



# TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE TIANGUISTENCO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**TÍTULO:**

---

SISTEMA DE NAVEGACIÓN PARA UNA PLATAFORMA ROBÓTICA DE  
AUTOBALANCE

---

## TESIS

**PRESENTADA POR:**

HÉCTOR NÚÑEZ FLORES

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

INGENIERO MECATRÓNICO

**DIRECTOR:**

DR. HUGO YÁÑEZ BADILLO

SANTIAGO TIANGUISTENCO, DICIEMBRE 2023

# Índice

Resumen . . . . .	3
Introducción . . . . .	4
Planteamiento del problema . . . . .	5
Justificación . . . . .	6
Objetivos . . . . .	7
—1. Generalidades . . . . .	8
——1.1 Marco histórico . . . . .	8
————1.1.1 Mecánica clásica . . . . .	8
————1.1.2 Lagrangiano . . . . .	8
————1.1.3 Péndulo invertido . . . . .	9
————1.1.4 Controladores $P$ , $PI$ , $PD$ , $PID$ . . . . .	9
————1.1.5 Algoritmos $RRT$ . . . . .	10
————1.1.6 Alcelerómetros . . . . .	11
————1.1.7 Impresión 3D en robótica . . . . .	12
————1.1.8 Motorreductores . . . . .	12
————1.1.9 Funcion de trasferencia . . . . .	13
————1.1.10 Sensores de efeto Hall . . . . .	13
——1.2 Marco conceptaul . . . . .	14
————1.2.1 H-TWIP . . . . .	14
————1.2.2 Algoritmos de Control . . . . .	14
————1.2.3 Actuadores (motores) . . . . .	14
————1.2.4 Sensores de efecto Hall . . . . .	14
————1.2.5 Reguladores de voltaje Step Down . . . . .	15
————1.2.6 Acelerometros . . . . .	15
————1.2.7 Baterias $LiPo$ . . . . .	15
————1.2.8 Microcontroladores . . . . .	15
————1.2.9 Comunicación $I^2C$ . . . . .	15
————1.2.10 Programación en Arduino $IDE$ . . . . .	16
—2. Metodología 1 ( $H-TWIP$ ) . . . . .	17
——2.1 Realización del $H-TWIP$ . . . . .	17
————2.1.1 Diseño . . . . .	17
—————2.1.1.1 Etapa 1: Base . . . . .	18
—————2.1.1.2 Etapa 2: Potencia . . . . .	19
—————2.1.1.3 Etapa 3: Control . . . . .	21
—————2.1.1.4 Etapa 4: Sensor . . . . .	22

———-2.1.2 Creación . . . . .	23
———-2.1.3 Electronica . . . . .	25
—3. Metodología 2 (Sistema de navegación) . . . . .	28
———3.1 Simulación de un sistema de navegación . . . . .	28
———-3.1.1 Lagrangiano . . . . .	28
———-3.1.1.1 Coordenadas generalizadas . . . . .	31
———-3.1.1.2 Energía cinética ( $K$ ) y potencial ( $V$ ) . . . . .	32
———-3.1.1.3 Lagrangiano ( $L$ ) . . . . .	33
———-3.1.1.4 Generalización de las Ecuaciones de Euler-Lagrange ( $L$ ) . . . . .	34
———-3.1.2 Algoritmos <i>RRT</i> . . . . .	36
———-3.1.2.1 <i>RRT</i> LaValle 1998 . . . . .	36
———-3.1.2.2 <i>RRTConnect</i> . . . . .	39
———-3.1.2.3 <i>RRTConnect</i> ( <i>variación</i> ) . . . . .	40
Resultados . . . . .	42
———Resultados de la metodología 1 ( <i>H-TWIP</i> ) . . . . .	42
Conclusiones y recomendaciones . . . . .	46
Referencias . . . . .	48

## Resumen

La presente tesis aborda la construcción de un vehículo tipo *TWIP*, siguiendo una metodología estructurada en cuatro etapas fundamentales: Diseño, Creación, Electrónica e Implementación. En la fase de Diseño, se establecen las especificaciones y se planifica la estructura mecánica, mientras que en la etapa de Creación se lleva a cabo la fabricación de componentes mediante técnicas como impresión 3D. La fase de Electrónica se centra en la integración de sensores y actuadores, así como en el diseño de un sistema de control para mantener la estabilidad del vehículo. Finalmente, en la etapa de Implementación, se ensamblan todos los componentes, se realizan pruebas para verificar la estabilidad y se ajustan parámetros según sea necesario.

La tesis también aborda el desarrollo de un sistema de navegación mediante una metodología secundaria que consta de cuatro fases esenciales: Lagrangiano, Algoritmos *RRT*, Python e Integración. En la etapa de Lagrangiano, se realiza un análisis teórico basado en el principio de Lagrange para modelar y comprender la dinámica del sistema de navegación. La implementación de Algoritmos *RRT* se centra en la planificación de trayectorias eficientes y seguras. La fase de Python implica la codificación de algoritmos y funcionalidades del sistema utilizando este lenguaje de programación. La etapa final de Integración busca la convergencia de ambas metodologías para lograr un sistema de navegación completo y funcional.

# Introducción

La integración de tecnologías robóticas en el ámbito de la movilidad ha generado avances significativos en la creación de plataformas autónomas capaces de mantener el equilibrio dinámico en entornos cambiantes. En este contexto, el diseño y control de vehículos tipo *TWIP* (Two Wheels Inverted Pendulum, por sus siglas en inglés) representan un desafío apasionante en la búsqueda de soluciones innovadoras para la movilidad inteligente.

La singularidad distintiva de un vehículo tipo *TWIP* radica en su capacidad para equilibrarse sobre dos ruedas, desafiando las convenciones de la movilidad tradicional. A diferencia de los vehículos convencionales, que se apoyan en configuraciones más estables con cuatro ruedas, el vehículo tipo *TWIP* adopta una postura innovadora al equilibrarse sobre dos ruedas en una coreografía elegante y dinámica. Esta excepcionalidad no solo desafía las expectativas de estabilidad, sino que también redefine la respuesta del vehículo ante perturbaciones externas del entorno. La capacidad única del *TWIP* para neutralizar perturbaciones externas, adaptándose con agilidad a cambios imprevistos en su entorno, añade una dimensión extraordinaria a la experiencia de desplazamiento.

Este proyecto se centra en la ejecución de la construcción integral y el funcionamiento efectivo de un vehículo tipo *TWIP*. A lo largo de este trabajo, se explicará el análisis que se llevó a cabo en cada fase del proceso, desde la conceptualización y diseño inicial hasta la implementación práctica y las pruebas de funcionamiento. La construcción del vehículo tipo *TWIP* abordará la selección de materiales, la ingeniería de la estructura y la integración precisa de componentes clave. Paralelamente, la fase de operación se enfocó en la programación de algoritmos de control avanzados, la sincronización precisa de los actuadores y la optimización continua para lograr un equilibrio dinámico óptimo. Este enfoque holístico asegura no solo la construcción exitosa del vehículo tipo *TWIP*, sino también la consecución de un funcionamiento eficiente y estabilizado, cumpliendo con los objetivos establecidos en este proyecto de ingeniería.

Durante las secciones subsiguientes de este documento, se explorará en detalle tanto el diseño *CAD* (Computer-Aided Design, por sus siglas en inglés) del *TWIP* como las estrategias y consideraciones fundamentales para la efectiva implementación de un sistema de navegación. Este estudio no solo contribuirá al campo de la robótica móvil, sino que también abrirá nuevas perspectivas para la aplicación práctica de vehículos de autobalance en diversos escenarios, desde entornos industriales hasta soluciones avanzadas de movilidad urbana.

## Planteamiento del problema

Un péndulo invertido es un sistema mecánico en el cual un péndulo, que normalmente oscilaría libremente hacia abajo bajo la influencia de la gravedad, se encuentra en una posición vertical, equilibrándose sobre un punto de apoyo móvil o una plataforma. Este sistema es especialmente interesante porque la posición vertical es inherentemente inestable, cualquier pequeña perturbación puede hacer que el péndulo caiga o se desplace lejos de la posición vertical, esto lo convierte en un problema desafiante y un área de estudio en el campo de la dinámica y el control.

Una vez que se consigue exitosamente mantener el péndulo invertido en una posición vertical, se presenta el desafío adicional de llevar a cabo un movimiento controlado desde un punto  $A$  hasta un punto  $B$  en el espacio. El objetivo central consiste en idear y aplicar una estrategia de control que permita al péndulo invertido ejecutar una trayectoria fluida y precisa desde su punto de partida en el punto  $A$ , donde se encuentra verticalmente, hacia el punto de destino en el punto  $B$ . Superar este reto implica abordar varios aspectos, tales como garantizar una transición sin problemas desde mantener el péndulo en posición vertical, planificar la trayectoria exacta que el péndulo debe seguir, y generar esfuerzos de control con precisión para asegurar el seguimiento de la trayectoria deseada. Además, el control debe ser adaptable a cambios en las condiciones dinámicas durante el movimiento y capaz de contrarrestar posibles perturbaciones.

## Justificación

El desarrollo de un vehículo tipo *TWIP* presenta desafíos considerables que exigen un enfoque cuidadoso. La dificultad de mantener la estabilidad dinámica, dada la naturaleza inestable del péndulo invertido, exige la necesidad de un control en tiempo real capaz de neutralizar perturbaciones externas del ambiente. La presencia de no linealidad y no estacionariedad en el sistema requiere la aplicación de algoritmos de control avanzados, mientras que la precisión de los sensores, encargados de medir la posición angular y la velocidad de los motores, es esencial para evitar desviaciones que podrían afectar la capacidad del vehículo para mantenerse en posición vertical. Estos retos se ven acentuados por la necesidad de un diseño *CAD* mecánico y práctico adaptable a diversas condiciones del terreno. En conjunto, estos elementos complejos subrayan la naturaleza desafiante del proceso de desarrollo de un vehículo tipo *TWIP*, demandando una integración meticulosa de conocimientos en ingeniería mecánica, electrónica y de control.

Este proyecto beneficia principalmente a aquellos que estén dispuestos a emprender la investigación y desarrollo tecnológico en el campo de la robótica y el control de sistemas dinámicos, a las comunidades estudiantiles, contribuyendo al crecimiento intelectual, la innovación educativa y la formación de habilidades técnicas y científicas entre los miembros de dichas comunidades y a trabajos futuros para proporcionar apoyo y conocimientos para llevar a cabo su propósito.

Los vehículos tipo *TWIP* desempeñan un papel fundamental en diversos campos, desde la investigación y desarrollo hasta la investigación en robótica. Estos sistemas se utilizan extensamente para probar y mejorar algoritmos de control, así como para simular y abordar problemas de control avanzados. Su versatilidad también se extiende a la investigación en robótica, donde los vehículos tipo *TWIP* sirven como modelos para comprender el desplazamiento y el equilibrio en entornos dinámicos.

El impacto técnico de los vehículos tipo *TWIP* se refleja en el avance de algoritmos de control y sistemas de estabilización, contribuyendo a mejorar las técnicas de control dinámico. Este progreso no solo tiene implicaciones directas en la estabilidad y rendimiento de estos vehículos, sino que también influye metodológicamente en la investigación y diseño en campos como la ingeniería y la robótica. La necesidad de abordar desafíos específicos, como la estabilidad dinámica, impulsa el desarrollo de nuevas metodologías y enfoques en estas disciplinas, destacando la interconexión entre el avance técnico y la evolución de los métodos de investigación[1].

# Objetivos

## General

- Desarrollar un sistema de navegación mediante la teoría de árboles aleatorios de rápida exploración para resolver el problema de planificación de rutas de una plataforma robótica de autobalance.

## Específicos

- Describir el modelo matemático del robot mediante las ecuaciones de movimiento de Lagrange para construir un modelo de simulación.
- Analizar los diferentes algoritmos basados en la teoría *RRT* mediante representaciones de grafos para determinar sus principales características.
- Diseñar el modelo *CAD* de un péndulo invertido, considerando aspectos de estabilidad y funcionalidad, para su posterior fabricación e implementación en un sistema de control.
- Diseñar un controlador de movimiento mediante la teoría de control no lineal para que el robot se mueva de manera satisfactoria.
- Construir un modelo de simulación mediante el lenguaje de programación Python para visualizar el movimiento del robot.



# 1. Generalidades

## 1.1 Marco histórico

### — 1.1.1 Mecánica clásica —

La historia de la mecánica clásica se remonta a la antigua Grecia, donde filósofos como Aristóteles sentaron las bases conceptuales de esta disciplina. En el siglo IV a.C., Aristóteles propuso una teoría del movimiento basada en la observación y el razonamiento lógico. Según él, los objetos se mueven naturalmente hacia su lugar propio en el cosmos. Estableció una clasificación del movimiento en términos de movimientos naturales y violentos. Sin embargo, fue durante el Renacimiento y el siglo XVII cuando se produjo un avance significativo en la mecánica clásica. En esta época, el interés por la ciencia y la experimentación se intensificó. Galileo Galilei (1564-1642) es considerado uno de los padres de la física moderna. Mediante experimentos, Galileo demostró que los objetos en caída libre tienen una aceleración constante y que el tiempo de caída es independiente de su masa. Además, introdujo el concepto de inercia, afirmando que los objetos en reposo tienden a permanecer en reposo y los objetos en movimiento tienden a mantener su velocidad constante.

La figura más influyente en el desarrollo de la mecánica clásica es Sir Isaac Newton (1643-1727). En su obra maestra "Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica" (Principios matemáticos de la filosofía natural), publicada en 1687, Newton formuló las tres leyes del movimiento que llevan su nombre. Estas leyes establecen las relaciones entre las fuerzas, las masas y las aceleraciones de los objetos, proporcionando un marco teórico sólido para describir el movimiento. Además de las leyes del movimiento, Newton desarrolló la ley de la gravitación universal. Esta ley establece que cualquier objeto con masa ejerce una fuerza de atracción sobre cualquier otro objeto con masa. La magnitud de esta fuerza depende de las masas de los objetos y de la distancia que los separa. La ley de la gravitación universal permitió explicar los movimientos de los planetas alrededor del Sol y sentó las bases de la mecánica celeste (Goicolea Ruigómez, 2010.)

### — 1.1.2 Lagrangiano —

El lagrangiano es una importante herramienta matemática utilizada en el campo de la mecánica clásica. Su historia se remonta al siglo XVIII, cuando el matemático italiano Joseph-Louis Lagrange desarrolló la formulación lagrangiana de la mecánica, que proporciona una descripción más elegante y general de los sistemas físicos en comparación con los enfoques anteriores. Lagrange nació el 25 de enero de 1736 en Turín, Italia. Estudió matemáticas y mecánica en la Universidad de Turín, y luego continuó su educación en París, donde fue influenciado por los grandes matemáticos de la época, como Euler y d'Alembert. En 1788, publicó su obra maestra, "Mécanique Analytique" (Mecánica Analítica), donde presentó el formalismo lagrangiano.

El lagrangiano se basa en el principio de mínima acción, que establece que el camino real que toma un sistema físico entre dos puntos en el tiempo es aquel para el cual la acción (una medida integral de energía a lo largo del tiempo) es mínima. Lagrange utilizó este

principio como base para desarrollar una forma unificada de describir los movimientos de cualquier sistema mecánico, desde partículas individuales hasta sistemas complejos. Lagrange introdujo el concepto de coordenadas generalizadas, que son variables que describen completamente el estado del sistema. Estas coordenadas pueden ser independientes de las coordenadas cartesianas tradicionales y están elegidas de manera que simplifiquen las ecuaciones de movimiento. También formuló una función llamada lagrangiano, que es una función de las coordenadas generalizadas y sus derivadas con respecto al tiempo. Esta función captura la energía cinética y potencial del sistema y, al aplicar el principio de mínima acción, se derivan las ecuaciones de movimiento del sistema. La formulación lagrangiana tiene varias ventajas, como la capacidad de describir sistemas con restricciones y la posibilidad de utilizar simetrías y conservaciones para simplificar los cálculos. Además, proporciona una base sólida para la formulación de teorías físicas más avanzadas, como la mecánica cuántica y la teoría de campos (Soldovieri C, 2013).

