuado para el modelo de pata simple ubicado en el sector inferior bajo la membrana antideslizante, en cuanto a sensor tipo encord se selecciono por su facilidad de obtencion el Broadcom AEDT-9810-Z00 en su forma de kit el cual incluye su rueda codificada. En cuestión de componentes que integran el ESC (Control de velocidad Electrónico) el principal componente de control de fases es el transistor tipo IGBT del modelo NTD110N02R en el encapsulado DPAK de cuatro pines, otro componente importante es el Opto-acoplador modelo HCPL-3120 con transistor IGBT en su empaquetado tipo smd.

Gracias a la contextualización del problema se lograron establecer bases necesarias para el desarrollo exitoso de un diseño mecánico estructural para un robot cuadrúpedo donde se considero como factores especifico la Rigidez mecánica donde las resistencia del material

valido que diseño soporta las carga propuesta donde las variaciones de modulo de von miss no supera aproximadamente de 3MPa además de contar que el método de manufactura aditiva en la maquinaria de Impresión 3D da una flexibilidad en cuestión de resistencia mecánica dependen de de los patrones de relleno, cantidad de relleno, temperaturas de de fundición, Refrigeración de Capa, Velocidades de impresión, Retracción de extracción y sobre todo el tipo de maquinaria utilizada, cabe recalcar que este tipo de métodos no esta libre de incertidumbres y variaciones de ambiente.

9. Recomendaciones

Se recomienda realizar una investigación a mayor profundidad acerca de los sistemas de almacenamiento o generación de energía compatibles con el cuadrúpedo, como seria el caso puntual de las celdas de combustible de hidrógeno.

De manera complementaria a este trabajo se recomienda realizar una nueva revisión del estado del arte referente a los diferentes tipos de motores y sistemas de transmisión mecánica que se puede emplear en el diseño del cuadrúpedo. Esto debido a la constante innovación y readecuación de actuadores en el mercado.

Como parte de las consideraciones de manufactura se sugiere realizar una investigación adicional acerca de como los diferentes tipos de patrones y rellenos, empleados en la deposición de material mediante una impresora 3D, afectarían las propiedades mecánicas del cuadrúpedo.

Referencias

- Ali, M. H., Zhanabayev, A., Khamzhin, S., y Mussin, K. (2019). Biologically inspired gripper based on the fin ray effect. En *2019 5th international conference on control, automation and robotics (iccar)* (pp. 865–869).
- Angeles, J. (2013). *Rational kinematics*. Springer New York. Descargado de <https://books.google.com.ec/books?id=WUXTBwAAQBAJ>
- Grimminger, F., Meduri, A., Khadiv, M., Viereck, J., Wüthrich, M., Naveau, M., . . . Righetti, L. (2020). An open torque-controlled modular robot architecture for legged locomotion research. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(2), 3650-3657. doi: 10.1109/LRA.2020.2976639
- Initiative, O. D. R. (2023). *Open dynamic robot initiative*. Disponible en: https://github.com/open-dynamic-robot-initiative/open_robot_actuator_hardware/blob/master/mechanics/quadruped_robot_12dof_v1/images/solo12_8.jpg; Accedido el: 5 de mayo del 2023.
- Katz, B., Di Carlo, J., y Kim, S. (2019). Mini cheetah: A platform for pushing the limits of dynamic quadruped control. En *2019 international conference on robotics and automation (icra)* (pp. 6295–6301).
- Léziart, P.-A., Flayols, T., Grimminger, F., Mansard, N., y Souères, P. (2021). Implementation of a reactive walking controller for the new open-hardware quadruped solo-12. En *2021 ieee international conference on robotics and automation (icra)* (p. 5007-5013). doi: 10.1109/ICRA48506.2021.9561559
- Malea, J. M. E., y Balaguer, E. F. B. (2004). *Problemas resueltos de máquinas eléctricas rotativas* (Vol. 19). Publicacions de la Universitat Jaume I.
- Malvino, A. P., Bates, D. J., y cols. (1991). *Principios de electrónica* (Vol. 6). McGraw-Hill.
- Martín, V. C. (2021, Junio). *Desarrollo de la locomoción para un robot cuadrúpedo*. Descargado de <https://oa.upm.es/68519/>
- Mehmood, J., Abid, M., Khan, M. S., Khan, A. Q., y Mustafa, G. (2021). Design of speed controller for a brushless dc motor using feedback linearization. En *2021 international bhurban conference on applied sciences and technologies (ibcast)* (p. 657-661). doi: 10.1109/IBCAST51254.2021.9393215
- Norton, R. L. (2016). *Diseño de maquinaria*.
- RAE. (2023). Locomocion. *RAE*. Descargado de <https://dle.rae.es/locomociÃ³n>
- Raibert, M., Blankespoor, K., Nelson, G., y Playter, R. (2008). Bigdog, the rough-terrain quadruped robot. *IFAC Proceedings Volumes*, 41(2), 10822-10825. Descarga-

- do de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016407020>
(17th IFAC World Congress) doi: <https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.01833>
- Rodriguez, J. (s.f.). Fundamentos de robotica antonio barrientos.
- Semini, C., Tsagarakis, N. G., Guglielmino, E., Focchi, M., Cannella, F., y Caldwell, D. G. (2011). Design of hyq—a hydraulically and electrically actuated quadruped robot. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 225(6), 831–849.
- Seok, S., Wang, A., Chuah, M. Y., Otten, D., Lang, J., y Kim, S. (2013). Design principles for highly efficient quadrupeds and implementation on the mit cheetah robot. En *2013 ieee international conference on robotics and automation* (pp. 3307–3312).
- Siegwart, R., Nourbakhsh, I. R., y Scaramuzza, D. (2011). *Introduction to autonomous mobile robots*. MIT press.
- Stewart, T. A., Lemberg, J. B., Taft, N. K., Yoo, I., Daeschler, E. B., y Shubin, N. H. (2020). Fin ray patterns at the fin-to-limb transition. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(3), 1612–1620.
- Sutyasadi, P., y Parnichun, M. (2015). Trotting control of a quadruped robot using pid-*ilc*. En *Iecon 2015 - 41st annual conference of the ieee industrial electronics society* (p. 004400-004405). doi: 10.1109/IECON.2015.7392784
- Tsai, S.-J. (1983). *An experimental study of a binocular vision system for rough terrain locomotion of a hexapod walking robot*. The Ohio State University.
- Wen, J., Wang, J., Chen, W., y Zhang, J. (2012). A gait planning approach for locomotion stability of four-legged robots. En *2012 7th ieee conference on industrial electronics and applications (iciea)* (p. 324-329). doi: 10.1109/ICIEA.2012.6360745

ANEXOS

Anexo A: Matriz de Consistencia Lógica

Tabla 8

Matriz de consistencia.

MATRIZ DE CONSISTENCIA				
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLES	MARCO TEÓRICO
¿Cual es el diseño idóneo de un mecanismo de movilidad para un robot cuadrúpedo para realizar actividades de desplazamiento por los espacios de la Universidad Politécnica Salesiana ?	Diseñar un mecanismo de movilidad para un robot cuadrúpedo que pueda desplazarse por los espacios de la Universidad Politécnica Salesiana.	El diseño de un mecanismo de movilidad para un robot cuadrúpedo le permitirá realizar actividades de desplazamiento en los espacios de la universidad politécnica salesiana.	-VI: Diseño. -VD: Desplazamiento.	Diseño mecánico Robot Cuadrúpedo.
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	VARIABLES	MARCO TEÓRICO
¿Se podrá establecer los parámetros iniciales para el Diseño de un mecanismo de movilidad para un robot cuadrúpedo para realizar actividades de desplazamiento por los espacios de la Universidad Politécnica Salesiana?	Establecer los parámetros iniciales para el diseño de un mecanismo de movilidad para un robot cuadrúpedo que realice actividades de desplazamiento por los espacios de la Universidad Politécnica Salesiana.	Se establecerá los parámetros iniciales para el diseño de un mecanismo de movilidad para un robot cuadrúpedo para realizar actividades de desplazamiento por los espacios de la Universidad Politécnica Salesiana.	-VI: Diseño. -VD: Desplazamiento.	Robot Cuadrúpedo
¿ Es posible realizar el diseño mecánico de un mecanismo de movilidad para un robot cuadrúpedo capaz de realizar actividades de desplazamiento por los espacios de la Universidad Politécnica Salesiana?	Realizar el diseño mecánico de un mecanismo de movilidad para un robot cuadrúpedo que realice actividades de desplazamiento por los espacios de la Universidad Politécnica Salesiana.	Se realizara el diseño mecánico de un mecanismo de movilidad para un robot cuadrúpedo que realice actividades de desplazamiento por los espacios de la Universidad Politécnica Salesiana.	-VI: Diseño. -VD: Desplazamiento.	Robot Cuadrúpedo
¿Es factible proponer un diseño electromecánico de un mecanismo de movilidad para un robot cuadrúpedo capaz de realizar actividades de desplazamiento por los espacios de la Universidad Politécnica Salesiana?	Proponer un diseño electromecánico para un mecanismo de movilidad para un robot cuadrúpedo que realice actividades de desplazamiento por los espacios de la Universidad Politécnica Salesiana	Se propondrá diseño electromecánico para un mecanismo de movilidad para un robot cuadrúpedo que realice actividades de desplazamiento por los espacios de la Universidad Politécnica Salesiana.	-VI: Diseño. -VD:Desplazamiento.	Simulación de movimiento

Nota: La matriz de consistencia presentada facilita identificar la relación que existe entre las variables y los objetivos además de como se relaciona con el marco teórico referencial.

Anexo B: Operacionalización de Variables

La tabla 9 presenta la operacionalización de la variable dependiente: tiempo de operación.

Tabla 9

Variable dependiente.

VARIABLE DEPENDIENTE: TIEMPO DE OPERACIÓN				
Dimensiones	Definiciones	Indicador	Magnitud	Instrumento de medición o Fuente
	<p>Definición conceptual: Del lat. locus 'lugar' y motio, -ōnis 'movimiento'.(RAE, 2023).</p>			
<p>Locomoción del robot cuadrúpedo</p>	<p>Definición operacional: Es el proceso por el cual los sistemas implementados en el robot trabajan juntos para producir movimientos coordinados y controlados para producir el desplazamiento de un lugar a otro.</p>	Locomoción	metros	Ambiente controlado

Nota: La tabla presenta las definiciones de la variable dependiente utilizada en la investigación, aplicadas al proceso de diseño del dispositivo de movilidad para un robot cuadrúpedo.

Anexo C: Código generado para algoritmo D-H en MATLAB

Figura 42

Código en MATLAB para extremidad inferior de forma simbólica.

```
1      %% ROBOT PLANAR 3DOF
2      % modelado simbólico
3      clc
4      clear all
5      close all
6      syms a1 a2 a3 q1 q2 q3 d1 d2 d3
7      A01=MTH_DH_GA(q1,d1,a1,0);
8      A12=MTH_DH_GA(q2,d2,a2,0);
9      A23=MTH_DH_GA(q3,d3,a3,0);
10     T03=A01*A12*A23
11     simplify(T03)
12     simplify(T03*[0;0;0;1])
13
```

Nota: Modelado matemático mediante D-H de la extremidad inferior.

Figura 43

Código en MATLAB para extremidad inferior de forma numérica.

```
14 % modelado numérico
15 clc
16 clear all
17 close all
18 a1=230; % longitud eslabón 1
19 a2=230; % longitud eslabón 2
20 a3=230; % longitud eslabón 3
21 q1=180*pi/180; % ángulo de giro Joint 1
22 q2=90*pi/180; % ángulo de giro Joint 2
23 q3=45*pi/180; % ángulo de giro Joint 3
24 d1=50;% longitud entre eje 01
25 d2=50;% longitud entre ejes12
26 d3=50;% longitud entre ejes23
27 A01=MTH_DH_GA(q1,d1,a1,0);
28 A12=MTH_DH_GA(q2,d2,a2,0);
29 A23=MTH_DH_GA(q3,d3,a3,0);
30 T03=A01*A12*A23
31
32 T03*[0;0;0;1]
```

Nota: Modelado matemático mediante D-H de la extremidad inferior.

Figura 44

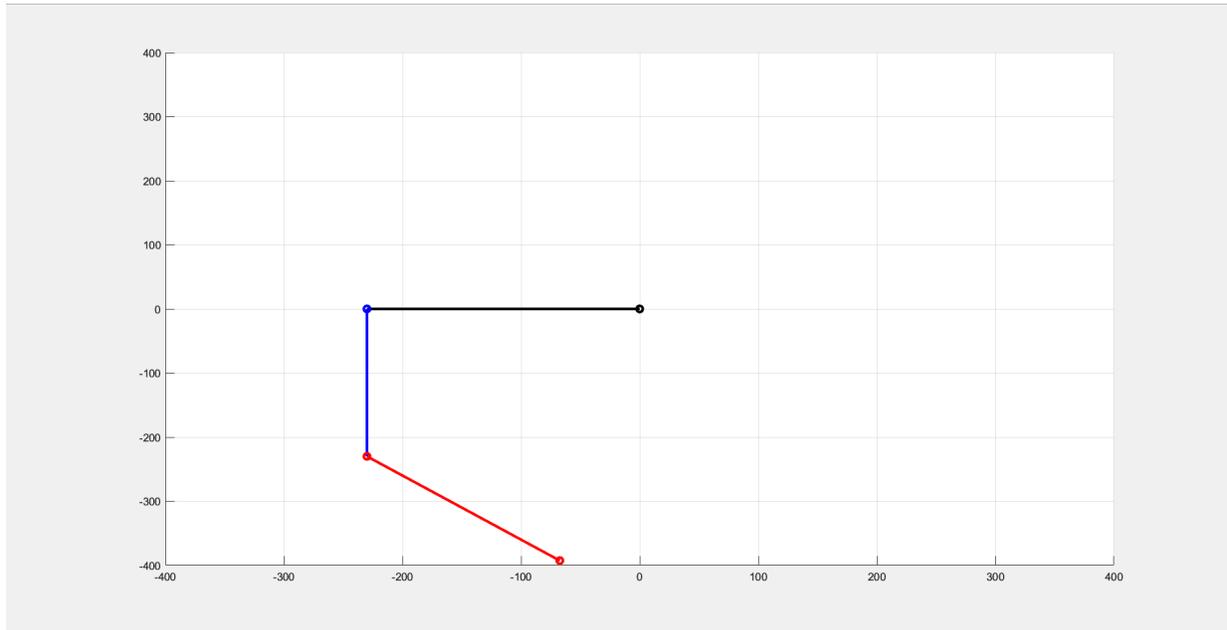
Código en MATLAB para extremidad inferior para generar gráfica.

```
34 % graficar los eslabones
35 p3=T03*[0;0;0;1];% ubicación Joint 3
36 p2=A01*A12*[0;0;0;1];% ubicación Joint 2
37 p1=A01*[0;0;0;1];% ubicación Joint 1
38 xA=0;
39 yA=0;
40 zA=0;
41 xB=p1(1,1);
42 yB=p1(2,1);
43 zB=p1(3,1);
44 xC=p2(1,1);
45 yC=p2(2,1);
46 zC=p2(3,1);
47 xD=p3(1,1);
48 yD=p3(2,1);
49 zD=p3(3,1);
50 figure(1)
51 plot3([xA,xB],[yA,yB],[zB zB],'k-o','LineWidth',2.5)
52 axis([-400 400 -400 400 -400 400])
53 hold on % holds the current plot
54 plot3([xB,xC],[yB,yC],[zC,zC],'b-o','LineWidth',2.5)
55 hold on % holds the current plot
56 plot3([xC,xD],[yC,yD],[zD,zD],'r-o','LineWidth',2.5)
57 hold off
58 grid on
```

Nota: Generación de Gráfica de eslabonamiento de la extremidad inferior.

Figura 45

Gráfica de eslabonamiento de la extremidad inferior.



Nota: Generación de Gráfica de eslabonamiento de la extremidad inferior.

