



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**



**DISEÑO E INTEGRACIÓN DE ACTUADORES QUASI-DIRECT DRIVE
PROPIOCEPTIVOS EN UN ROBOT BÍPEDO DE ALTA DINÁMICA**

POR

Bastían Nicolás Inostroza Sanzana

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título profesional de Ingeniero(a) Civil Electrónico(a)

Profesor(es) Guía
José Rubén Espinoza Castro

Septiembre 2025
Concepción (Chile)

©2025 Bastían Nicolás Inostroza Sanzana

©2025 Bastián Nicolás Inostroza Sanzana

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

A Dios por la fuerza que me da para no rendirme. A toda mi familia que amo y siempre me ha apoyado. A mi pareja y amigos que creyeron en mí. Y por los alumnos del pasado, presente y futuro del L.C.D.A.

Agradecimientos

Primero que todo le doy gracias a Dios por darme la energía y perseverancia en esta memoria. Sin duda, si no fuera por Él, no habría logrado terminar un proyecto tan ambicioso y grande como lo es el construir un robot de este alcance.

También le doy gracias a mis padres y familia que siempre creyeron en mis capacidades, me educaron para lograr todas las metas que me proponga, me apoyaron cuando necesitaba ayuda y para aconsejarme.

Gracias le doy al profesor José Espinoza por creer en este proyecto desde el primer día, gestionar cada material, ser un excelente mentor y académico, que en mi opinión, es el mejor de la Universidad de Concepción.

Gracias le doy a mi pareja por alentarme cada día, apoyarme cuando me sentía cansado y siempre levantarme los ánimos durante largas jornadas de trabajo.

Gracias le doy a mis amigos que creyeron en mí, me brindaron ideas, me criticaron constructivamente y en ciertas ocasiones me colaboraron con el armado del robot.

Gracias le doy enormemente a don René Álvarez por apoyarme en el ensamblado del robot y la manufactura de piezas, además de sus sabios consejos profesionales que los llevaré siempre en mis recuerdos.

Gracias por su puesto al director del Departamento de Ingeniería Eléctrica, el profesor Juan Tapia, junto con el profesor Luis Morán y el vicedecano Eduardo Balladares, por haber contribuido en gran manera con el financiamiento de este proyecto.

También agradezco a don Ramón Lillo por facilitar sus instrumentos de laboratorio y su colaboración en la mantención de algunos motores.

Por último pero no menos importante, agradezco a los compañeros del L.C.D.A. que fueron casi como una familia a lo largo del semestre, sin duda sus consejos u opiniones fueron de gran ayuda para el desarrollo de este proyecto.

Nadie llega lejos solo, detrás de grandes proyectos, hay grandes equipos. Sin embargo, a pesar de todo, mi mayor fuente de inspiración y perseverancia ha sido la fe. Con ese espíritu de confianza y resiliencia que ha guiado cada paso, concluyo con una cita que resume mi experiencia:

“Bendito el varón que confía en Jehová, y cuya confianza es Jehová. Porque será como el árbol plantado junto a las aguas, que junto a la corriente echará sus raíces, y no verá cuando viene el calor, sino que su hoja estará verde; y en el año de sequía no se fatigará, ni dejará de dar fruto.”
(Jeremías 17:7-8)

Sumario

En la última década, la robótica bípeda ha experimentado un progreso gigante. El desarrollo de plataformas como Atlas (Boston Dynamics), Cassie (Agility Robotics) o Tron 1 (Limx Dynamics) han mostrado que los principales desafíos siguen siendo la estabilidad, planificación de trayectorias, eficiencia energética, reducción de masa y últimamente los tipos de actuadores. En este escenario, los actuadores Quasi Direct Drive (QDD) se han transformado en un hito tecnológico al permitir transmisiones bajas y compactas, con alta densidad de torque, bajo peso y buena eficiencia energética, condiciones críticas para lograr movimientos rápidos y controlados en tiempo real. Universidades reconocidas como MIT, Stanford, UCLA o empresas privadas como Boston Dynamics han liderado estas investigaciones, estableciendo un estándar que enseña e inspira desarrollos a nivel global.

En este contexto, la presente memoria aborda el diseño y validación de un actuador QDD propioceptivo e integrado en el robot bípedo B1P0 de 6 grados de libertad, cumpliendo los objetivos de: (i) comunicación CAN multi-driver operativa; (ii) modelo 3D e integración mecánica; (iii) control independiente por eje con demostración funcional; y (iv) un actuador de alta densidad de torque capaz de retroalimentar su posición con exactitud en tiempo real. El actuador desarrollado con un reductor planetario 9:1 impreso en 3D alcanza una densidad de torque de 20.9 [Nm/kg], con aproximadamente un 95 % de eficiencia frente al motor desnudo (sin reductor) que genera 5.3 [Nm/kg]. Concluyendo además, que el actuador construido entrega 8.8 veces más torque útil sin penalizar corriente.

El chasis modular de tres niveles (potencia, control y sensores) permitió fácil mantenimiento y alta escalabilidad; el sistema entra de forma confiable en lazo cerrado y ejecuta trayectorias por CAN (video demo en el repositorio). En conjunto, B1P0 constituye hasta donde se tiene registro, el primer prototipo de robot bípedo de esta envergadura en Chile, desarrollado íntegramente en el Laboratorio de Control Digital Aplicado (L.C.D.A.) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción, dejando una base sólida para iterar en: estructura y materiales livianos, simulaciones avanzadas, sistemas de control, visión por computadora e inteligencia artificial.

Summary

Over the last decade, bipedal robotics has experienced tremendous progress. The development of platforms such as Atlas (Boston Dynamics), Cassie (Agility Robotics), and Tron 1 (Limx Dynamics) have shown that the main challenges remain stability, trajectory planning, energy efficiency, mass reduction, and, more recently, actuator types. In this context, Quasi Direct Drive (QDD) actuators have become a technological milestone, enabling low and compact transmissions with high torque density, low weight, and good energy efficiency—critical conditions for achieving rapid, controlled movements in real time. Renowned universities such as MIT, Stanford, and UCLA, as well as private companies such as Boston Dynamics, have led this research, setting a standard that teaches and inspires developments globally.

In this context, this paper addresses the design and validation of a proprioceptive QDD actuator integrated into the 6-degree-of-freedom B1P0 biped robot, fulfilling the objectives of: (i) operational multi-driver CAN communication; (ii) 3D model and mechanical integration; (iii) independent axis control with functional demonstration; and (iv) a high-torque-density actuator capable of accurate position feedback in real time. The developed actuator with a 3D-printed 9:1 planetary gearbox achieves a torque density of 20.9 [Nm/kg], with approximately 95% efficiency compared to the bare motor (without gearbox) that generates 5.3 [Nm/kg]. Furthermore, it is concluded that the constructed actuator delivers 8.8 times more useful torque without any current penalty.

The three-level modular chassis (power, control, and sensors) allowed for easy maintenance and high scalability. The system reliably enters a closed loop and executes trajectories via CAN (demo video in the repository). Overall, B1P0 constitutes the first bipedal robot of this size in Chile, developed entirely in the Applied Digital Control Laboratory (LCDA) of the Faculty of Engineering at the University of Concepción, leaving a solid foundation for iterating in: lightweight structure and materials, advanced simulations, control systems, computer vision, and artificial intelligence.

Tabla de Contenidos

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.2.	EL RIESGO INHERENTE DE LABORES HUMANAS.....	2
1.3.	UNA BREVE REVISIÓN SOBRE LOS ROBOTS DE ALTA DINÁMICA CON PATAS	4
1.4.	LA EFICIENCIA ANATÓMICA DE ROBOTS BÍPEDOS CON RODILLAS HACIA ATRÁS	5
1.5.	REQUISITOS DE DISEÑO EN ACTUADORES MODULARES PARA ROBOTS DE ALTA DINÁMICA	7
1.6.	OBJETIVOS.....	9
1.6.1	<i>Objetivo General.....</i>	9
1.6.2	<i>Objetivos Específicos.....</i>	9
1.7.	ALCANCES Y LIMITACIONES	9
1.8.	TEMARIO Y METODOLOGÍA	10
2.	MARCO TEÓRICO	11
2.1.	MOTORES DC BRUSHLESS Y OPERACIÓN	11
2.1.1	<i>Construcción.....</i>	11
2.1.2	<i>Principio de funcionamiento y sistemas de control</i>	12
2.1.3	<i>Comparación respecto a alternativas de motores DC.....</i>	14
2.2.	FUNDAMENTOS FÍSICOS Y MECÁNICOS	15
2.2.1	<i>Torque eléctrico y mecánico.....</i>	15
2.2.2	<i>Densidad de Torque</i>	16
2.2.3	<i>Cinemática rotacional.....</i>	17
2.3.	SISTEMA DE TRANSMISIÓN MECÁNICA	18
2.3.1	<i>Generalidades sobre engranajes.....</i>	18
2.3.2	<i>Tren de engranajes planetarios</i>	19
2.4.	PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN CAN	22
2.4.1	<i>Protocolos de comunicación serial.....</i>	22
2.4.2	<i>Capa física del protocolo CAN.....</i>	24
2.4.3	<i>Descripción del protocolo CAN y envío de datos.....</i>	25
2.5.	MODELACIÓN E IMPRESIÓN 3D	27
3.	SOLUCIÓN PROPUESTA.....	29
3.1.	PROBLEMÁTICA ACTUAL Y SISTEMA PARA PROPONER.....	29
3.2.	ACTUADORES PROPUESTOS.....	31
3.2.1	<i>Quasi Direct Drive (QDD)</i>	31
3.2.2	<i>Actuador propioceptivo</i>	32
3.3.	DISEÑO CONCEPTUAL DEL SISTEMA ROBÓTICO.....	32
3.3.1	<i>Diagrama conceptual de actuador QDD</i>	32
3.3.2	<i>Arquitectura eléctrica de robot BIP0.....</i>	33
3.3.3	<i>Condiciones de diseño.....</i>	35
3.3.4	<i>Lista de materiales</i>	36
4.	DISEÑO EN DETALLE	38
4.1.	DISEÑO DE CAJA REDUCTORA	38
4.2.	ESTRATEGIAS DE CONTROL.....	40
4.3.	ESTRATEGIA DE COMUNICACIÓN CAN PARA SISTEMA MULTI DRIVER.....	45
4.3.1	<i>Arquitectura electrónica.....</i>	45
4.3.2	<i>Protocolo CAN en firmware Odrive.....</i>	46
4.4.	ALGORITMO DE CONTROL Y MONITOREO CENTRAL.....	48
4.4.1	<i>Librería ODriveTeensyCAN</i>	48
4.4.2	<i>Lógica y funciones principales</i>	49
4.5.	DISEÑO 3D DE ROBOT BÍPEDO.....	51
5.	RESULTADOS	53

5.1.	PRUEBAS DE TORQUE.....	53
5.2.	CARACTERIZACIÓN FINAL DE ACTUADORES	55
5.3.	PROTOTIPO FINAL DE ROBOT BÍPEDO E INTEGRACIÓN DE ACTUADORES	56
5.4.	VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL EN ROBOT BÍPEDO BASADO EN ODRIVE S1 Y PROTOCOLO CAN.....	60
6.	CONCLUSIONES.....	61
6.1.	SUMARIO	61
6.2.	CONCLUSIONES	61
6.3.	TRABAJOS FUTUROS	62
	REFERENCIAS.....	63

Lista de Tablas

Tabla 1.1: Tabla de indicadores de accidentabilidad año 2021, por SISESAT SUSESO.....	3
Tabla 3.1: Lista de materiales y su uso para el actuador QDD propioceptivo	37
Tabla 3.2: Lista de materiales y su uso para el resto del robot B1P0.....	37
Tabla 5.1: Caracterización final de actuador QDD propioceptivo.....	55

Lista de Figuras

Figura 1.1: Robot bípedo Tron 1, desarrollado por la empresa LimX Dynamics.....	1
Figura 1.2: Comparación anatómica de articulaciones inferiores entre humano y avestruz (Haberland y Kim, 2015)	5
Figura 1.3: Comparativa del movimiento articular entre el colapso de rodilla hacia adelante y la propulsión con rodilla hacia atrás (Haberland y Kim, 2015)	6
Figura 1.4: Robot Mini Cheetah del Instituto Tecnológico de Massachusetts.....	7
Figura 1.5: Vista transversal superior del actuador de acero-molibdeno robótico diseñado por la Universidad de Genoa, Italia.	8
Figura 2.1: Configuraciones clásicas de estator y rotor en motores BLDC	12
Figura 2.2: Estructura interna de un motor BLDC de tipo Outrunner	12
Figura 2.3: Vista esquemática de un motor BLDC trifásico	13
Figura 2.4: Funcionamiento interno de un motor BLDC comparando señales de entrada y salida ...	14
Figura 2.5: Partícula P moviéndose en círculo bajo el centro O con una trayectoria s.....	18
Figura 2.6: Nomenclatura general de engranajes	19
Figura 2.7: Elementos de un tren de engranajes planetarios	20
Figura 2.8: Velocidades tangenciales de un engranaje en un punto central y exterior	21
Figura 2.9: Velocidades tangenciales y radios de un engranaje planetario de 3 planetas	21
Figura 2.10: Transmisión de datos serial (superior) y paralela (inferior)	23
Figura 2.11: Topología típica de CANbus extraída del datasheet del modulo SN65HVD230	24
Figura 2.12: Componentes de un nodo (dispositivo) conectado a un bus de CAN (datasheet modulo SN65HVD230).....	25
Figura 2.13: Funcionamiento de 2 estados lógicos en protocolo CAN, recesivo 1 y dominante 0 (A. Martínez Requena, "Introducción a CAN bus: Descripción, ejemplos y aplicaciones de tiempo real").....	26
Figura 2.14: Trama clásica de datos CAN	27
Figura 2.15: Proceso de modelado por deposición fundida	28
Figura 3.1: Dibujo conceptual de robot B1P0.....	30
Figura 3.2: Arquitectura interna del actuador propioceptivo QDD.....	33
Figura 3.3: Diagrama eléctrico del robot B1P0.....	34
Figura 4.1: Tren de engranajes planetarios con porta planeta y rodamientos	39
Figura 4.2: Tren de engranajes planetario sin porta planeta	40
Figura 4.3: Diagrama de control en lazo cerrado en cascada utilizado en Odrive S1.....	41
Figura 4.4: Región de operación del control de torque basado en límites de corriente y velocidad..	42
Figura 4.5: Espacio sugerido entre la cara cercana del imán y el circuito integrado MA702.....	43
Figura 4.6: Configuración de parámetros de controladores por medio de Web GUI	43
Figura 4.7: Respuestas de posición, velocidad y corriente medidas por Odrive S1	44
Figura 4.8: Modelo 3D del actuador con soporte de imán, espaciado a 2 [mm] del encoder	44
Figura 4.9: Diagrama lógico del módulo SN65HVD230.....	45
Figura 4.10: Diagrama electrónico de comunicación CAN	46
Figura 4.11: Trama simple de mensajes CAN	47
Figura 4.12: Configuración de interfaz CAN por medio de la Web GUI	47
Figura 4.13: Diagrama de flujo para validación de actuadores integrado en robot B1P0.....	50
Figura 4.14: Modelo 3D de robot B1P0; a) vista frontal, b) vista trasera	52
Figura 5.1: Setup experimental: actuador, balanza digital y brazo de fuerza de 220 [mm].....	53
Figura 5.2: Resultados experimentales de torque en condiciones de saturación.....	54

Figura 5.3: Piezas 3D impresas y motores previo a ensamblaje	56
Figura 5.4: Actuador impreso; a) sin carcasa y salida de pernos, b) con carcasa y salida con polea dentada	57
Figura 5.5: Pierna completa de robot B1P0 de 3 grados de libertad	58
Figura 5.6: Ensamblaje completo de los 6 actuadores (con drivers) y 2 piernas completas	58
Figura 5.7: Robot B1P0 completamente armado con subsistemas eléctricos conectados	59

1. Introducción

1.1. Introducción General

Los robots bípedos han evolucionado desde prototipos experimentales de universidades destacadas hasta plataformas con aplicaciones prácticas en industrias como minería, manufactura, logística y rescate. Su principal ventaja radica en la capacidad de operar en entornos diseñados para humanos, incluyendo terrenos irregulares y espacios confinados donde los sistemas con ruedas resultan ineficientes. Sin embargo, su desarrollo enfrenta tres desafíos fundamentales: (1) la complejidad en mantener estabilidad con solo dos puntos de apoyo, (2) la alta demanda energética en movimientos explosivos (como saltos, escaladas, caídas, etc.), y (3) la necesidad de actuadores que combinen alto torque, precisión y baja inercia sin incrementar excesivamente costos o el peso.