### — 1.1.3 Péndulo invertido —

Un péndulo invertido es un sistema físico que consta de una barra o varilla vertical con un peso en uno de sus extremos. A diferencia de un péndulo convencional, donde el peso se encuentra en el extremo inferior y oscila libremente, en un péndulo invertido el peso se ubica en el extremo superior y está sujeto a un mecanismo de equilibrio o control para mantenerlo en una posición vertical. La estabilidad del péndulo invertido se logra mediante un sistema de control que puede ajustar la posición del peso de manera activa y mantenerlo en equilibrio vertical. Este sistema de control puede ser implementado mediante diversos métodos, como controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo), controladores LQR (Regulador Cuadrático Lineal) u otras técnicas de control. El péndulo invertido es un objeto de estudio común en la teoría de control y la robótica, ya que presenta desafíos interesantes debido a su naturaleza no lineal y su comportamiento dinámico. Se utiliza en aplicaciones como sistemas de estabilización de vehículos, robots equilibradores y brazos robóticos.

La estabilidad del péndulo invertido se logra mediante el control continuo de la posición y la velocidad del peso en el extremo superior. Al detectar cualquier desviación de la posición vertical, el sistema de control realiza ajustes adecuados para contrarrestar la desviación y mantener el equilibrio. Esto se logra a través de la retroalimentación del estado del sistema y el uso de algoritmos de control para tomar decisiones en tiempo real. El estudio y el control del péndulo invertido han llevado al desarrollo de técnicas avanzadas en el campo de la teoría de control, como el control óptimo y el control predictivo. Estas técnicas permiten un control preciso y eficiente del péndulo invertido, lo que lo convierte en un objeto de investigación y aplicación en diversos campos tecnológicos (Roca Cusido, 2014).

### — 1.1.4 Controladores $P$ , $PI$ , $PD$ , $PID$ —

La historia de los controladores  $P$ ,  $PI$ ,  $PD$  y  $PID$  está intrínsecamente ligada al desarrollo de la teoría de control automático a lo largo del tiempo. Estos controladores han desempeñado un papel fundamental en la regulación de sistemas y han evolucionado para abordar los desafíos asociados con la estabilidad, la precisión y la respuesta de los sistemas de control.

El control proporcional ( $P$ ) fue uno de los primeros conceptos desarrollados en la teoría de control automático. Surgió en el siglo  $XIX$  cuando los ingenieros comenzaron a experimentar con sistemas de control en aplicaciones industriales y de automatización. El controlador proporcional utiliza una ganancia proporcional para ajustar la señal de control en función del error presente en el sistema. Cuanto mayor es el error, mayor es la acción de control aplicada. Aunque el control proporcional es simple y fácil de implementar, puede presentar limitaciones en términos de estabilidad y respuesta transitoria.

Con el objetivo de mejorar la precisión y la estabilidad del control, se introdujo el controlador integral ( $I$ ). El controlador integral acumula el error a lo largo del tiempo y lo utiliza para ajustar la señal de control. De esta manera, se elimina el error de estado estacionario y se mejora la respuesta del sistema. El controlador integral es especialmente útil cuando hay perturbaciones o variaciones en los parámetros del sistema que generan un error constante. En la misma época, también se desarrolló el controlador derivativo ( $D$ ) como una adición al control proporcional. El controlador derivativo utiliza la tasa de cambio del error para ajustar la señal de control. Esto implica anticipar los cambios en el error y proporcionar una respuesta rápida. La acción derivativa puede mejorar la respuesta transitoria del sistema y reducir el tiempo de estabilización. Sin embargo, también puede introducir amplificación de ruido y sensibilidad a perturbaciones.

A mediados del siglo  $XX$ , se consolidó el controlador proporcional-integral-derivativo ( $PID$ ) como una solución ampliamente utilizada en la teoría de control. El controlador  $PID$  combina las acciones proporcional, integral y derivativa para proporcionar un control más completo y robusto de los sistemas. La acción proporcional se encarga de ajustar la señal de control en función del error presente, la acción integral acumula el error a lo largo del tiempo para eliminar el error de estado estacionario, y la acción derivativa anticipa los cambios en el error para mejorar la respuesta transitoria. La combinación de estas acciones permite una mayor precisión, estabilidad y adaptabilidad a diferentes condiciones de operación. Desde su introducción, el controlador  $PID$  ha sido objeto de una amplia investigación y desarrollo. Se han propuesto numerosas variaciones y mejoras en los algoritmos de control  $PID$  para abordar desafíos específicos en diferentes aplicaciones. Además, se han desarrollado técnicas de sintonización avanzadas para ajustar adecuadamente los parámetros del controlador  $PID$  y lograr un rendimiento óptimo (Piedrafita Moreno, 1999).

### — 1.1.5 Algoritmos $RRT$ —

Los algoritmos  $RRT$  (Rapidly-exploring Random Tree, por sus siglas en inglés) son una familia de algoritmos ampliamente utilizados en robótica y planificación de movimiento. Estos algoritmos permiten la generación eficiente de trayectorias en espacios de configuración complejos y altamente dimensional. El objetivo principal de los algoritmos  $RRT$  es explorar rápidamente el espacio de configuración del robot para encontrar una trayectoria segura y factible entre un estado inicial y un estado objetivo. A diferencia de los enfoques tradicionales de planificación basados en grafos, como el algoritmo  $A^*$  o el  $PRM$  (Probabilistic Roadmap Method, por sus siglas en inglés), los  $RRT$  no requieren una discretización previa del espacio de configuración y se adaptan bien a espacios de alta dimensionalidad.

El proceso de generación de un *RRT* comienza con la creación de un árbol que representa las diferentes configuraciones alcanzables por el robot. El árbol se construye de manera incremental, añadiendo nodos en función de una estrategia de muestreo aleatorio. En cada iteración, se genera un nuevo punto de muestreo aleatorio en el espacio de configuración y se busca el nodo más cercano en el árbol existente. Luego, se extiende el árbol agregando un nuevo nodo en dirección al punto de muestreo, tomando en cuenta las restricciones de movimiento y evitando colisiones con obstáculos. La exploración continua y aleatoria del espacio de configuración por parte del algoritmo *RRT* permite una cobertura amplia y eficiente del espacio, lo que facilita la búsqueda de trayectorias en entornos complejos. A medida que se agregan más y más nodos al árbol, la probabilidad de encontrar una ruta entre el estado inicial y el estado objetivo aumenta significativamente.

Una vez que se encuentra una trayectoria factible entre el estado inicial y el estado objetivo, se pueden aplicar técnicas adicionales, como la suavización de trayectorias o la optimización de costos, para mejorar aún más la solución encontrada por el algoritmo RRT. Los algoritmos RRT han demostrado ser muy útiles en una amplia gama de aplicaciones, como la planificación de movimientos de robots móviles, la navegación autónoma de robots en entornos desconocidos, la generación de movimientos para brazos robóticos y la planificación de trayectorias para robots humanoides. Su eficiencia y capacidad para manejar espacios de configuración complejos los convierten en una herramienta poderosa en la planificación de movimiento y la navegación robótica (M. LaValle, 2006).

### — 1.1.6 Acelerómetros —

Los acelerómetros pueden medir la aceleración en una o varias direcciones, dependiendo del tipo de acelerómetro utilizado. Los acelerómetros de una sola dirección miden la aceleración en un eje específico, como el eje X, Y o Z. Por otro lado, los acelerómetros de tres ejes son capaces de medir la aceleración en las tres direcciones espaciales: X, Y y Z.

Existen diferentes tipos de acelerómetros, pero uno de los más comunes es el acelerómetro de tipo *MEMS* (Microelectromechanical Systems, por sus siglas en inglés). Estos acelerómetros se basan en la tecnología de microfabricación, lo que permite miniaturizar el sensor y facilitar su integración en dispositivos compactos. El funcionamiento básico de un acelerómetro MEMS se basa en la medición de la deformación mecánica de una estructura microscópica, generalmente mediante la detección de cambios en la capacitancia o resistencia causados por la aceleración. Cuando un objeto acelerado experimenta una fuerza, la estructura interna del acelerómetro se deforma, generando cambios en las propiedades eléctricas del sensor. Estos cambios se convierten en señales eléctricas proporcionales a la aceleración medida.

Los acelerómetros se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones. En dispositivos móviles, por ejemplo, se utilizan para detectar la orientación del dispositivo y cambiar automáticamente la orientación de la pantalla. En la industria automotriz, los acelerómetros se utilizan para activar los sistemas de seguridad en caso de colisión. En la navegación inercial, se utilizan para medir la aceleración y la inclinación de vehículos y embarcaciones. En la robótica, los acelerómetros se utilizan para el control del equilibrio y la detección de colisiones en robots (S. Beedy G. Ensell M. Kraft y. N. White, 2004).

### — 1.1.7 Impresión 3D en robótica —

La impresión 3D ha tenido un impacto significativo en el campo de la robótica al permitir nuevas posibilidades de diseño y fabricación. Esta tecnología revolucionaria utiliza la deposición capa por capa de material para crear estructuras y componentes tridimensionales a partir de un modelo digital. En la robótica, la impresión 3D ha simplificado el proceso de diseño y prototipado, al permitir la rápida creación de modelos asequibles. Esta capacidad ha acelerado el desarrollo de nuevos robots y sus componentes. Además, la impresión 3D ofrece beneficios clave en este campo:

- **Personalización y complejidad geométrica:** La impresión 3D posibilita la creación de formas complejas y geoméricamente intrincadas, que no serían factibles mediante los métodos de fabricación convencionales. Esto resulta especialmente útil en la robótica, donde las estructuras y piezas deben adaptarse a tareas y entornos específicos. Con la impresión 3D, los robots pueden diseñarse para cumplir requisitos precisos y adaptarse a diversas condiciones.
- **Ligereza y optimización estructural:** La capacidad de diseñar y fabricar componentes huecos y estructuras optimizadas en términos de peso es otra ventaja importante de la impresión 3D. Esto permite la creación de robots más livianos y eficientes, mejorando su movilidad y capacidad de carga. Asimismo, la impresión 3D permite la integración de componentes y mecanismos en una sola pieza, reduciendo la necesidad de ensamblaje y mejorando la resistencia y rigidez estructural.
- **Iteración rápida y reducción de costos:** La capacidad de realizar cambios rápidos en el diseño y fabricar prototipos en poco tiempo ha acelerado el proceso de desarrollo en robótica. Con la impresión 3D, los diseñadores pueden realizar ajustes y mejoras de forma ágil, lo que reduce el tiempo y los costos asociados con los métodos de fabricación tradicionales. Esto permite una mayor experimentación y refinamiento en el diseño de robots (H. L. Melba Kurman, 2013).

### — 1.1.8 Motorreductores —

Un motorreductor es un dispositivo que combina un motor eléctrico con un sistema de reducción de velocidad. Su función principal es disminuir la velocidad de rotación del eje de salida y aumentar el torque disponible. Esto permite que los motores puedan manejar cargas más pesadas y realizar trabajos que requieren fuerza adicional. El cálculo de la relación de entrada y salida en un motorreductor es esencial para determinar la relación de velocidad y torque entre el motor y el eje de salida. La relación de reducción se define como la proporción entre la velocidad del motor y la velocidad de salida. Para calcular la relación de reducción, se deben tener en cuenta dos factores clave: el número de dientes de la rueda de entrada (piñón) y el número de dientes de la rueda de salida (corona). Es importante destacar que la relación de reducción determina cómo el motorreductor cambiará la velocidad y el torque del sistema. Una relación de reducción más alta aumentará el torque disponible en el eje de salida, pero reducirá proporcionalmente la velocidad. Por otro lado, una relación de reducción más baja permitirá una mayor velocidad de salida, pero a costa de un menor torque disponible (D. Dudley J. Sprengers D. Schröder y. H. Yamashina, 2013).

### — 1.1.9 Funcion de trasferencia —

La función de transferencia es una herramienta matemática utilizada en el análisis y diseño de sistemas dinámicos. Proporciona una descripción matemática de la relación entre la entrada y la salida de un sistema en términos de frecuencia. A través de la función de transferencia, se pueden obtener importantes características y propiedades del sistema. La función de transferencia se representa como el cociente de dos polinomios, donde el numerador representa la salida del sistema y el denominador representa la entrada. Esta representación algebraica permite analizar y comprender cómo el sistema responde a diferentes frecuencias de entrada.

Algunos conceptos clave asociados con la función de transferencia incluyen:

- **Ganancia:** La función de transferencia puede indicar la ganancia del sistema, que es la relación entre la amplitud de la señal de salida y la señal de entrada en un determinado punto de frecuencia.
- **Retardo de fase:** La función de transferencia también proporciona información sobre el retardo de fase, que es el desfase entre la señal de entrada y la señal de salida en función de la frecuencia. Esto es crucial para comprender la respuesta temporal del sistema.
- **Frecuencias de corte:** La función de transferencia puede revelar las frecuencias de corte del sistema, que son los puntos en los que la amplitud de la respuesta del sistema comienza a disminuir o donde se produce un cambio significativo en la fase.
- **Estabilidad:** La función de transferencia puede utilizarse para analizar la estabilidad del sistema, identificando las frecuencias y las condiciones en las que el sistema puede volverse inestable (Norman S. Nise, 2007).

### — 1.1.10 Sensores de efeto Hall —

El efecto Hall, que es la base de los sensores de efecto Hall, fue descubierto por el físico estadounidense Edwin Hall en 1879 mientras realizaba investigaciones en el Johns Hopkins University. Edwin Hall estaba investigando el fenómeno mientras trabajaba con corriente eléctrica en una lámina metálica colocada en un campo magnético perpendicular. Observó que se generaba una diferencia de potencial en ángulo recto tanto con la dirección de la corriente como con la dirección del campo magnético. Este descubrimiento resultó ser fundamental para entender la relación entre campos magnéticos y corriente eléctrica. La fórmula matemática que describe este fenómeno es conocida como la ley de Hall, y establece que la diferencia de potencial (voltaje Hall) es proporcional tanto a la corriente que fluye a través del material como al campo magnético al que está expuesto.

A lo largo del tiempo, los científicos han utilizado este principio para desarrollar una variedad de dispositivos y tecnologías, entre ellas los sensores de efecto Hall. Estos sensores se aplican en una amplia gama de industrias debido a su capacidad para medir campos magnéticos y generar señales eléctricas proporcionales, lo que es esencial en aplicaciones como la detección de posición, velocidad, y control de motores (Christian Vázquez Gamarra, 2020).

## 1.2 Marco conceptual

### — 1.2.1 Vehículo tipo TWIP —

Un vehículo tipo *TWIP* (Two Wheels Inverted Pendulum, por sus siglas en inglés) es un tipo de vehículo robótico que se basa en el concepto de péndulo invertido. En este diseño, el vehículo cuenta con dos ruedas y un sistema de control que le permite mantener su equilibrio en posición vertical (Ruben Gil Huerta, 2004).

En este trabajo, el robot construido fue denominado *H-TWIP*, tomando las iniciales del diseñador, constructor y programador del dispositivo. Además de esta personalización, se le asignó el nombre que refleja su tipo de vehículo, destacando así la combinación de la identidad del creador y la naturaleza específica del robot.