Figura 46

Código en MATLAB para superior de forma simbólica.

```
137      %% brazo
138      clc
139      clear all
140      close all
141      syms a2 a3 q1 q2 q3 q4 q5 d1 d2 d3 d4 A1 A4
142
143      A01=MTH_DH_GA(q1,d1,0,A1)
144      A12=MTH_DH_GA(q2,d2,a2,0)
145      A23=MTH_DH_GA(q3,d3,a3,0)
146      A34=MTH_DH_GA(q5,d4,0,A4)
147      T04=A01*A12*A23*A34
148      simplify(T04)
```

Nota: Modelado matemático mediante D-H de la extremidad superior.

Figura 47

Código en MATLAB para extremidad superior de forma numérica.

```
150 % modelado numérico
151 clc
152 clear all
153 close all
154 a2=50;
155 a3=50;
156 q1=90*pi/180;
157 q2=0;
158 q3=0;
159 q4=0;
160 q5=-45*pi/180;
161 A1=90*pi/180;
162 A4=90*pi/180;
163 d1=230;
164 d2=230;
165 d3=230;
166 d4=230;
167 d5=0;
168
169 A01=MTH_DH_GA(q1,d1,0,A1)
170 A12=MTH_DH_GA(q2,d2,a2,0)
171 A23=MTH_DH_GA(q3,d3,a3,0)
172 A34=MTH_DH_GA(q5,d5,0,A4)
173 T04=A01*A12*A23*A45
```

Nota: Modelado matemático mediante D-H de la extremidad superior.

Figura 48

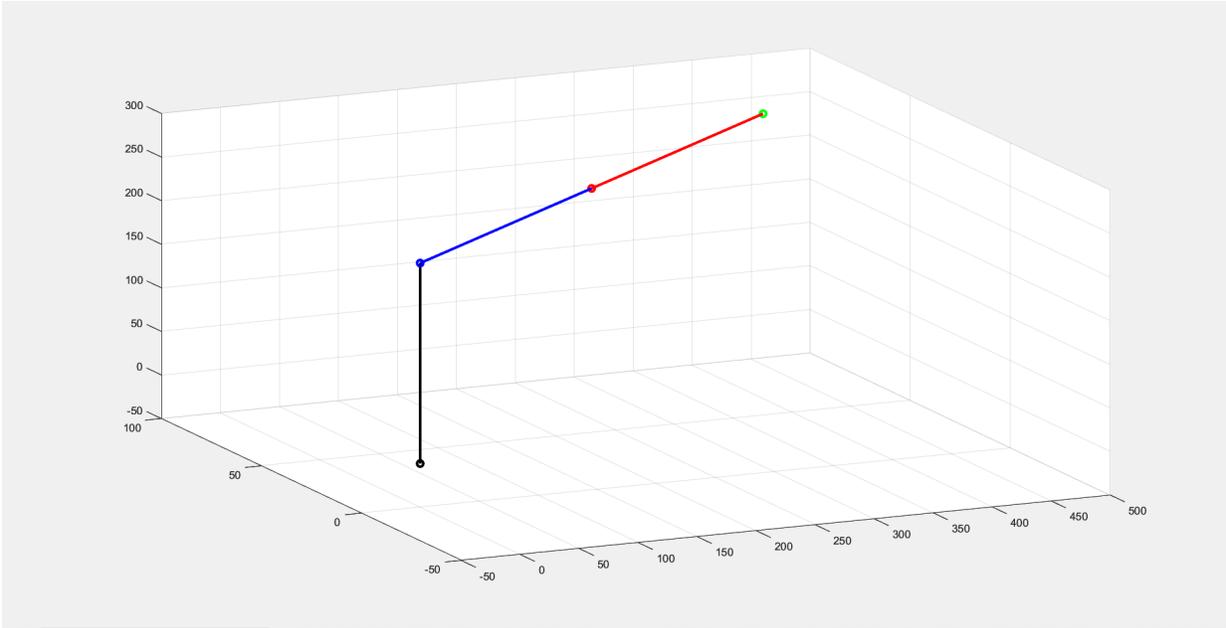
Código en MATLAB para extremidad superior para generar gráfica.

```
175 % graficar los eslabones
176 p4=T04*[0;0;0;1];
177 p3=A01*A12*A23*[0;0;0;1];% ubicación Joint 3
178 p2=A01*A12*[0;0;0;1];% ubicación Joint 2
179 p1=A01*[0;0;0;1];% ubicación Joint 1
180 xA=0;
181 yA=0;
182 zA=0;
183 xB=p1(1,1);
184 yB=p1(2,1);
185 zB=p1(3,1);
186 xC=p2(1,1);
187 yC=p2(2,1);
188 zC=p2(3,1);
189 xD=p3(1,1);
190 yD=p3(2,1);
191 zD=p3(3,1);
192 xF=p4(1,1);
193 yF=p4(2,1);
194 zF=p4(3,1);
195 figure(1)
196 plot3([xA,xB],[yA,yB],[zA zB],'k-o','LineWidth',2.5)
197 axis([-200 200 -200 200 -200 200])
198 hold on % holds the current plot
199 plot3([xB,xC],[yB,yC],[zB,zB],'b-o','LineWidth',2.5)
200 hold on % holds the current plot
201 plot3([xC,xD],[yC,yD],[zC,zC],'r-o','LineWidth',2.5)
202 hold on % holds the current plot
203 plot3([xD,xF],[yD,yF],[zD,zD],'g-o','LineWidth',2.5)
204 hold off
205 grid on
```

Nota: Generacion de Grafica de eslabonamiento de la extremidad superior.

Figura 49

Gráfica de eslabonamiento de la extremidad superior.



Nota: Generación de Gráfica de eslabonamiento de la extremidad superior.

Figura 50

Código en MATLAB para el manipulador de forma simbólica.

```
59      %% pinza flexible
60      clc
61      clear all
62      close all
63      syms a1 a2 a3 a4 q1 q2 q3 q4 q5
64      %MTH_DH(Theta,d,a,alfa)
65      A01=MTH_DH_GA(0,0,0,q1)
66      A12=MTH_DH_GA(q2,0,a1,0)
67      A23=MTH_DH_GA(q3,0,a2,0)
68      A34=MTH_DH_GA(q4,0,a3,0)
69      A45=MTH_DH_GA(q5,0,a4,0)
70      T05=A01*A12*A23*A34*A45
71      simplify(T05)
```

Nota: Modelado matemático mediante D-H del manipulador.

Figura 51

Código en MATLAB para el manipulador de forma numérica.

```
74 % modelado numérico
75 clc
76 clear all
77 close all
78 a1=10;
79 a2=10;
80 a3=10;
81 a4=10;
82 a5=10;
83 q1=-90*(pi/180)
84 q2=45;
85 q3=0;
86 q4=0;
87 q5=0;
88 A1=0;
89 A2=0;
90 A3=0;
91 A4=0;
92 A01=MTH_DH_GA(0,0,0,q1)
93 A12=MTH_DH_GA(q2,0,a1,0)
94 A23=MTH_DH_GA(q3,0,a2,0)
95 A34=MTH_DH_GA(q4,0,a3,0)
96 A45=MTH_DH_GA(q5,0,a4,0)
97 T05=A01*A12*A23*A34*A45
```

Nota: Modelado matemático mediante D-H del manipulador.

Figura 52

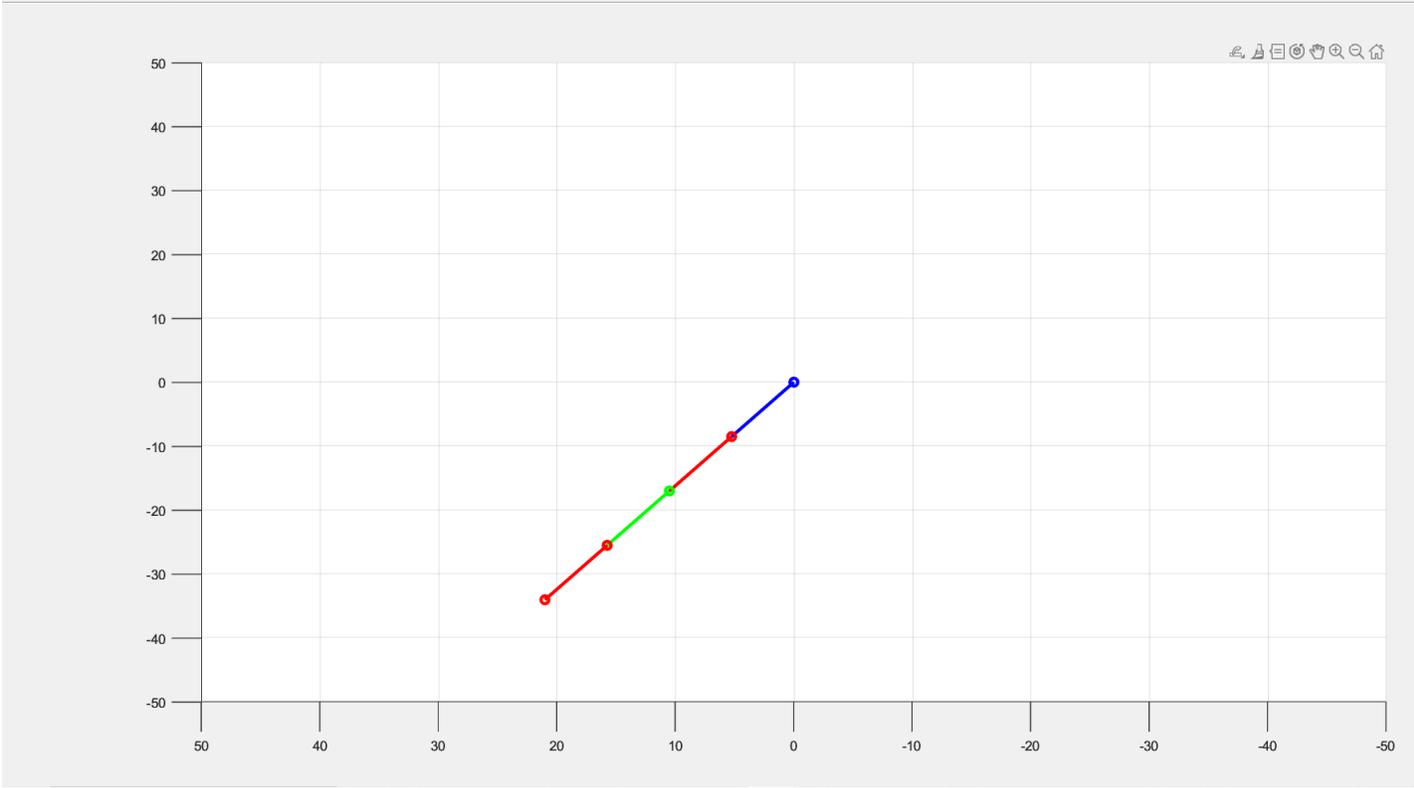
Código en MATLAB para extremidad superior para generar gráfica.

```
100 % graficar los eslabones
101 p5=T05*[0;0;0;1];
102 p4=A01*A12*A23*A34*[0;0;0;1];
103 p3=A01*A12*A23*[0;0;0;1];% ubicación Joint 3
104 p2=A01*A12*[0;0;0;1];% ubicación Joint 2
105 p1=A01*[0;0;0;1];% ubicación Joint 1
106 xA=0;
107 yA=0;
108 zA=0;
109 xB=p1(1,1);
110 yB=p1(2,1);
111 zB=p1(3,1);
112 xC=p2(1,1);
113 yC=p2(2,1);
114 zC=p2(3,1);
115 xD=p3(1,1);
116 yD=p3(2,1);
117 zD=p3(3,1);
118 xE=p4(1,1);
119 yE=p4(2,1);
120 zE=p4(3,1);
121 xF=p5(1,1);
122 yF=p5(2,1);
123 zF=p5(3,1);
124 figure(1)
125 plot3([xA,xB],[yA,yB],[zA zB],'k-o','LineWidth',2.5)
126 axis([-50 50 -50 50 -50 50])
127 hold on % holds the current plot
128 plot3([xB,xC],[yB,yC],[zB,zC],'b-o','LineWidth',2.5)
129 hold on % holds the current plot
130 plot3([xC,xD],[yC,yD],[zC,zD],'r-o','LineWidth',2.5)
131 hold on % holds the current plot
132 plot3([xD,xE],[yD,yE],[zD,zE],'g-o','LineWidth',2.5)
133 hold on % holds the current plot
134 plot3([xE,xF],[yE,yF],[zE,zF],'r-o','LineWidth',2.5)
135 hold off
136 grid on
```

Nota: Generacion de Grafica de eslabonamiento del Manipulador.

Figura 53

Gráfica de eslabonamiento del Manipulador.



Nota: Generacion de Grafica de eslabonamiento del Manipulador.

Anexo D: Planos del Diseño Mecánico

Figura 54

PLANO CUERPO DERECHO.