En este contexto, los actuadores eléctricos propioceptivos han surgido como solución clave para robots dinámicos, destacándose en plataformas como el MIT Mini Cheetah [1], Cassie de Agility Robotics [2] o en robots comerciales como el construido por la empresa China Limx Dynamics [3], Fig. 1.1. Estos sistemas integran sensores de posición y control de torque en lazo cerrado, permitiendo movimientos precisos bajo cargas variables y mejorando la eficiencia energética [4]. No obstante, su implementación en entornos académicos suele verse limitada por los altos costos de componentes personalizados y la complejidad en el diseño mecánico de reductores planetarios, como se evidenció en los prototipos preliminares desarrollados para esta investigación [5].



Figura 1.1: Robot bípedo Tron 1, desarrollado por la empresa LimX Dynamics

Esta memoria, además aborda el diseño, construcción y validación experimental de un actuador robótico QDD propioceptivo modular de bajo costo, destinado a un robot bípedo de 6 grados de libertad. La propuesta se basa en tres pilares: (i) el uso de motores BLDC comerciales acoplados a engranajes planetarios impresos en 3D, validando experimentalmente como se mejora el torque continuo de salida y la densidad de torque; (ii) la implementación de un sistema de control basado en el driver Odrive S1 [6], utilizando protocolos CAN bus para sincronización multi-actuador; y (iii) la modelación 3D de un robot bípedo con su respectivo prototipo físico.

Los resultados obtenidos no solo tienen potencial aplicación en industrias de alta dinámica y terrenos complejos como minería, construcción, agronomía, entre otros. Sino que además, presentan un gran avance en el desarrollo de robots humanoides en Chile, siendo la Universidad de Concepción de las primeras casas de estudios en diseñar y construir un prototipo de robot bípedo modular y altamente escalable para investigaciones futuras, dando un paso al frente en la robótica avanzada para nuestro país.

1.2. El riesgo inherente de labores humanas

El uso de robots bípedos en labores de alto riesgo se presenta como una solución eficiente y viable en sectores donde las condiciones de trabajo son peligrosas para los seres humanos. Ámbitos como el rescate en incendios forestales, las labores de salvamento en entornos urbanos o las actividades en minería enfrentan riesgos constantes, que van desde accidentes por caídas, colapsos estructurales, hasta la exposición a gases tóxicos y químicos. Un bombero en acción, por ejemplo, se ve constantemente expuesto a peligros como quemaduras, derrumbes o la caída de elementos pesados, como árboles y ramas. En la industria minera, los informes del Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin) señalan que las principales causas de accidentes fatales son los golpes de rocas, las caídas desde alturas y los deslizamientos de tierra [7]. Además, las estadísticas de accidentabilidad laboral del 2020 revelan que los accidentes más comunes se originan a partir de factores materiales, como el uso de herramientas no eléctricas, y condiciones ambientales o estructurales adversas [8]. Como se ilustra en la Tabla 1.1:

Tabla 1.1: Tabla de indicadores de accidentabilidad año 2021, por SISESAT SUSES0

Indicadores de accidentabilidad	
Agentes materiales del accidente, en mutualidades	
No se incluye la información de Mutual de Seguridad (no incluye accidentes de trayecto)	
2020	
Herramientas no eléctricas	36,03%
Factores ambientales y estructurales	33,92%
Agentes y productos químicos	8,59%
Otros aparatos o herramientas	6,20%
Medios de transporte rodantes	5,22%
Ambiente del trabajo en el exterior	4,21%
Agrupación del resto de agentes	2,73%
Animales	1,14%
Aparatos de izar	1,00%
Escaleras, rampas móviles	0,95%

A partir de estos datos, es evidente que, si bien algunos accidentes pueden originarse por errores humanos, muchos otros son el resultado de condiciones imprevistas o peligrosas que no pueden ser fácilmente mitigadas por la intervención directa de los trabajadores. Los robots bípedos, equipados con sensores avanzados, podrían realizar tareas como la inspección de zonas peligrosas, la detección de sustancias tóxicas y la evaluación de la estabilidad estructural, minimizando así la exposición de los trabajadores a estos riesgos. Estos robots no solo serían capaces de acceder a lugares inaccesibles para los humanos, sino que también ofrecerían una capa adicional de seguridad al acompañar a los operativos en terreno, anticipando y previniendo posibles accidentes.

Aunque los robots móviles autónomos con ruedas también podrían realizar algunas de estas tareas, su capacidad para maniobrar en terrenos complejos es limitada. Las ruedas enfrentan dificultades al sortear obstáculos, subir escaleras o desplazarse en terrenos irregulares, lo que incrementa el consumo energético y, en muchos casos, hace inviable su uso en entornos altamente dinámicos. En cambio, un robot bípedo, gracias a su capacidad para adaptarse a variaciones en el terreno y sortear obstáculos con mayor facilidad, representa una solución más eficiente, segura y energética para enfrentar desafíos en estos entornos.

1.3. Una breve revisión sobre los robots de alta dinámica con patas

Los robots humanoides y con patas han experimentado avances tecnológicos considerables en las últimas dos décadas. Dos factores principales que han contribuido al desarrollo de la investigación sobre robots con patas: el hardware y la tecnología de control.

Ahora bien, la pregunta que cualquiera podría realizarse es porque con patas y no con ruedas. La promesa de los robots con patas frente a los robots con ruedas estándar es proporcionar una movilidad mejorada en terrenos difíciles. Esta promesa se basa en el desacoplamiento entre el entorno y el cuerpo principal del robot que permite la presencia de piernas articuladas, con dos consecuencias. En primer lugar, el movimiento del cuerpo principal del robot puede hacerse en gran medida independiente de la rugosidad del terreno, dentro de los límites cinemáticos de las piernas. En segundo lugar, este desacoplamiento permite que las piernas abandonen temporalmente su contacto con el suelo, pudiendo así superar los puntos de apoyo aislados en un terreno discontinuo, lo que permite visitar lugares absolutamente fuera de alcance de otro modo y además mejorar la eficiencia energética en ciertos periodos de tiempo cuando una pierna esté en caída libre.

Aunque todavía no igualan las capacidades de los humanos y los animales, los robots con patas sí contribuyen a comprender su locomoción y estilo de movimiento, como lo demuestran las muchas colaboraciones fructíferas entre investigadores en robótica y biomecánica.

Recientemente, diferentes institutos de investigación han desarrollado robots cuadrúpedos más avanzados, como HyQ, ANYmal, MITCheetah y MiniCheetah. En el caso de los robots bípedos y humanoides, se han publicado en la literatura muchos logros de investigación significativos como TORO, TALOS, E2-DR, Cassie o algunos robots industriales de origen privado como el Biped Robot Tron 1 de Limx Dynamics, Digit de Agility Robotics, Optimus Gen 2 de Tesla, o el recientemente actualizado robot Atlas de Boston Dynamics.

El progreso en las últimas décadas ha sido notable. Preguntas profundas han sido finalmente respondidas: ahora se entiende cómo hacer que los robots con patas caminen y corran de manera bastante práctica. Pero aún quedan otras preguntas profundas por responder, como cuál es la mejor manera (o manera óptima) de hacer que caminen y corran eficientemente, o también si es posible estandarizar o generalizar un método de locomoción bípeda en la mayoría de robots.

El rendimiento de los robots con patas necesita ser mejorado de muchas maneras: energía, velocidad, reactividad, versatilidad, robustez, etc. Por lo tanto, seguiremos discutiendo en el siguiente tema los problemas más relevantes que actualmente intrigan a nuestra comunidad robótica.

1.4. La eficiencia anatómica de robots bípedos con rodillas hacia atrás

El diseño de robots bípedos se basa en principios anatómicos observados en la naturaleza, destacando la orientación de las rodillas. En el estudio de Haberland y Kim (2015) [4], se demuestra que las rodillas hacia atrás optimizan la eficiencia de locomoción al reducir la dependencia del torque en la cadera y permitir que una sola articulación combine funciones de propulsión y elevación. Este diseño es más eficiente en un 80% de los casos evaluados en cuanto al costo mecánico de transporte, con una significativa disminución del esfuerzo en la cadera.

Sin embargo, es importante aclarar que el diseño del robot bípedo no utiliza rodillas en el sentido convencional. Aunque el estudio se basa en la eficiencia de rodillas hacia atrás, en el futuro robot lo que parecen ser las rodillas, de hecho, son tobillos modificados con una configuración similar a las rodillas hacia atrás como se puede ver en la Figura 1.2. Esto significa que, aunque la anatomía y la mecánica son las de un tobillo, visual y funcionalmente adoptan un principio similar al de las rodillas hacia atrás, favoreciendo la propulsión y la elevación sin depender del movimiento de la cadera.

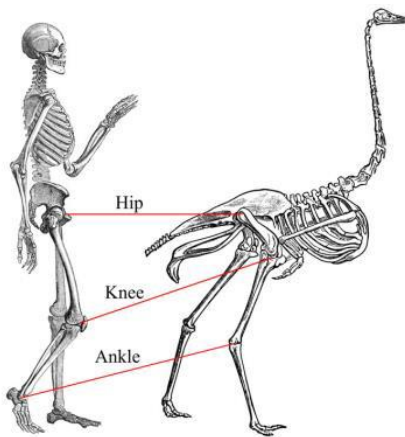


Figura 1.2: Comparación anatómica de articulaciones inferiores entre humano y avestruz (Haberland y Kim, 2015)

Ventajas funcionales clave de este diseño:

1. **Propulsión y elevación simultáneas:** Las articulaciones modificadas, que imitan el comportamiento de las rodillas hacia atrás, permiten que el robot mantenga propulsión sin depender de la cadera. Como se observa en la Figura 1.3, una rodilla tradicional hacia adelante no podría realizar este tipo de propulsión sin la ayuda de la cadera.

2. **Reducción de pérdidas de energía por impacto:** Al igual que en el caso de las rodillas hacia atrás, este diseño reduce el torque cuadrático, optimizando el costo de transporte y mejorando la eficiencia energética.

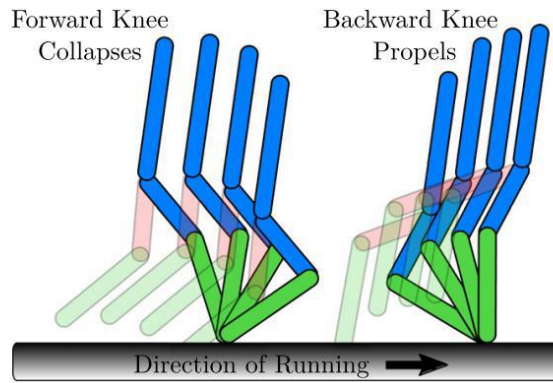


Figura 1.3: Comparativa del movimiento articular entre el colapso de rodilla hacia adelante y la propulsión con rodilla hacia atrás (Haberland y Kim, 2015)

Aunque el estudio de Haberland y Kim [4] no evalúa explícitamente terrenos irregulares, los principios mencionados sugieren que este tipo de diseño también es ventajoso en contextos de variabilidad del terreno debido a:

- **Menor dependencia de la cadera:** La reducción del torque necesario en la cadera minimiza los desbalances causados por cambios en la altura del terreno o impactos laterales.
- **Adaptación a variaciones del terreno:** La capacidad de los tobillos modificados para realizar propulsión y elevación permite ajustes rápidos en la zancada sin comprometer la estabilidad.
- **Centro de masa estable:** Concentrar la masa cerca del torso reduce el momento de inercia, facilitando el equilibrio ante perturbaciones externas.

Este diseño con tobillos modificados que simulan rodillas hacia atrás se presenta como una solución eficiente y funcional para superar las limitaciones comunes en la locomoción robótica. La capacidad de reducir la dependencia de la cadera, optimizar el torque en las articulaciones y adaptarse dinámicamente a variaciones del terreno resalta como una ventaja clave para el rendimiento del robot, posicionándolo como una opción robusta para aplicaciones en terrenos complejos.

1.5. Requisitos de diseño en actuadores modulares para robots de alta dinámica

Un robot bípedo sin un buen actuador, es como un deportista sin buenos músculos. El diseño de actuadores modulares para robots de alta dinámica, siendo generalmente estudiado por las universidades mas reconocidas del mundo en robótica, debe equilibrar torque, eficiencia, velocidad y peso. A continuación se presentan los requisitos clave extraídos de actuadores desarrollados por algunas academias, como la Universidad de Genoa, la Universidad de Denver y el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT).

1. Densidad de torque y eficiencia:

El robot Mini Cheetah del MIT (ver Figura 1.4) optimiza la densidad de torque mediante un rotor personalizado, logrando un torque máximo de 34 [Nm] sin aumentar el tamaño del motor [9]. Este enfoque de alta densidad de torque es esencial para generar fuerza en un tamaño compacto. Similarmente, el actuador de la Universidad de Genoa prioriza alta velocidad y torque continuo mediante un diseño de baja reducción, alcanzando un torque continuo de 26.4 [Nm] con una eficiencia de 80% [10].



Figura 1.4: Robot Mini Cheetah del Instituto Tecnológico de Massachusetts

2. Reducción de inercia y aumento de compacidad:

El Mini Cheetah y el robot Mithra de la Universidad de Denver colocan los actuadores de manera proximal para reducir la inercia, facilitando movimientos rápidos y controlados [9][11].

Mithra también utiliza mecanismos de 4 barras en el tobillo para reducir la masa distal y mejorar la dinámica.

3. Adaptabilidad dinámica y control:

El actuador del MIT y de Genoa integran sensores de retroalimentación como encoders magnéticos y control FOC, lo que permite ajustar la respuesta del actuador en tiempo real durante tareas dinámicas [9][10], asegurando un control preciso incluso en altas velocidades, permitiendo que el actuador mantenga un rendimiento estable bajo condiciones dinámicas

4. Resistencia estructural:

La resistencia estructural es clave para soportar fuerzas de impacto y garantizar la durabilidad del actuador. El uso de materiales ligeros y resistentes en el MIT Mini Cheetah y el robot Mithra aseguran la resistencia estructural sin aumentar mucho el peso. El robot de Genoa utiliza engranajes de acero-molibdeno (ver Figura 1.5) en su caja reductora para proporcionar rigidez adicional [10].

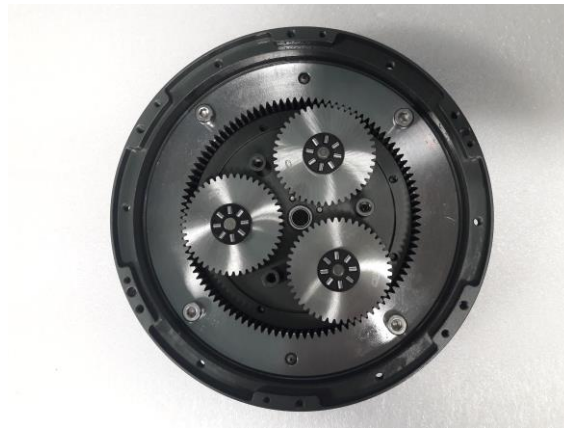


Figura 1.5: Vista transversal superior del actuador de acero-molibdeno robótico diseñado por la Universidad de Genoa, Italia.

1.6. Objetivos

1.6.1 Objetivo General

Diseñar, construir y validar actuadores robóticos QDD propioceptivos capaces de funcionar simultáneamente integrados en un robot bípedo de 6 grados de libertad.

1.6.2 Objetivos Específicos

- Establecer un protocolo de comunicación para el trabajo simultáneo de múltiples drivers y verificar su correcto funcionamiento.
- Construir un actuador robótico de baja relación de transmisión capaz de retroalimentar su posición en tiempo real.
- Diseñar un modelo 3D para un robot bípedo de 6 grados de libertad.
- Lograr un movimiento independiente de cada eje del robot bípedo.