### — 1.2.2 Algoritmos de Control —

**Algoritmos:** Es una serie de instrucciones detalladas que se siguen en un orden específico para lograr un resultado deseado. En el mundo de la informática, los algoritmos son esenciales para diseñar programas y sistemas que realicen tareas de manera sistemática y eficiente.

**Control:** en ingeniería de control, el término **control** se refiere al conjunto de técnicas y métodos utilizados para dirigir y manipular el comportamiento de un sistema dinámico con el objetivo de lograr un rendimiento deseado (Ogata, 2010).

Entonces, por lo tanto, un algoritmo de control es un conjunto de instrucciones diseñadas para dirigir el comportamiento de un sistema dinámico hacia un objetivo específico.

### — 1.2.3 Actuadores (motores) —

Un actuador es un dispositivo mecánico, eléctrico, hidráulico o neumático que convierte una señal de control en movimiento o acción física.

Un motor es un dispositivo que convierte energía en movimiento mecánico. Operan a través de la interacción de campos magnéticos y corrientes eléctricas, la expansión de gases, o la combustión de combustibles para generar fuerza y, en consecuencia, movimiento. Existen varios tipos de motores, y cada uno utiliza un principio específico para generar la fuerza motriz. En todo el trabajo cuando se ocupe el término **motor** se estará haciendo referencia a un motor eléctrico de corriente directa (*DC*).

**Motores Eléctricos:** Transforman la energía eléctrica en movimiento mecánico. Algunos ejemplos incluyen motores de corriente continua (*DC*), motores de corriente alterna (*AC*) y motores paso a paso (C. Krause & C. Krause, 2022).

### — 1.2.4 Sensores de efecto Hall —

En el desarrollo de este trabajo de investigación, se ha implementado exitosamente la integración de sensores de efecto Hall acoplados al motorreductor. El sensor de efecto Hall, también conocido como sonda o sensor Hall en honor a Edwin Herbert Hall, utiliza el efecto

Hall para medir campos magnéticos, corrientes o determinar la posición en la que se encuentra (Christian Vázquez Gamarra, 2020).

### — 1.2.5 Reguladores de voltaje Step Down —

Los reguladores de voltaje "step down", son componentes esenciales en el diseño de sistemas de suministro de energía eléctrica. Su función principal es reducir la tensión de entrada a un nivel de salida menor, lo que resulta efectivo en diversas aplicaciones donde se requiere un voltaje específico y constante para alimentar dispositivos electrónicos, sin embargo, si el voltaje de entrada cae por debajo del voltaje de salida requerido, el regulador no podrá proporcionar la salida de energía deseada.

### — 1.2.6 Acelerómetros —

Un acelerómetro es un dispositivo sensor que mide la aceleración experimentada por un objeto. La aceleración se refiere al cambio en la velocidad de un objeto en relación con el tiempo, y puede ser causada por cambios en la velocidad lineal o cambios en la dirección de movimiento. Los acelerómetros modernos suelen ser dispositivos microelectromecánicos (MEMS) que utilizan pequeñas estructuras mecánicas, como masas suspendidas, y sensores eléctricos para detectar cambios en la aceleración. Estos dispositivos son utilizados en una variedad de aplicaciones para medir y registrar la aceleración en tres dimensiones del espacio (ejes  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) (S. Beedy G. Ensell M. Kraft y. N. White, 2004).

### — 1.2.7 Baterías *LiPo* —

Las baterías *LiPo* (Lithium Polymer, por sus siglas en inglés), son dispositivos recargables de ion de litio conocidos por su alta densidad de energía y formato flexible. Estas baterías utilizan electrolitos poliméricos y son ideales para aplicaciones que requieren un suministro eficiente y ligero de energía, como en dispositivos portátiles, vehículos teledirigidos y drones (Davide Andrea, 2010).

### — 1.2.8 Microcontroladores —

Un microcontrolador es un tipo específico de circuito integrado que integra componentes clave como una unidad de procesamiento central (CPU), memoria, periféricos de entrada y salida, y, a menudo, interfaces de comunicación. La arquitectura de un microcontrolador se caracteriza por la cantidad de bits en su unidad de procesamiento central, lo que determina la cantidad de datos que puede procesar en cada operación. Por ejemplo, un microcontrolador de 8 bits realiza operaciones en datos de 8 bits a la vez, mientras que uno de 32 bits trabaja con datos de 32 bits (Ibrahim Dogan, 2007).

### — 1.2.9 Comunicación $I^2C$ —

La comunicación I2C (Inter-Integrated Circuit) utiliza un protocolo serial síncrono de dos cables para la transferencia de datos entre dispositivos electrónicos. Desarrollado original-



mente por Philips (ahora NXP Semiconductors), este protocolo es comúnmente empleado en sistemas embebidos y microcontroladores para facilitar la intercomunicación entre diversos componentes. Las conexiones físicas involucran dos líneas principales: SDA (Serial Data), que transporta información bidireccional, y SCL (Serial Clock), que sincroniza la transferencia de datos. Ambas líneas se conectan mediante resistencias de pull-up a la fuente de voltaje del sistema, asegurando niveles eléctricos adecuados para una comunicación fiable en el bus I2C (Ibrahim Dogan, 2007).

### — 1.2.10 Programación en Arduino *IDE* —

La programación de microcontroladores, ya sea en un contexto general o específicamente en la plataforma Arduino, implica la creación de software para controlar dispositivos integrados. Los pasos básicos incluyen la configuración del entorno de desarrollo, la elección del microcontrolador, la escritura del código en C/C++, la compilación del código en lenguaje de máquina y, finalmente, la carga del programa en el microcontrolador (Óscar Torrente Artero, 2013).

## 2. Metodología 1 (*H-TWIP*)

### 2.1 Realización del *H-TWIP*

A continuación se muestra en la figura 1 las distintas etapas que conforman la metodología para llevar a cabo la realización de un vehículo tipo *TWIP*. Este esquema visual proporciona una visión integral de las fases clave, desde el diseño inicial hasta la Programación final.

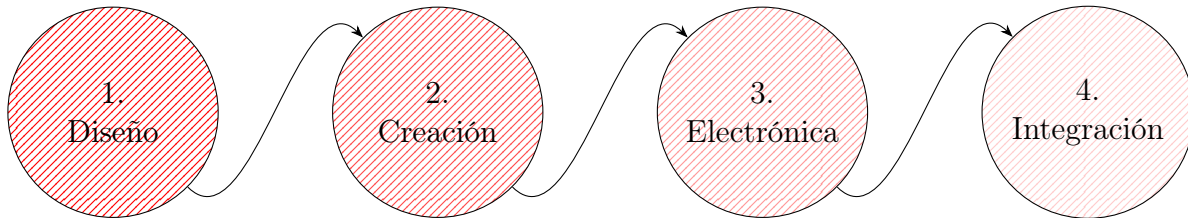


Figura 1: La metodología consta de cuatro fases, cada fase incluye subfases, documentación y controles de calidad para garantizar una ejecución de proyecto organizada y estructurada.

#### 2.1.1 Diseño

El diseño del proyecto comenzó con software especializado en diseño *CAD* para la obtención de planos y se estructura en cuatro partes como se puede observar en la figura 2: la base del vehículo que contempla los actuadores y sus respectivos sensores, la sección de potencia que aborda la distribución de las baterías y otros componentes relacionados con la regulación, y distribución de energía, la fase de control enfocada en la disposición estratégica de componentes para supervisar y dirigir movimientos mediante sistemas electrónicos, y la sección del sensor que coloca cuidadosamente el dispositivo de detección para que sea posible recopilar información precisa sobre el entorno y el estado del vehículo,

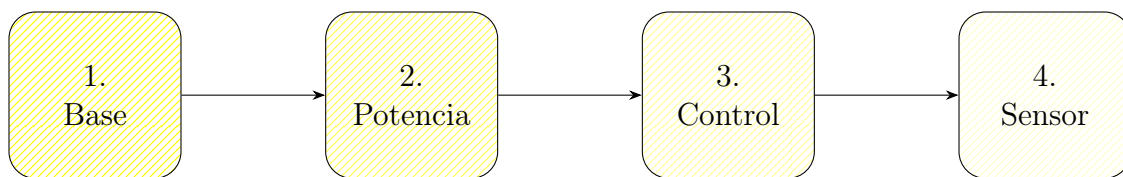


Figura 2: "Metodología empleada para el diseño del vehículo *H-TWIP*, las etapas se caracterizan por tener un enfoque secuencial donde cada etapa recibe su nombre según la parte específica del vehículo que se desarrolla en ella.

#### — Justificación del diseño del *H-TWIP* —

El diseño de las piezas ha sido minuciosamente cuidado considerando diversos elementos, como la compatibilidad entre componentes, la eficiencia funcional, el ahorro de material, la

autonomía y las consideraciones estéticas. Cada pieza ha sido adaptada para maximizar su eficiencia, asegurar la compatibilidad adecuada con los demás componentes y mejorar la autonomía del sistema. Al mismo tiempo, se ha prestado especial atención a conservar una estructura que garantice la estabilidad del vehículo; sin embargo, es importante destacar que las piezas no están diseñadas para resistir golpes significativos. Este enfoque integral también ha considerado la estética, asegurando que el diseño no solo cumpla con criterios funcionales y técnicos, sino que también ofrezca una apariencia visual atractiva y coherente.

**Dirigido al lector:** Es importante subrayar que cada una de las piezas ha sido cuidadosamente diseñada para encajar en un orden específico. En el material adjunto, las piezas se presentarán en el orden preciso en el que deben ser ensambladas. Además, se debe tener en cuenta que, por razones de simplicidad y practicidad en los planos y en el texto, ciertos detalles específicos, como, medidas, orificios, mecanismos de anclaje y formas de las piezas, no se explican de manera detallada. Esto no implica que dichos elementos no sean importantes; simplemente, su representación detallada se ha omitido intencionadamente en los documentos adjuntos.

### 2.1.1.1 Etapa 1: Base

En la figura 3 se puede observar el diseño de la base de los actuadores. Se consideró la presencia de un sensor de efecto *Hall* en la parte posterior de los motores, del cual se obtienen 6 cables; estos deben ser tratados con especial cuidado para evitar posibles daños, ya que su integridad es esencial para el correcto funcionamiento del sistema. Además, se contempló la fijación de los actuadores a la estructura mediante tornillos, este enfoque se debe a que el motor ya cuenta con orificios preexistentes diseñados de fábrica para la utilización de tornillos. Las piezas también cuentan con orificios específicos para tornillos, los cuales se utilizan para conectar la base con las siguientes piezas del vehículo.

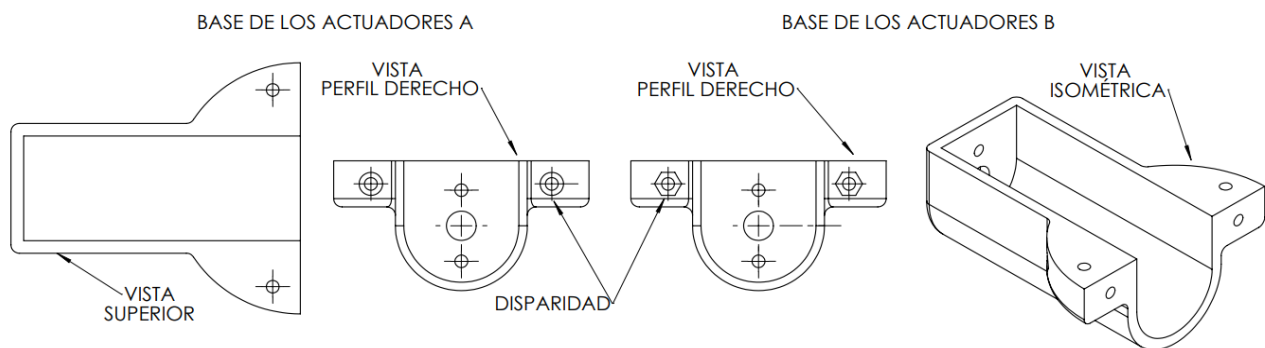


Figura 3: Plano con la base de los actuadores, donse se puede contemplar la evidente disparidad entre la parte A y la Parte B de la base, se imprimió en dos partes considerando que el vehículo en algún momento, podría necesitar una reparación o ajuste futuro.

## 2.1.1.2 Etapa 2: Potencia

En la etapa de potencia, se abordó principalmente el almacenamiento de las baterías destinadas a alimentar el vehículo, dividiendo esta fase en tres partes para simplificar el proceso.

### Parte 1:

Denominada "**Base de baterías**", como primera pieza conectiva entre la base y la fase de potencia, se observa en la figura 4. Esta pieza está específicamente diseñada para albergar las baterías que suministran energía al vehículo, además de facilitar el paso organizado de los cables de los motores y sensores. Al igual que las piezas anteriores, la base de baterías está equipada con orificios para tornillos, permitiendo una unión firme con las piezas subsecuentes del vehículo y garantizando la integridad estructural del conjunto.

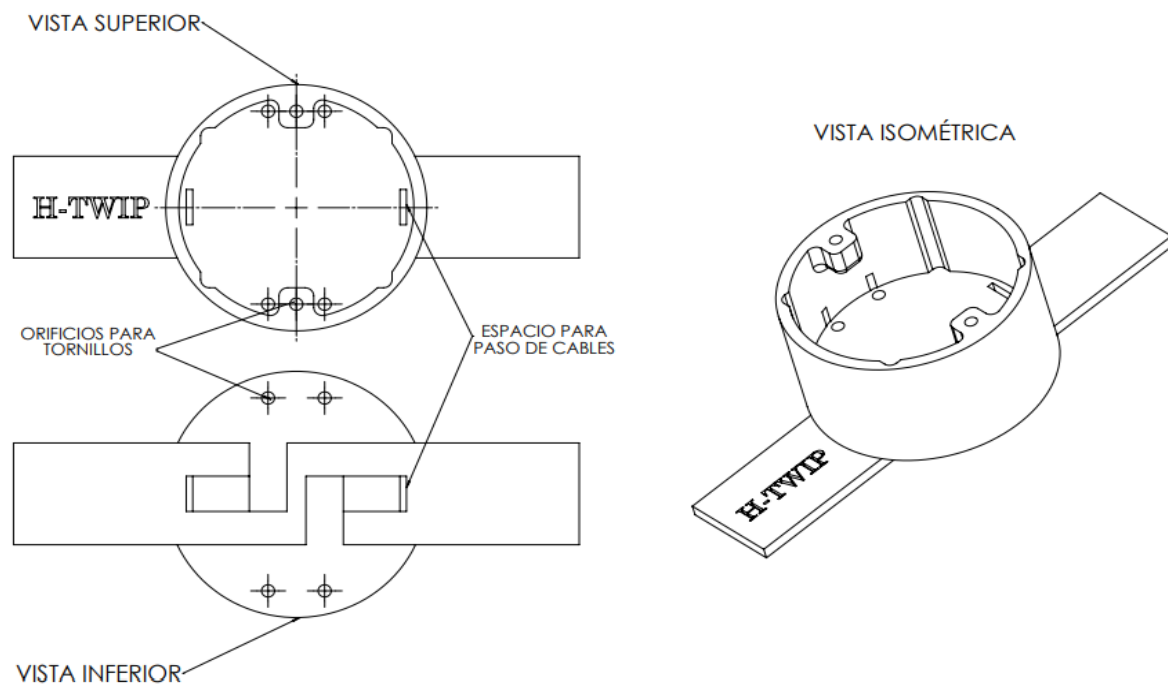


Figura 4: Pieza que sirve como enlace entre las piezas de la etapa 1 (Base) y la etapa 2 (Potencia) del vehículo. Este componente presenta orificios por donde pasan tornillos para una unión sólida y cuenta con una cavidad diseñada para almacenar las baterías que suministran energía a todo el sistema.