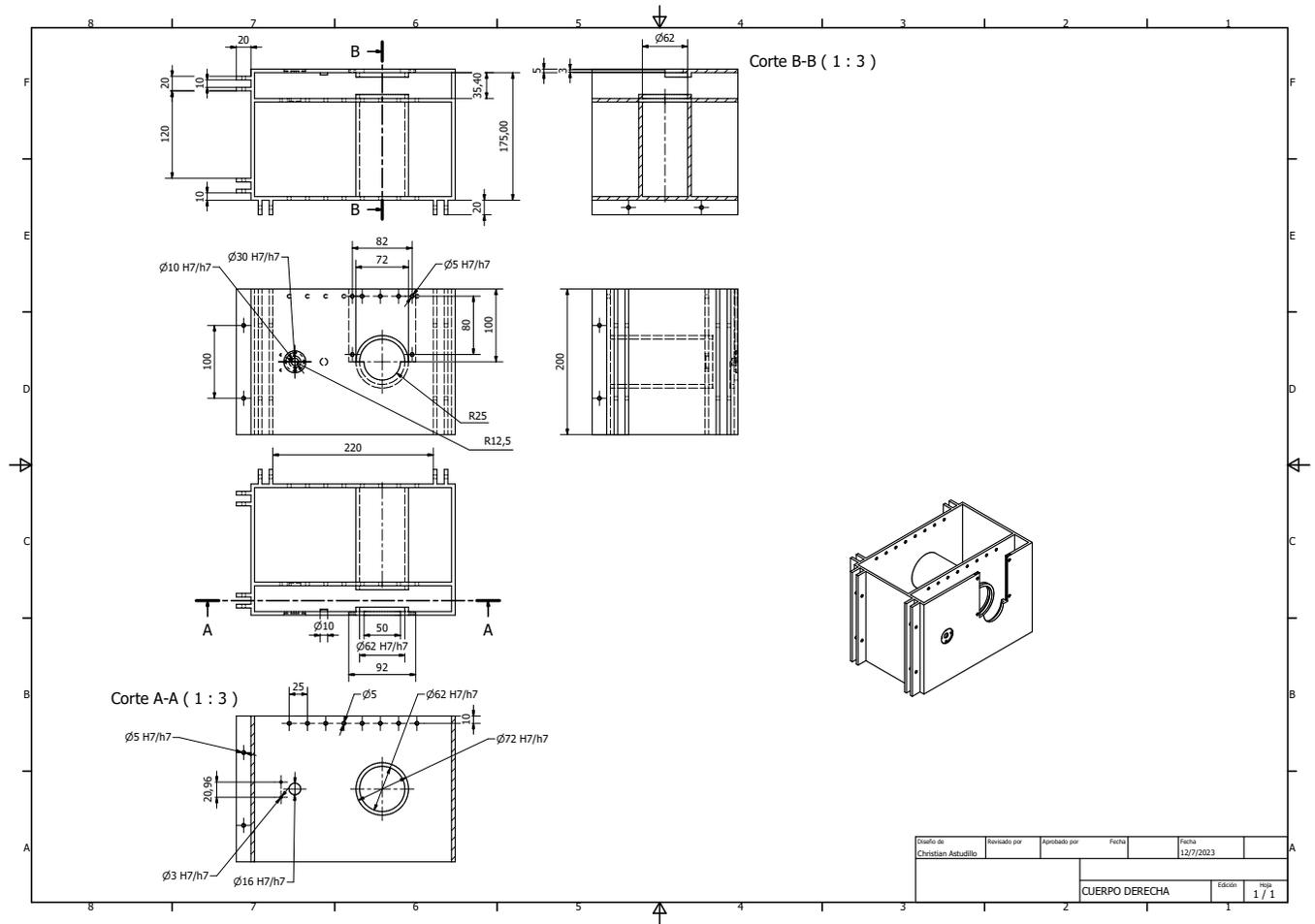
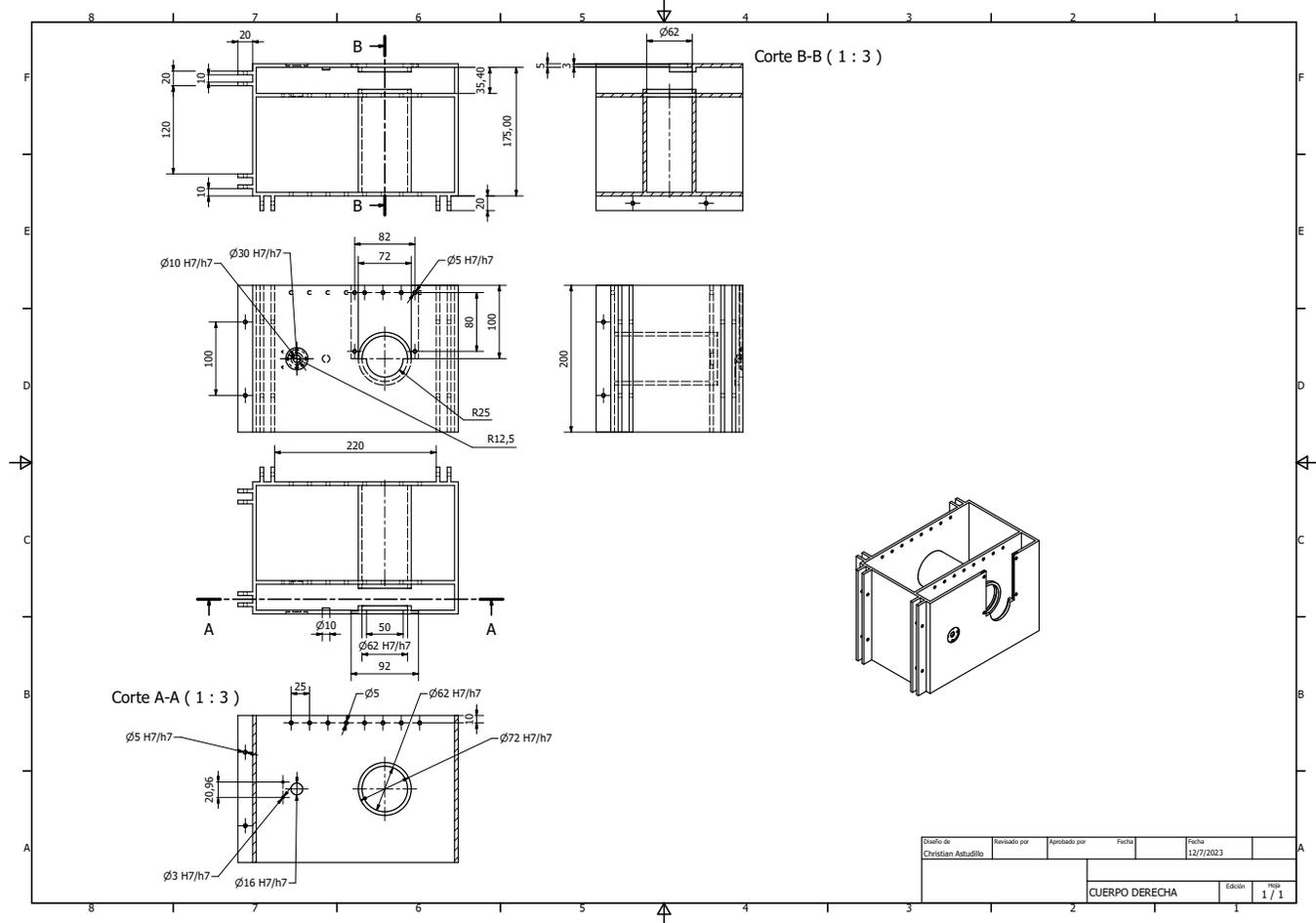


Figura 55

PLANO CUERPO IZQUIERDO.



Diseño de	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Edición	Página
Christian Astudillo			12/7/2023		1 / 1
CUERPO DERECHA					

Figura 56

PLANO ESTRUCTURA NÚCLEO.

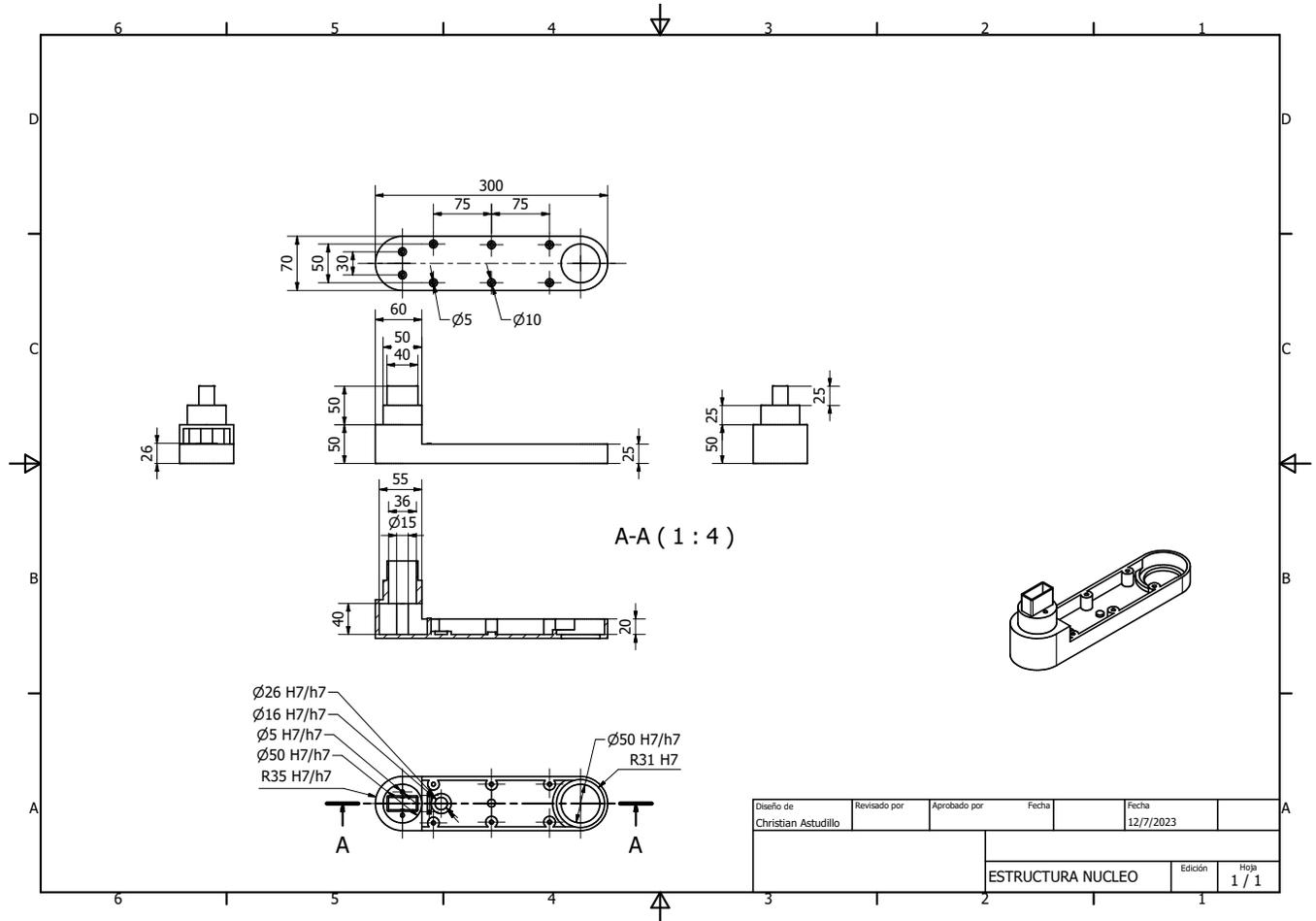


Figura 57

PLANO TAPA NÚCLEO.

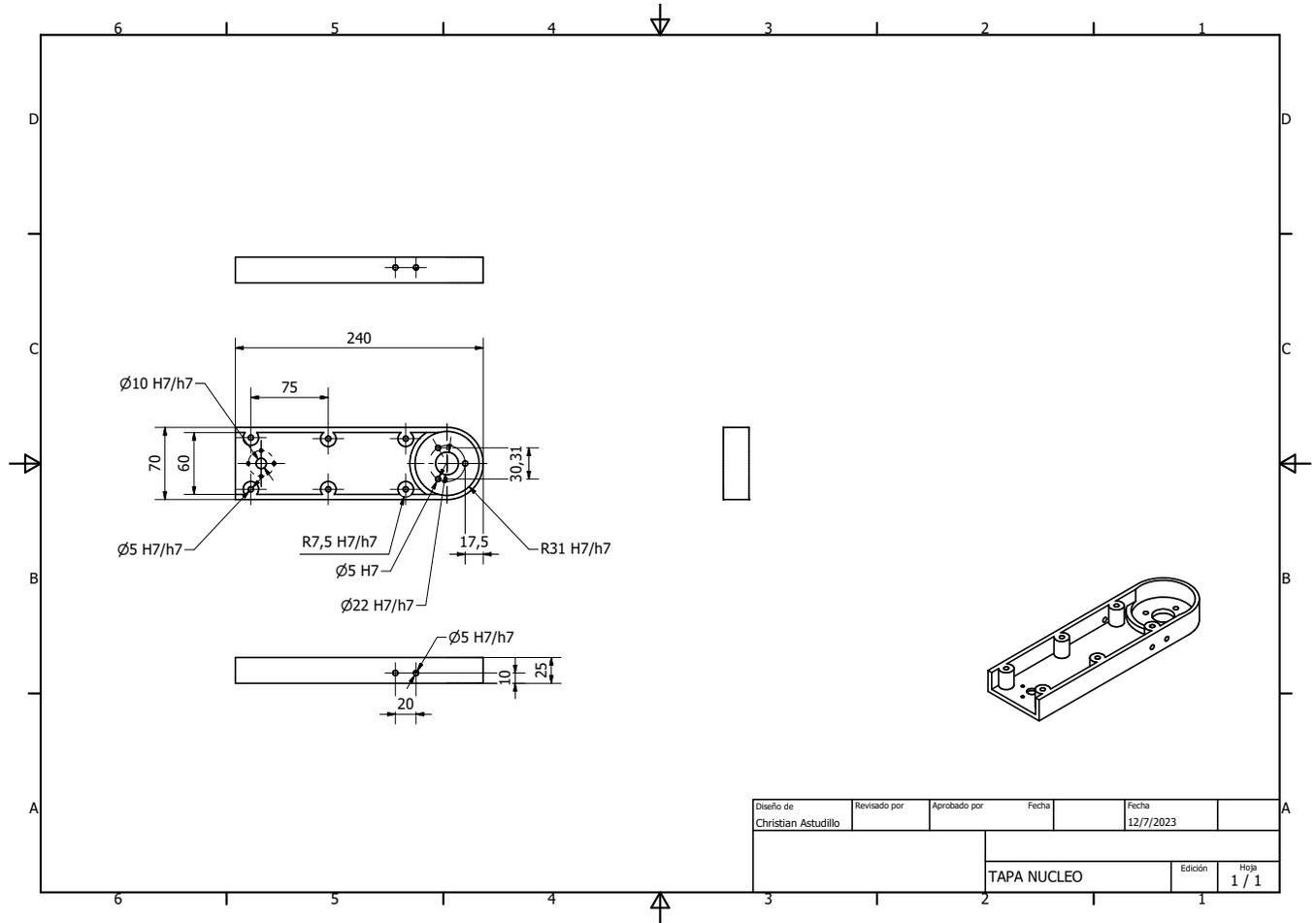


Figura 58

PLANO TAPA CUERPO.

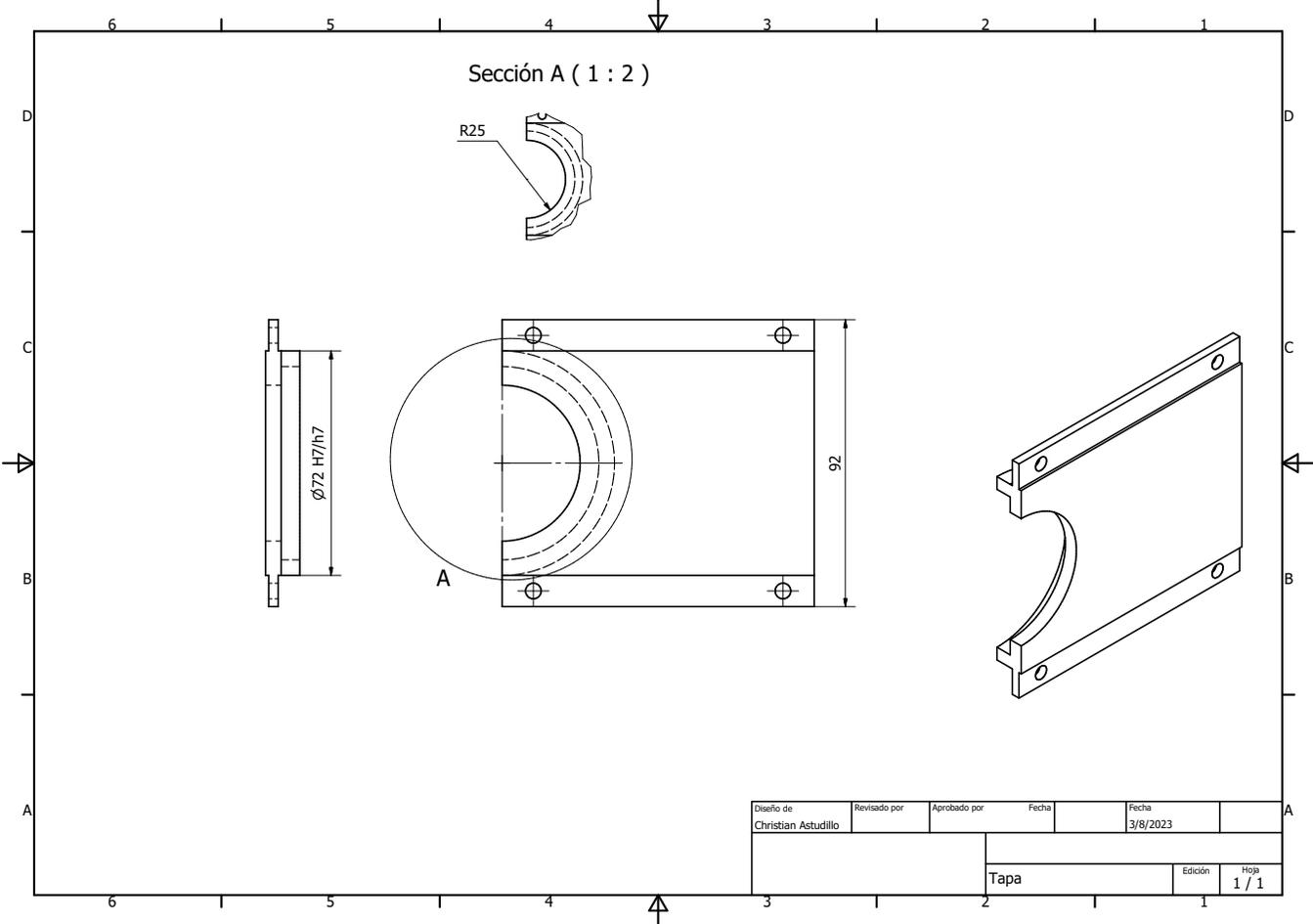


Figura 59

PLANO PATA SIMPLE.