1.7. Alcances y Limitaciones

Este trabajo se enfoca en desarrollar actuadores robóticos para un robot bípedo, pero con algunas restricciones importantes. No se diseñarán los circuitos electrónicos ni los motores desde cero, se utilizarán componentes ya disponibles en el mercado. Tampoco se harán optimizaciones mecánicas muy avanzadas, sino que se limitará a modelado 3D básico con los materiales que se tengan a mano.

Lo que sí se logra es crear un sistema completo donde varios actuadores trabajen independientemente, con un protocolo de comunicación implementado. El robot tendrá 6 grados de libertad y se validará el funcionamiento con pruebas prácticas de movimiento y torque, sabiendo que será un prototipo académico más que un producto industrial terminado.

La idea es demostrar que se puede armar un sistema robótico funcional con componentes accesibles, sentando bases para futuras mejoras. No es perfecto, pero sirve para investigar conceptos clave de locomoción bípeda, sistemas de comunicaciones, actuadores eléctricos, cinemática, visión artificial y varios conceptos más abordados por diferentes alumnos de la facultad de ingeniería, de tal manera de crear un proyecto sólido y escalable a lo largo del tiempo.

1.8. Temario y Metodología

Esta memoria sigue una estructura progresiva que avanza desde los fundamentos teóricos hasta la implementación práctica, organizada en seis capítulos principales. El Marco Teórico (Capítulo 2) establece las bases físicas y mecánicas del proyecto, incluyendo dinámica rotacional, diseño de actuadores y protocolos de comunicación, respaldado por revisión bibliográfica de referencias clave. Los Capítulos 3 y 4 analizan soluciones existentes y presentan una propuesta de diseño, centrada en modularidad y bajo costo mediante modelado 3D y componentes comerciales.

La metodología combina prototipado ágil (impresión 3D, pruebas incrementales) con validación experimental sistemática. Finalmente el Capítulo 5 detalla la implementación del actuador y los resultados de torque y sincronización de actuadores, contrastando datos teóricos y empíricos. El proceso se apoya en herramientas como Fusion 360, lenguaje C++, Python, entre otras. Asegurando constantemente el cumplimiento de los objetivos específicos planteados en la sección 1.6.2.

2. Marco Teórico

2.1. Motores DC Brushless y operación

Los motores DC Brushless, conocidos popularmente como BLDC (Brushless DC), son motores eléctricos de corriente continua que no poseen escobillas ni sistemas de conmutación mecánica, a diferencia de los motores DC tradicionales. Esta ausencia de partes móviles de fricción proporciona beneficios como mayor vida útil, menor mantenimiento y una eficiencia energética superior.

Aunque estos motores suelen clasificarse como motores DC debido a su alimentación directa con corriente continua, técnicamente pertenecen a la familia de motores síncronos, caracterizados por operar a una velocidad sincronizada con la frecuencia de la corriente aplicada mediante un inversor electrónico. Esta velocidad se define según la fórmula:

$$N = \frac{120f}{P} \quad (2.1)$$

donde N representa la velocidad de sincronismo en [rpm], f la frecuencia de alimentación, y P el número de pares de polos del motor [12]. De esta ecuación se concluye que, para realizar un control continuo y eficiente de la velocidad, es imprescindible modificar la frecuencia de excitación eléctrica del motor ya que la alternativa de variar físicamente el número de pares de polos es inviable para aplicaciones dinámicas donde buscamos obtener velocidades variantes y no discretas en el tiempo.

2.1.1 Construcción

Los motores BLDC presentan dos configuraciones constructivas principales [13]:

- Inrunner: El rotor se ubica en el interior del estator, proporcionando mayores velocidades de rotación a costa de un menor torque.
- Outrunner: El rotor rodea externamente al estator, resultando en mayores niveles de torque pero a menores velocidades, como se muestra en la Figura 2.1.

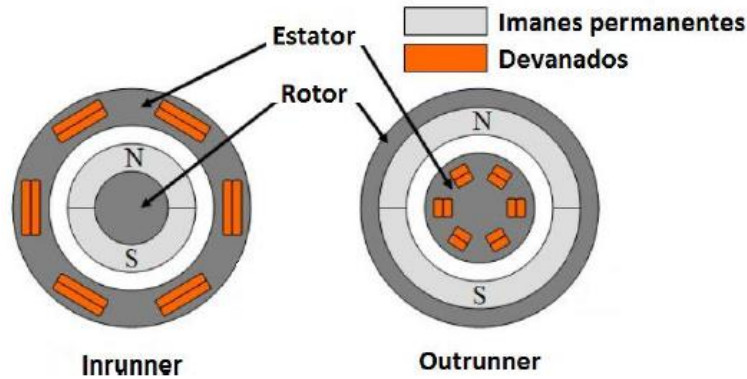


Figura 2.1: Configuraciones clásicas de estator y rotor en motores BLDC

La estructura interna consiste en un rotor provisto de imanes permanentes y un estator con devanados distribuidos en fases generalmente trifásicas. La Figura 2.2 ilustra esta configuración básica.



Figura 2.2: Estructura interna de un motor BLDC de tipo Outrunner

2.1.2 Principio de funcionamiento y sistemas de control

El principio de operación del motor BLDC radica en la interacción entre los campos magnéticos generados por los imanes permanentes del rotor y los campos electromagnéticos generados por los devanados del estator. Estos motores están diseñados específicamente para lograr una fuerza electromotriz (FEM) de forma trapezoidal, lo que exige un flujo magnético uniforme por parte del rotor [14].

En un motor BLDC trifásico típico, las fases del estator (A, B y C) se energizan secuencialmente mediante un controlador electrónico, generalmente un inversor trifásico. Esta secuencia de activación crea un campo magnético rotatorio que interactúa con el campo magnético

estático generado por los imanes permanentes del rotor, induciendo así su rotación. La activación de cada fase debe sincronizarse cuidadosamente en función de la posición angular del rotor, generalmente detectada por sensores Hall o mediante técnicas de detección de fuerza contraelectromotriz (FCEM).

La Figura 2.3 muestra una configuración típica de un motor trifásico BLDC, donde se identifican el estator con las bobinas trifásicas (fases U, V y W), el rotor provisto de imanes permanentes, y el espacio de aire que facilita la interacción magnética.

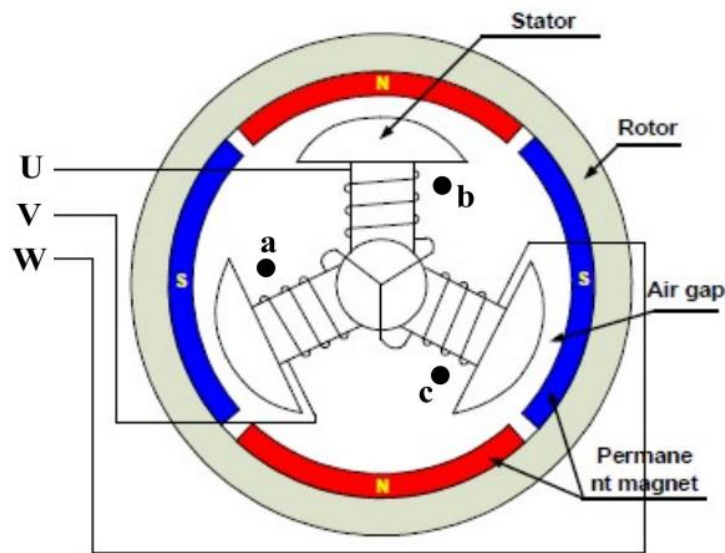


Figura 2.3: Vista esquemática de un motor BLDC trifásico

La secuencia típica de activación de las fases sigue un patrón como $U \rightarrow V \rightarrow W$, con cada fase activada en intervalos específicos y alternando la polaridad para asegurar una rotación continua y uniforme del rotor. Este proceso se repite continuamente mientras se aplica energía al motor [14].

Como se ha explicado anteriormente, para poder controlar la velocidad de un motor síncrono de una manera continua es necesario ajustar la frecuencia de excitación, por este motivo los motores BLDC precisan de algún dispositivo capaz de transformar una señal continua en otra alterna; para la tarea anterior se suele utilizar un inversor, capaz de generar una señal de excitación alterna de frecuencia deseada con la que poder alimentar a cada fase del motor.

La conmutación y control preciso de los motores BLDC generalmente se realiza mediante sensores de efecto Hall. Estos sensores proporcionan señales discretas que informan al controlador electrónico sobre la posición angular del rotor, lo que permite realizar una conmutación adecuada y precisa de los devanados del estator, asegurando un control estable y eficiente.

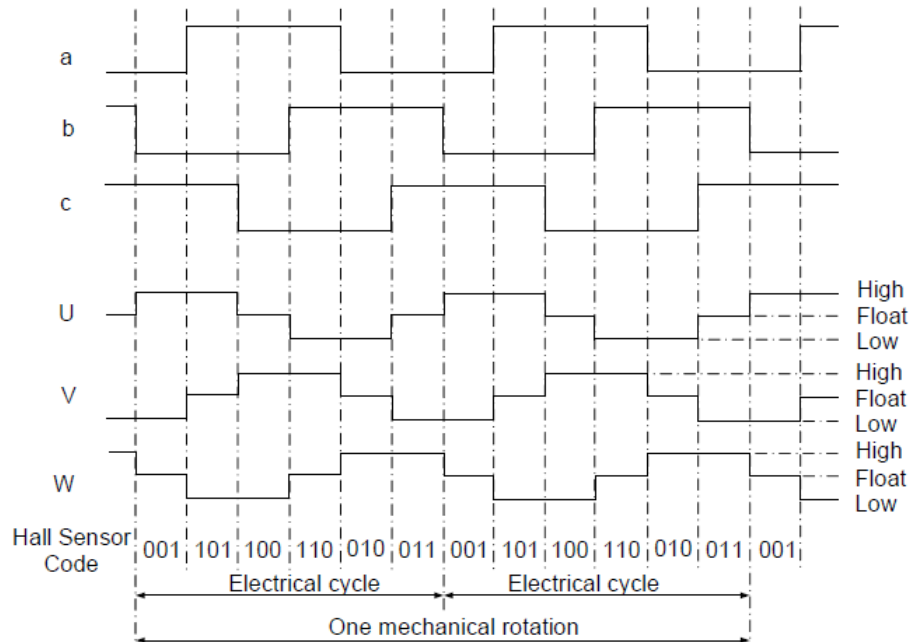


Figura 2.4: Funcionamiento interno de un motor BLDC comparando señales de entrada y salida

La Figura 2.4 muestra la relación entre la señal generada por la FEM y la posición codificada por los sensores de efecto Hall.

En aplicaciones donde los sensores no son una opción viable, por ejemplo en ambientes herméticos como compresores, se utiliza un método denominado control "sensorless", basado en la detección de la fuerza contraelectromotriz (FCEM). En este enfoque, la conmutación se realiza detectando los cruces por cero de la señal FCEM [14].

2.1.3 Comparación respecto a alternativas de motores DC

La elección de motores BLDC para robots dinámicos bípedos está justificada por varias razones técnicas. Los motores síncronos alimentados por corriente alterna no son adecuados debido a la limitación práctica de disponer de una red fija de 220 [V]. Por ende, los motores BLDC alimentados por corriente continua destacan como la opción ideal, al proporcionar alto torque, respuesta rápida y eficiencia energética con fuentes de alimentación portátiles.

En comparación con otras opciones populares como servomotores o motores paso a paso, los motores BLDC ofrecen ventajas claras en aplicaciones robóticas dinámicas debido a su mayor relación torque-peso, alta eficiencia energética y capacidad para respuestas rápidas y precisas en situaciones cambiantes. Los servomotores tienden a ser más pesados y lentos, mientras que los

motores paso a paso generalmente presentan limitaciones en términos de torque dinámico y eficiencia energética.

2.2. Fundamentos físicos y mecánicos

En el desarrollo de actuadores robóticos es preciso entender la física detrás de todo y por supuesto los objetivos que se desean alcanzar. Cuando se busca obtener un actuador robótico robusto, de alta dinámica, poca masa y alto torque, buscamos cumplir con principios básicos de física general y mecánica, como lo es el concepto de torque (o par) ya sea mecánico o eléctrico, un concepto poco conocido pero muy usado en el diseño de sistemas mecánicos fuertes, como lo es la densidad de torque. Siguiendo la misma línea, como se ve en capítulos posteriores el diseño de un actuador siempre debe considerar un sistema de amplificación de fuerzas (torque), lo cual en mecánica, siempre lleva a la teoría y base de todo, como lo es las velocidades angulares, tangenciales y transmisión de potencia.

2.2.1 Torque eléctrico y mecánico

Cuando se ejerce una fuerza en un objeto rígido que se articula en torno a un eje, el objeto tiende a dar vuelta en torno a dicho eje. La tendencia de una fuerza a dar vuelta un objeto en torno a cierto eje se mide mediante una cantidad llamada momento de torsión, torque, par o en algunos países torca. Denominado comúnmente con la letra griega tau (τ). [15]

La magnitud del momento de torsión se define mediante la siguiente expresión medida en Newton metro [Nm]:

$$\tau = rF\sin(\phi) \quad (2.2)$$

donde r es la distancia entre el punto de aplicación de la fuerza F y ϕ es el ángulo con la horizontal en el punto donde se aplica la fuerza. Notar que si $\phi = 90^\circ$ el torque es máximo, por lo tanto en esos casos se puede simplificar la expresión a simplemente la fuerza aplicada multiplicada por la distancia al eje de rotación.

Por otro lado, pero de manera similar, en las máquinas eléctricas rotatorias, como lo es anteriormente explicado un motor BLDC, el concepto de torque físicamente es el mismo orientado a un eje como lo es el rotor, pero se consideran otras propiedades para calcularlo. como por ejemplo la corriente que circula por la armadura del motor ya que todos los conductores en el devanado de armadura desarrollan torque en la misma dirección entonces contribuyen a este torque. De esta manera el torque medio eléctrico total es:

$$\tau = K_a \Phi I_a \quad (2.3)$$

donde Φ es el flujo magnético que fluye desde el polo a la armadura, K_a la constante del devanado que depende del diseño del motor y finalmente I_a que es la corriente de armadura que es proporcional a la carga del motor [16]. De esta manera, el torque claramente depende de la carga sometida en el eje la cual se ve reflejada en el consumo de corriente.

2.2.2 Densidad de Torque

En el diseño de sistemas mecánicos y actuadores robóticos, un parámetro frecuentemente subestimado pero de gran relevancia es la densidad de torque. Este concepto permite evaluar la capacidad de un componente para entregar fuerza rotacional (torque) en relación con el espacio o volumen que ocupa, lo que resulta fundamental en aplicaciones donde el tamaño y el peso están restringidos, como en robótica bípoda.

La densidad de torque se define como la relación entre el torque que puede entregar un componente y su volumen:

$$\text{Densidad de Torque} = \frac{\tau}{V} \quad (2.4)$$

donde es el torque entregado y el volumen físico del componente. Sus unidades típicas son Newton-metros por metro cúbico [Nm/m^3] o Joules por metro cúbico. En esencia, cuantifica cuánta fuerza rotacional puede generar un sistema por unidad de espacio disponible [17].

Este parámetro complementa a la tradicional potencia mecánica, definida como:

$$P_m = \tau \omega \quad (2.5)$$

donde ω representa la velocidad angular. Si bien la potencia indica cuánto trabajo puede realizar un sistema por unidad de tiempo, la densidad de torque se centra en dónde ocurre el trabajo dentro del espacio físico ocupado. En el mundo de la robótica y a lo largo de esta memoria, este parámetro se expresa en [Nm/kg], ya que se busca comparar directamente el torque disponible con la masa del actuador. Porque si bien, el volumen es relevante, este se puede flexibilizar dentro del espacio de un robot o bien adaptar piezas. Sin embargo, el peso es un factor crítico que determina la dinámica y eficiencia del robot, no pudiendo modificarse fácilmente.

En el diseño de actuadores robóticos, una alta densidad de torque permite integrar sistemas potentes en estructuras compactas, optimizando espacio y reduciendo masa. Esto mejora la eficiencia energética, estabilidad y agilidad del robot, aspectos clave en locomoción bípoda.