### Parte 2:

La "**Caja de baterías**", presentada en la figura 5, desempeña la función de albergar las tres baterías utilizadas por el vehículo. Esta caja se integra en la base de baterías, asegurando un alojamiento estable y sin posibilidad de movimientos bruscos para garantizar la estabilidad del sistema. Con el objetivo de facilitar el proceso de inserción y extracción, la caja de baterías ha sido diseñada con bordes redondeados, proporcionando una manipulación sencilla y eficiente. Además, para asegurar una organización ordenada del sistema eléctrico, la caja

cuenta con cavidades en la parte superior, permitiendo el paso adecuado de los cables de las baterías.

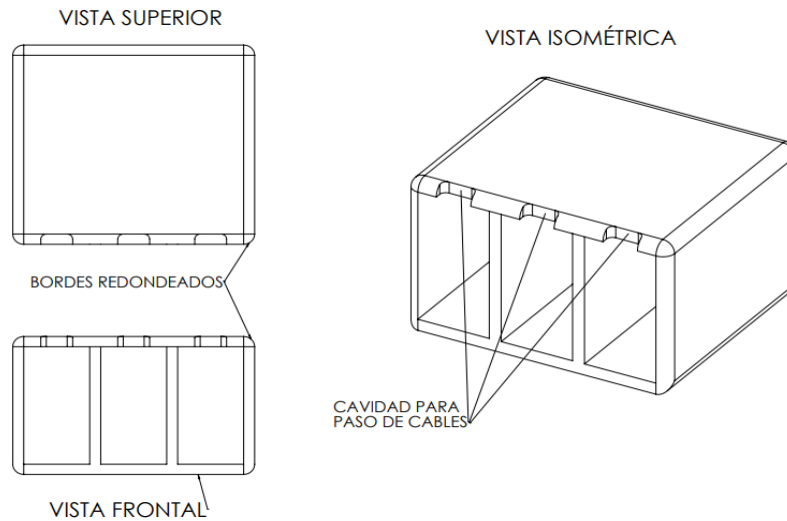


Figura 5: Caja de baterías diseñada con bordes redondeados para una extracción fácil, la caja cuenta con tres cavidades individuales, una para cada batería, y está se integra en la pieza mostrada en la Figura 4.

### Parte 3:

La etapa de potencia concluye con la pieza nombrada "**Soporte de distribución de energía**" que se muestra en la figura 6, diseñada para sostener dos reguladores de voltaje, un puente H y un switch para prender o apagar el vehículo. Esta pieza desempeña el papel de mantener fijos los componentes, asegurando así la correcta distribución de energía en todo el vehículo.

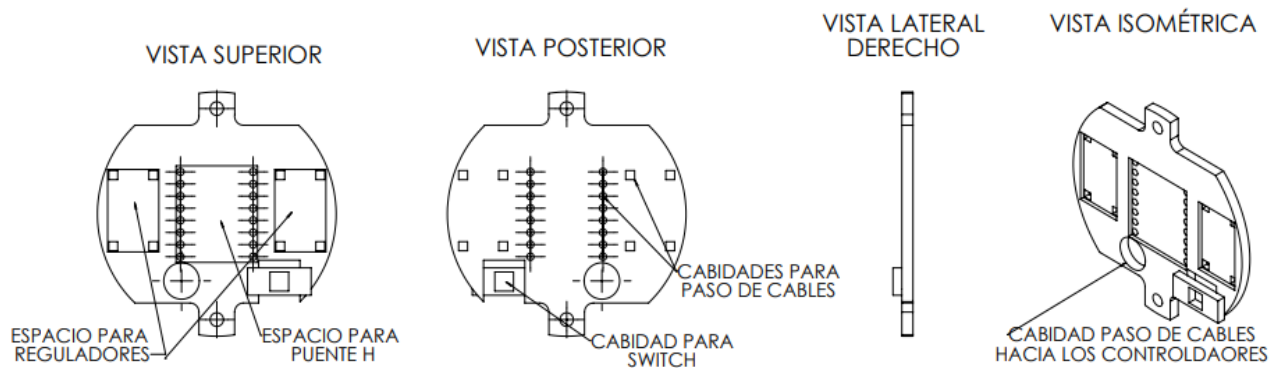


Figura 6: La pieza es parte de la etapa de potencia; sin embargo, una vez colocados los componentes, se integra al vehículo por encima de la pieza mostrada en la figura 7, la cual forma parte de la etapa 3: Control. Ambas piezas se fijan simultáneamente al sistema mediante tornillos.

### 2.1.1.3 Etapa 3: Control

Las piezas diseñadas para la etapa de control tienen dos objetivos fundamentales: en primer lugar, ser compatibles tanto con la etapa anterior como con la etapa siguiente del proceso, y en segundo lugar, alojar de manera segura y eficiente los controladores del vehículo. Este diseño considera cuidadosamente todos los cables necesarios para el correcto funcionamiento del sistema.

En la Figura 7 se muestran las piezas que son visibles a simple vista, destacando las diferencias entre cada una de ellas. Es importante mencionar que en dicha figura solo se presentan tres de las cinco piezas, ya que tres de ellas son idénticas. Posteriormente, en la figura 8, se revelan las piezas que se encuentran en el interior de la estructura.

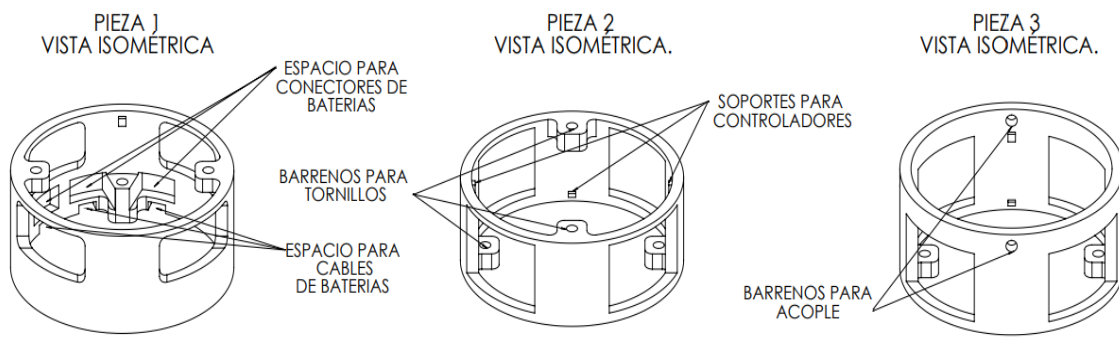


Figura 7: Se resaltan las principales diferencias entre las piezas, permitiendo una identificación clara de las variaciones más notables. El proceso de ensamblaje sigue una secuencia ordenada, donde las piezas se colocan una después de otra para construir la estructura. Sin embargo, cabe destacar una excepción: la pieza dos se utiliza de manera única al repetirse tres veces en el proceso.

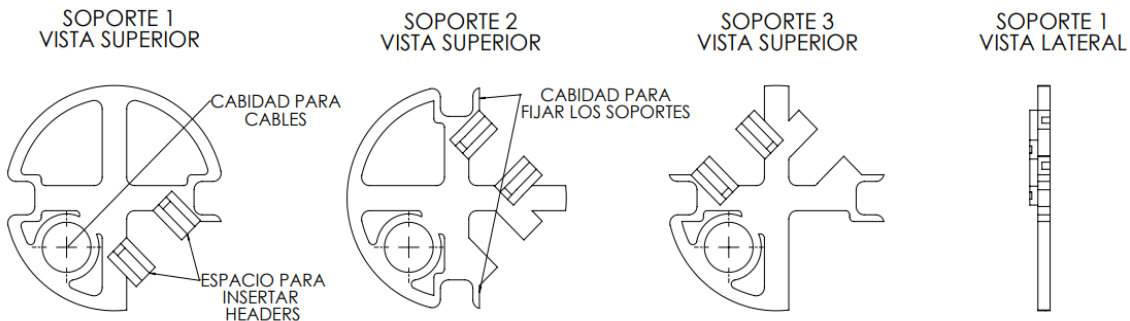


Figura 8: Las piezas internas han sido diseñadas con varias funciones clave. Incluyen soportes dedicados para los controladores, garantizando su sujeción segura, y cavidades para el paso ordenado de cables y la inserción de headers hembra. Destaca que todas estas características mantienen un ancho uniforme, simplificando el diseño y favoreciendo la compatibilidad entre las diversas partes del sistema. Es importante señalar que estas piezas están ubicadas internamente, por lo que no es posible verlas a simple vista, contribuyendo así a una estética más limpia y funcional.

### 2.1.1.4 Etapa 4: Sensor

En la etapa final del diseño, se ha enfocado en la colocación estratégica del acelerómetro en la parte superior del péndulo invertido, específicamente dentro de la pieza llamada "**Esfera interna**", como se observa en la Figura 9. Esta disposición busca maximizar la precisión en la captura de datos de movimiento.

La esfera interna, resguardada por una estructura protectora externa denominada "**Esfera exterior**" mostrada en la figura 10, desempeña un papel crucial al salvaguardar el acelerómetro. En caso de impacto, la capa envolvente está diseñada para absorber y reducir posibles daños al péndulo, asegurando así la integridad y el rendimiento del acelerómetro. Este enfoque tiene como objetivo optimizar la funcionalidad del sistema y garantizar su resistencia en situaciones adversas.

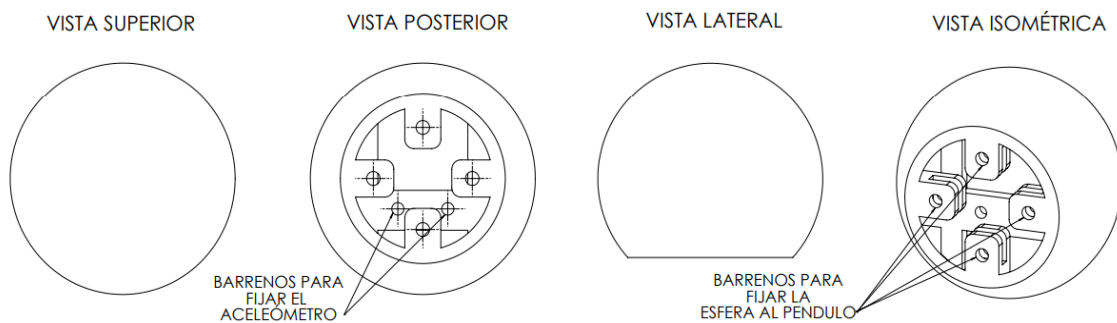


Figura 9: Esfera interna que alberga estratégicamente el acelerómetro en la parte superior del péndulo invertido, con barrenos diseñados tanto para fijar el acelerómetro como para sujetar la esfera al péndulo. Estos barrenos permiten la fijación mediante tornillos, contribuyendo así a la estabilidad y robustez del sistema.

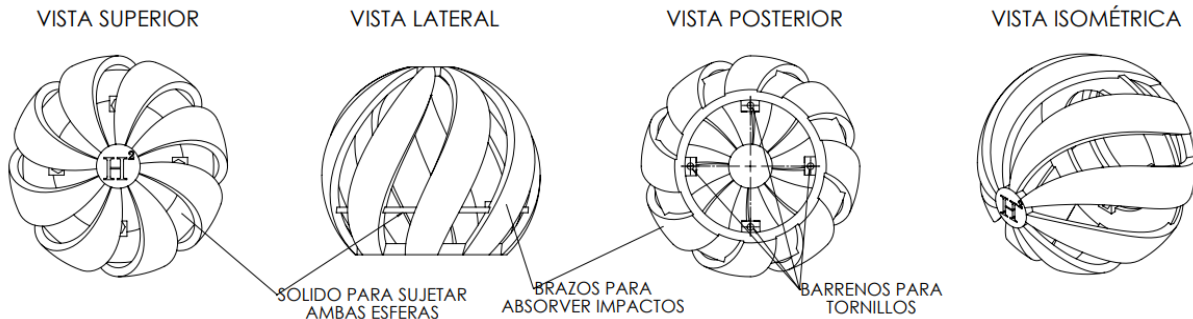


Figura 10: Esfera exterior con brazos diseñados para romperse en caso de recibir un impacto significativo, con la finalidad de reducir el daño al péndulo invertido. Esta característica se ha integrado estratégicamente para mejorar la resistencia del sistema ante situaciones adversas, minimizando el riesgo de daños permanentes.

## 2.1.2 Creación

### — Justificación de la tecnología utilizada —

Durante la etapa de "**Creación**", se optó por utilizar la tecnología de impresión 3D FDM (Fused Deposition Modeling, por sus siglas en inglés). La decisión se basa en consideraciones prácticas, ya que esta tecnología permite una fabricación eficiente y económica de componentes con formas y geometrías específicas. La impresión en 3D agiliza el proceso de producción, reduciendo los costos asociados y facilitando ajustes continuos en el diseño. La capacidad de personalización de la impresión en 3D garantiza la precisión necesaria para cada pieza, y su enfoque económico contribuye a optimizar recursos en el proyecto.

### — Consideraciones para la impresión en 3D —

Las configuraciones básicas para imprimir en 3D incluyen ajustes como la temperatura de la boquilla y la cama caliente, la velocidad de impresión, la resolución de capa y la altura de la primera capa. También es importante configurar la distancia de retracción, decidir sobre el uso de soportes y el porcentaje de relleno interno, así como ajustar las opciones de enfriamiento para prevenir deformaciones, la secuencia de capas, el patrón de relleno, el diámetro del filamento, entre muchas otras consideraciones más, por todo lo anterior, cada impresión en 3D se convierte en un proceso único y adaptativo, ya que las necesidades específicas de la pieza en cuestión influyen directamente en las configuraciones requeridas, todas las piezas mostradas en este trabajo fueron impresas en una impresora "Monoprice - Select Mini 3D".

A continuación, en la figura 11 se presenta el ensamblaje de las piezas diseñadas durante el proceso de creación. Este montaje proporciona una representación visual detallada de cómo cada componente encaja y se relaciona con los demás para formar el sistema completo.

Posteriormente en la figura 12, se exhibe el robot en su forma física, donde todas las piezas se han colocado estratégicamente. Este paso marca la culminación del proceso de diseño e impresión en 3D, mostrando el resultado tangible del trabajo realizado. El robot completo incluye cada elemento diseñado, desde la esfera interna con el acelerómetro hasta la esfera externa con sus brazos diseñados para absorber impactos.

Esta representación física del robot no solo valida la efectividad del diseño, sino que también sirve como punto de referencia para evaluaciones futuras y posibles ajustes. La visualización del robot en su totalidad proporciona una perspectiva integral de cómo las decisiones de diseño se traducen en un producto funcional y listo para llevar a cabo su tarea prevista.



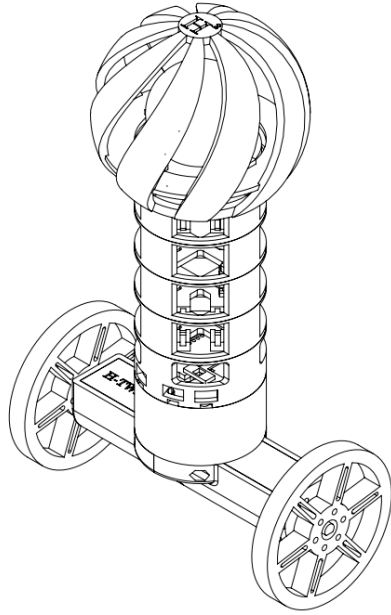


Figura 11: Ensamblaje de las piezas diseñadas durante el proceso de creación. Este montaje ofrece una representación visual, mostrando cómo cada componente se ensambla y se relaciona con los demás para formar el sistema completo. En esta representación no se incluyen los componentes electrónicos.