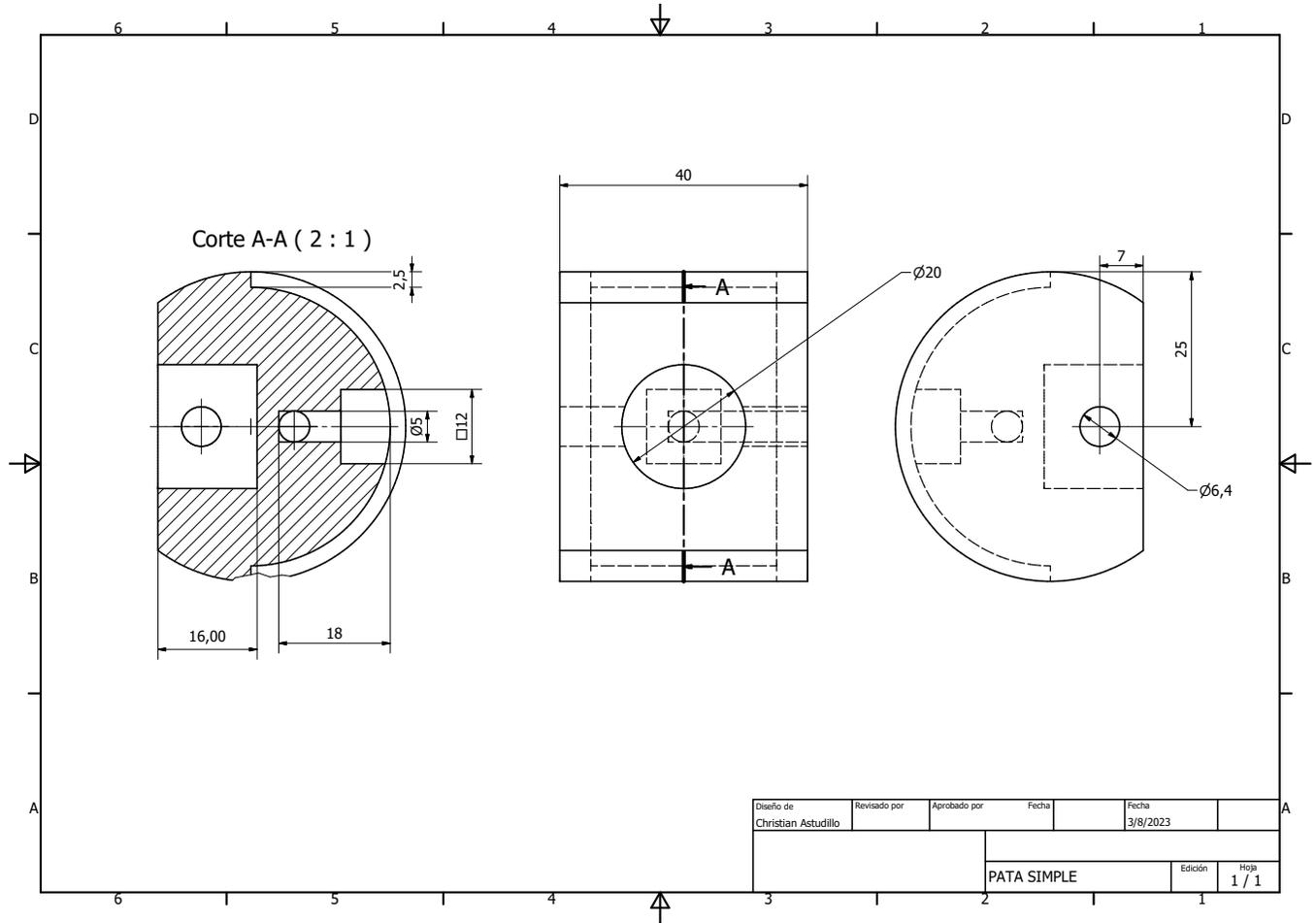


Figura 60

PLANO GOMA ANTIDESLIZANTE.

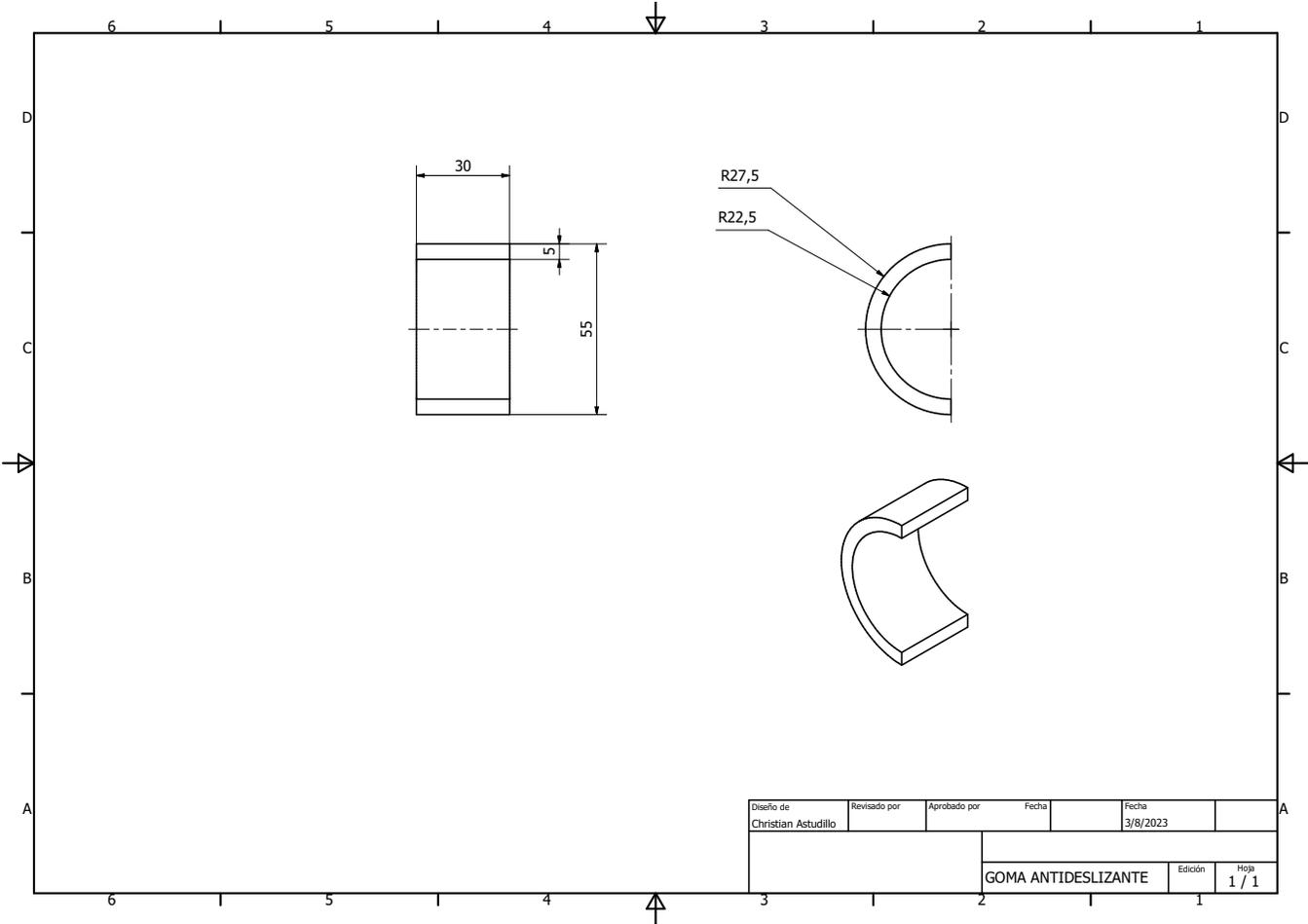


Figura 61

PLANO BASE PINZA.

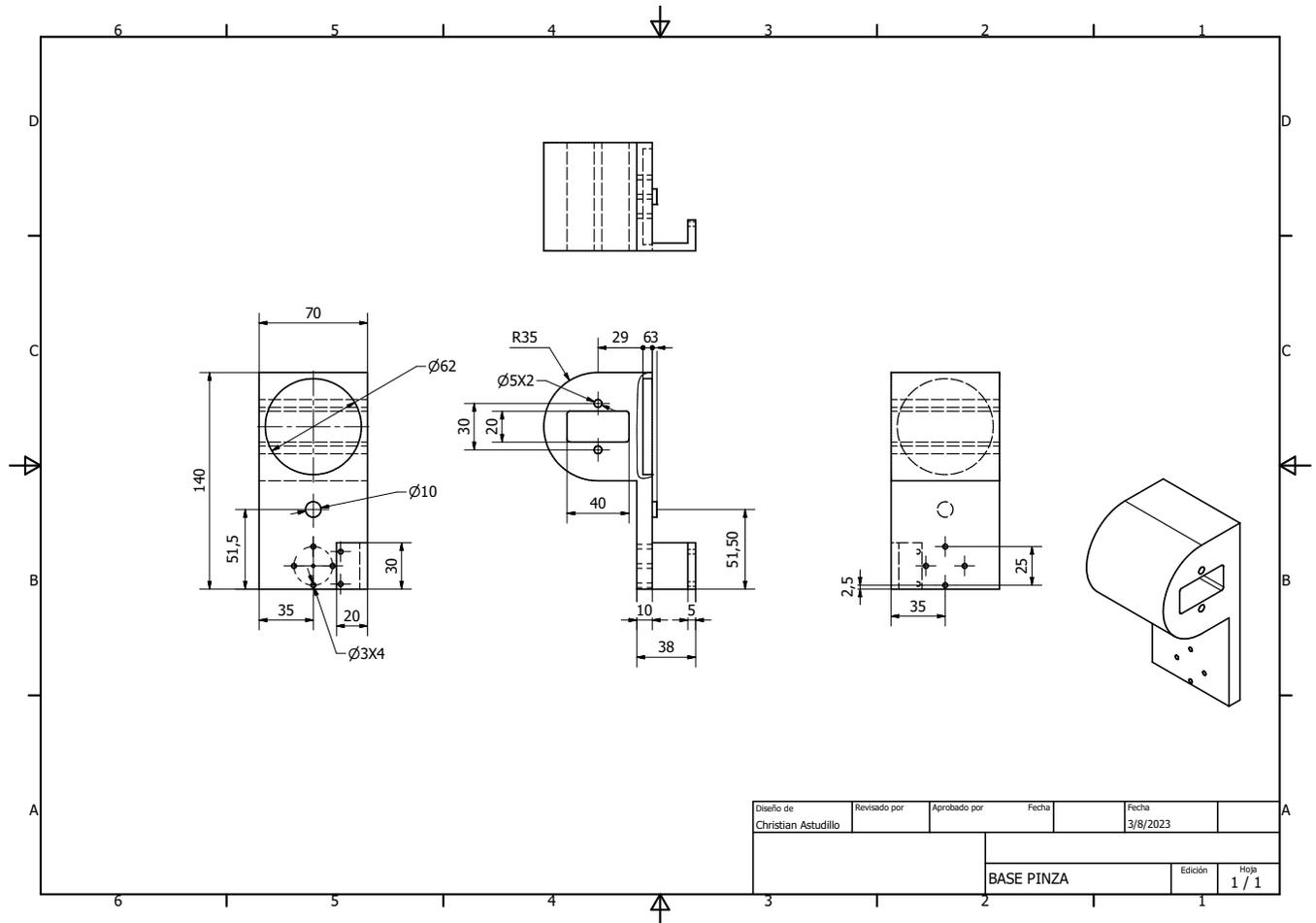


Figura 62

PLANO BASE BRAZO.

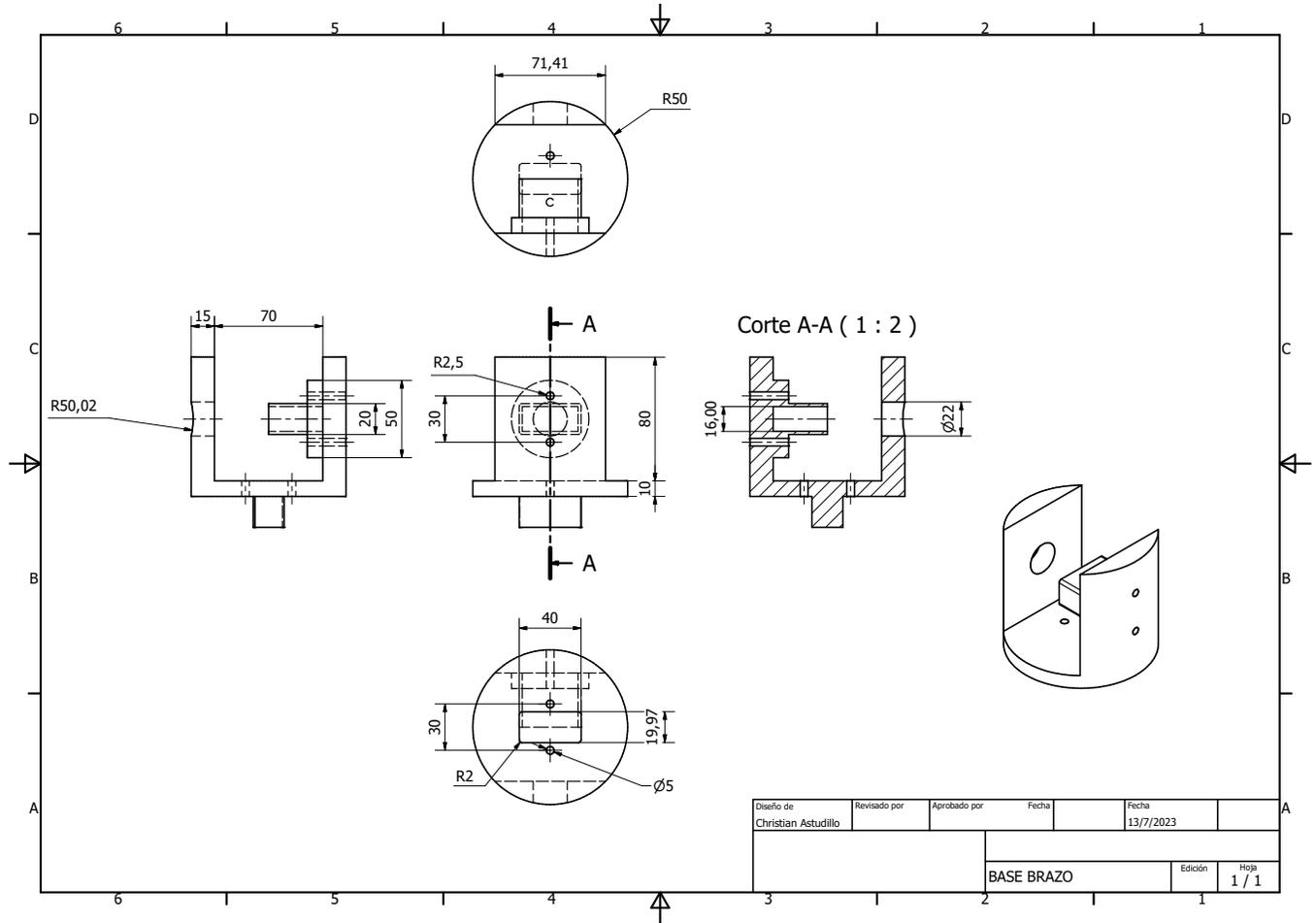
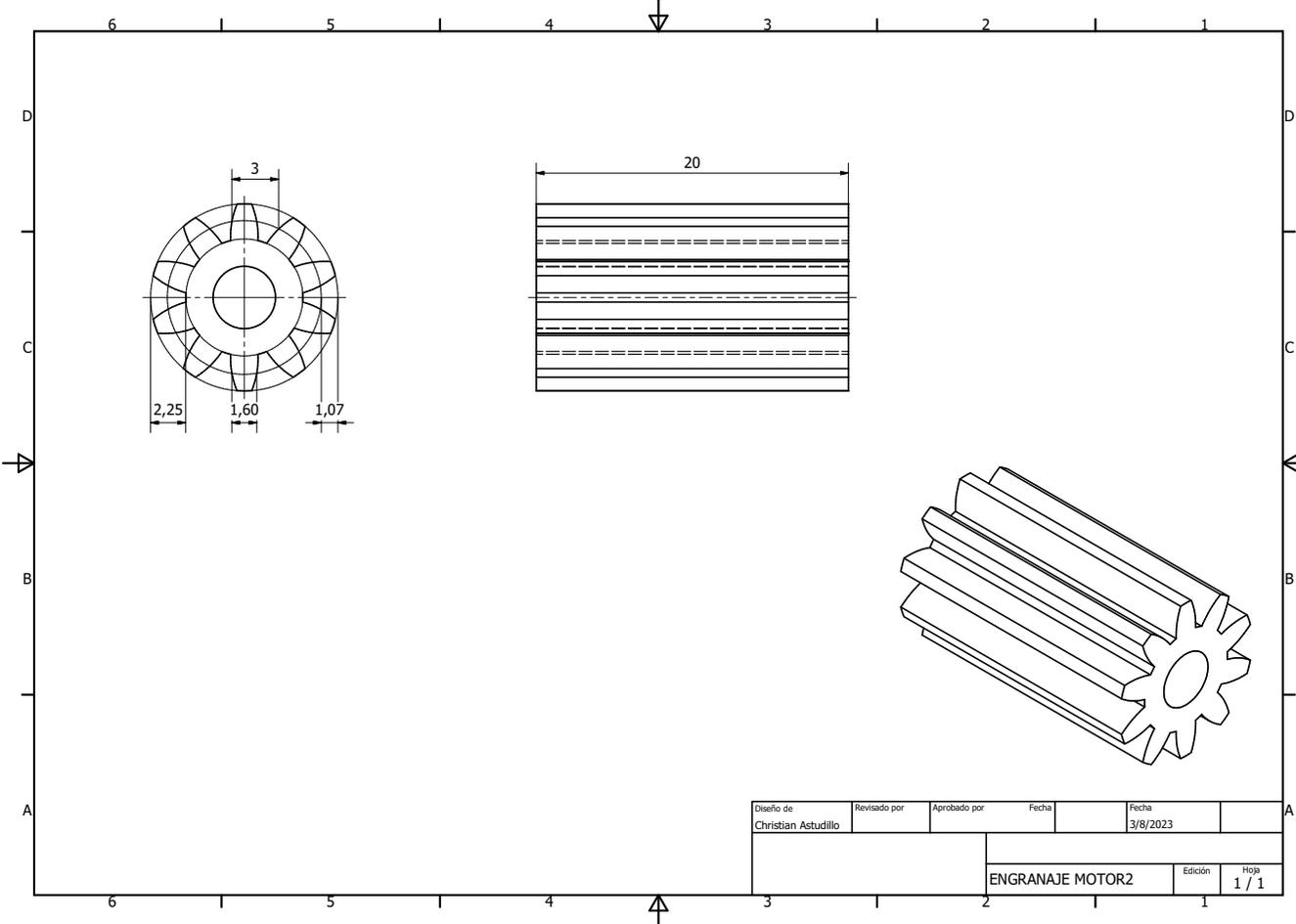


Figura 63

PLANO ENGRANAJE MOTOR 2.