Usar este parámetro desde etapas tempranas del diseño facilita decisiones inteligentes al comparar alternativas con igual potencia pero distinta eficiencia volumétrica. Sus beneficios incluyen reducción de peso, menor volumen ocupado, ahorro de costos y posibilidad de diseños más innovadores.

En suma, la densidad de torque es un indicador clave para lograr actuadores eficientes y funcionales en robots de alta dinámica.

2.2.3 Cinemática rotacional

Cuando un objeto rígido gira respecto a un eje fijo, sus partículas se mueven en trayectorias circulares alrededor de dicho eje. Este tipo de movimiento da origen a dos conceptos fundamentales para el análisis cinemático de sistemas rotacionales: velocidad angular y velocidad tangencial [15].

La velocidad angular ω describe qué tan rápido gira un objeto respecto a un eje. Si la aceleración angular α es constante, la variación de ω a lo largo del tiempo se obtiene integrando la aceleración, es decir:

$$\omega_f = \omega_i + \alpha t \quad (\text{para } \alpha \text{ constante}) \quad (2.6)$$

Esta expresión permite determinar la velocidad angular en cualquier instante t , siendo ω_i la velocidad angular inicial. Es análoga a la ecuación del movimiento rectilíneo uniformemente acelerado en dinámica lineal.

Por otro lado, la velocidad tangencial v representa la rapidez lineal de una partícula situada a una distancia r del eje de rotación. Si bien todas las partículas del objeto giran con la misma velocidad angular, aquellas más alejadas del eje recorren trayectorias circulares más extensas en el mismo tiempo, por lo que su velocidad lineal es mayor [15].

La relación entre v y ω se obtiene derivando la distancia recorrida s por una partícula en función del tiempo como se muestra en la Figura 2.5:

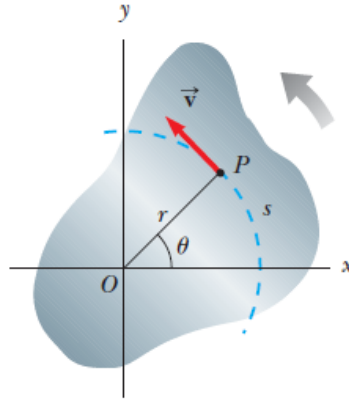


Figura 2.5: Partícula P moviéndose en círculo bajo el centro O con una trayectoria s

$$v = \frac{ds}{dt} = r \frac{d\theta}{dt} \quad (2.7)$$

Dado que $\omega = \frac{d\theta}{dt}$, se concluye que:

$$v = r\omega \quad (2.8)$$

Esta ecuación muestra que la velocidad tangencial de un punto en rotación es directamente proporcional a su distancia al eje. Por tanto, en un objeto rígido, aunque todos los puntos compartan la misma velocidad angular, su velocidad tangencial varía linealmente con r .

En el diseño de sistemas rotacionales como actuadores y transmisiones, estas relaciones son esenciales para calcular velocidades y fuerzas en distintos puntos del mecanismo, y así optimizar su desempeño mecánico y dinámico.

2.3. Sistema de transmisión mecánica

Un sistema de transmisión eficiente es clave para transformar correctamente la energía del motor en movimiento útil, especialmente cuando se requiere aumentar el torque disponible. En esta sección se presentan las generalidades necesarias para comprender el funcionamiento de los engranajes, base indispensable para entender los sistemas planetarios analizados posteriormente.

2.3.1 Generalidades sobre engranajes

Los engranajes son mecanismos diseñados para transmitir movimiento de rotación entre ejes mediante el contacto sucesivo de dientes tallados en ruedas dentadas. Su función principal es modificar el torque y la velocidad angular de manera precisa, sin deslizamientos, lo que los convierte en elementos fundamentales en sistemas de transmisión mecánica [18].

La geometría de un engranaje está definida por varios parámetros clave. El más importante es la circunferencia primitiva, que es el círculo teórico donde ocurre el contacto ideal entre dientes. Su diámetro se denota como d_0 , y está relacionado con el módulo m y el número de dientes Z por la expresión:

$$m = \frac{d_0}{Z} \quad (2.9)$$

El módulo representa el tamaño del diente (en mm) y debe ser idéntico en todos los engranajes que engranan entre sí, siendo un parámetro normativo fundamental en el diseño y fabricación.

Otros elementos relevantes son la circunferencia exterior, que delimita el extremo superior de los dientes, y la circunferencia de fondo, que marca el límite inferior, el paso circular p_c que es el ancho entre un diente y el hueco siguiente medido sobre la circunferencia primitiva. El diente en sí se compone de la cara, el flanco y el fondo, zonas que deben estar perfiladas de forma que aseguren un contacto suave y continuo [18].

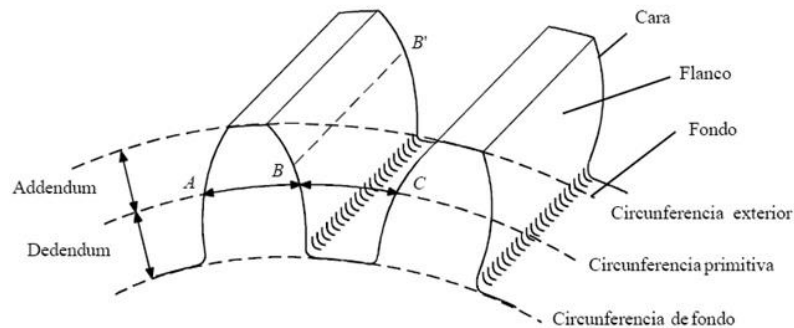


Figura 2.6: Nomenclatura general de engranajes

Además, la línea de presión define la dirección en que se transmite la fuerza entre dientes y debe pasar siempre por el punto primitivo, es decir, el punto de tangencia entre las circunferencias primitivas de los engranajes en contacto.

Estos conceptos geométricos constituyen la base para un análisis riguroso del funcionamiento de los engranajes y permiten garantizar una transmisión mecánica precisa y confiable.

2.3.2 *Tren de engranajes planetarios*

Los trenes de engranajes planetarios son sistemas de transmisión en los que al menos un engranaje denominado planeta gira sobre su propio eje mientras simultáneamente rota en torno a otro eje central. Este tipo de tren se compone típicamente de tres elementos: el sol o engranaje central, los

planetas o satélites que giran y orbitan alrededor del sol, el portador, carrier, o portaplaneta, que sostiene los planetas y gira junto a ellos y por último [19].

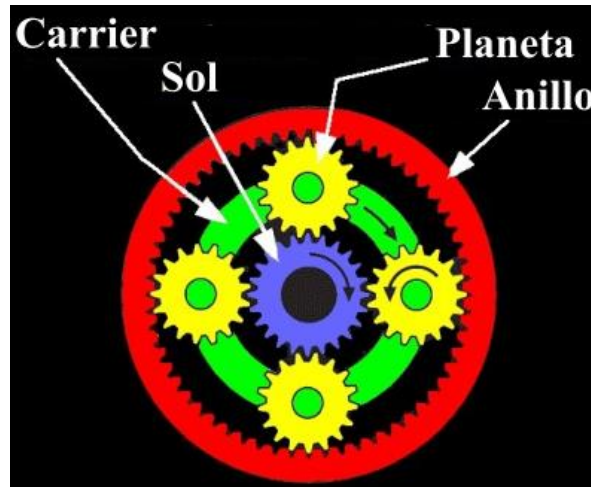


Figura 2.7: Elementos de un tren de engranajes planetarios

Este sistema permite una alta compacidad y eficiencia en la transmisión de potencia. En el caso del diseño de nuestro actuador, buscamos con este sistema un incremento de torque mediante la redistribución de velocidades angulares entre los elementos móviles. El principio físico fundamental que explica este aumento de torque es la conservación de la potencia mecánica. Recordemos que la potencia de un sistema rotacional se define como:

$$P_m = \tau\omega \quad (2.10)$$

En condiciones ideales (sin pérdidas), la potencia de entrada es igual a la de salida, es decir:

$$\tau_{in}\omega_{in} = \tau_{out}\omega_{out} \quad (2.11)$$

De esta igualdad se deduce que, cuando un tren planetario reduce la velocidad angular en la salida ($\omega_{out} < \omega_{in}$), el torque aumenta de manera proporcional ($\tau_{out} > \tau_{in}$). Así, al sacrificar velocidad se obtiene un incremento directo en el torque disponible, manteniendo constante la potencia transmitida.

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

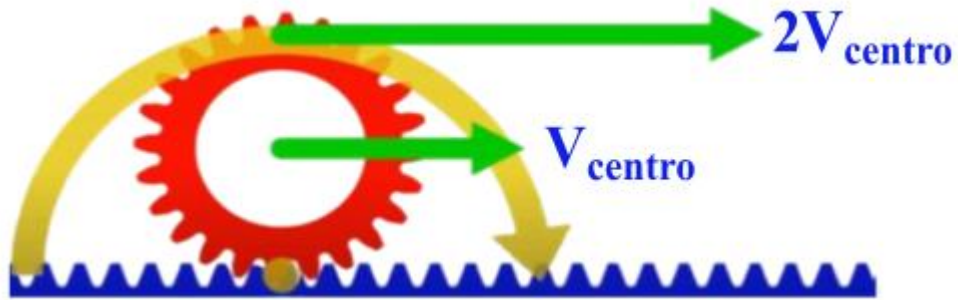


Figura 2.8: Velocidades tangenciales de un engranaje en un punto central y exterior

Recordando las secciones anteriores y observando la Figura 2.8, podemos ver que la velocidad tangencial en el centro y el exterior de un engranaje cualquiera serán:

$$v_{centro} = r\omega \quad (2.12)$$

$$v_{exterior} = 2v_{centro} \quad (2.13)$$

Por ende, para un sistema de engranajes planetarios típico de 3 planetas como se muestra en la Figura 2.9. Podemos deducir que la velocidad de salida del carrier o porta planeta v_c (que normalmente se ubica en el centro de un planeta) y la velocidad tangencial del sol v_s son,

$$v_c = \omega_c(r_s + r_p) \quad (2.14)$$

$$v_s = \omega_s r_s \quad (2.15)$$

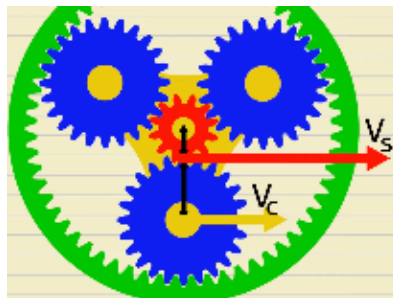


Figura 2.9: Velocidades tangenciales y radios de un engranaje planetario de 3 planetas

Donde r_p corresponde al radio del planeta. Pero también sabemos que en el punto donde impacta el engranaje solar, al igual como deducimos anteriormente, la velocidad tangencial es 2 veces la del carrier.

$$v_s = \omega_s r_s = 2v_c = 2\omega_c(r_s + r_p) \quad (2.16)$$

Luego, si se busca una relación entre la velocidad de salida con la de entrada (carrier con sol respectivamente) se obtiene,

$$\frac{\omega_s}{\omega_c} = \frac{2r_s + 2r_p}{r_s} \quad (2.17)$$

Sin embargo, si se observa detenidamente la Figura 2.9 podemos derivar el radio de un planeta a partir del radio del anillo de la siguiente manera,

$$r_r = r_s + 2r_p \quad (2.18)$$

$$2r_p = r_r - r_s \quad (2.19)$$

Donde se obtiene finalmente la siguiente relación de transmisión de velocidad

$$\frac{\omega_s}{\omega_c} = \frac{2r_s + r_r - r_s}{r_s} = 1 + \frac{r_r}{r_s} \quad (2.20)$$

Para continuar, es necesario expresar la relación anterior en función del número de dientes de los engranajes. Esto se fundamenta en la condición de engrane, la cual establece que el paso circular p_c debe ser el mismo para todos los engranajes en contacto:

$$p_c = \frac{\pi d_s}{Z_s} = \frac{\pi d_r}{Z_r} \quad (2.21)$$

Finalmente, simplificando obtenemos la relación de transmisión i ,

$$i = \frac{\omega_s}{\omega_c} = 1 + \frac{r_r}{r_s} = 1 + \frac{Z_r}{Z_s} \quad (2.21)$$

Cabe destacar que una condición poco considerada en los diseños de engranajes planetarios es que el número de dientes entre anillo y sol sobre el número planetas N_p debe ser un número entero, asegurando así una correcta simetría en el espacio disponible.

$$\frac{Z_r + Z_s}{N_p} = N^\circ \text{ entero} \quad (2.22)$$

Todas estas condiciones nos servirán en un futuro para el diseño de nuestro actuador basado en una transmisión de potencia con engranajes planetarios.

2.4. Protocolo de comunicación CAN

2.4.1 Protocolos de comunicación serial

Los protocolos y estándares de comunicación serial son ideales para dispositivos digitales o mixtos (analógico-digitales), especialmente con microcontroladores. A diferencia de las comunicaciones en paralelo, los buses seriales utilizan menos pines para intercambiar información

entre múltiples dispositivos como se evidencia en la Figura 2.10. Aunque son más lentos que las opciones en paralelo, su velocidad es suficiente para la mayoría de circuitos integrados y dispositivos, permitiendo el envío de comandos y datos eficientemente.

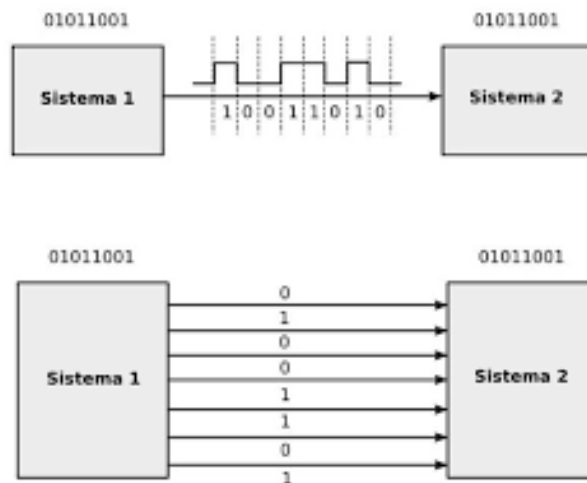


Figura 2.10: Transmisión de datos serial (superior) y paralela (inferior)

La comunicación serial se puede clasificar en síncrona y asíncrona, la primera requiere una fuente de reloj común para enviar datos sincronizadamente (según el canto del reloj), la segunda en cambio no requiere una fuente de reloj común entre el transmisor y receptor, ambos lados funcionan con relojes independientes. En general los protocolos de comunicación serial más comunes son:

- **SPI:** De tipo síncrona, usa cuatro líneas (MOSI, MISO, SCK y SS), con un maestro que controla el reloj y varios esclavos que responden cuando son seleccionados. Es rápido y confiable, aunque requiere más cables y depende totalmente del maestro.
- **I2C:** Comunicación síncrona de dos hilos (SDA y SCL) que admite múltiples maestros y esclavos, cada uno con dirección propia. Simplifica el cableado y la interconexión, pero es más lento que SPI por el proceso de enmarcado.
- **UART/USART:** Comunicación serial punto a punto que utiliza TX y RX; en UART es asíncrona y en USART puede ser también síncrona. Es sencilla y flexible en velocidad de transmisión, pero solo conecta dos dispositivos a la vez.
- **CAN:** Protocolo serial asíncrono diseñado para aplicaciones robustas en tiempo real, especialmente en entornos industriales y automotrices. Utiliza solo dos líneas (CAN_H

y CAN_L) para transmitir mensajes basados en identificadores en lugar de direcciones, lo que permite que múltiples nodos compartan el bus y determinen la prioridad de forma automática. Es altamente confiable frente a interferencias eléctricas y permite la comunicación eficiente entre numerosos dispositivos con un cableado reducido.

Para aplicaciones robóticas, aeronáuticas y automotrices de alto estándar, donde se requiere estar comunicándose en tiempo real con diferentes sensores, motores, periféricos y ser robusto ante ruido electromagnético, el protocolo dominante en el mercado por creces es el Controller Area Network (CAN), en la sección siguiente se estudiará en detalle su funcionamiento.