Figura 12: Prototipo físico completo con todos los componentes ensamblados. En esta imagen, se aprecia el resultado final del ensamblaje, destacando la disposición cuidadosa de cada componente para formar un sistema completo y funcional.

### 2.1.3 Electrónica

En esta etapa del proyecto, se llevará a cabo una detallada descripción de todos los componentes empleados en el diseño del **H-TWIP**. Inicialmente, se abordará la explicación del diagrama de conexiones, tal como se aprecia en la figura 13, proporcionando una guía visual clara de la conexión entre los distintos elementos del sistema.

Posteriormente, en la tabla 1 proporciona una explicación del funcionamiento de cada uno de los componentes utilizados. Cada componente será analizado en términos de su propósito específico dentro del sistema, detallando cómo contribuye al rendimiento general del **H-TWIP**.

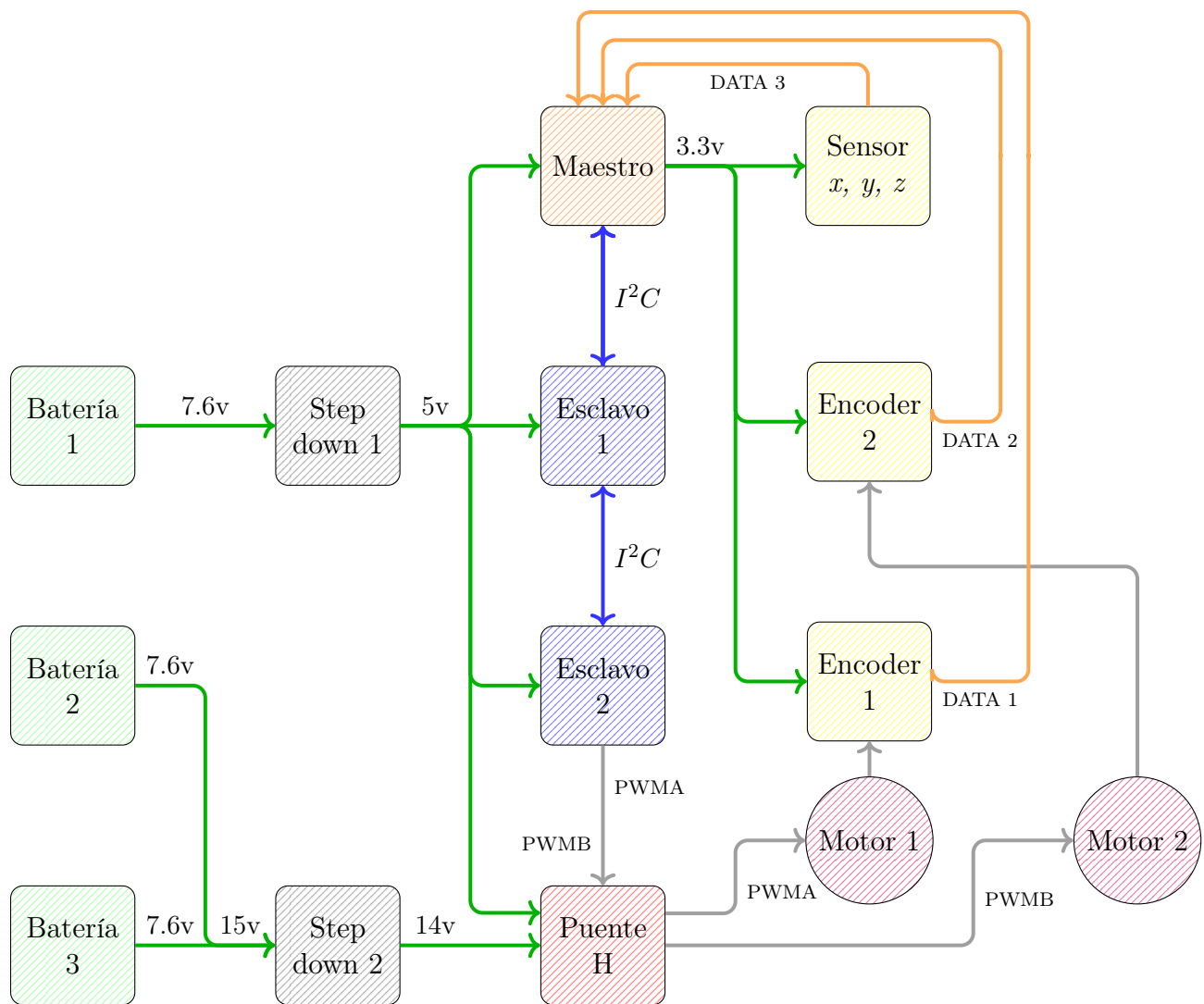

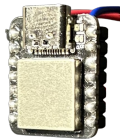

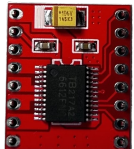




Figura 13: Este diagrama simplificado se centra únicamente en las señales de entrada y salida de cada componente del sistema **H-TWIP**. Se han omitido detalles específicos, como el número de cables existentes en la implementación física, ya que no son esenciales para comprender la lógica y la interacción entre los elementos.

Símbolo	Foto	Descripción	Función
Maestro		Seeeduino XIAO: es una placa de desarrollo compacta basada en el microcontrolador ARM Cortex-M0+ SAMD21 de 32 bits de Microchip/Atmel.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Lee el acelerómetro.</li> <li>2) Supervisa los sensores de los motores.</li> <li>3) Ejecuta el PID.</li> <li>4) Envía órdenes a los XIAO esclavos a través del bus I2C.</li> </ol>
Esclavo 1		Seeeduino ESP32-S3: es una placa de desarrollo que utiliza el microcontrolador ESP32-S3, conocido por la conectividad inalámbrica a través de Wi-Fi y BT.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Recibir ordenes del maestro.</li> <li>2) Controlar el motor A.</li> <li>3) Enc./apag. el puente H.</li> <li>4) Controlar el LED A.</li> </ol>
Esclavo 2		Seeeduino ESP32-C3: es una placa de desarrollo basada en el microcontrolador ESP32-C3. Con conectividad Wi-Fi y BT. de bajo consumo,	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Recibir ordenes del maestro.</li> <li>2) Controlar el motor B.</li> <li>3) Controlar el LED B.</li> </ol>
Puente H		TB6612FNG: es un puente H con un chip tipo MOSFET que controla la dirección y velocidad de motores, hace uso de dos fuentes para poder funcionar.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Recibir órdenes de los esclavos A y B.</li> <li>2) Controlar los motores A y B.</li> </ol>
Sensor $x, y, z$		ADXL335: es un sensor tridimensional que mide la aceleración en los ejes X, Y y Z, proporcionando salidas analógicas.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Medir la inclinación del H-TWIP.</li> <li>2) Medir la orientación del H-TWIP.</li> </ol>
Encoder 1		Sensor de efecto Hall: detecta campos magnéticos, generando una señal eléctrica proporcional. Sirve para medir posición y velocidad en sistemas electrónicos.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Mandar pulsos generados por el motor A al XIAO maestro.</li> </ol>







Símbolo	Foto	Descripción	Función
Encoder 2		Sensor de efecto Hall: detecta campos magnéticos, generando una señal eléctrica proporcional. Sirve para medir posición y velocidad en sistemas electrónicos.	1) Mandar los pulsos generados por el motor B al XIAO maestro.
Motor 1		Motor con caja de engranajes: ajusta la velocidad y el torque mediante una caja reductora que utiliza engranajes.	1) Ajusta la posición angular para mantener el equilibrio del péndulo. 2) Regula la velocidad angular permitiendo cambios suaves en la posición.
Motor 2		Motor con caja de engranajes: ajusta la velocidad y el torque mediante una caja reductora que utiliza engranajes.	1) Ajusta la posición angular para mantener el equilibrio del péndulo. 2) Regula la velocidad angular permitiendo cambios suaves en la posición.
Step down 1		Regulador step-down: es un dispositivo electrónico que reduce un voltaje de entrada a un nivel más bajo y constante en la salida.	1) Transformar un voltaje de 7.8v a 4v. 2) Suministrar energía a los controladores u otros dispositivos electrónicos con el voltaje reducido.
Step down 1		Regulador step-down: es un dispositivo electrónico que reduce un voltaje de entrada a un nivel más bajo y constante en la salida.	1) Transformar un voltaje de 15v a 14v. 2) Suministrar energía a los motores
Baterías 1, 2, 3		Las baterías LiPo: son recargables, conocidas por su alta densidad de energía y diseño ligero.	1) Bateria 1: Suministrar energía al regulador 1 2) Bateria 2 y 3: Están conectadas en serie y suministran energía al regulador 2

Tabla 1: Explicación de las funciones de cada componente utilizado.

## 3. Metodología 2 (Sistema de navegación)

En la figura 14, se destacan las cuatro fases de la segunda metodología empleada en este proyecto y posteriormente se desarrollan cada una de las fases individualmente.

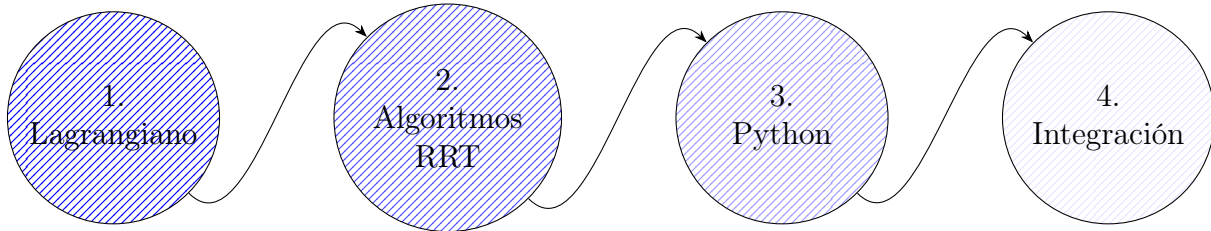


Figura 14: La segunda metodología consta de cuatro fases, cada una se desarrolla y se explica de manera detallada en las paginas siguientes

### 3.1 Simulación de un sistema de navegación

#### 3.1.1 Lagrangiano

Calcular el Lagrangiano de un sistema es un paso crucial en la formulación de las ecuaciones de movimiento en el contexto de la mecánica analítica. Para la obtención del lagrangiano es necesario conocer algunos datos del sistema los cuales se mencionan a continuación:

1. Diagrama de cuerpo libre: el uso de un diagrama de cuerpo libre es crucial para obtener el Lagrangiano de un sistema porque permite identificar y comprender las fuerzas y momentos que actúan sobre el sistema. En la figura 15 se observa el diagrama de cuerpo libre del péndulo invertido.
2. Coordenadas Generalizadas: son las variables que describen completamente la configuración del sistema. Pueden ser posiciones o ángulos que definen la posición de las partículas o puntos importantes en el sistema.
3. Energía Cinética: la energía cinética ( $T$ ) el sistema se relaciona con las velocidades de las coordenadas generalizadas. Se calcula como la suma de las energías cinéticas individuales de las diferentes partes del sistema.
4. Energía Potencial: la energía potencial ( $V$ ) está asociada con las fuerzas conservativas en el sistema y se expresa en función de las coordenadas generalizadas. Por ejemplo, si hay fuerzas gravitatorias o elásticas presentes, se expresarían en términos de las coordenadas generalizadas.
5. Lagrangiano: el Lagrangiano ( $L$ ) es la diferencia entre la energía cinética y la energía potencial del sistema. Matemáticamente:

$$L = T - V$$

6. Generalización de las Ecuaciones de Euler-Lagrange: las ecuaciones de Euler-Lagrange son un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales que se derivan al aplicar el principio de mínima acción al Lagrangiano del sistema. Estas ecuaciones proporcionan las ecuaciones de movimiento del sistema en términos de las coordenadas generalizadas y sus derivadas con respecto al tiempo.

El proceso inicia con la elaboración de un diagrama de cuerpo libre que ilustra todas las fuerzas actuantes en el sistema figura 15, tanto externas como internas. A través de este análisis, se identifican las variables involucradas en la descripción del movimiento, seleccionando posteriormente variables generalizadas que caracterizan completamente el estado del sistema. Así mismo en la figura 16, se muestra el *H-TWIP* puesto en el diagrama de cuerpo libre correspondiente. Este enfoque gráfico simplifica la comprensión de las fuerzas que actúan sobre el sistema.

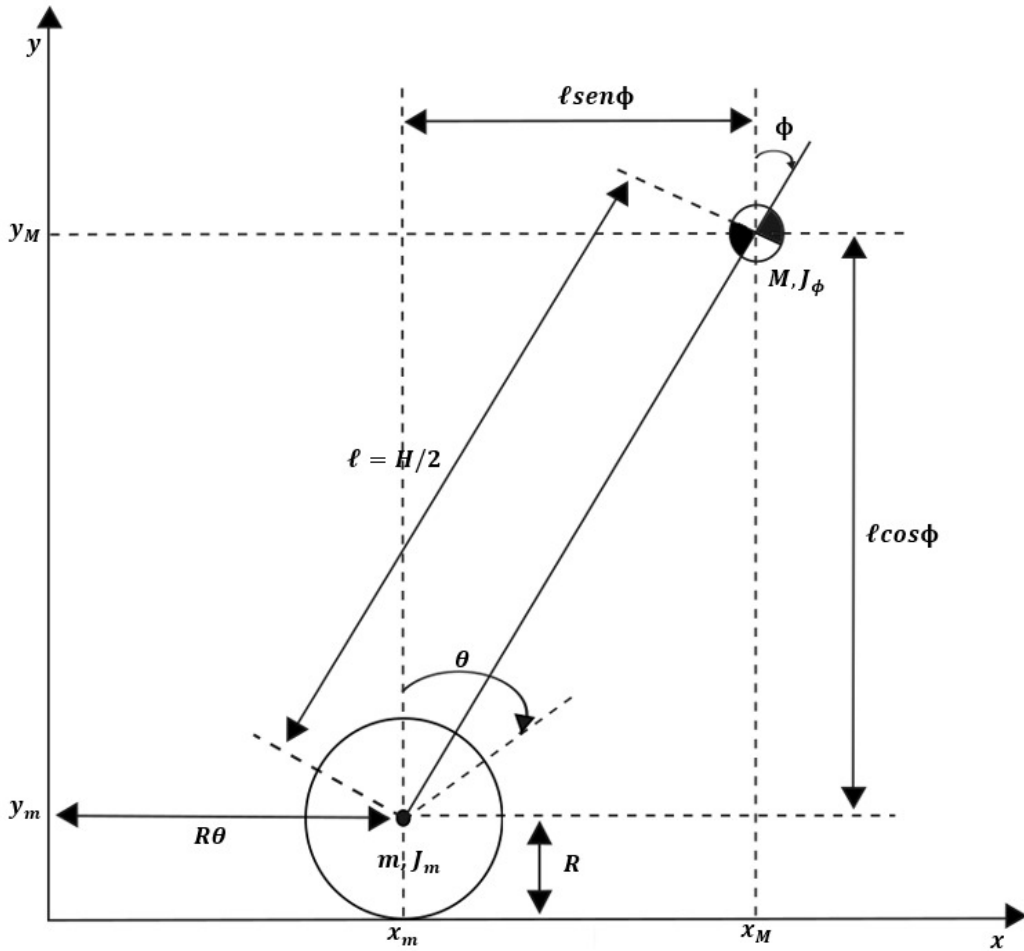


Figura 15: Diagrama de cuerpo libre del *H-TWIP*, se aprecian todas las fuerzas que están actuando.