Diseño de Christian Astudillo	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 3/8/2023	
ENGRANAJE MOTOR2				Edición	Hoja 1 / 1

Figura 64

PLANO ENGRANAJE MOTOR .

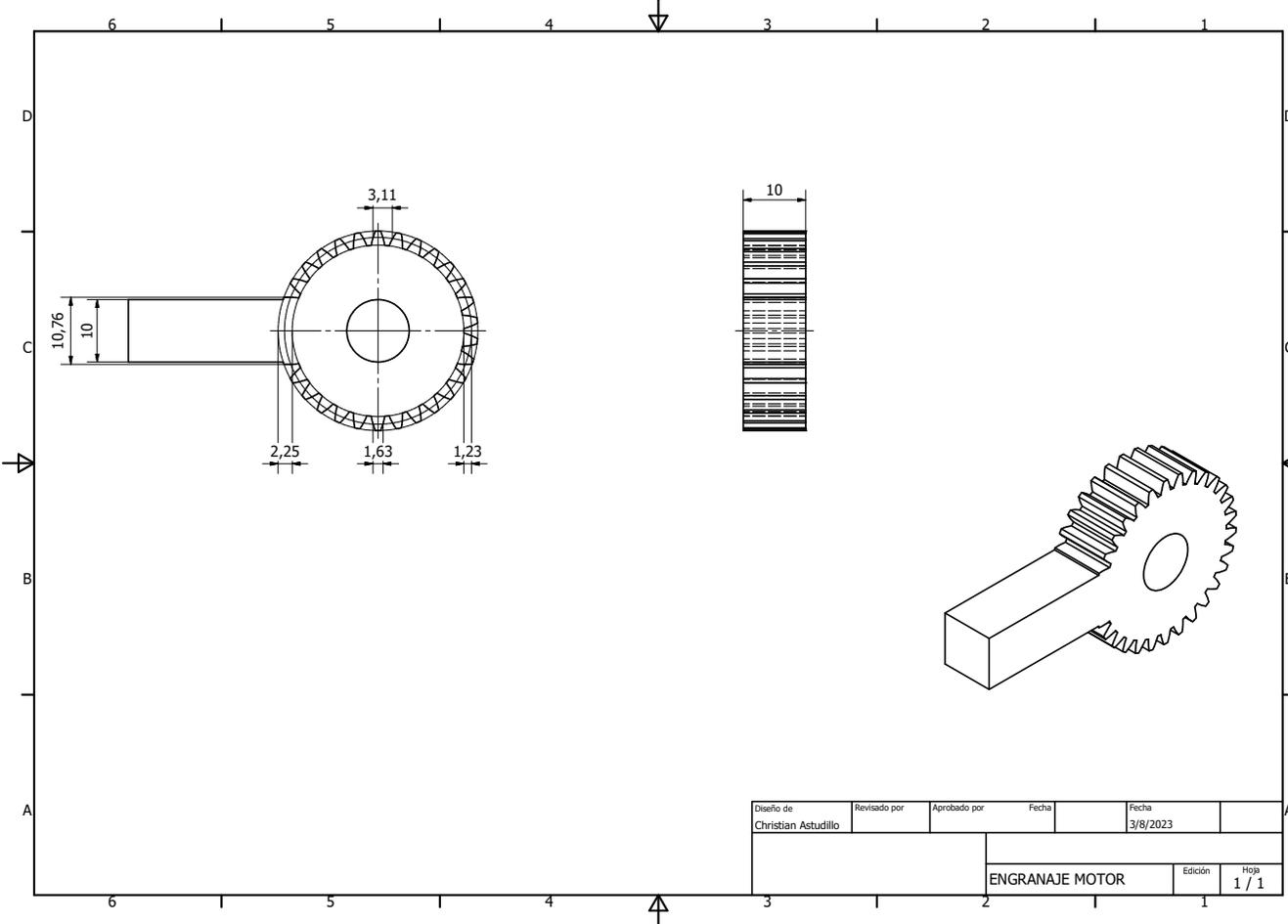


Figura 65

PLANO BANDEJA.

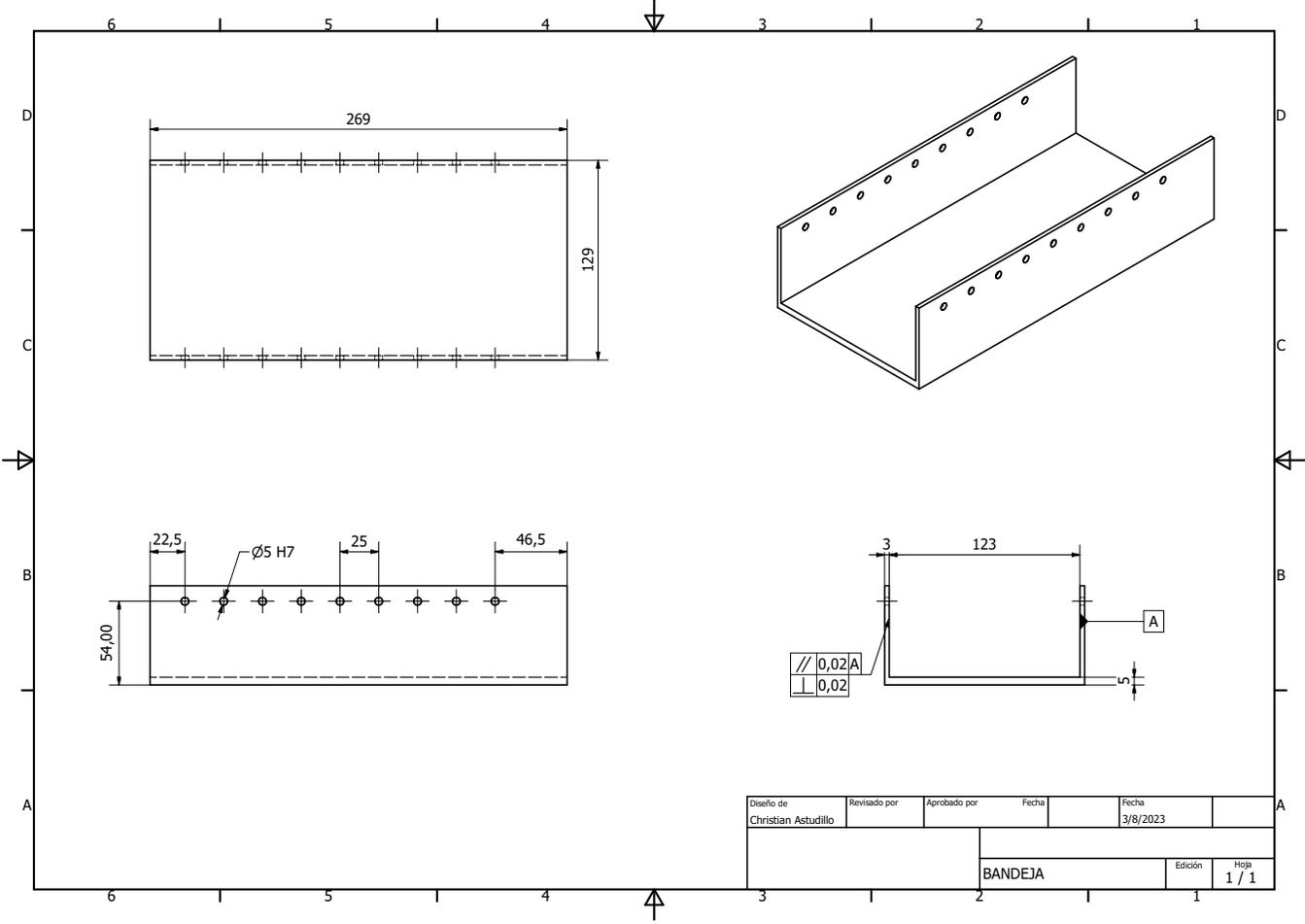


Figura 66

PLANO PINZA FLEXIBLE.

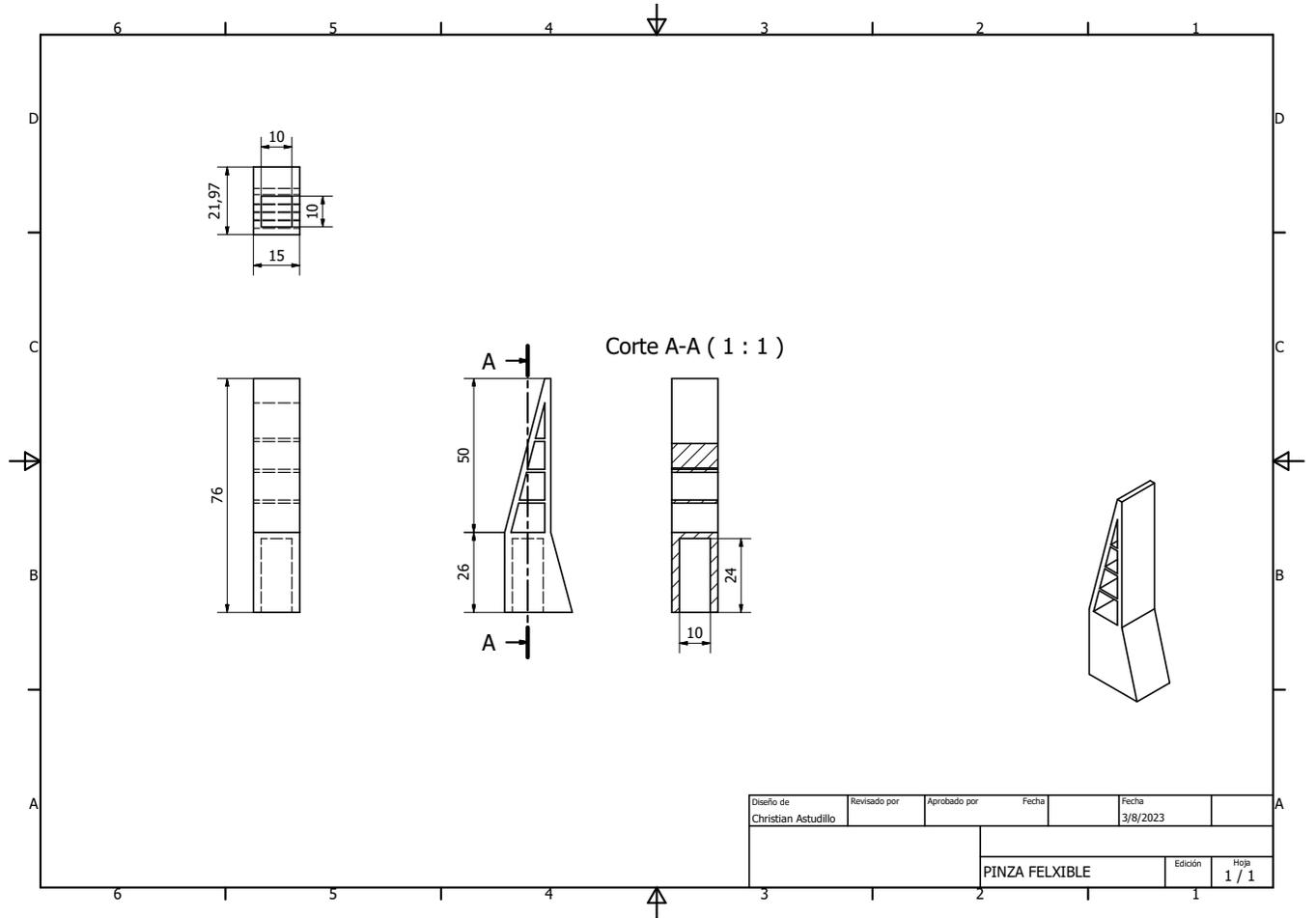


Figura 67

PLANO ENGRANAJE 21.

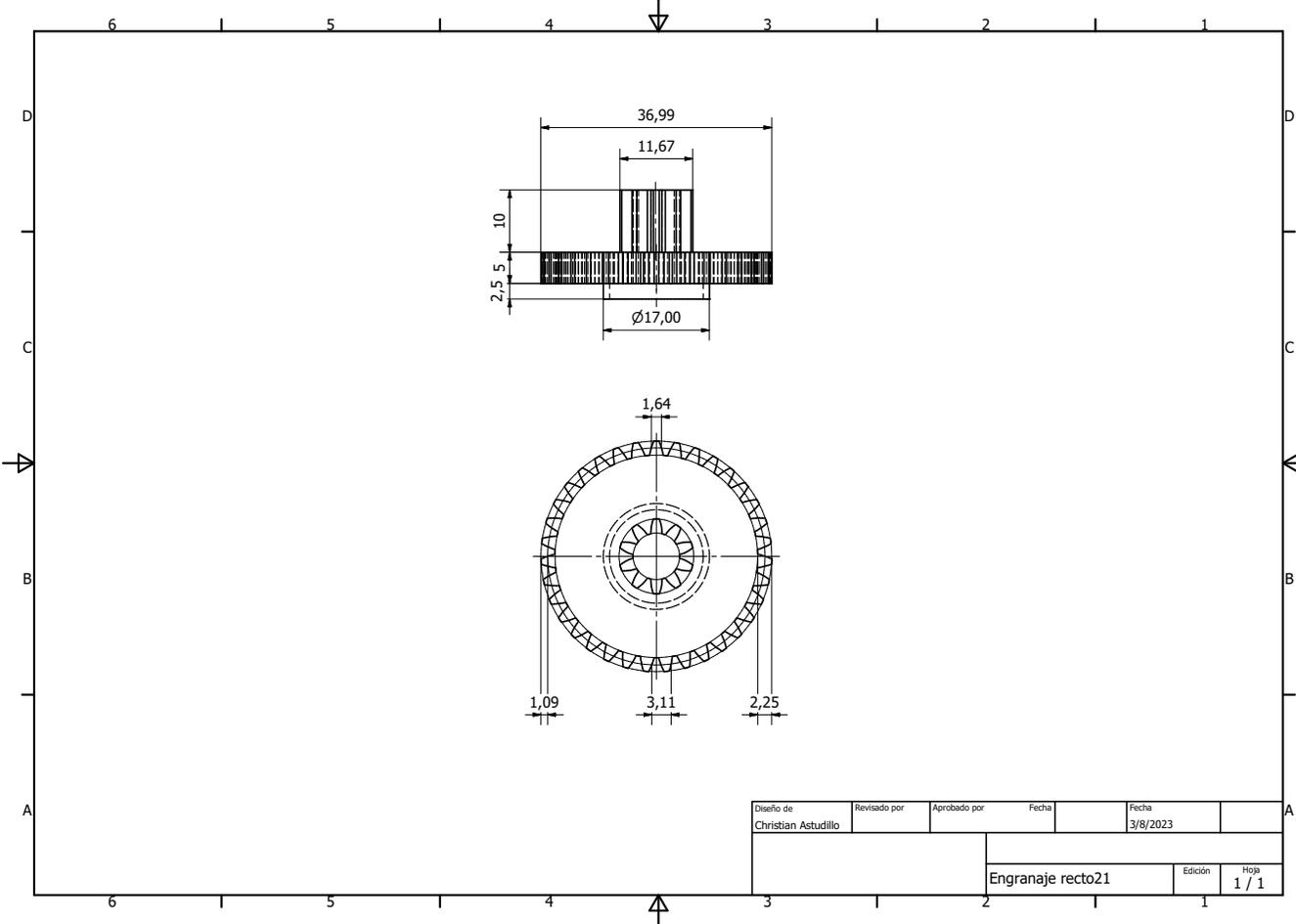


Figura 68

PLANO ENGRANAJE SOPORTE 2.