2.4.2 Capa física del protocolo CAN

El protocolo CAN posee una topología del tipo bus, es decir diversos dispositivos se pueden conectar a un mismo par de cables, llamados CAN-H y CAN-L, y así todos ser parte de una misma red, como se muestra en la Figura 2.11 extraída del módulo SN65HVD230.

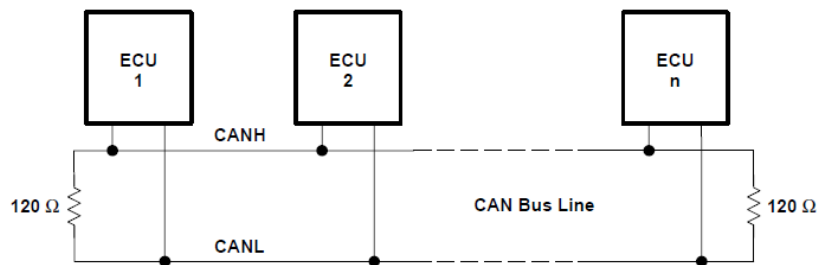


Figura 2.11: Topología típica de CANbus extraída del datasheet del modulo SN65HVD230

A pesar de poseer una topología simple, no todos los microcontroladores son capaces de manejar este protocolo, debido a que se necesita un controlador dedicado de CAN. Un sistema CAN típico se compone de 2 elementos básicos [20].

- Controlador: Gestiona la trama de datos, verifica errores en la transmisión propia o de otros nodos, así también la detección de colisiones.
- Transmisor/Receptor: También llamado transceptor de CAN. Este módulo se encarga de la codificación y decodificación de los mensajes en el bus, sincronización, control de los niveles de la señal o control de acceso al medio llamado arbitraje.

Tanto el controlador como el transceptor de CAN son módulos independientes, pero en conjunto forman un solo dispositivo (ver Figura 2.12), el cual se llama nodo. Cada nodo puede enviar mensajes

y cualquiera lo puede recibir ya que están todos conectados al mismo bus, sin embargo, como se ve en la sección siguiente cada mensaje al inicio lleva un identificador de nodo (node ID), de esta manera los dispositivos pueden descartar el mensaje si no coincide con su node ID o bien leerlos si coincide [20].

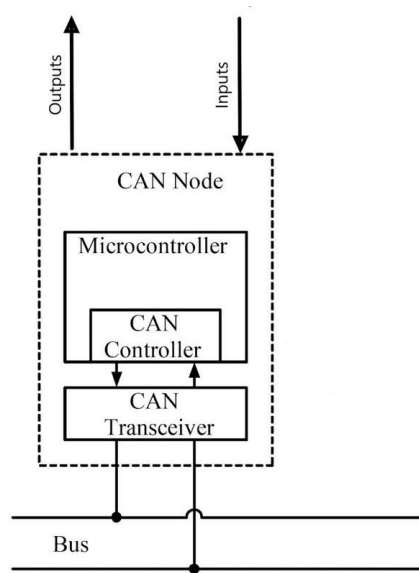


Figura 2.12: Componentes de un nodo (dispositivo) conectado a un bus de CAN (datasheet modulo SN65HVD230).

2.4.3 Descripción del protocolo CAN y envío de datos

Una de las mayores ventajas del protocolo CAN es su alta inmunidad al ruido electromagnético, razón por la cual se emplea ampliamente en la industria automotriz, donde los cables suelen recorrer grandes distancias cerca de bobinas, altavoces y sensores. A diferencia de otros protocolos seriales que podrían corromperse fácilmente en estas condiciones, CAN utiliza transmisión en modo diferencial, lo que significa que la información se transporta mediante dos señales de igual magnitud pero en direcciones opuestas (CAN_H y CAN_L).

El receptor no mide cada línea respecto a tierra, sino la diferencia entre ambas. Cuando CAN_H y CAN_L mantienen el mismo nivel (por ejemplo, 2,5 V cada una), el bus se interpreta en estado recesivo (lógico “1”). En cambio, cuando se genera una diferencia significativa (CAN_H aumenta y CAN_L disminuye), se obtiene un estado dominante (lógico “0”) [20]. Este principio, mostrado en la Figura 2.13, permite que el bus distinga con fiabilidad los niveles lógicos incluso en presencia de ruido, ya que las interferencias afectan a ambas líneas de igual manera y se cancelan al compararlas.

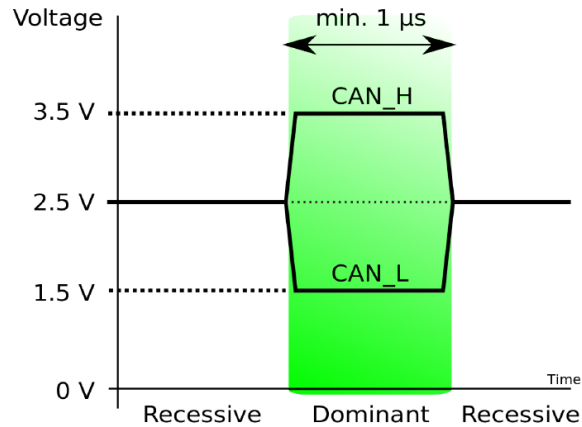


Figura 2.13: Funcionamiento de 2 estados lógicos en protocolo CAN, recesivo 1 y dominante 0 (A. Martínez Requena, "Introducción a CAN bus: Descripción, ejemplos y aplicaciones de tiempo real").

Los mensajes CAN están estructurados en varias tramas de datos garantizando una comunicación robusta y priorizada entre nodos (ver Figura 2.14) [20].

1. Bit de inicio (SOF - Start of Frame). Un bit dominante marca el inicio de la transmisión, sincronizando todos los nodos del bus antes de enviar datos.
2. Campo de identificador (ID) y RTR. El identificador (11 bits en formato estándar, 29 bits en formato extendido) determina la prioridad de la trama: valores más bajos tienen mayor prioridad debido a su mayor cantidad de bits dominantes al inicio. Incluye un bit RTR (Remote Transmission Request), que diferencia entre una trama de datos (0) y una solicitud remota (1).
3. Campo de control. Contiene 6 bits, 2 bits reservados (generalmente dominantes) y 4 bits DLC (Data Length Code), que indican el tamaño del campo de datos.
4. Campo de datos. Transporta la información útil, con un tamaño variable según el DLC. CAN admite hasta 8 bytes por trama, optimizando la eficiencia en transmisiones cortas.
5. CRC (Cyclic Redundancy Check). Un código de 16 bits (incluyendo un bit delimitador recesivo) que permite a los receptores detectar errores en los datos recibidos. Si hay discrepancia, la trama se descarta y se solicita retransmisión.
6. ACK (Acknowledgment). 2 bits (incluyendo delimitador) de reconocimiento, los cuales confirman recepción correcta.
7. EOF (7 bits recesivos): Marca el fin de la trama y libera el bus para nuevas transmisiones.

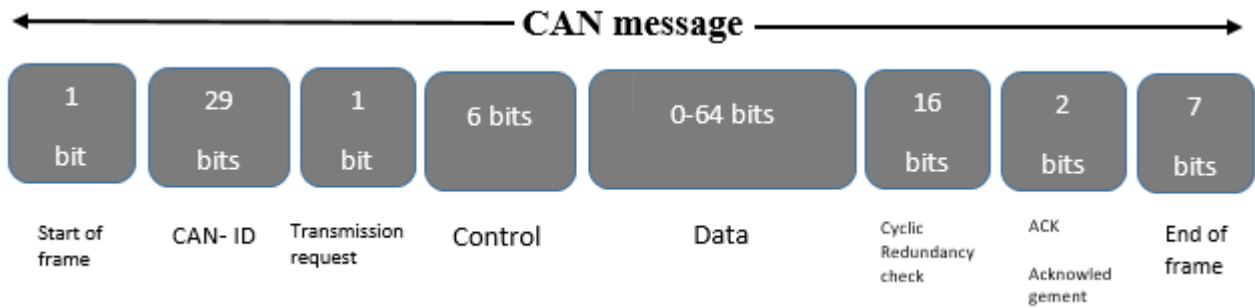


Figura 2.14: Trama clásica de datos CAN

Como se pudo ver, el manejo de errores en CAN con su sistema de nodos y la protección contra ruido, convierten al protocolo en un sistema robusto para aplicaciones de altas exigencias.

Sin embargo, lo que destaca al protocolo en usos como la robótica, automóviles y aeronáutica, es la capacidad de manejar múltiples dispositivos a una velocidad de transmisión muy alta y protegida, sin la necesidad de mucho material, mas bien con el simple uso de un par de cables trenzados.

2.5. Modelación e impresión 3D

La impresión 3D, una tecnología revolucionaria de fabricación por adición permite crear objetos tridimensionales superponiendo capas de material de manera precisa y eficiente. Surge en los años 80 con los primeros desarrollos de estereolitografía y el formato STL, pero fue en las últimas dos décadas cuando se popularizó gracias a la reducción de costos y la mejora en accesibilidad. Hoy, esta tecnología se usa en campos tan diversos como la medicina, la ingeniería y el diseño industrial, destacando por su capacidad para producir prototipos rápidos y piezas personalizadas sin necesidad de costosas herramientas de moldeo.

El proceso comienza con el modelado 3D mediante software CAD, donde se diseña la pieza con las dimensiones y geometrías necesarias. Una vez definido el modelo, un software de laminado (o slicer) divide el objeto en capas y genera las instrucciones para la impresora. Entre las técnicas más comunes está el modelado por deposición fundida (FDM/FFF), donde un filamento termoplástico se extruye capa por capa como se muestra en la Figura 2.15, ideal para prototipos funcionales por su bajo costo y versatilidad. Otras técnicas, como el sinterizado láser (SLS), permiten mayor precisión y resistencia, aunque con equipos más costosos.

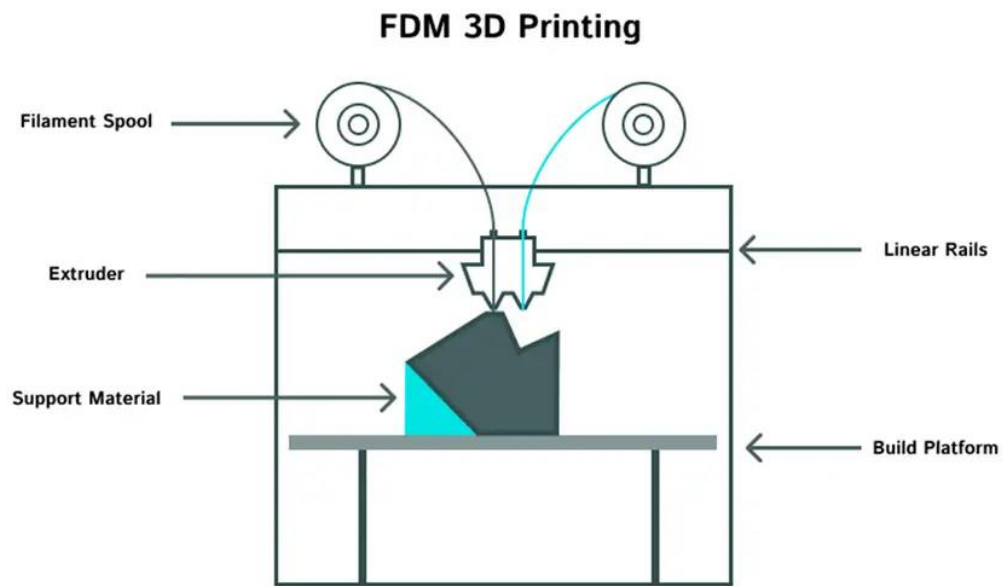


Figura 2.15: Proceso de modelado por deposición fundida

Para construir un robot bípedo, la impresión 3D es fundamental. Permite crear piezas ligeras, resistentes y a medida, optimizando el diseño mediante pruebas rápidas y correcciones inmediatas: si un componente falla, basta reimprimirlo en horas. Además, su versatilidad de materiales (PLA, nylon, etc.) permite ajustar flexibilidad y resistencia según cada pieza. Esta tecnología no solo acelera el desarrollo y abarata costos, sino que también simplifica la fabricación de prototipos complejos, desde una pierna del robot, hasta la caja reductora de engranajes planetarios, convirtiéndola en una herramienta clave para la robótica actual.

3. Solución propuesta

3.1. Problemática actual y sistema para proponer

El diseño y construcción de robots de alta dinámica enfrenta múltiples desafíos:

- Alto costo de componentes.
- Escasa documentación disponible a nivel global.
- Desarrollos aún en etapas tempranas, sin soluciones maduras.
- Poco incentivo para innovar, debido al liderazgo de instituciones académicas y privadas.

Si bien los avances recientes en robótica se han centrado principalmente en software como el estudio de trayectorias, la visión artificial o los modelos de aprendizaje automático y en la mecánica con materiales ligeros y rígidos que mejoran la eficiencia estructural, el desarrollo de actuadores continúa siendo un campo rezagado. Sin actuadores capaces de combinar alta densidad de torque, bajo peso y retroalimentación precisa, resulta imposible materializar los algoritmos de locomoción más avanzados ni responder adecuadamente a las exigencias de la robótica dinámica. Los actuadores tradicionales, como servomotores, motores paso a paso o motores industriales, no ofrecen el desempeño requerido debido a su exceso de peso, volumen y limitaciones de respuesta.

Frente a esta problemática, el eje central de esta memoria es el diseño y construcción de actuadores robóticos propioceptivos Quasi Direct Drive (QDD), capaces de integrarse en sistemas de locomoción dinámica. Para validar su desempeño, dichos actuadores se implementan luego en un prototipo bípedo modular denominado B1P0 (Biped Penquista), concebido como plataforma experimental para ensayar y caracterizar simultáneamente múltiples actuadores. Como se muestra en la Figura 3.1, el diseño de B1P0 contempla una arquitectura en niveles: la base inferior destinada a sistemas de potencia y baterías, el nivel intermedio para electrónica de control y procesamiento central, y el nivel superior para cargas ligeras como cámaras o sensores LiDAR. Esta disposición modular facilita la escalabilidad, el mantenimiento y futuras mejoras, asegurando un entorno de prueba versátil y robusto.

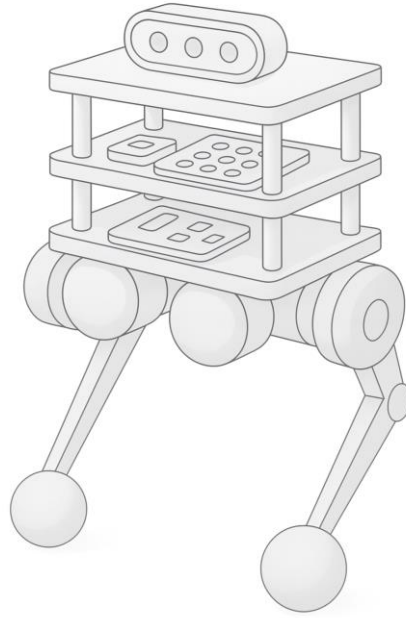


Figura 3.1: Dibujo conceptual de robot B1P0

La elección de un robot bípedo responde a su capacidad para desenvolverse en entornos de alta dinámica particularmente aquellos diseñados para el ser humano donde los sistemas con ruedas resultan poco eficientes frente a terrenos irregulares, escaleras o espacios confinados [7] [8]. Además, B1P0 incorpora articulaciones que simulan el comportamiento de rodillas hacia atrás, tal como se fundamenta en estudios previos [4]. Esta configuración no solo mejora la eficiencia de locomoción al reducir la dependencia del torque en la cadera, sino que también facilita la combinación de funciones de propulsión y elevación, favoreciendo la estabilidad y la adaptabilidad frente a variaciones del terreno.

De esta manera, el sistema propuesto permite cumplir con el objetivo central de este trabajo, el cual es: diseñar, construir y validar actuadores propioceptivos QDD de bajo costo y alta eficiencia, dentro de una plataforma bípedo modular que asegure condiciones reales de operación para su correcta evaluación.

3.2. Actuadores propuestos

3.2.1 *Quasi Direct Drive (QDD)*

Los actuadores Quasi-Direct Drive (QDD) se han convertido en la solución preferida para la robótica dinámica en las principales universidades del mundo. La razón es clara: ofrecen el mejor equilibrio entre torque y velocidad, manteniendo la capacidad de sentir fuerzas externas, algo esencial para robots ágiles.