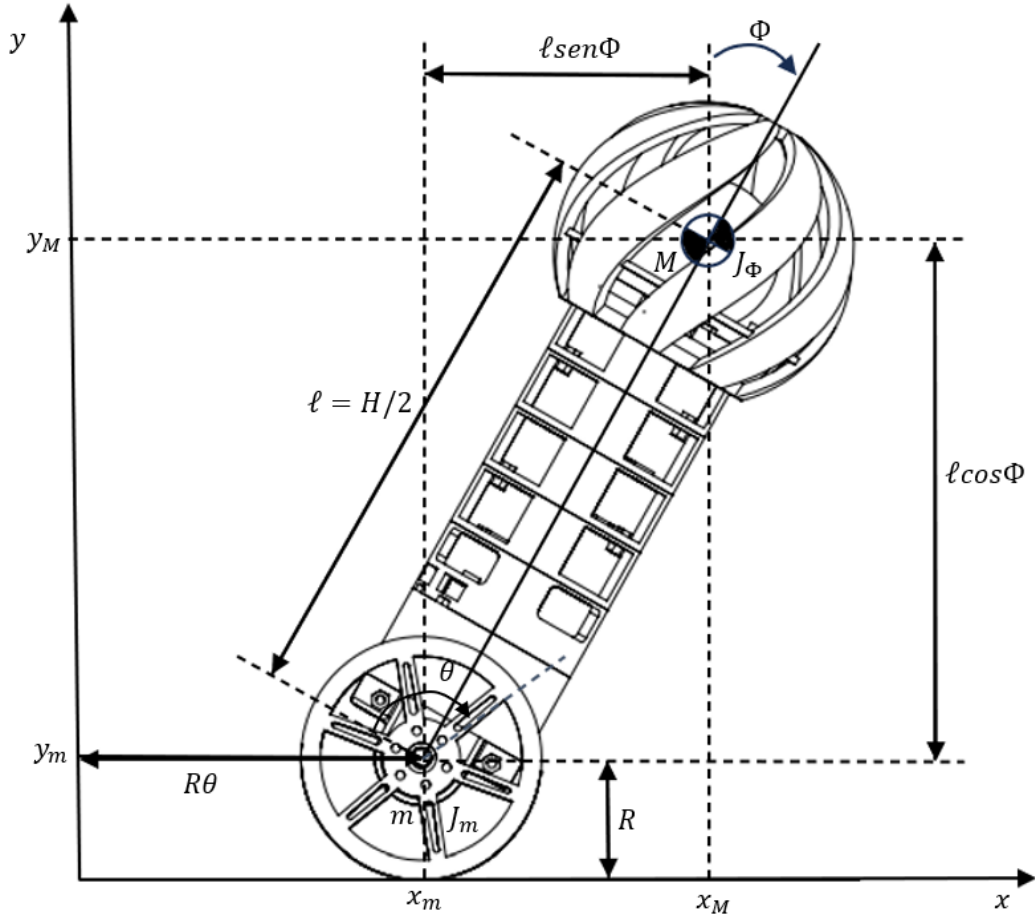


Figura 16: Representación gráfica del modelo utilizado, para una mejor comprensión de las fuerzas que están actuando.

En las tablas 2 y 3, en la cual se presentan los nombres de todas las variables correspondientes al diagrama de cuerpo libre.

Variable	Descripción
$\theta$	Ángulo de inclinación de las ruedas.
$\phi$	Ángulo de inclinación del cuerpo.
$J_m$	Momento de inercia de las ruedas.

Tabla 2: Símbolos y nombres de las variables mostradas en el diagrama de cuerpo libre.

$j_\phi$	Momento de inercia del péndulo.
$H$	Altura del péndulo.
$M$	Masa del cuerpo.
$m$	Masa de la rueda.
$R$	Radio de las ruedas.

Tabla 3: Símbolos y nombres de las variables mostradas en el diagrama de cuerpo libre.

### 3.1.1.1 Coordenadas generalizadas

Una vez analizado el diagrama, se deben identificar las partes móviles y sus grados de libertad. Las coordenadas generalizadas son variables independientes que describen completamente la configuración del sistema y simplifican las ecuaciones del mismo, las coordenadas generalizadas del  $H-TWIP$  se pueden observar en la tabla 3.

Para ello, se debe realizar lo siguiente:

1. Identificación de grados de libertad: Se determina cuántos grados de libertad tiene el sistema.
2. Definición de coordenadas generalizadas: Se asignan variables simbólicas a los grados de libertad identificados.
3. Verificación de independencia: Es importante asegurarse de que las coordenadas generalizadas sean independientes entre sí.

Variable	Descripción
$\theta$	Ángulo de inclinación de las ruedas.
$\phi$	Ángulo de inclinación del cuerpo.
$(x_i, y_i)$	Posición de la rueda izquierda.
$(x_d, y_d)$	Posición de la rueda derecha.

Tabla 4: Coordenadas generalizadas utilizadas para obtener el Lagrangiano del sistema.



### 3.1.1.2 Energía cinética ( $K$ ) y potencial ( $V$ )

Calcular las energías cinética y potencial: una vez que se han definido las coordenadas generalizadas, se procede a calcular las energías cinética y potencial del sistema. La energía cinética se refiere a la energía asociada al movimiento del robot, mientras que la energía potencial se relaciona con la posición del robot en un campo gravitacional.

En el contexto de la mecánica lagrangiana, al abordar el análisis de un péndulo invertido, se formula el lagrangiano considerando únicamente la energía cinética del sistema, omitiendo la inclusión de la energía potencial gravitatoria. Esta selección se realiza para simplificar las ecuaciones de movimiento y facilitar el análisis.

La energía cinética total  $T$  de un sistema mecánico se obtiene sumando las contribuciones de la energía cinética de cada una de sus partes. En el contexto de la mecánica clásica, la energía cinética se define como la suma de las energías cinéticas traslacional y rotacional para cada componente del sistema.

Energía cinética traslacional ( $K_T$ ): energía asociada al movimiento de traslación de un objeto. Se relaciona con la velocidad y la masa del objeto. La energía cinética traslacional del *H-TWIP* esta representada por las ecuaciones (1), (2) y (3).

$$K_T = \frac{1}{2}mv_l^2 + \frac{1}{2}mv_r^2 + \frac{1}{2}Mv_{b_x}^2 + \frac{1}{2}Mv_{b_z}^2 \dots \quad (1)$$

$$K_T = \frac{1}{2}m(R\dot{\theta})^2 + \frac{1}{2}m(R\dot{\theta})^2 + \frac{1}{2}M(R\dot{\theta} + \ell\dot{\phi}\cos\phi)^2 + \frac{1}{2}M(-\ell\dot{\phi}\sin\phi)^2 \dots \quad (2)$$

$$K_T = m(R\dot{\theta})^2 + \frac{1}{2}M(R\dot{\theta} + \ell\dot{\phi}\cos\phi)^2 + \frac{1}{2}M(-\ell\dot{\phi}\sin\phi)^2 \dots \quad (3)$$

Energía cinética rotacional ( $K_R$ ): energía asociada al movimiento de rotación de un objeto alrededor de un eje .Se define como la mitad del momento de inercia del objeto multiplicado por el cuadrado de su velocidad angular, ver ecuacion (4).

$$K_R = \frac{1}{2}I\omega^2 \dots \quad (4)$$

Energía cinética rotacional ( $K_R$ ) dada por las ecuaciones (5), (6) y (7).

$$K_R = \frac{1}{2}Jm_l\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}Jm_r\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}J_\phi\dot{\phi}^2 + \frac{1}{2}M\dot{x}_M^2 + \frac{1}{2}M\dot{z}_M^2 \dots \quad (5)$$

$$K_R = Jm\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}J_\phi\dot{\phi}^2 + \frac{1}{2}M\ell^2\sin\phi^2 + \frac{1}{2}M\ell^2\cos\phi^2 \dots \quad (6)$$

$$K_R = Jm\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}J_\phi\dot{\phi}^2 + M\ell^2 \dots \quad (7)$$

Energía cinética total ( $K$ ) dada por las ecuaciones (8) y (9).

$$K = K_T + K_R \dots \quad (8)$$

$$K = m(R\dot{\theta})^2 + \frac{1}{2}M(R\dot{\theta} + \ell\dot{\phi}\cos\phi)^2 + \frac{1}{2}M(-\ell\dot{\phi}\sin\phi)^2 + Jm\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}J_\phi\dot{\phi}^2 + M\ell^2 \dots \quad (9)$$

### 3.1.1.3 Lagrangiano ( $L$ )

La diferencia entre la energía cinética ( $K$ ) y la energía potencial ( $V$ ) nos da como resultado el Lagrangiano ( $L$ ), expresado en las ecuaciones (10) y (11).

$$L = T - V \dots \quad (10)$$

$$L = m(R\dot{\theta})^2 + \frac{1}{2}M(R\dot{\theta} + \ell\dot{\phi}\cos\phi)^2 + \frac{1}{2}M(-\ell\dot{\phi}\sin\phi)^2 + Jm\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}J_\phi\dot{\phi}^2 + M\ell^2 - 2mgR - Mg(R + \ell\cos\phi) \dots \quad (11)$$

### 3.1.1.4 Generalización de las Ecuaciones de Euler-Lagrange

Las ecuaciones de Euler-Lagrange son las ecuaciones de movimiento obtenidas al aplicar el principio de mínima acción al lagrangiano del sistema. Estas ecuaciones relacionan las fuerzas, las aceleraciones y las derivadas de las coordenadas generalizadas del robot. Derivar las ecuaciones respecto al tiempo da como resultado la generalización de la ecuaciones de Euler-Lagrange, por lo que se tiene que derivar la ecuación (10).

$$L = m(R\dot{\theta})^2 + \frac{1}{2}M(R\dot{\theta} + \ell\dot{\phi}\cos\phi)^2 + \frac{1}{2}M(-\ell\dot{\phi}\sin\phi)^2 + Jm\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}J_{\phi}\dot{\phi}^2 + M\ell^2 - 2mgR - Mg(R + \ell\cos\phi) \dots \quad (10)$$

Una vez que se han obtenido las ecuaciones de Euler-Lagrange, se procede a resolverlas. Esto permite describir completamente el comportamiento dinámico del robot.

Para  $F_{\theta}$  obtenemos como resultado la ecuacion (16), mientras que de las ecuaciones (11) a (15), se observa el desarrollo de las derivada respecto al tiempo ( $t$ );

$$\frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right] = m(R\dot{\theta})^2 + \frac{1}{2}M(R\dot{\theta} + \ell\dot{\phi}\cos\phi)^2 + Jm\dot{\theta}^2 \dots \quad (11)$$

$$\frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right] = m(R\dot{\theta})^2 + \frac{1}{2}M(R^2\dot{\theta}^2 + 2R\dot{\theta}\ell\dot{\phi}\cos\phi) + Jm\dot{\theta}^2 \dots \quad (12)$$

$$\frac{d}{dt} = 2mR^2\dot{\theta} + MR^2\dot{\theta} + MR\ell\dot{\phi}\cos\phi + 2Jm\dot{\theta} \dots \quad (13)$$

$$= 2mR^2\ddot{\theta} + MR^2\ddot{\theta} + MR\ell\ddot{\phi}\cos\phi - MR\ell\dot{\phi}^2\sin\phi + 2Jm\ddot{\theta} \dots \quad (14)$$

$$= (2m + M)R^2\ddot{\theta} + MR^2\ddot{\theta} + MR\ell\ddot{\phi}\cos\phi - MR\ell\dot{\phi}^2\sin\phi + 2Jm\ddot{\theta} \dots \quad (15)$$

$$[(2m + M)R^2 + 2jm]\ddot{\theta} + MR\ell\ddot{\phi}\cos\phi - MR\ell\dot{\phi}^2\sin\phi + 2Jm\ddot{\theta} = F_{\theta} \dots \quad (16)$$

Para  $F_\phi$  se obtiene como resultado la ecuacion (25) y de las ecuaciones (17) a (25), se observa el desarrollo de las derivada respecto al tiempo ( $t$ );

$$\frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial L}{\partial \dot{\phi}} \right] = \frac{1}{2} M (R\dot{\theta} + \ell\dot{\phi} \cos \phi)^2 + \frac{1}{2} M (-\ell\dot{\phi} \sin \phi)^2 + \frac{1}{2} J_\phi \dot{\phi}^2 \dots \quad (17)$$

$$= \frac{1}{2} M (R^2\dot{\theta}^2 + 2R\dot{\theta}\dot{\phi} \cos \phi + \ell^2\dot{\phi}^2 \cos^2 \phi) - \frac{1}{2} M \ell^2 \dot{\phi}^2 \sin^2 \phi + \frac{1}{2} J_\phi \dot{\phi}^2 \dots \quad (18)$$

$$\frac{d}{dt} = MR\ell\dot{\theta} \cos \phi - M\ell^2\dot{\phi} \cos^2 \phi - M\ell^2\dot{\phi} \sin^2 \phi + J_\phi \dot{\phi} \dots \quad (19)$$

$$= MR\ell\ddot{\theta} \cos \phi - MR\ell\dot{\theta} \sin \phi \dot{\phi} - M\ell^2\ddot{\phi} + J_\phi \ddot{\phi} \dots \quad (20)$$

$$= MR\ell\ddot{\theta} \cos \phi - MR\ell\dot{\theta} \sin \phi \dot{\phi} - (M\ell^2 + J_\phi)\ddot{\phi} \dots \quad (21)$$

$$\frac{\partial}{\partial \phi} = \frac{1}{2} M (R\dot{\theta} + \ell\dot{\phi} \cos \phi)^2 + \frac{1}{2} M (-\ell\dot{\phi} \sin \phi)^2 - Mgl \cos \phi \dots \quad (22)$$

$$= 2M(R^2\dot{\theta}^2 + 2R\dot{\theta}\dot{\phi} \cos \phi + \ell^2\dot{\phi}^2 \cos^2 \phi) - \frac{1}{2} M \ell^2 \dot{\phi}^2 \sin^2 \phi - Mgl \cos \phi \dots \quad (23)$$

$$\begin{aligned} & - MR\ell\dot{\theta} \dot{\phi} \sin \phi - \frac{1}{2} M \ell^2 \dot{\phi}^2 \cos^2 \phi - \frac{1}{2} M \ell^2 \dot{\phi}^2 \sin^2 \phi + Mgl \sin \phi \\ & = -MR\ell\dot{\theta} \dot{\phi} \sin \phi + Mgl \sin \phi \dots \end{aligned} \quad (24)$$

$$\frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial L}{\partial \dot{\phi}} \right] - \frac{d}{dt} = MR\ell\ddot{\theta} \cos \phi - (M\ell^2 + J_\phi)\ddot{\phi} + Mgl \sin \phi = F_\phi \dots \quad (25)$$

### 3.1.2 Algoritmos *RRT*

Cuando se menciona el termino algoritmos *RRT* se suele mencionar su papel en la resolución de problemas de planificación de movimientos en entornos complejos. Estos algoritmos, conocidos por su capacidad para explorar rápidamente el espacio de configuración mediante la generación de árboles de expansión basados en muestras aleatorias, han demostrado ser efectivos en entornos desconocidos o dinámicos. Su aplicabilidad se extiende a la mejora de la autonomía y navegación de robots en diversos campos, desde la robótica móvil hasta la planificación de movimientos en entornos industriales, destacando su capacidad de adaptación y respuesta a cambios. Por estas razones, los algoritmos *RRT* son de particular importancia para sistemas de navegación, ya que ofrecen soluciones eficientes y flexibles para superar desafíos en la planificación de trayectorias en entornos desafiantes.