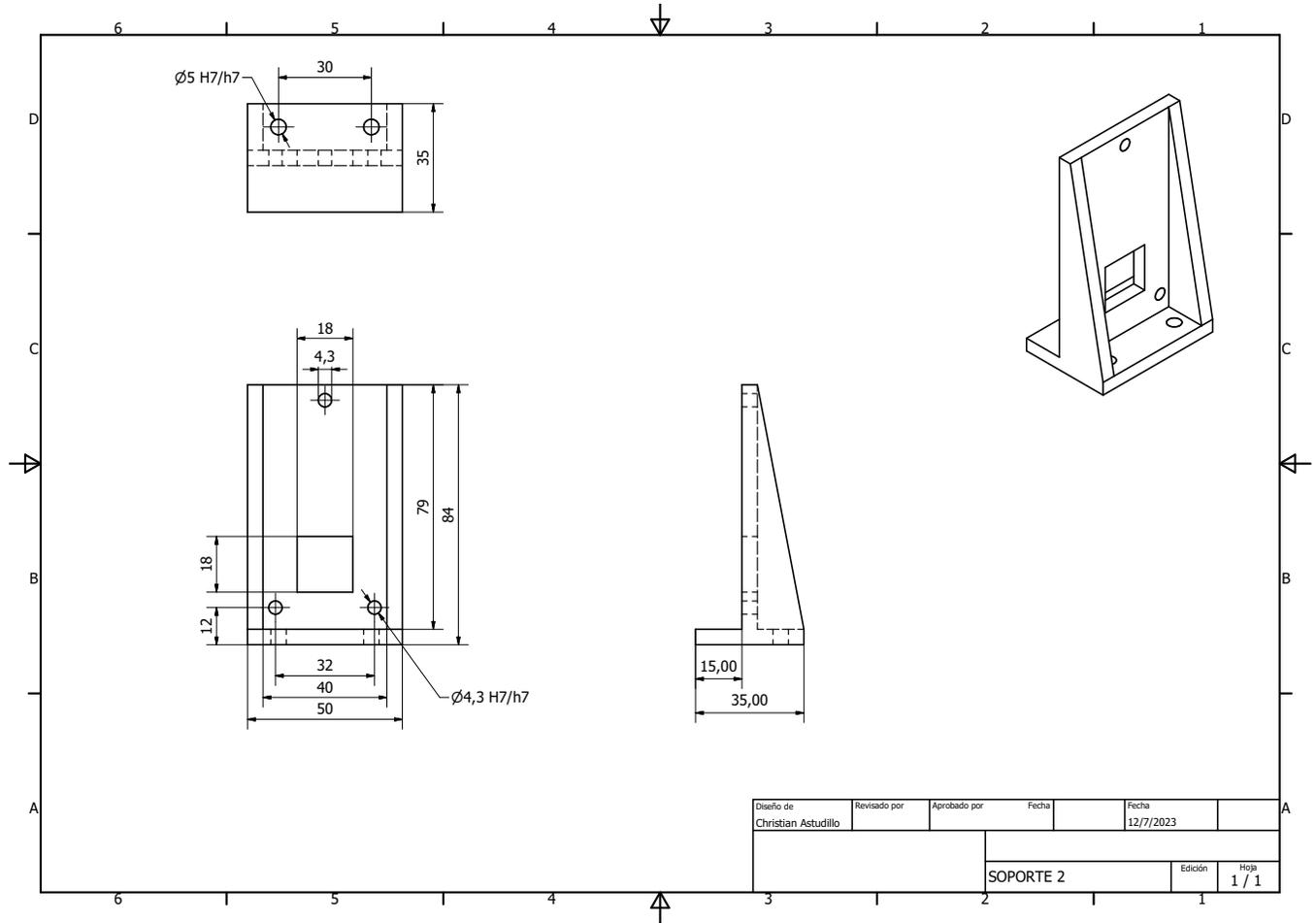


Figura 69

PLANO ENGRANAJE SOPORTE.

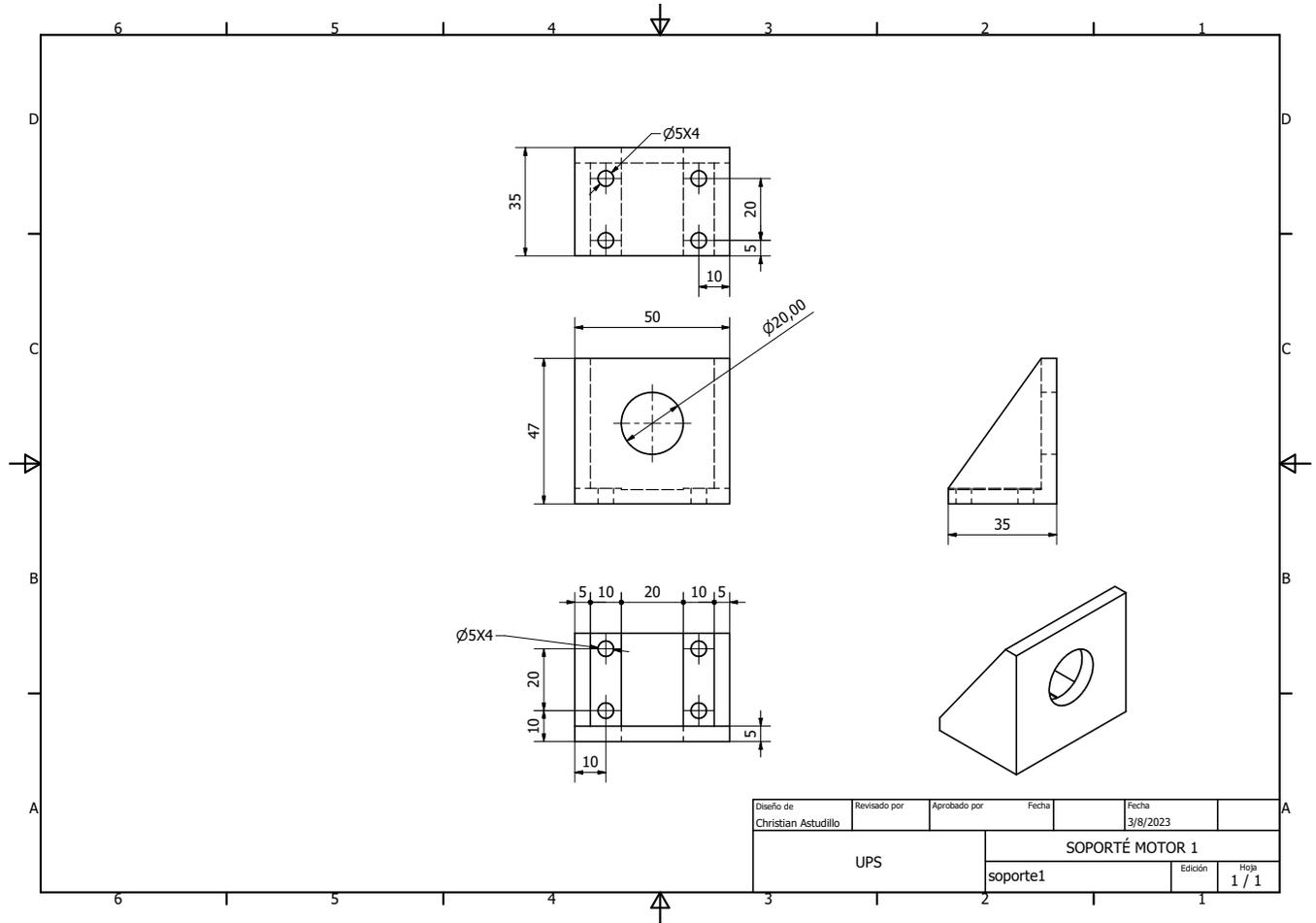
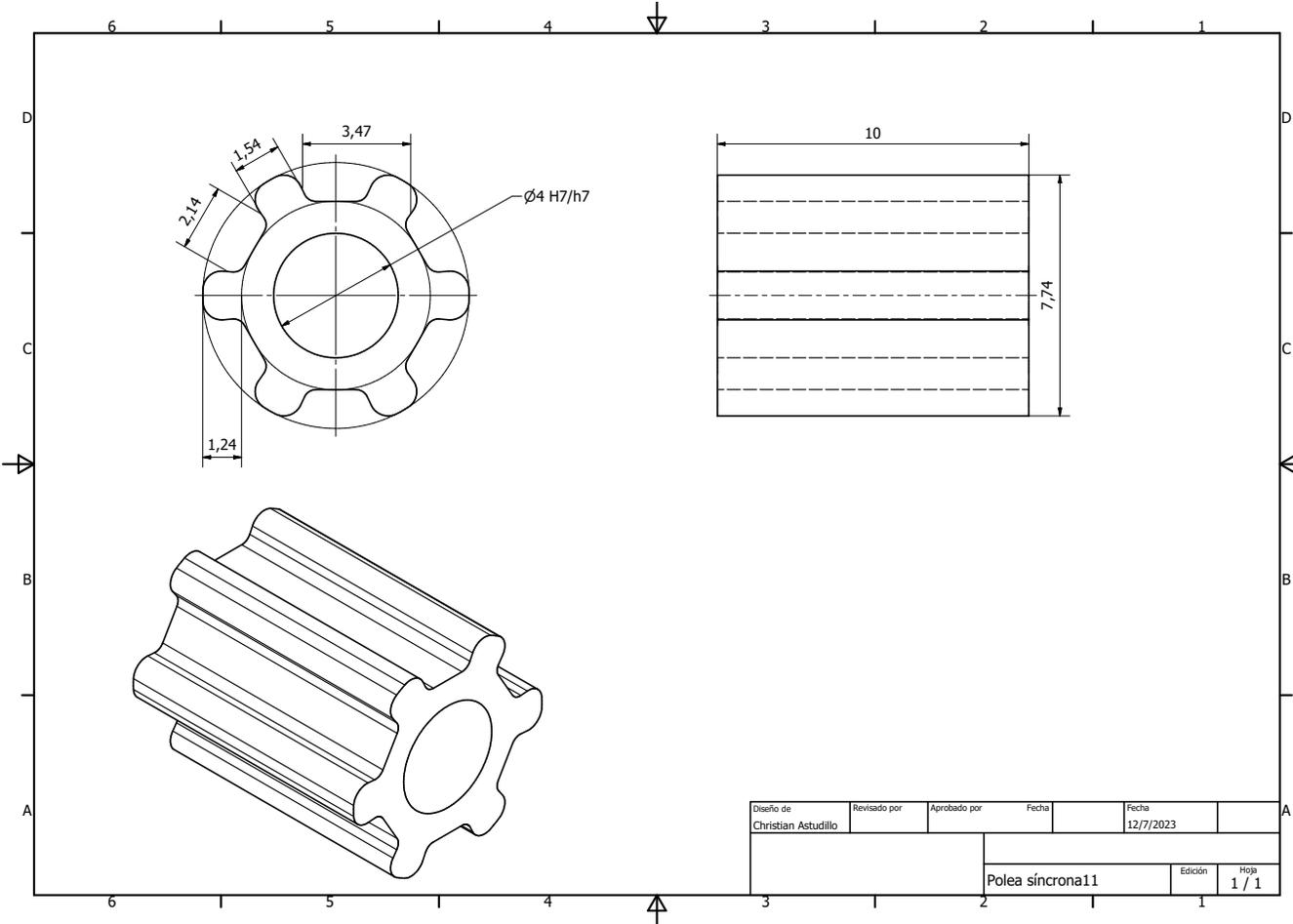


Figura 70

PLANO POLEA SÍNCRONA 11.



Diseño de Christian Astudillo	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha	
				12/7/2023	
Polea sincrona11				Edición	Hoja
				1	1 / 1

Figura 71

PLANO POLEA SÍNCRONA 21.