El robot Stanford Doggo [21] es un excelente ejemplo de esta tecnología. Utiliza una transmisión por correa con relación 6:1, lo que le permite lograr saltos excepcionales y movimientos dinámicos. Este diseño le dio una ventaja del 22% en agilidad vertical sobre robots anteriores. Lo más interesante es que todo el robot fue diseñado para ser accesible, con un costo menor a \$3000 USD y usando herramientas comunes.

En la misma línea, el MIT Mini Cheetah emplea también una relación 6:1 (usando engranajes planetarios) [9], demostrando la efectividad de esta configuración para robots cuadrúpedos que requieren una locomoción ágil y capacidad de salto. Este robot ha establecido nuevos estándares en movimientos dinámicos y recuperación de caídas.

Por otro lado, el trabajo presentado en la Universidad de California en Los Ángeles muestra otra variante del QDD usando engranajes cicloidales con relación 10:1 [22]. Esta solución es particularmente robusta para aplicaciones donde se esperan cargas pesadas e impactos fuertes, como en robots que deben soportar caídas. El sistema incluye un estimador de torque basado en redes neuronales para compensar las no linealidades propias de este tipo de engranajes.

Estos ejemplos demuestran que el QDD no es una solución única, sino un concepto flexible que puede adaptarse a diferentes necesidades. Tanto la versión de correa (6:1) como la cicloidal (10:1), o los planetarios del MIT comparten características clave:

- Reducciones moderadas (entre 5:1 y 10:1)
- Baja inercia reflejada
- Capacidad de retroalimentación natural (backdrivability)
- Diseños compactos y eficientes

La elección entre estas variantes depende del balance específico que se busque entre torque, velocidad y robustez. En todos los casos, desde Stanford [21] hasta el MIT [9] y el actuador cicloidal

de UCLA [22], los resultados confirman que estas son las soluciones que están permitiendo a los robots más avanzados del mundo realizar movimientos dinámicos y complejos.

3.2.2 *Actuador propioceptivo*

La propiocepción, ese "sexto sentido" que nos permite movernos con precisión sin depender de la visión, es fundamental para la robótica dinámica. En sistemas biológicos, esta capacidad surge de mecanorreceptores especializados que monitorean constantemente la posición y movimiento de las articulaciones. Casos clínicos como el de Ian Waterman, quien perdió esta capacidad y quedó severamente limitado en sus movimientos, demuestran su importancia fundamental [23].

La solución propuesta implementa esta capacidad mediante encoders magnéticos de alta resolución, específicamente el modelo MA702 incluido en la placa electrónica ODrive S1 [24]. Estos sensores proporcionan una precisión angular de hasta 12 bits, actuando como los propioceptores artificiales del sistema robótico. Su diseño sin contacto los hace particularmente resistentes para aplicaciones dinámicas donde vibraciones y cargas mecánicas son frecuentes.

El controlador ODrive S1 integra esta información sensorial con un potente sistema de control para motores BLDC. Sus características clave incluyen: capacidad para manejar hasta 40 [A] continuos, soporte para múltiples modos de control (torque, velocidad y posición), y una arquitectura que permite actualizaciones en tiempo real a 8 [kHz] [24]. La combinación de estos componentes crea un sistema de retroalimentación propioceptiva completo, donde la electrónica de control está físicamente integrada con el actuador, minimizando latencias y mejorando la respuesta dinámica.

Esta implementación mantiene los principios esenciales de los sistemas biológicos -monitoreo autónomo y continuo del estado mecánico mientras aprovecha las ventajas de la electrónica moderna.

3.3. **Diseño conceptual del sistema robótico**

3.3.1 *Diagrama conceptual de actuador QDD*

El actuador Quasi Direct Drive (QDD) propuesto integra en un mismo módulo los elementos necesarios para generar y controlar el movimiento de manera eficiente y propioceptiva. La arquitectura del sistema se ilustra en la Figura 3.2.

El actuador recibe energía desde una fuente de corriente continua (DC), la cual alimenta al driver ODrive S1, encargado de controlar el motor BLDC trifásico mediante las fases A, B y C. A través de una señal digital de control proveniente de un microcontrolador central, el ODrive con el

firmware en su versión más reciente 0.6.11, ejecuta de forma precisa los lazos de posición, velocidad y torque, además de rutinas de calibración automática y protocolos de comunicación en tiempo real para la operación de múltiples actuadores en simultáneo.

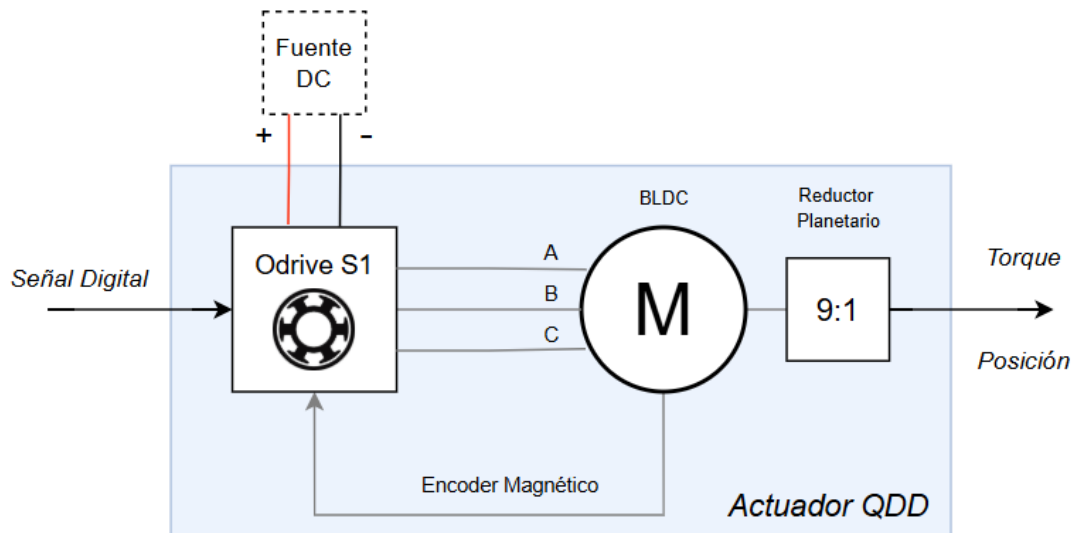


Figura 3.2: Arquitectura interna del actuador propioceptivo QDD

La propiocepción se obtiene mediante un encoder magnético montado frente al rotor, el cual detecta el campo magnético rotatorio a través de sensores de efecto Hall. El procesamiento de estas señales permite calcular en tiempo real el ángulo absoluto del eje [25].

De este modo, el actuador QDD entrega a la salida el torque y la posición requeridos para la locomoción dinámica, constituyéndose en el núcleo operativo de la plataforma BIP0.

3.3.2 Arquitectura eléctrica de robot BIP0

La Figura 3.3 muestra la arquitectura eléctrica del robot BIP0, organizada para garantizar un suministro de energía estable y una adecuada separación entre el control de baja y alta complejidad.

La batería principal alimenta a un sistema de monitoreo y distribución de potencia, encargado de entregar los niveles adecuados de tensión a cada subsistema y medir los consumos de potencia de ellos.

El microcontrolador recibe datos de sensores como el IMU (Unidad de Medición Inercial) y otros periféricos, gestionando tareas de baja complejidad pero de alta velocidad de respuesta, tales como la lectura de posiciones y velocidades angulares, y envío de señales de control a los actuadores. Solo la información procesada y relevante es transmitida a la CPU, que actúa como el centro de alto nivel del sistema.

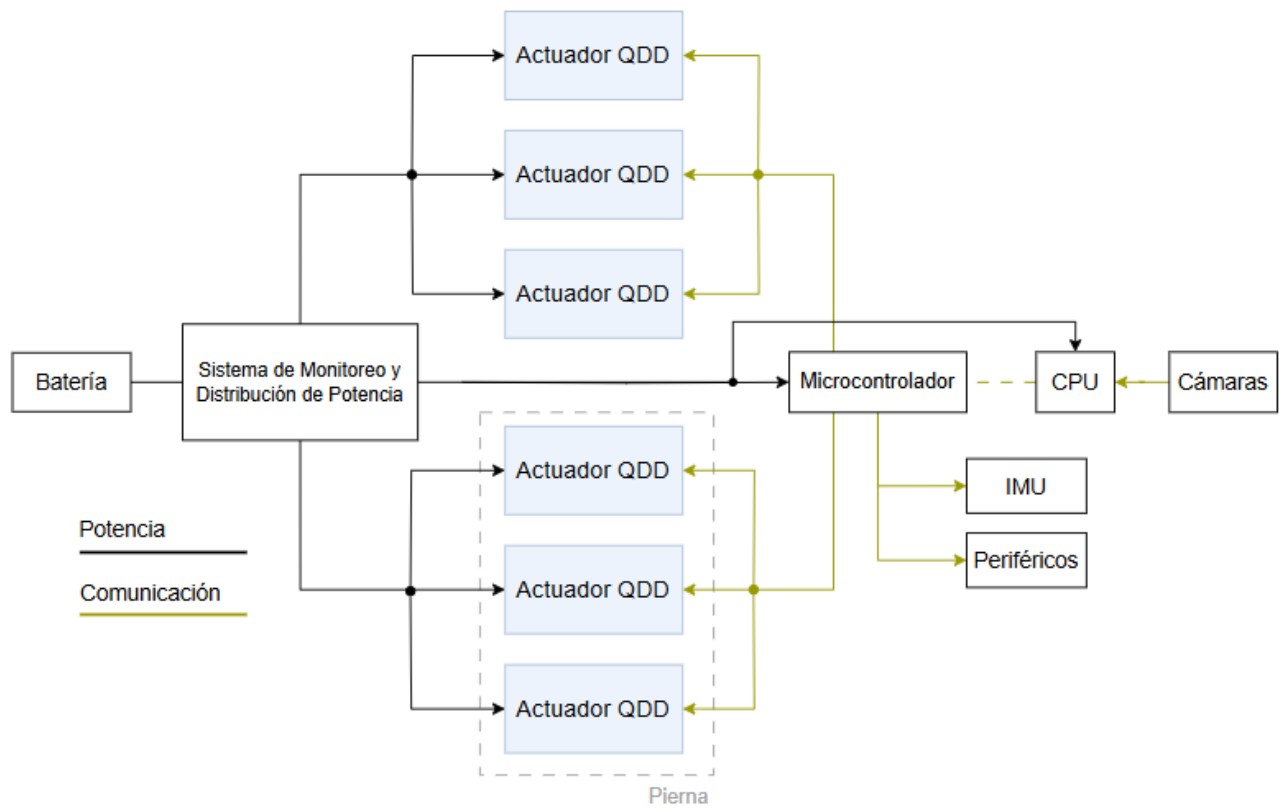


Figura 3.3: Diagrama eléctrico del robot B1P0

La CPU, posiblemente implementada en una plataforma como Raspberry Pi, se encarga de procesar sensores más complejos, como cámaras de profundidad o sistemas LiDAR, y de ejecutar un sistema operativo que permita la futura interacción con el usuario mediante una interfaz gráfica. Además, está destinada a correr algoritmos avanzados de control de estabilidad, locomoción bípeda y modelos de inteligencia artificial, funciones críticas para aprovechar el potencial dinámico del robot en labores humanas de alto riesgo.

Las líneas negras en el diagrama corresponden a la distribución de potencia, mientras que las líneas amarillas indican los canales de comunicación que integran la información entre todos los subsistemas. Además, como se planteó en un principio del capítulo, la solución propuesta es un robot bípedo de 6 grados de libertad (6DoF), lo cual se evidencia en el conjunto de 3 actuadores que conforman una sola pierna.

3.3.3 Condiciones de diseño

El desarrollo del robot bípedo B1P0 se define a partir de las exigencias propias de la locomoción dinámica y de los aprendizajes obtenidos de proyectos desarrollados en universidades líderes como el MIT, Stanford, entre otras. A continuación, se detallan las principales condiciones de diseño y su justificación.

Requisitos para el robot B1P0

- **Peso total entre 6–8 [kg] con baterías.** Un peso moderado facilita la estabilidad y la capacidad de sumar cargas livianas. Proyectos como el Stanford Doggo [21] o el Mini Cheetah [1] priorizan estructuras ligeras para maximizar la agilidad vertical y rápidos movimientos.
- **Capacidad para caminar en distintos terrenos.** En entornos de rescate, minería, plantas industriales o espacios urbanos, las irregularidades del suelo hacen inviable el uso de robots con ruedas. El robot B1P0, al tener dos patas le permite mejorar su adaptabilidad ante los terrenos mencionados reduciendo riesgos para operadores humanos.
- **Soporte de cargas livianas.** La arquitectura modular del B1P0, como se ilustra en la Figura 3.1, destina el nivel superior a cargas como cámaras, sensores LiDAR o herramientas ligeras. Esta característica está alineada con el diseño del robot Mithra, que distribuye masas de forma proximal para reducir momentos de inercia en las extremidades [11], asegurando estabilidad pese al agregado de dispositivos.
- **Capacidad para subir y bajar escaleras.** Diseños como el Stanford Doggo han demostrado que transmisiones de baja reducción mejoran la agilidad vertical [21], mientras que el uso de QDD en el MIT Mini Cheetah permite recuperarse de caídas y ejecutar movimientos explosivos como saltos o trotes [9]. Estas evidencias respaldan la necesidad de que B1P0 cuente con actuadores capaces de generar impulsos suficientes para superar escalones u obstáculos.
- **Articulaciones inspiradas en rodillas hacia atrás.** Tal como se fundamenta en estudios de Haberland y Kim [4], la orientación de rodillas hacia atrás reduce la dependencia del torque de cadera y mejora la eficiencia del costo mecánico de transporte en un 80% de los casos evaluados. Aunque en B1P0 se implementan tobillos modificados que replican este principio, se mantiene la misma ventaja funcional de propulsión y elevación.

Condiciones para el actuador QDD propioceptivo

- **Peso máximo de 800 [g] por actuador incluyendo drivers.** Considerando que el robot debe poseer 6 actuadores (6 grado de libertad), el peso total será aproximadamente (incluyendo solo estos) 4,8 [kg], dejando margen de carga para baterías, sensores y restos del cuerpo como piernas.
- **Relación de transmisión de 9:1 con engranaje planetario.** Universidades como Stanford y UCLA han demostrado que reducciones moderadas (entre 5:1 y 10:1) maximizan la agilidad y la backdrivability en sistemas QDD [21][22]. La elección de 9:1 en el robot B1P0 prioriza un aumento significativo de torque sacrificando levemente la velocidad de respuesta ya que los usos del robot no están pensados para saltos rápidos o carreras, además se usa un reductor basado en engranajes planetarios por su fácil prototipado y diseño.
- **Torque máximo objetivo de 16 [Nm].** El torque requerido se determina considerando la capacidad del motor sin reductor, la cual según estudios previos fue de un torque máximo de 1.78 [Nm], por lo tanto, este nuevo torque objetivo debe ser nueve veces más que el anterior. Además, este requisito de torque debe cumplir con la capacidad de levantar al menos el peso del robot (6-8 [kg]) más un 10% (movimientos de impulso).
- **Propiocepción integrada mediante encoders magnéticos.** El uso de encoders magnéticos de alta resolución ha sido un estándar en todos los proyectos de diversas academias internacionales. En este trabajo se emplean encoders basados en sensores de efecto Hall, capaces de medir ángulos absolutos en tiempo real y robustos frente a vibraciones.

3.3.4 *Lista de materiales*

En base a las consideraciones de diseño anteriores, se propone la siguiente lista de materiales para el desarrollo de ambos sistemas (actuador y robot).