En este proyecto, se llevará a cabo un análisis detallado de los principales algoritmos *RRT*, destacando sus ventajas y desventajas. El objetivo es seleccionar el algoritmo más adecuado para la planificación de trayectorias, considerando factores como la eficiencia computacional, la adaptabilidad a entornos cambiantes y la complejidad algorítmica.

En el transcurso de este proyecto, se programaron e implementaron tres variantes distintas del algoritmo *RRT*. A continuación, se proporciona una lista con los nombres de cada uno de estos algoritmos:

- *RRT LaValle 1998*.
- *RRTConnect*.
- *RRTConnect (variación)*.

#### 3.1.2.1 *RRT* LaValle 1998

"*RRT* LaValle 1998" artículo escrito por Steven M. LaValle en 1998, donde introdujo el algoritmo *RRT*. En este artículo, titulado "**Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning**", LaValle propuso los *RRT* como una herramienta innovadora para abordar problemas de planificación de trayectorias en entornos complejos y desconocidos. Su contribución ha tenido un impacto significativo en la robótica y la planificación de movimiento, estableciendo los *RRT* como una técnica ampliamente utilizada en diversas aplicaciones de sistemas autónomos.

A continuación, en las figuras 16 y 18, se muestra el comportamiento de este algoritmo en un ambiente sin obstáculos, y en las figuras 19 y 21 se muestra en un ambiente donde los obstáculos se generan aleatoriamente.

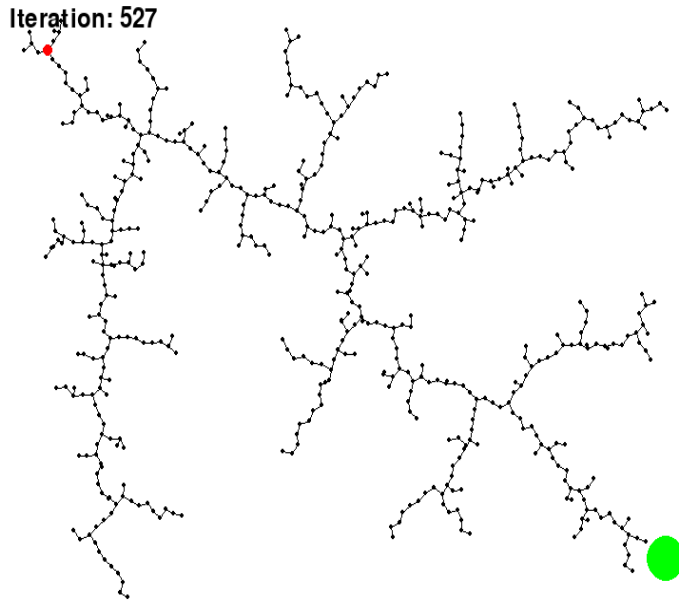


Figura 17: Algoritmo *RRT* LaValle 1998, prueba número 1, ambiente: sin objetos, únicamente se puso el inicio (punto rojo) y el objetivo (punto verde), número de iteraciones para llegar al objetivo: 527.

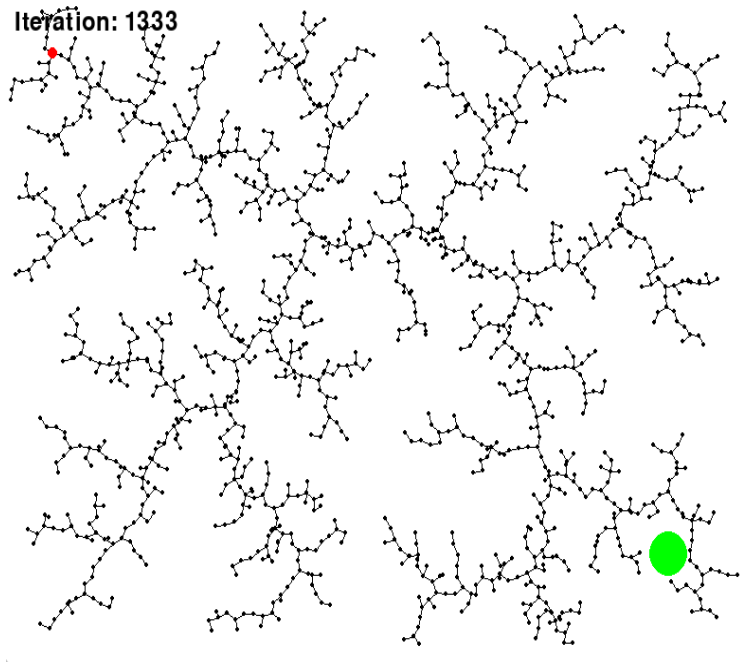


Figura 18: Algoritmo *RRT* LaValle 1998, prueba número 2, ambiente: sin objetos, únicamente se puso el inicio (punto rojo) y el objetivo (punto verde), número de iteraciones para llegar al objetivo: 1333.

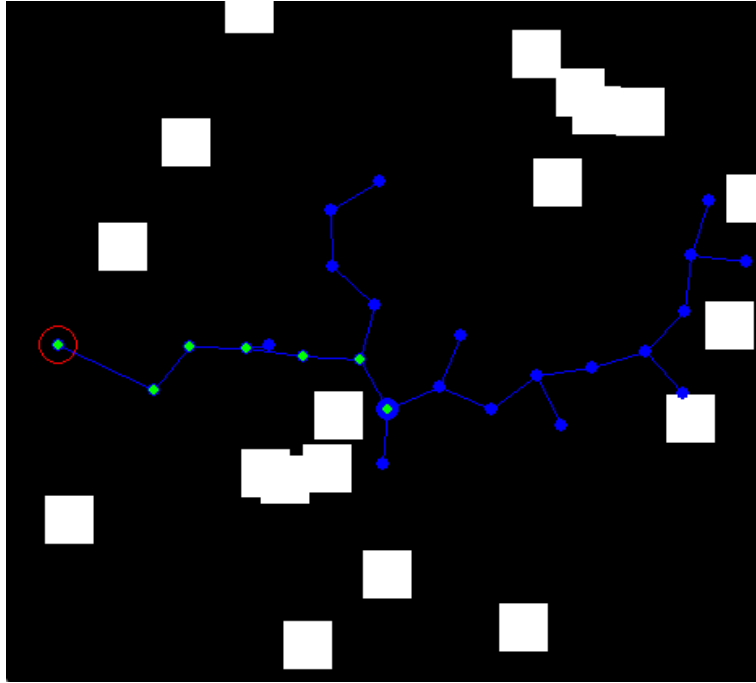


Figura 19: Algoritmo *RRT* LaValle 1998, prueba número 1, ambiente: con objetos, número de iteraciones para llegar al objetivo: 26.

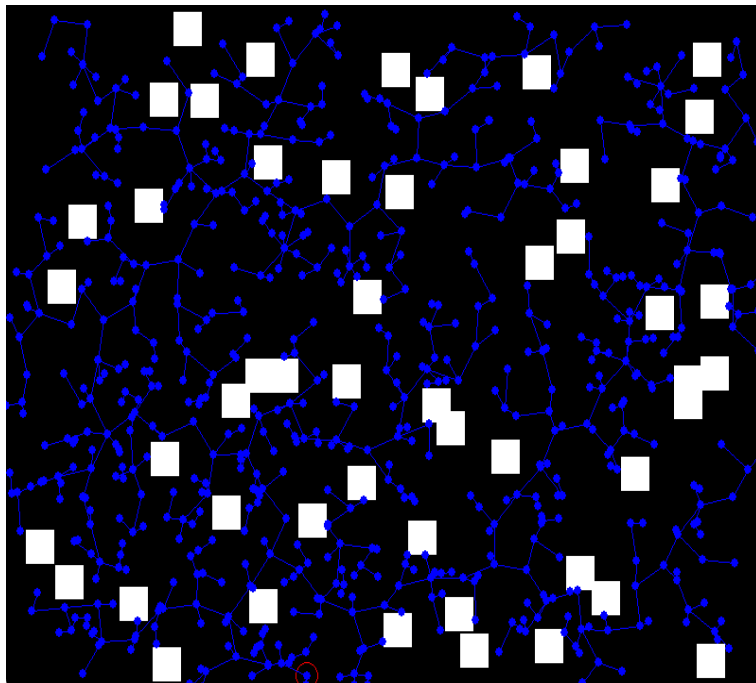


Figura 20: Algoritmo *RRT* LaValle 1998, prueba número 1, ambiente: con objetos, número de iteraciones para llegar al objetivo: desconocido, el programa se detuvo superando las 2500 iteraciones.

### 3.1.2.2 *RRTConnect*

"*RRTConnect*" es una variante del algoritmo de árbol de expansión rápida aleatoria (*RRT*) comúnmente utilizado en la planificación de trayectorias para robots y sistemas autónomos. Este algoritmo fue diseñado para buscar una conexión directa entre el punto de inicio y el punto objetivo mediante la construcción simultánea de dos árboles *RRT*, como se puede observar en las figuras 20 y 21.

Proceso de ejecución de *RRTConnect*:

- Inicialización de árboles: se inicia con dos árboles *RRT*, uno que se expande desde el punto de inicio y otro desde el punto objetivo.
- Expansión aleatoria: Durante las iteraciones, se selecciona un punto aleatorio en el espacio de configuración y se busca el nodo más cercano en cada árbol. Luego, se extiende el árbol desde ese nodo hacia el punto aleatorio.
- Conexión entre árboles: En cada iteración, se verifica si los nodos recién añadidos en ambos árboles están lo suficientemente cerca para conectarse directamente. Si se cumple esta condición, se ha encontrado una trayectoria que conecta el punto de inicio con el punto objetivo.

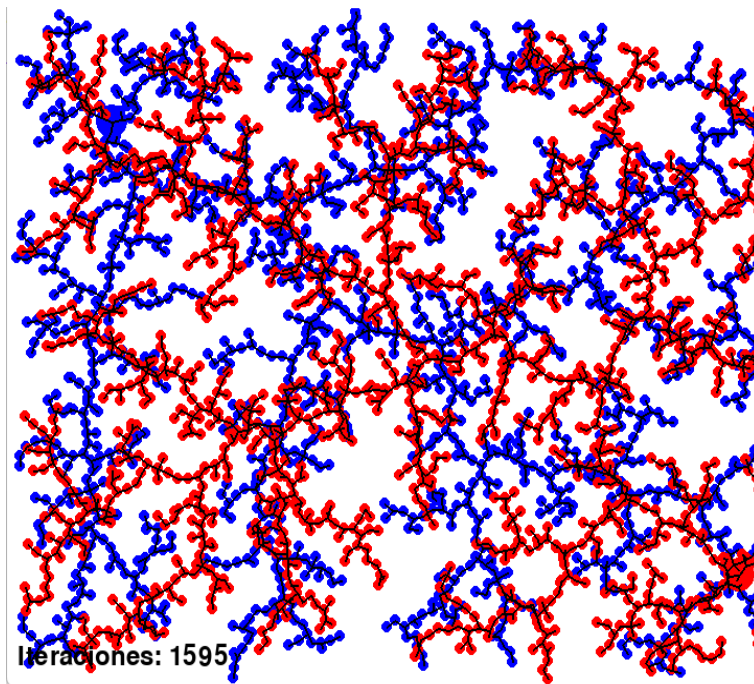


Figura 21: Algoritmo *RRTConnect*, prueba número 1, ambiente: sin objetos, número de iteraciones para llegar al objetivo: 1595.



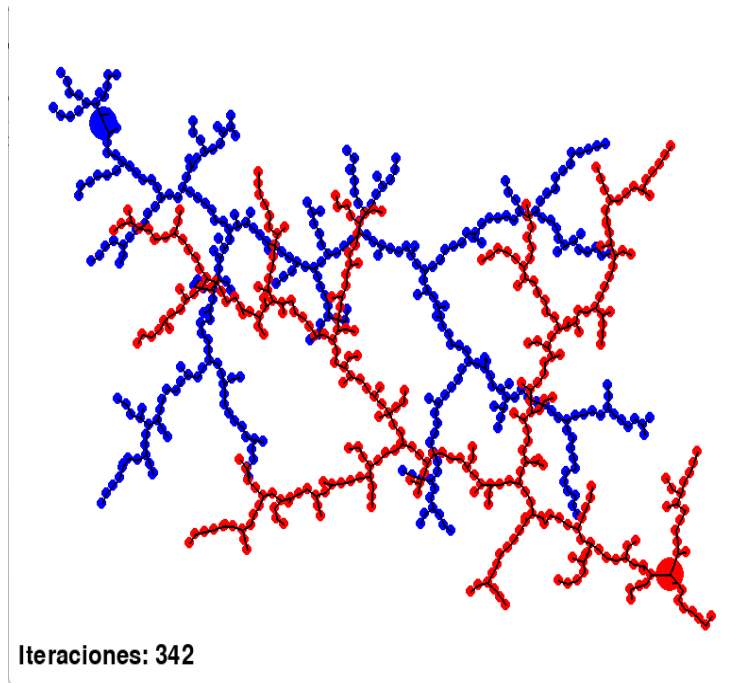


Figura 22: Algoritmo *RRTConnect*, prueba número 2, ambiente: sin objetos, número de iteraciones para llegar al objetivo: 342.

### 3.1.2.3 *RRTConnect* (variación)

Este algoritmo representa una evolución del método *RRTConnect*, diseñado con el propósito explícito de mejorar la eficiencia en el proceso de conexión entre los árboles durante la búsqueda de una trayectoria. Su enfoque se destaca por su capacidad para reducir sustancialmente el número de iteraciones requeridas para hallar una ruta válida.

La optimización del proceso de conexión se traduce en una exploración más rápida y eficaz del espacio de configuración. En comparación con enfoques convencionales, este algoritmo demuestra su eficacia al lograr conexiones más directas y, por ende, trayectorias más eficientes. Las figuras 22 y 23 ofrecen una representación visual de cómo este algoritmo acelera el proceso de búsqueda al reducir el número de iteraciones necesarias para encontrar una solución viable, lo que resalta su utilidad en entornos complejos o de alta dimensionalidad.

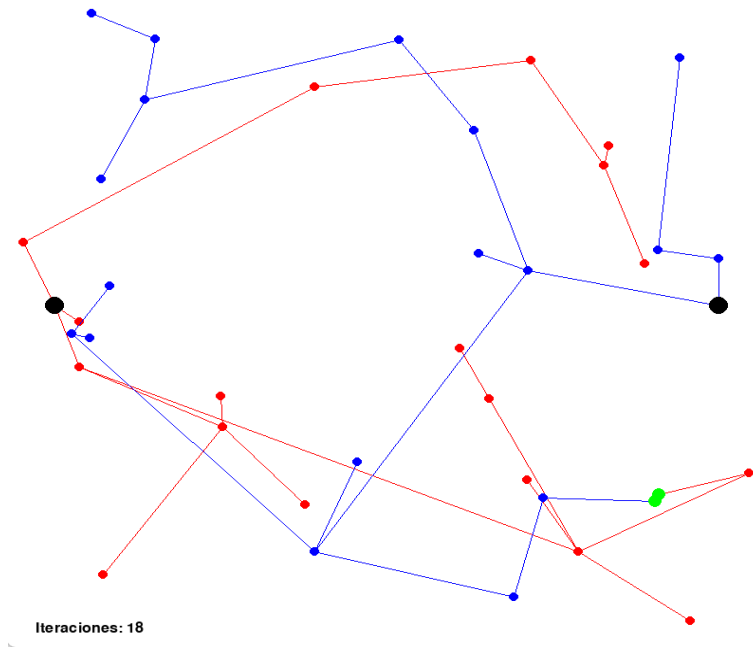


Figura 23: Algoritmo *RRTConnect* (variación, prueba número 1, ambiente: sin objetos, número de iteraciones para llegar al objetivo: 18).