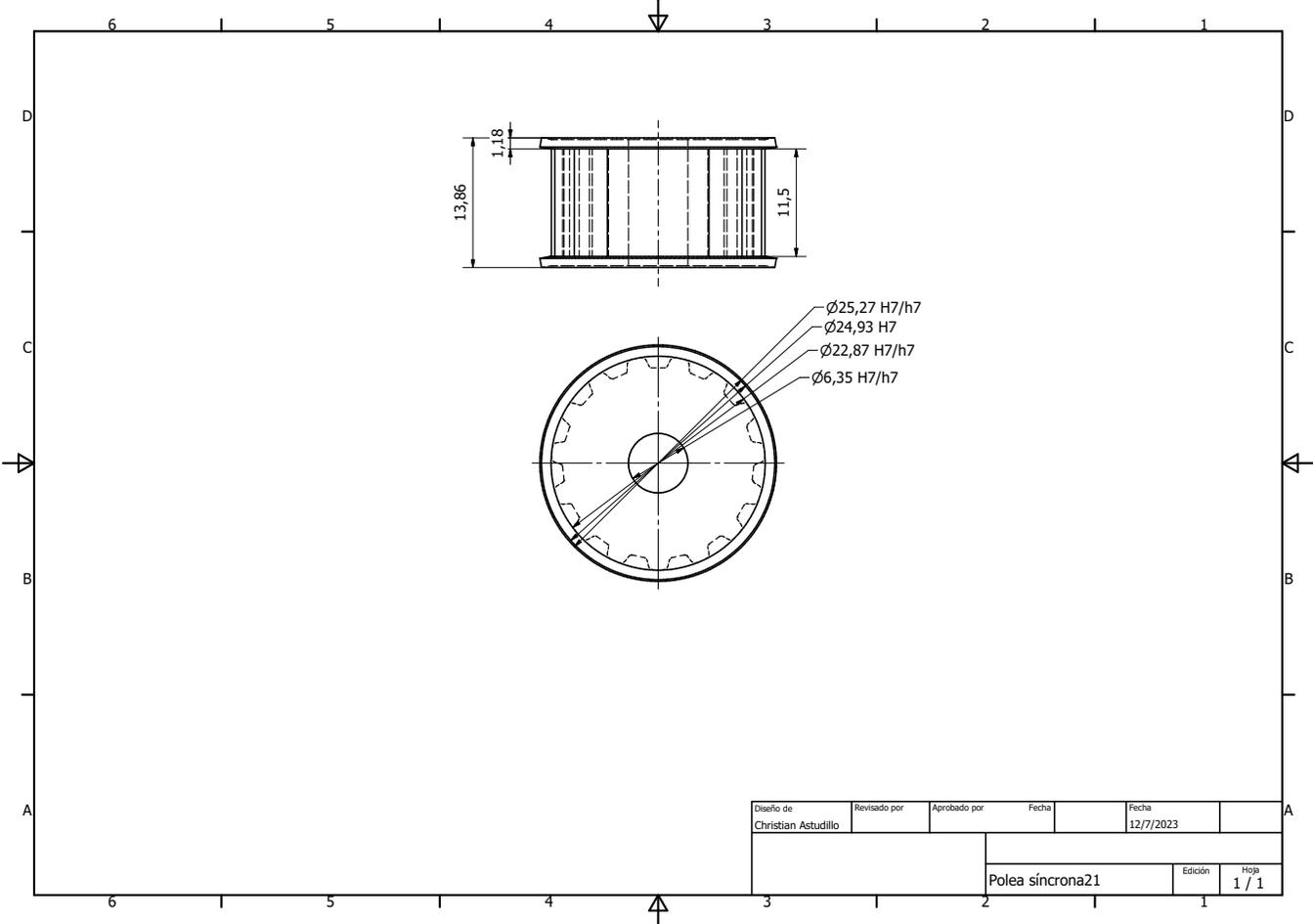
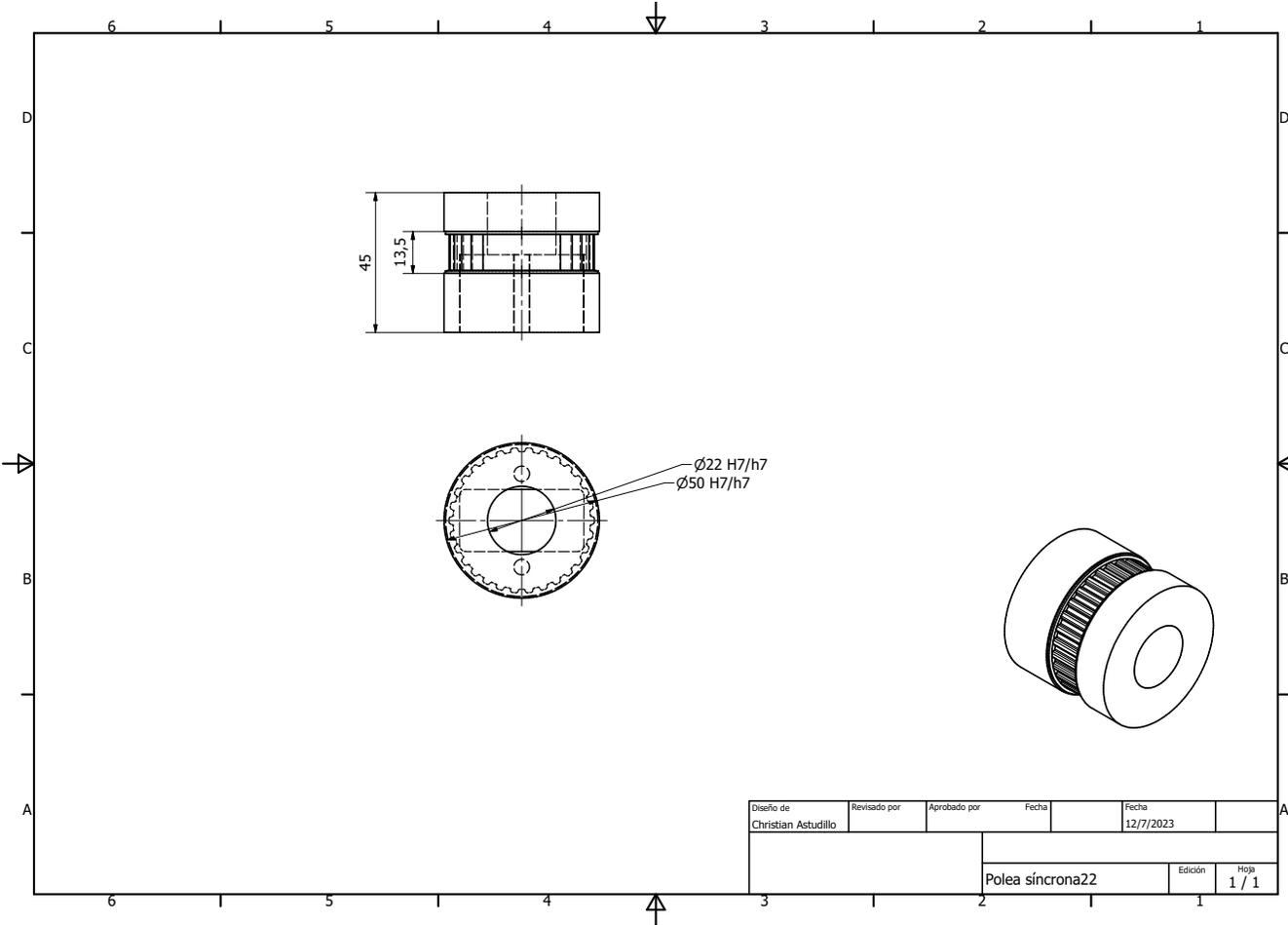


Figura 72

PLANO POLEA SÍNCRONA 22.



Diseño de	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha	
Christian Astudillo				12/7/2023	
			Polea síncrona22	Edición	Hoja
				1	1 / 1

Figura 73

PLANO POLEA SÍNCRONA 23.

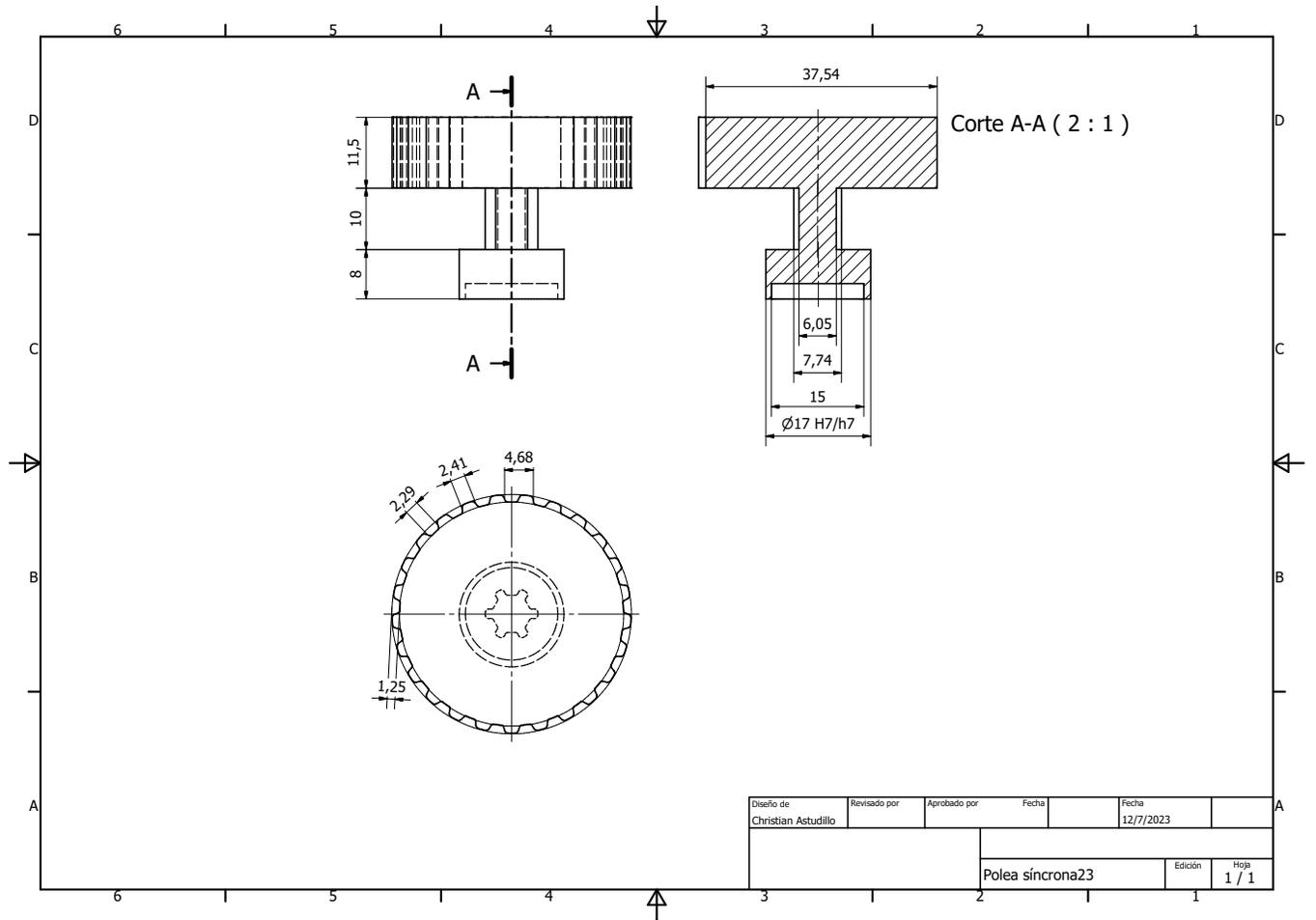


Figura 74

PLANO SHAFT.

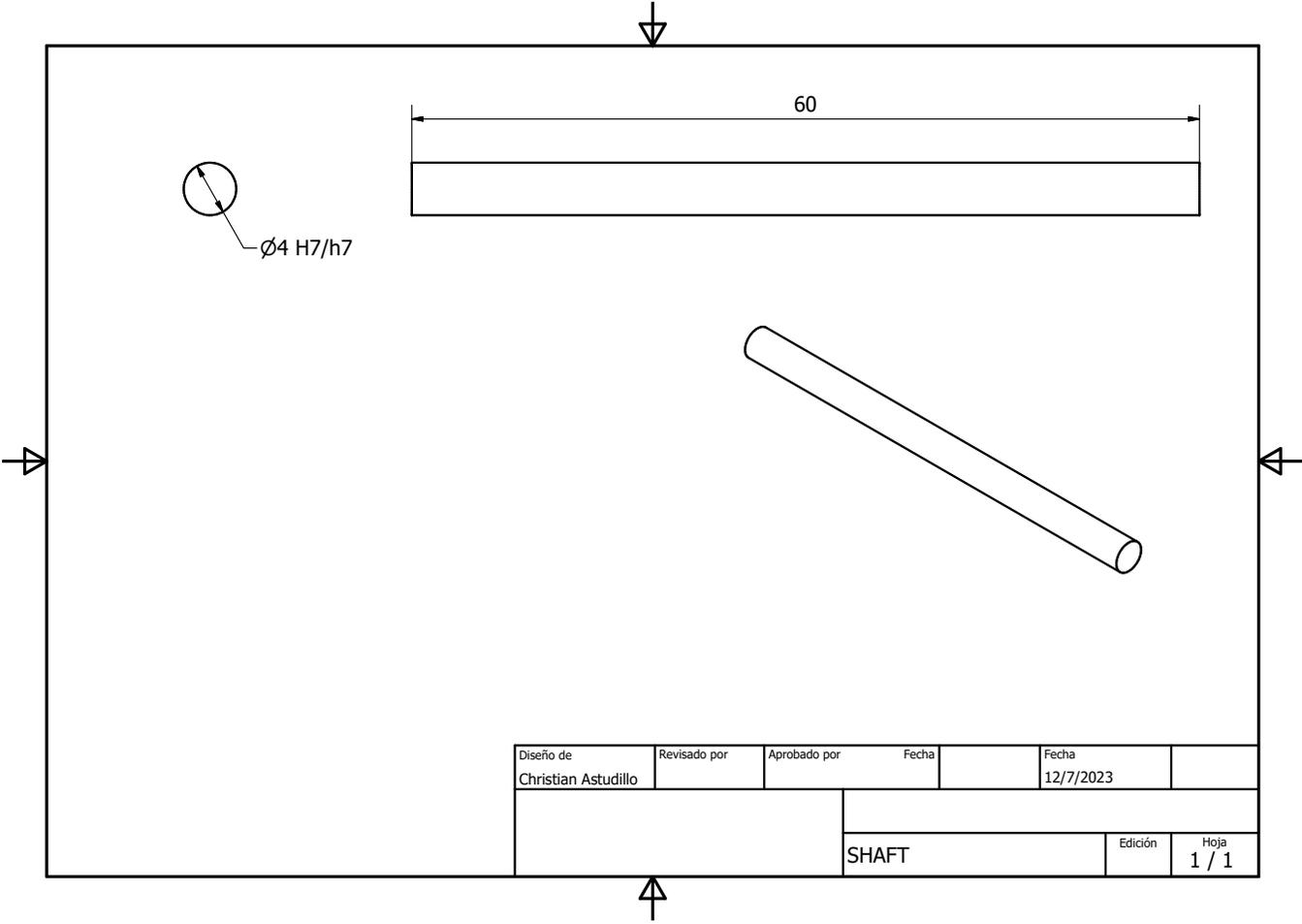
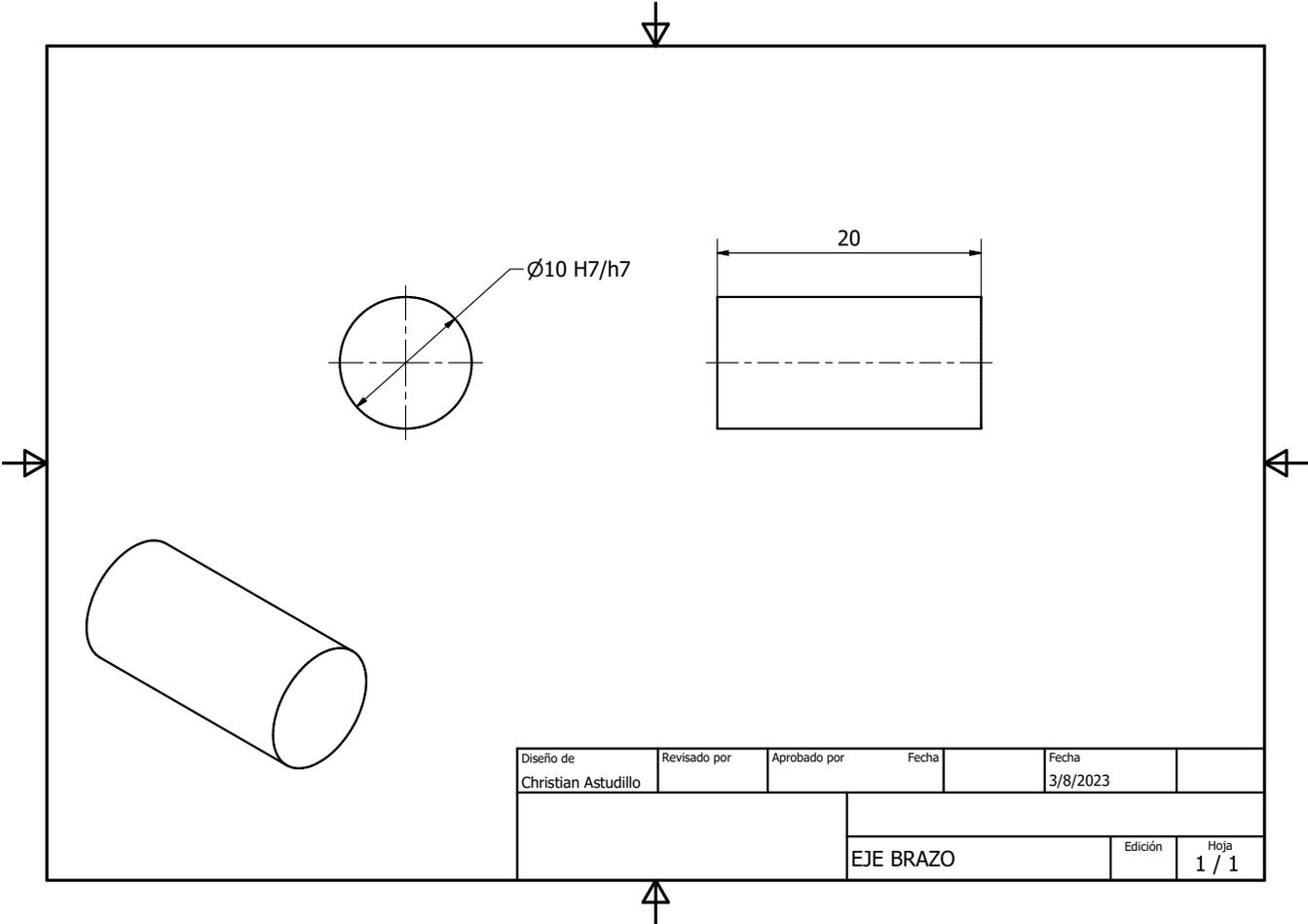


Figura 75

PLANO EJE BRAZO..