Tabla 3.1: Lista de materiales y su uso para el actuador QDD propioceptivo

Material	Uso
Brushless motor Eaglepower 90KV LA8308	Motor DC principal (eje solar)
Odrive S1	Driver de control y monitoreo de parámetros
Rodamiento de bolas 32x15x8mm (x18)	Soporte de engranajes planetarios
Rodamientos de bolas 35x44x5mm (x6)	Soporte de portaplanetas
Imán radial de neodimio 6x2.5mm	Envío de posición mediante encoder magnético
Filamento Creality PLA+ (2kg)	Fabricación de carcasa y reductores en 3D
Pernos y tuercas M2, M3 y M4	Montaje estructural del actuador
Golillas de presión M4 y M3	Fijación de pernos
EP-2 Lithium Vistony	Grasa blanca de litio para lubricar engranajes

Tabla 3.2: Lista de materiales y su uso para el resto del robot B1P0

Material	Uso
Placas de fibra de carbono 200x250x2mm (x2)	Placa soporte niveles inferior y superior
Placas de fibra de carbono 200x250x1mm (x1)	Placa soporte nivel intermedio
Tubos de fibra de carbono 12x10x500mm (x3)	Vigas estructurales verticales
Tubos de fibra de carbono 10x8x500mm (x2)	Vigas estructurales cruzadas
Filamento Creality PLA+ (1kg)	Impresión de restos del cuerpo y soportes.
Microcontrolador Teensy 4.1	Control y monitoreo de bajo nivel
Raspberry Pi 5, 16GB RAM	CPU principal para procesamiento avanzado
SparkFun OpenLog Artemis	Sensor principal IMU
RealSense D435i	Cámara de profundidad para trayectorias
Sistema de montaje PCB y periféricos	Integración y conexión de la electrónica
Conectores JST GH-4Pines	Comunicación entre drivers y microcontrolador
Set de pernos CORGI M2, M3 y M4 1080Pcs	Montaje estructural general del robot
Set de insertos M2, M2.5, M3 y M4 1400Pcs	Refuerzo de uniones roscadas en piezas 3D
Set de tornillos Zonsanta M2, M3 y M4 460Pcs	Fijación de piezas 3D
Polea dentada GT2 diámetro 19mm	Transmisión de torque mediante correas
Correa dentada GT2-6 500mm	Transmisión de movimiento hacia extremidades

4. Diseño en detalle

En este capítulo se describen los aspectos técnicos que materializan la solución propuesta, abordando desde el diseño de la caja reductora y las estrategias de control y comunicación, hasta el desarrollo del algoritmo y el modelo 3D del robot bípedo B1P0.

4.1. Diseño de caja reductora

Como se ha estudiado y definido antes, el sistema de transmisión de potencia mecánica escogido es un diseño de caja reductora de engranajes planetarios, utilizando un tipo de engranajes rectos por su facilidad de diseño y prototipado.

Del marco teórico, se obtuvo la siguiente relación de transmisión i para un sistema de transmisión planetaria.

$$i = 1 + \frac{Z_r}{Z_s} \quad (4.1)$$

De las condiciones de diseño, sabemos que se debe reducir la velocidad 9 veces, es decir por cada 9 vueltas en el eje solar, a la salida (porta planeta) se debe dar 1 vuelta (relación 9:1). Luego, el módulo de un engranaje está dado por la ecuación 4.2.

$$m = \frac{d_0}{z} \quad (4.2)$$

Ya que el motor escogido tiene una configuración de rotor Outrunner y cuenta con un diámetro de 92 [mm] según su hoja de datos, podemos aprovechar este espacio para construir el sistema planetario de manera de optimizar el torque final. Por ende, si se considera un módulo típico para este tipo de engranajes de 1 [mm] y un diámetro primitivo de 96 [mm]. Se puede encontrar el número de dientes inicial para el anillo o corona de la siguiente manera,

$$Z_r = \frac{d_0}{m} = \frac{96}{1} = 96 \quad (4.3)$$

Reemplazando el número de dientes en la ecuación de relación de transmisión se obtiene,

$$9 = 1 + \frac{96}{Z_s} \quad (4.4)$$

$$Z_s = 12 \quad (4.5)$$

Luego, usando la misma relación del número de dientes con el radio de un engranaje, se puede derivar el número de dientes de cada planeta mediante el siguiente reemplazo,

$$r_r = r_s + 2r_p \Leftrightarrow Z_r = Z_s + 2Z_p \quad (4.6)$$

$$96 = 12 + 2Z_p \quad (4.7)$$

$$Z_p = 42 \quad (4.8)$$

Luego, se valida su relación geométrica para que cada engranaje esté simétricamente espaciado mediante la siguiente condición (2.22).

$$\frac{Z_r + Z_s}{N_p} = \frac{96 + 12}{3} = 36 \quad (4.9)$$

Al ver que se obtiene un número entero, se valida esta condición geométrica y se concluye que el reductor de engranajes planetarios queda conformado por los siguientes parámetros de diseño.

- Número de dientes del anillo (Z_r): 96
- Número de dientes del sol (Z_s): 12
- Número de dientes de cada planeta (Z_p): 42
- Módulo (m): 1[mm]
- Relación de transmisión (i): 9

Con estas consideraciones se puede continuar con el diseño 3D del sistema.



Figura 4.1: Tren de engranajes planetarios con porta planeta y rodamientos

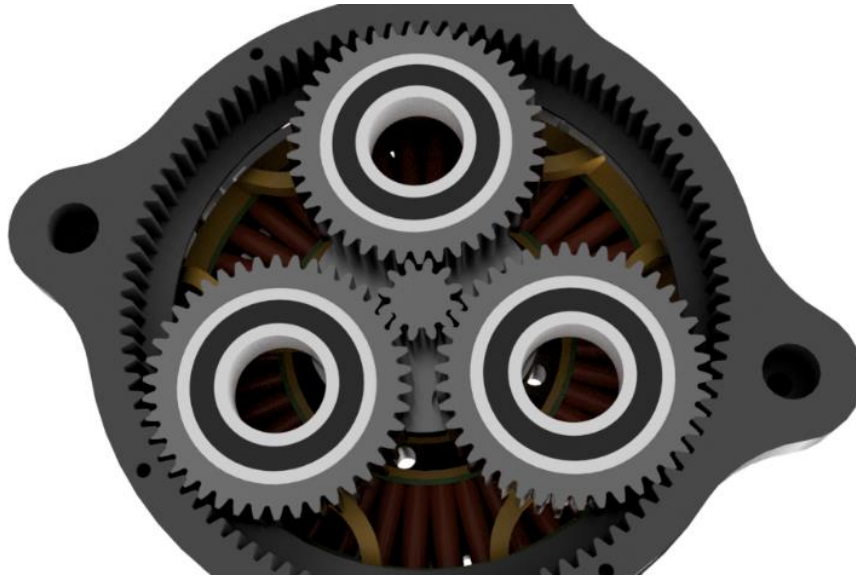


Figura 4.2: Tren de engranajes planetario sin porta planeta

En las Figuras 4.1 y 4.2 se muestran los resultados del diseño en 3D del sistema planetario. Como se puede apreciar, se optó por un diseño tipo pancake (utilizado comúnmente en la robótica académica). Este diseño se caracteriza por ir “apilando” subsistemas desde el eje de giro inicial, hasta el final. Por esto mismo, detrás de todo se puede apreciar el motor BLDC con sus respectivos devanados (color rojo). En el eje del motor se acopla el engranaje solar y de esta manera se va transmitiendo el movimiento hasta llegar al eje final (porta planeta).

4.2. Estrategias de control

ODrive implementa una arquitectura de lazos de control en cascada compuesta por controladores de posición, velocidad y corriente, como se muestra en la Figura 4.3. Cada lazo es de tipo P o PI, dependiendo del nivel, y opera a distintas velocidades: el lazo de corriente (más interno) tiene la dinámica más rápida, seguido por el de velocidad, mientras que el de posición (más externo) opera con la dinámica más lenta [26].

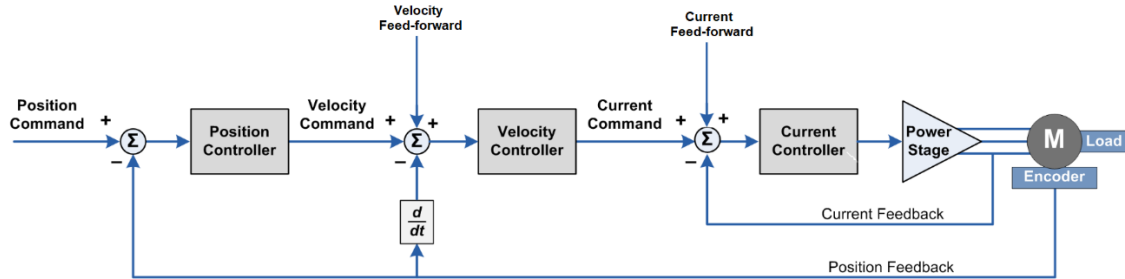


Figura 4.3: Diagrama de control en lazo cerrado en cascada utilizado en Odrive S1

Aunque ODrive cuenta con múltiples modos de operación [26] orientados a diversas aplicaciones, en el contexto de un robot desarrollado en este trabajo, los modos relevantes son:

- Modo trayectoria: Genera movimientos suaves a partir de límites definidos de velocidad, aceleración y desaceleración. Mejora la capacidad de rechazo a perturbaciones y facilita el tuning de los controladores.
- Modo velocidad: Permite aplicar directamente una velocidad angular al motor en [rev/s].
- Modo torque (Figura 4.4): Controla directamente el par aplicado en [Nm]. Para seguridad, este modo incluye una limitación automática de torque basada en la velocidad.
- Modo posición: Intenta alcanzar una posición objetivo lo más rápido posible, sin considerar transiciones suaves.

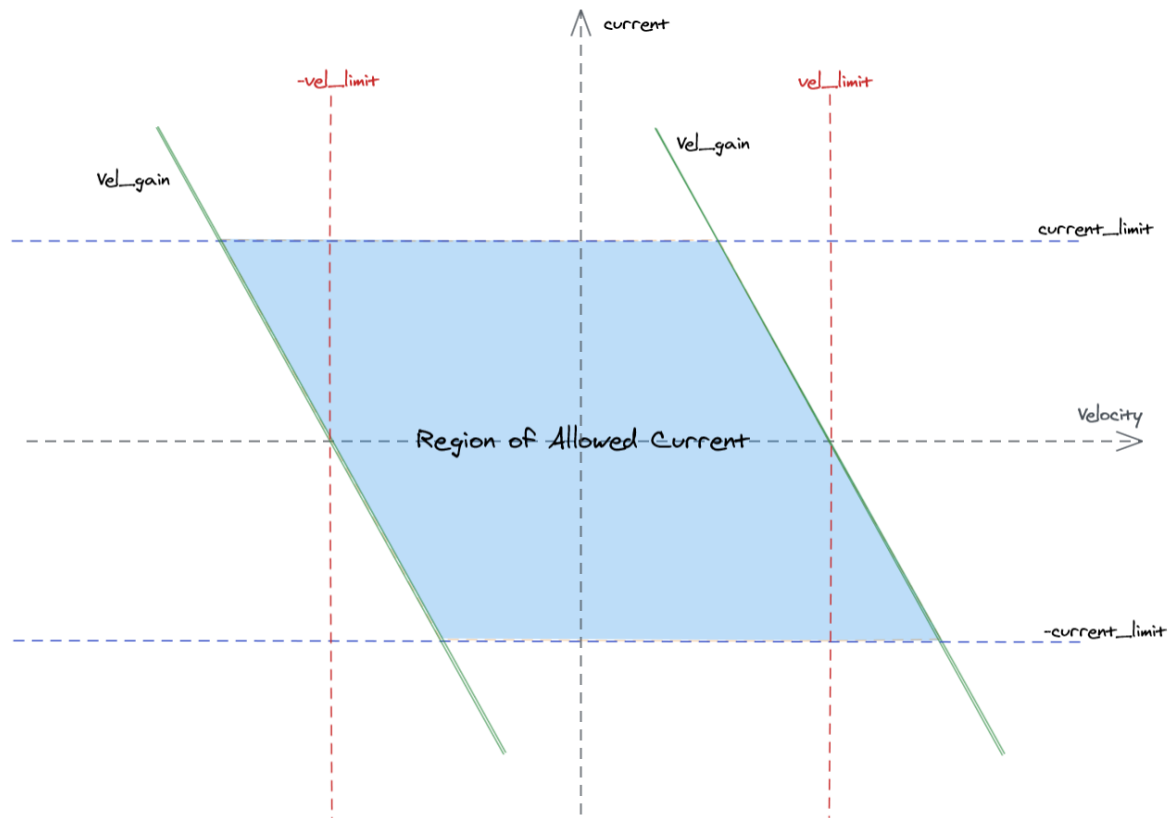


Figura 4.4: Región de operación del control de torque basado en límites de corriente y velocidad

La región azul de la Figura 4.4 representa la zona segura de operación, delimitada por vel_limit , $current_limit$ y vel_gain [26].

En cuanto a la implementación física, se utiliza un encoder magnético integrado en el ODrive S1 (sensor MA702), el cual detecta la rotación de un imán de neodimio montado en el eje del rotor. Para una lectura confiable del ángulo, se mantiene una distancia entre 0.5 y 3 [mm] entre el sensor y el imán, tal como recomienda la documentación oficial [25]. Este montaje puede observarse en la Figura 4.5.

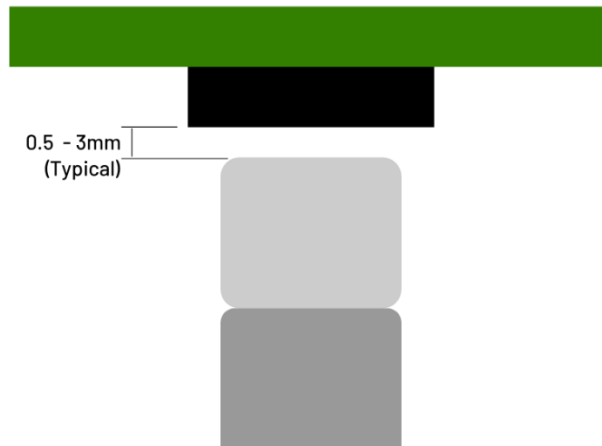


Figura 4.5: Espacio sugerido entre la cara cercana del imán y el circuito integrado MA702

Previo a la operación, el firmware de ODrive permite ejecutar una rutina de calibración automática desde la Web GUI y guardarla en la memoria no volátil del hardware. Posteriormente, la misma interfaz permite ajustar los parámetros de los controladores (Figura 4.6) y analizar gráficamente las respuestas del sistema (Figura 4.7).