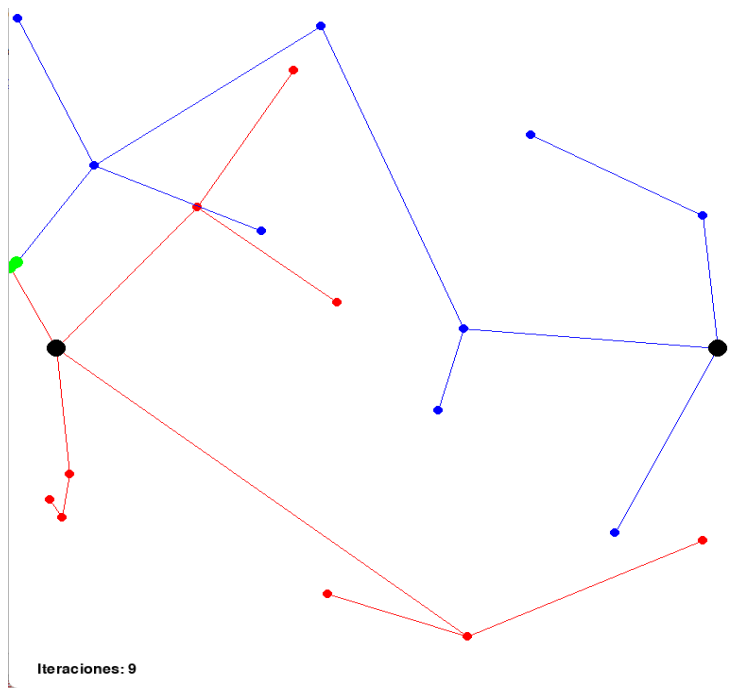


Figura 24: Algoritmo *RRTConnect* (variación, prueba número 2, ambiente: sin objetos, número de iteraciones para llegar al objetivo: 9).

# Resultados

## Resultados de la metodología 1 (*H-TWIP*)

Se llevó a cabo el diseño del modelo CAD de un péndulo invertido con un enfoque exhaustivo en la consideración de aspectos críticos de estabilidad y funcionalidad. Este proceso implicó la utilización de herramientas avanzadas de diseño asistido por computadora (*CAD*), permitiendo la creación de representaciones tridimensionales precisas del péndulo invertido. Durante la fase de diseño, se prestaron especial atención a factores clave como el centro de masa, la distribución de peso y la geometría estructural para garantizar la estabilidad óptima del sistema, la figura 25 se puede apreciar el diseño del vehículo.

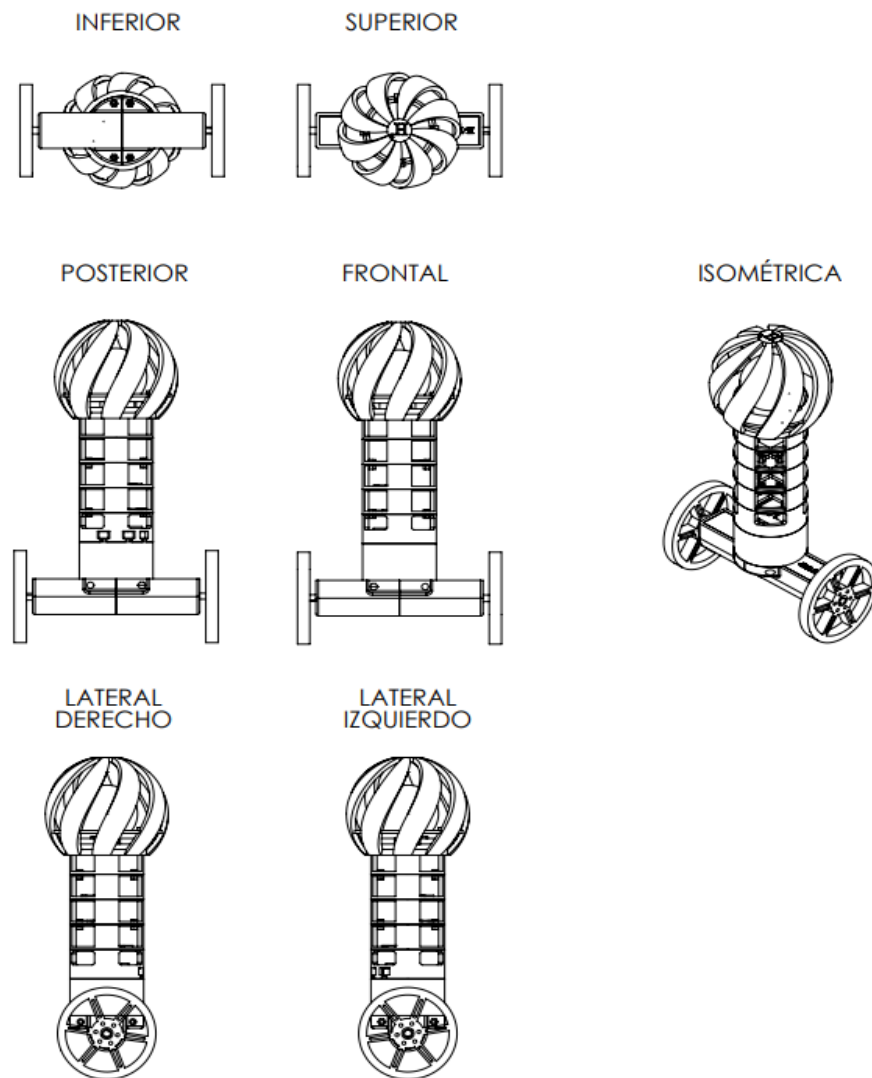


Figura 25: Plano con vistas del *H-TWIP* se puede apreciar desde diferentes ángulos

El *H-TWIP* tomó forma gracias a la implementación de una impresora 3D, que produjo cada componente necesario mediante la superposición de capas de material plástico. Este proceso, respaldado por el previo diseño CAD, aseguró la precisión y eficiencia en la fabricación de las partes esenciales del dispositivo. Posteriormente, durante la fase de ensamblaje, se dispusieron estratégicamente los componentes electrónicos, y el uso de tornillos como método de fijación garantizó una estructura estable y resistente. El resultado final es un *H-TIWP* funcional, destacando la convergencia entre la tecnología de impresión 3D y la precisión en el ensamblaje. Este enfoque integral demuestra la viabilidad de la fabricación aditiva para la construcción de prototipos.

— **Contratiempos** —

### **Batería descompuesta**

Es importante señalar que durante el desarrollo del proyecto, ocurrió un imprevisto significativo cuando una de las baterías del vehículo se descompuso debido a una descarga por debajo del voltaje mínimo recomendado, una situación que puede ser especialmente problemática para las baterías de ion de litio tipo LiPo. Esta experiencia demostró la importancia de comprender y respetar los límites de voltaje establecidos para este tipo de baterías, ya que descargas excesivas pueden resultar en daños irreversibles. Como resultado de este incidente, el *H-TWIP* actualmente solo puede funcionar mediante la conexión a través de un cable USB-C, asegurando así una fuente de energía confiable y evitando riesgos asociados con la operación independiente de baterías. Este cambio en la alimentación no solo garantiza la continuidad operativa del vehículo, sino que también destaca la importancia de implementar medidas cautelares para adaptarse a las circunstancias y garantizar la seguridad continua durante el desarrollo del proyecto.

### **Fallo del controlador**

En medio del desarrollo del proyecto, se enfrentó a un obstáculo significativo al detectar que uno de los controladores dejó de responder sin motivo aparente. Aunque las causas precisas detrás de la falla del controlador siguen siendo desconocidas, se actuó de manera proactiva y se llevó a cabo pruebas exhaustivas para comprender y abordar el problema, pero ante la imposibilidad de restablecer el funcionamiento del controlador, se tomó la decisión de sustituirlo por otro dispositivo funcional.

### **Reimpresiones**

En el transcurso del proyecto, surgió un contrat tiempo significativo que absorbió una cantidad considerable de tiempo, ya que fue necesario repetir varias piezas durante el proceso de impresión 3D. Estos inconvenientes se originaron principalmente en errores de diseño, como dimensiones inapropiadas y detalles demasiado delicados para la capacidad de la tecnología de impresión utilizada. Además, los problemas asociados con el soporte necesario para geometrías complejas contribuyeron a la necesidad de reimprimir ciertas piezas.

La ejecución de la Metodología 1 ha culminado con éxito, el enfoque metodológico, diseñado para abordar aspectos específicos del proyecto, ha sido implementado de manera eficaz, cumpliendo con los objetivos y entregando resultados positivos. Desde la fase inicial de planificación hasta la etapa de implementación práctica, cada paso ha sido ejecutado con precisión y atención a los detalles.

Se han superado desafíos identificados, y se ha logrado una integración de los diversos elementos del proyecto. La finalización exitosa de esta metodología sienta las bases para el progreso continuo del proyecto, destacando la eficacia de la planificación estratégica y la ejecución meticulosa en el alcance de los objetivos establecidos, el resultado final se puede observar en las figuras 25, 26 y 27.



Figura 26: La imagen del *H-TWIP* terminado captura un evento significativo en el proyecto, mostrando el producto final listo para su implementación. Este momento refleja el arduo trabajo y la dedicación de las personas involucradas en el desarrollo, desde las primeras etapas conceptuales hasta la realización exitosa del vehículo. La fotografía revela no solo el aspecto físico completo y funcional del *H-TWIP*, sino también el logro de los objetivos establecidos durante el proceso de diseño y fabricación.



Figura 27: Las primeras pruebas son esenciales para identificar posibles desafíos y ajustes necesarios en el diseño. La imagen puede mostrar la interacción entre el *H-TWIP* y su entorno, revelando aspectos como estabilidad, respuesta a las entradas de control y posibles áreas de mejora.



Figura 28: El *H-TWIP* experimentó varios contratiempos, y uno de ellos quedó documentado en esta fotografía, donde no sufrió un daño considerable.

## Conclusiones y recomendaciones

Al concluir este proyecto, es importante destacar que se lograron cumplir con éxito la mayoría de los objetivos propuestos, tanto el general como los específicos, centrados en la creación de un sistema de navegación para una plataforma robótica de autobalance mediante la teoría de árboles aleatorios.

El objetivo principal de desarrollar un sistema de navegación basado en árboles aleatorios se alcanzó, proporcionando a la plataforma robótica la capacidad de moverse de manera inteligente y segura.

Se logró describir el modelo matemático del robot mediante ecuaciones de movimiento de Lagrange, sentando las bases para la construcción del modelo de simulación.

Se llevó a cabo un análisis detallado de diferentes algoritmos basados en la teoría RRT, identificando sus características principales y seleccionando los más apropiados para la aplicación específica.

Se completó con éxito el diseño CAD del péndulo invertido, considerando aspectos de estabilidad y funcionalidad para su futura fabricación e implementación.

Se diseñó un controlador de movimiento utilizando la teoría de control no lineal, lo que permitió al robot moverse de manera satisfactoria.

Aunque se avanzó en el proceso, lamentablemente, debido a restricciones de tiempo, no se logró completar plenamente la implementación del modelo de simulación en Python.

A pesar de la limitación de tiempo en el último objetivo específico, los resultados obtenidos en los demás puntos contribuyen significativamente al campo de la robótica y sientan las bases para futuras investigaciones. Este proyecto representa un paso importante hacia la implementación exitosa de un sistema de navegación eficiente para plataformas robóticas de autobalance.

Durante las pruebas, el vehículo experimentó algunas caídas, pero demostró su capacidad de recuperación, manteniendo su funcionamiento adecuado después de los golpes. Estos resultados subrayan la resistencia y la fiabilidad del vehículo en situaciones adversas, lo cual es un indicador positivo para su aplicación en entornos dinámicos y desafiantes.

Se recomienda a futuros trabajos los siguientes puntos:

- 1.- Comprensión profunda de trabajos existentes, esto incluye estudiar el modelo matemático, los algoritmos RRT, el diseño CAD y el controlador de movimiento. Asegurándose de entender cada componente y su interacción.
- 2.- Replanteamiento de objetivos según tus propios intereses y recursos, se puede expandir la investigación centrándose en áreas específicas o aplicar el sistema de navegación a diferentes tipos de plataformas robóticas.
- 3.- Validación experimental, donde sea posible, realizar validaciones experimentales para confirmar la eficacia del sistema de navegación en entornos del mundo real. Esto puede incluir pruebas en un entorno controlado o la implementación en un prototipo real.

4.- Mejora continua, aprovechar la oportunidad para mejorar y optimizar algunos trabajos existentes, explorando nuevas técnicas, algoritmos o enfoques que podrían mejorar la eficiencia o robustez del sistema de navegación.

5.- Documentación clara y detallada, asegurarse de documentar cada paso del trabajo de manera clara y detallada. Esto facilitará la comprensión para otros investigadores y proporcionará una referencia sólida para futuros proyectos.

6.- Aplicaciones prácticas, explorar cómo el sistema de navegación podría aplicarse en situaciones del mundo real o en diferentes contextos industriales, identificando posibles escenarios de uso que podrían beneficiarse para la investigación.



## Referencias

- [1] Ogata, k. (2010). Ingeniería de control moderna (5a ed.). PEARSON.
- [2] Goicolea Ruigómez, J. M. (2010). CURSO DE MECÁNICA Volúmenes I y II (2a ed.). Universidad Politecnica de Madrid ´ Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- [3] Soldovieri C, T. (2013). Introducción la Mecánica de Lagrange y Hamilton. Universidad de Zulia.
- [4] Roca Cusido, A. (2014). Control automático de procesos industriales: Con prácticas de simulación y análisis por ordenador PC. Ediciones Díaz de Santos, S.A.
- [5] Piedrafito Moreno, R. (1999). Evolución Histórica de la Ingeniería de Control. sin editorial.
- [6] M. LaValle, S. (2006). PLANING ALGORITHMS. Cambridge University Press.
- [7] S. Beedy G. Ensell M. Kraft y. N. White. (2004). MEMS Mechanical Sensors. Artech House, Inc.
- [8] H. L. Melba Kurman. (2013). Fabricated: The New World of 3D Printing. Wiley.
- [9] D. Dudley J. Sprengers D. Schröder y. H. Yamashina. (2013). Gear Motor Handbook. Springer.
- [10] Norman S. Nise. (2007). Control Systems Engineering. John Wiley & Sons Inc.
- [11] TOSHIBA.(2008). TB6612FNG Driver IC for Dual DC motorDua. TB6612FNG. <https://www.pololu.com/file/0J86/TB6612FNG.pdf>
- [12] Christian Vázquez Gamarra. (2020). INGENIERÍA ELECTRONICA. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.
- [13] Ruben Gil Huerta, D. (2004). CONTROL DE UN PÉNDULO INVERTIDO SOBRE DOS RUEDAS DE TRES GRADOS DE LIBERTAD [Tesis ingeniero inédita]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- [14] C. Krause, P. C. K., & C. Krause, T. (2022). Introduction to Modern Analysis of Electric Machines and Drives (IEEE Press Series on Power and Energy Systems). Wiley-IEEE Press.
- [15] Davide Andrea. (2010). Battery Management Systems for Large Lithium Ion Battery Packs. Artech House.
- [16] Ibrahim Dogan. (2007). programacion de microcontroladores pic. Marcombo.
- [17] Óscar Torrente Artero. (2013). ARDUINO Curso práctico de formación. Alphaomega.