Diseño de	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha	
Christian Astudillo				3/8/2023	
EJE BRAZO				Edición	Hoja
					1 / 1

Anexo C: Hojas de Datos

Figura 76

Hoja de datos transistor IGBT.



2.0 Amp Output Current IGBT Gate Drive Optocoupler

Technical Data

HCPL-3120
HCPL-J312
HCNW3120

Features

- 2.0 A Minimum Peak Output Current
- 15 kV/ μ s Minimum Common Mode Rejection (CMR) at $V_{CM} = 1500$ V
- 0.5 V Maximum Low Level Output Voltage (V_{OL}) Eliminates Need for Negative Gate Drive
- $I_{CC} = 5$ mA Maximum Supply Current
- Under Voltage Lock-Out Protection (UVLO) with Hysteresis
- Wide Operating V_{CC} Range: 15 to 30 Volts
- 500 ns Maximum Switching Speeds
- Industrial Temperature Range: -40°C to 100°C
- Safety Approval
UL Recognized
2500 Vrms for 1 min. for HCPL-3120
3750 Vrms for 1 min. for HCPL-J312
5000 Vrms for 1 min. for HCNW3120

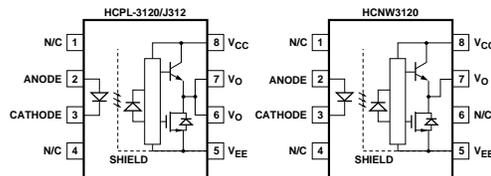
CSA Approval

VDE 0884 Approved
 $V_{IORM} = 630$ Vpeak for HCPL-3120 (Option 060)
 $V_{IORM} = 891$ Vpeak for HCPL-J312
 $V_{IORM} = 1414$ Vpeak for HCNW3120
BSI Certified (HCNW3120 only) (Pending)

Applications

- IGBT/MOSFET Gate Drive
- AC/Brushless DC Motor Drives
- Industrial Inverters
- Switch Mode Power Supplies

Functional Diagram



TRUTH TABLE

LED	$V_{CC} - V_{EE}$ "POSITIVE GOING" (i.e., TURN-ON)	$V_{CC} - V_{EE}$ "NEGATIVE GOING" (i.e., TURN-OFF)	V_O
OFF	0 - 30 V	0 - 30 V	LOW
ON	0 - 11 V	0 - 9.5 V	LOW
ON	11 - 13.5 V	9.5 - 12 V	TRANSITION
ON	13.5 - 30 V	12 - 30 V	HIGH

A 0.1 μ F bypass capacitor must be connected between pins 5 and 8.

CAUTION: It is advised that normal static precautions be taken in handling and assembly of this component to prevent damage and/or degradation which may be induced by ESD.

Nota: Hoja de datos transistor IGBT utilizado en el ESC

Figura 77

Hoja de datos Optoacoplador.

NTD110N02R, STD110N02R

MOSFET – Power, N-Channel, DPAK

24 V, 110 A

Features

- Planar HD3e Process for Fast Switching Performance
- Low $R_{DS(on)}$ to Minimize Conduction Loss
- Low C_{iss} to Minimize Driver Loss
- Low Gate Charge
- Optimized for High Side Switching Requirements in High-Efficiency DC-DC Converters
- S Prefix for Automotive and Other Applications Requiring Unique Site and Control Change Requirements; AEC-Q101 Qualified and PPAP Capable
- These Devices are Pb-Free and are RoHS Compliant

MAXIMUM RATINGS ($T_J = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Rating	Symbol	Value	Unit
Drain-to-Source Voltage	V_{DS}	24	V
Gate-to-Source Voltage – Continuous	V_{GS}	± 20	V
Thermal Resistance – Junction-to-Case	$R_{\theta JC}$	1.35	$^\circ\text{C/W}$
Total Power Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$	P_D	110	W
Drain Current	I_D	110	A
– Continuous @ $T_C = 25^\circ\text{C}$, Chip	I_D	110	A
– Continuous @ $T_C = 25^\circ\text{C}$	I_D	32	A
Limited by Package	I_D	110	A
– Continuous @ $T_A = 25^\circ\text{C}$	I_D	110	A
Limited by Wires	I_D	110	A
– Single Pulse ($t_p = 10 \mu\text{s}$)			
Thermal Resistance			
– Junction-to-Ambient (Note 1)	$R_{\theta JA}$	52	$^\circ\text{C/W}$
– Total Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$	P_D	2.88	W
– Drain Current – Continuous @ $T_A = 25^\circ\text{C}$	I_D	17.5	A
Thermal Resistance			
– Junction-to-Ambient (Note 2)	$R_{\theta JA}$	100	$^\circ\text{C/W}$
– Total Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$	P_D	1.5	W
– Drain Current – Continuous @ $T_A = 25^\circ\text{C}$	I_D	12.5	A
Operating and Storage Temperature Range	T_J, T_{stg}	-55 to 175	$^\circ\text{C}$
Single Pulse Drain-to-Source Avalanche Energy – Starting $T_J = 25^\circ\text{C}$ ($V_{DD} = 50 \text{ Vdc}$, $V_{GS} = 10 \text{ Vdc}$, $I_L = 15.5 \text{ Apk}$, $L = 1.0 \text{ mH}$, $R_G = 25 \Omega$)	E_{AS}	120	mJ
Maximum Lead Temperature for Soldering Purposes, (1/8" from case for 10 s)	T_L	260	$^\circ\text{C}$

Stresses exceeding those listed in the Maximum Ratings table may damage the device. If any of these limits are exceeded, device functionality should not be assumed, damage may occur and reliability may be affected.

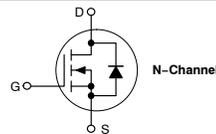
1. When surface mounted to an FR4 board using 0.5 sq in drain pad size.
2. When surface mounted to an FR4 board using the minimum recommended pad size.



ON Semiconductor®

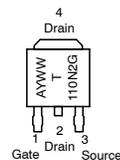
<http://onsemi.com>

$V_{(BR)DSS}$	$R_{DS(on)}$ TYP	I_D MAX
24 V	4.1 m Ω @ 10 V	110 A



DPAK
CASE 369AA
(Surface Mount)
STYLE 2

MARKING DIAGRAM & PIN ASSIGNMENT



A = Assembly Location*
Y = Year
WW = Work Week
T110N2 = Device Code
G = Pb-Free Package

* The Assembly Location code (A) is front side optional. In cases where the Assembly Location is stamped in the package, the front side assembly code may be blank.

ORDERING INFORMATION

See detailed ordering and shipping information on page 5 of this data sheet.

Nota: Hoja de datos de Opto-acoplador utilizado en el ESC

Figura 78

Hoja de datos Optoacoplador.



2.0 Amp Output Current IGBT Gate Drive Optocoupler

Technical Data

HCPL-3120
HCPL-J312
HCNW3120

Features

- 2.0 A Minimum Peak Output Current
- 15 kV/ μ s Minimum Common Mode Rejection (CMR) at $V_{CM} = 1500$ V
- 0.5 V Maximum Low Level Output Voltage (V_{OL}) Eliminates Need for Negative Gate Drive
- $I_{CC} = 5$ mA Maximum Supply Current
- Under Voltage Lock-Out Protection (UVLO) with Hysteresis
- Wide Operating V_{CC} Range: 15 to 30 Volts
- 500 ns Maximum Switching Speeds
- Industrial Temperature Range: -40°C to 100°C
- Safety Approval
 UL Recognized
 2500 Vrms for 1 min. for HCPL-3120
 3750 Vrms for 1 min. for HCPL-J312
 5000 Vrms for 1 min. for HCNW3120

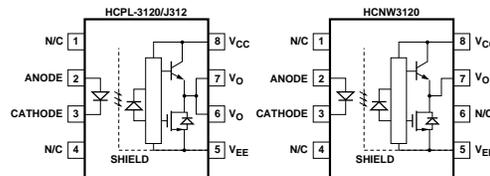
CSA Approval

VDE 0884 Approved
 $V_{IORM} = 630$ Vpeak for HCPL-3120 (Option 060)
 $V_{IORM} = 891$ Vpeak for HCPL-J312
 $V_{IORM} = 1414$ Vpeak for HCNW3120
BSI Certified (HCNW3120 only) (Pending)

Applications

- IGBT/MOSFET Gate Drive
- AC/Brushless DC Motor Drives
- Industrial Inverters
- Switch Mode Power Supplies

Functional Diagram



TRUTH TABLE

LED	$V_{CC} - V_{EE}$ "POSITIVE GOING" (i.e., TURN-ON)	$V_{CC} - V_{EE}$ "NEGATIVE GOING" (i.e., TURN-OFF)	V_O
OFF	0 - 30 V	0 - 30 V	LOW
ON	0 - 11 V	0 - 9.5 V	LOW
ON	11 - 13.5 V	9.5 - 12 V	TRANSITION
ON	13.5 - 30 V	12 - 30 V	HIGH

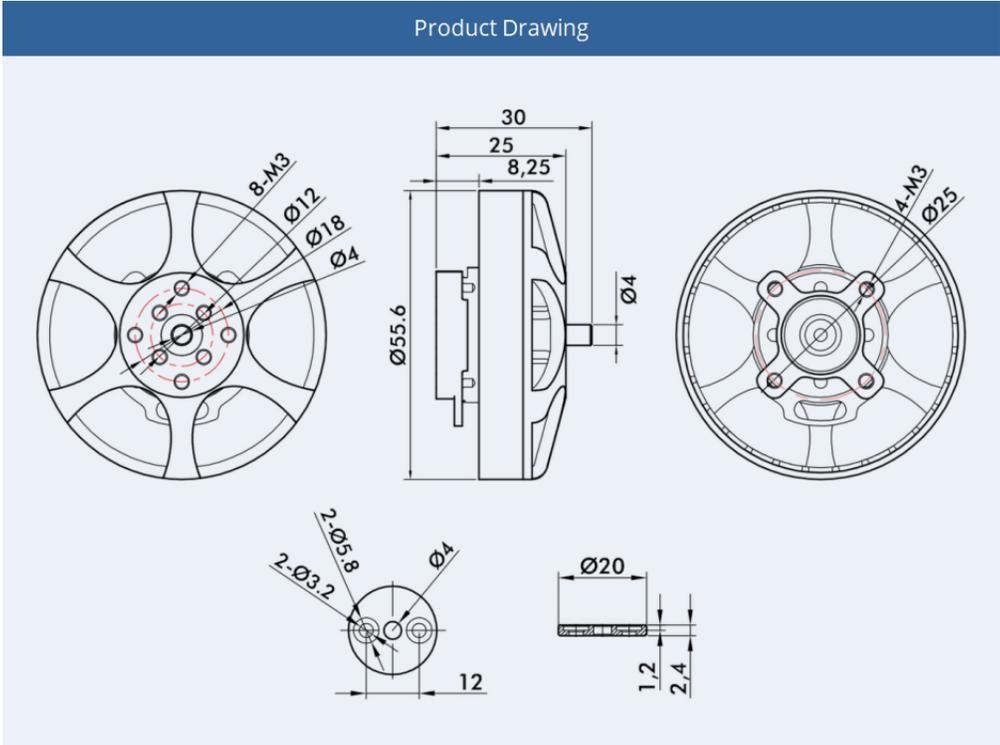
A 0.1 μ F bypass capacitor must be connected between pins 5 and 8.

CAUTION: It is advised that normal static precautions be taken in handling and assembly of this component to prevent damage and/or degradation which may be induced by ESD.

Nota: Hoja de datos de Opto-acoplador utilizado en el ESC

Figura 79

Especificaciones mecánicas del Motor.



Nota: Especificaciones mecánicas del Motor de actuación principal.

Figura 80

Especificaciones mecánicas del Motor.

Specifications	
Motor Size	Φ55.6*30mm
Stator	Imported silicon steel sheet; Anti-rust treatment; 180°C high temperature-resisting coatings
Configuration	24N28P
Shaft Diameter	IN: 6mm
Bearing	Imported 696ZZ
Magnet Level	150°C high temperature resistance: Level E
Lead Cable	60mm
Copper Wire	180°C high temperature resistance: Level H
Coil Insulation Test	500V
Centrifugal Cooling Design	YES
Rotor Dynamic Balance Standard	≤15mg
Motor Dynamic Balance Standard	≤10mg
IP	IP35
Packing Size	106*81*35mm

Nota: Especificaciones eléctricas del Motor de actuación principal.

Figura 81

Valores de consumo del Motor.

Type	Propeller	Throttle	Voltage (V)	Current (A)	Power (W)	RPM	Torque (N*m)	Thrust (g)	Efficiency (g/W)	Operating Temperature (°C)
MN5006 KV450	T-MOTOR P17*5.8" CF	40%	15.69	2.15	34	2353	0.09	438	12.99	45
		45%	15.67	2.85	45	2614	0.11	562	12.6	
		50%	15.63	3.78	59	2912	0.14	694	11.76	
		55%	15.58	4.91	76	3206	0.17	840	10.98	
		60%	15.55	6.09	95	3477	0.20	987	10.43	
		65%	15.50	7.41	115	3711	0.23	1144	9.97	
		70%	15.45	8.84	137	3942	0.25	1294	9.47	
		75%	15.40	10.49	161	4167	0.28	1453	9	
		80%	15.35	12.13	186	4377	0.31	1603	8.61	
		90%	15.23	15.95	243	4800	0.38	1934	7.97	
	100%	15.11	19.85	300	5153	0.44	2228	7.43		
	T-MOTOR P18*6.1" CF	40%	15.67	2.74	43	2271	0.12	555	12.92	64
		45%	15.63	3.62	57	2524	0.15	694	12.27	
		50%	15.59	4.84	75	2805	0.19	853	11.31	
		55%	15.54	6.23	97	3067	0.22	1030	10.64	
		60%	15.49	7.74	120	3314	0.26	1204	10.03	
		65%	15.44	9.37	145	3534	0.29	1374	9.51	
		70%	15.37	11.22	173	3757	0.33	1540	8.93	
		75%	15.32	13.10	201	3959	0.37	1720	8.57	
		80%	15.25	15.27	233	4142	0.41	1911	8.21	
90%		15.10	19.98	302	4504	0.48	2274	7.54		
100%	14.96	24.82	371	4801	0.55	2609	7.03			

Note: Motor temperature is motor surface temperature @100% throttle running 10mins.
 (Date above based on benchtest are for reference only, comparison with that of other motor types is not recommended.)

Nota: Valores de consumo del Motor. de actuación principal.

Figura 82

Hoja de datos del actuador lineal.



Product Data Sheet



Standard Features:

- Compact design
- All aluminum frame and extension tube
- Nominal stroke lengths: 2" [50mm], 4" [100mm], 6" [150mm], 8" [200mm], 10" [250mm], 12" [300mm]
- Input voltage: 12VDC, 24VDC
- Standard gear ratio: 20:1 [other ratios available]
- Dynamic load range: 34 lbs. [150 Newtons] –to- 225 lbs. [1000 Newtons]
- Maximum static load: 562 lbs. [2,500 Newtons]
- Maximum current draw: 3.2 Amps @ 12 VDC
- Speed at no load: 0.28 in/sec [7 mm/sec] –to- 1.73 in/sec [43.9 mm/sec]
- Speed at full load: 0.22 in/sec [5.5 mm/sec] –to- 1.44 in/sec [36.5 mm/sec]
- Standard preset limit switches at both ends of stroke
- Noise level: ≤70dB
- Mounting hole diameter (both ends): 1/4" [6.4mm]
- Duty cycle: 25% or 1 min continuous operation in 4 min.
- Working temperature: -13F [-25C] to +149F [+65C]
- IP rating: IP65
- Certified: CE Marking, Electromagnetic Compatibility Directive 2014/30/EU (nylon pinion gear version only)

Accessories:

- Mounting brackets
- Direction reversing switches
- Wired and wireless controllers
- Direction reversing relays



Concentric International
1901 Bell Ave., Suite 18, Des Moines, IA 50315
www.concentricintl.com
Rev. 20201208