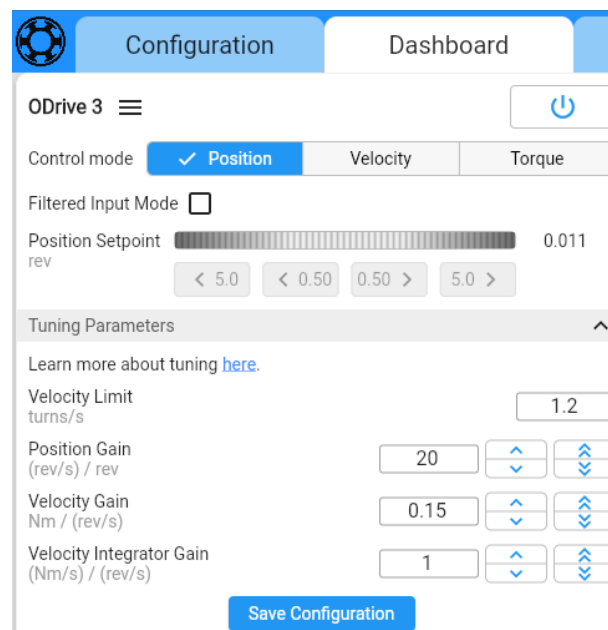


Figura 4.6: Configuración de parámetros de controladores por medio de Web GUI

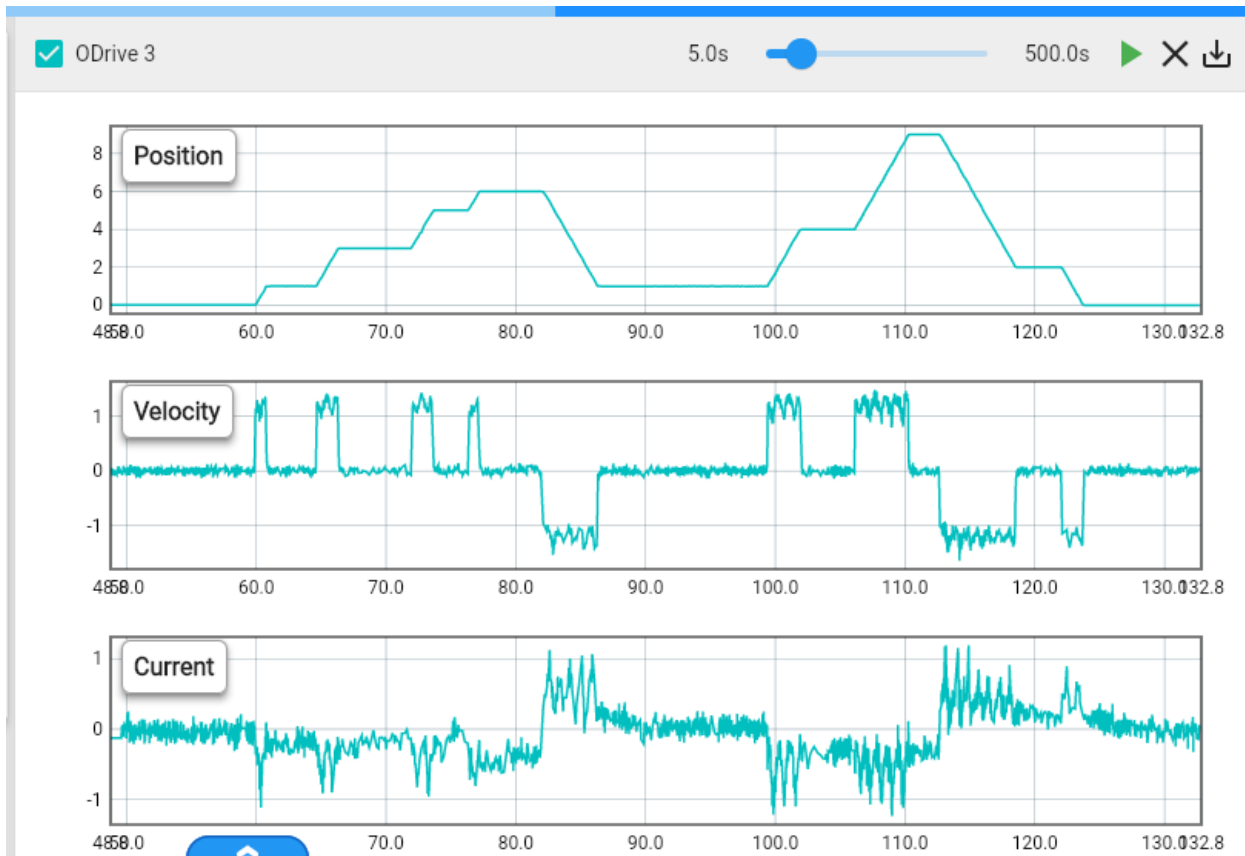


Figura 4.7: Respuestas de posición, velocidad y corriente medidas por Odrive S1

El soporte del imán se diseña en Fusion 360 y fabricado mediante impresión 3D para asegurar un acople firme con el eje (Figura 4.8).

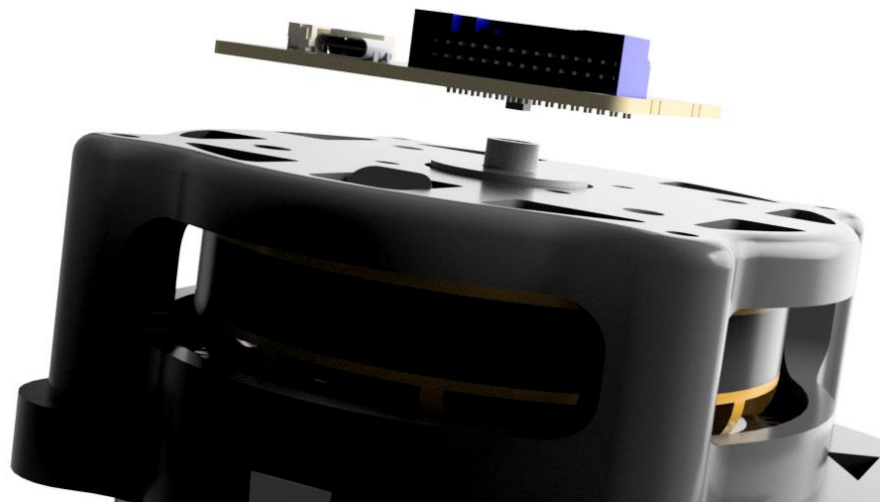


Figura 4.8: Modelo 3D del actuador con soporte de imán, espaciado a 2 [mm] del encoder

Con el sistema calibrado, los lazos de control afinados y el encoder correctamente montado, el sistema queda en condiciones de aceptar referencias externas y operar bajo los distintos modos de control habilitados por ODrive.

4.3. Estrategia de comunicación CAN para sistema multi driver

4.3.1 Arquitectura electrónica

Esta arquitectura CAN une al Teensy 4.1 (nodo maestro) con los ODrive S1 que actúan como nodos de potencia. El Teensy trabaja a 3.3 [V] y entrega/recibe tramas por CTX/CRX hacia un SN65HVD230, que convierte la lógica CMOS a la señal diferencial y viceversa. El pin D del módulo fuerza los dos bits para ser enviados sobre el bus, percatándose que CANL vaya negado; luego para recibir, el comparador interno lee la diferencia $V_{CAN_H} - V_{CAN_L}$ y entrega el bit recibido por R (dominante o recesivo) hacia CRX (ver Figura 4.9).

En el pin 8 se fija una resistencia R_S para escoger el modo de control slope, el cual disminuye las pendientes de subida y bajada de cada bit para minimizar la interferencia electromagnética (EMI).

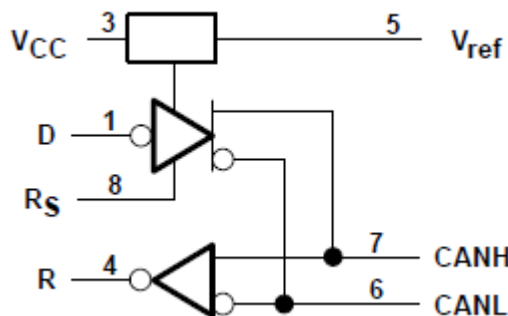


Figura 4.9: Diagrama lógico del módulo SN65HVD230

Desde el módulo CAN, el par diferencial se redistribuye por la PCB a los conectores J16 de cada driver como se muestra en la Figura 4.10. Cada ODrive integra su propio transceptor, por lo que se conecta en paralelo al bus (solo CAN_H/CAN_L y una referencia GND). Aunque la decisión de bit es puramente diferencial, llevar GND mantiene el modo común dentro de rango y mejora la inmunidad frente a ruidos. Los pines 12 [V] de entrada en el conector J16 no participan del enlace

CAN ya que cada dispositivo cuenta con sus propias alimentaciones independientes, como por ejemplo los drivers que reciben 22.2 [V] por líneas de potencia externas.

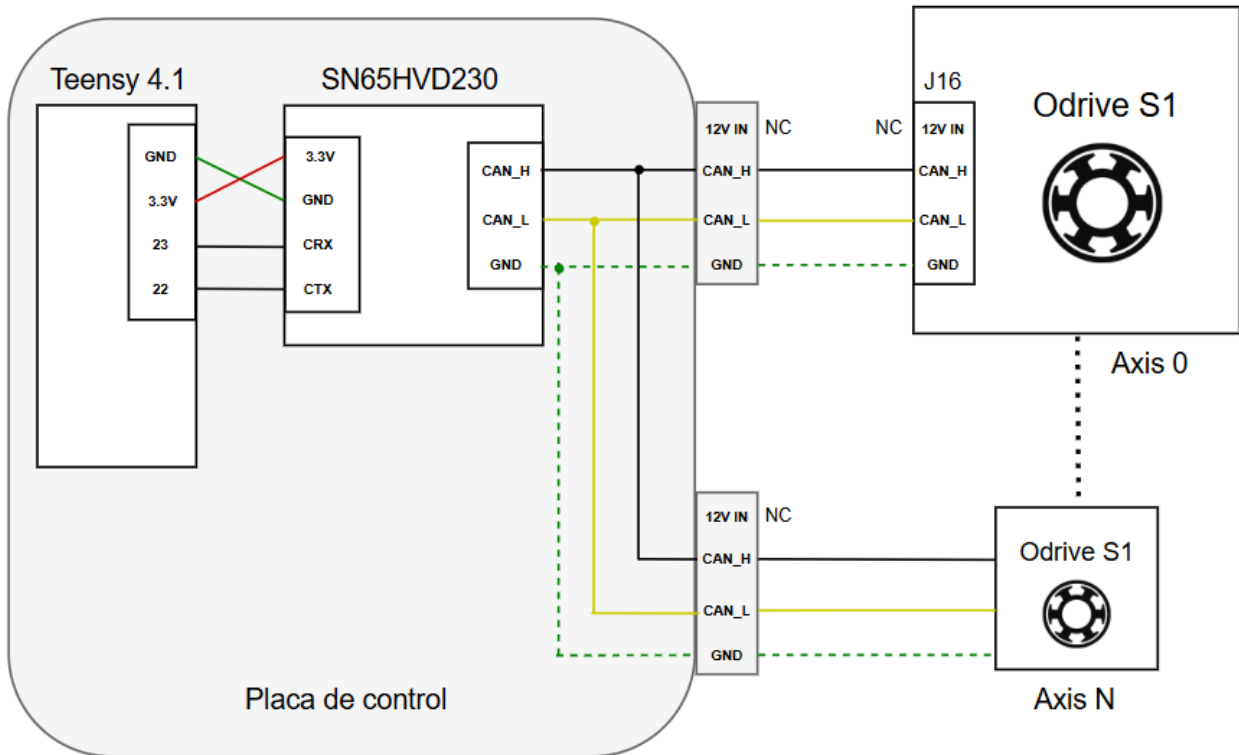


Figura 4.10: Diagrama electrónico de comunicación CAN

Para el cierre del enlace, el tramo físico debe quedar terminado con 120 [Ω] en cada extremo: el módulo CAN ya aporta un terminador; el segundo se instala en el último ODrive del mazo o bien se puede incluir la resistencia de manera externa en la PCB al final del bus. Con esta disposición, el Teensy direcciona N drivers por su identificador CAN, mantiene el cableado de potencia y comunicación desacoplado y deja una base escalable para el control simultáneo de todos los actuadores.

4.3.2 Protocolo CAN en firmware Odrive

En ODrive el bus se maneja con CANSimple y un identificador estándar de 11 bits que parte el ID en dos campos: `node_id` (quién) y `cmd_id` (qué), ver Figura 4.11. Con esto, desde el Teensy se puede enviar de forma directa a cada driver/axis del robot B1P0 solo tres tipos de órdenes de control: `SetPosition`, `SetVelocity` y `SetTorque`. Esas tres son las que realmente “mueven” un eje y, además, reinician el watchdog del ODrive.

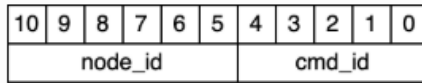


Figura 4.11: Trama simple de mensajes CAN

La configuración de cada driver se muestra en la Figura 4.12. El Bitrate es un parámetro crucial en el cual todos los nodos deben compartir la misma tasa. Para B1P0 se fijó 250 [kbit/s] ya que da margen suficiente entre cableado interno y ruido electromagnético sin penalizar la latencia de mando. El Node ID es el identificador de cada eje que debe ser único para cada uno. Puede asignarse por GUI/USB o vía comandos.

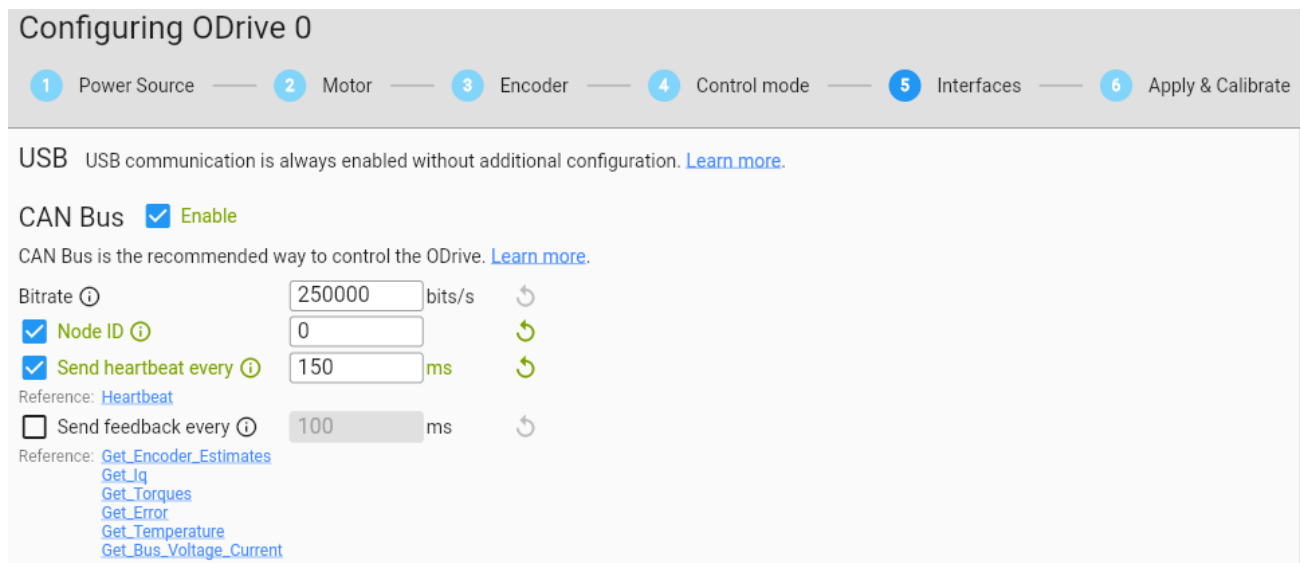


Figura 4.12: Configuración de interfaz CAN por medio de la Web GUI

Los mensajes cíclicos son típicos en este tipo de dispositivos para revisar estados en tiempo real, el Heartbeat (configurado en 150 [ms]) por ejemplo, es útil para saber si el eje está “vivo”, su estado y si terminó una trayectoria. El resto de variables importantes como Get_Encoder_Estimates (corriente, temperatura, etc.) queda desactivado y se pide puntualmente cuando hace falta. Así el tráfico recurrente es bajo y el bus queda libre para las órdenes Set.

Con estos 3 ajustes: tasa fija, IDs únicos y telemetría cíclica mínima el esquema CAN de B1P0 queda claro: el Teensy publica setpoints (posición/velocidad/torque) a cada node_id, los ODrive ejecutan en lazo cerrado y devuelven Heartbeats al ritmo configurado, lo suficiente para supervisar salud básica sin comprometer el ancho de banda del bus.

4.4. Algoritmo de control y monitoreo central

El control central se ejecuta en un Teensy 4.1, encargado de coordinar los seis controladores ODrive S1 a través de un bus CAN. Para organizar esta comunicación, se implementa una estructura de software que separa dos funciones clave:

- La gestión de los mensajes CAN de forma clara y directa.
- La lógica de control que define qué órdenes enviar y cómo reaccionar a la información recibida.

Esta división simplifica el desarrollo, evita errores en el manejo de datos y facilita la ampliación del sistema en el futuro.

4.4.1 Librería *ODriveTeensyCAN*

ODriveTeensyCAN.h es una librería desarrollada para facilitar la comunicación con controladores ODrive usando el protocolo *CANSimple*. Su función es traducir, de forma automática, las órdenes y datos del Teensy a mensajes CAN que el ODrive entiende, y viceversa. Esto evita que el programador tenga que construir manualmente cada mensaje byte por byte o descifrar la información recibida.

En lugar de trabajar con números y tramas CAN crudas, la librería ofrece funciones con nombres claros, por ejemplo `SetPosition()` para mover un motor a una posición específica, o `RunState()` para cambiar el estado de un eje. De esta manera, la programación se centra en lo que se quiere hacer, no en los detalles del formato del mensaje.

En este sistema, la librería permite un arranque rápido y seguro de los motores manteniendo movimientos precisos. Funciones como `SetPosition()` envían de forma confiable la posición objetivo a cada motor sin tener que preocuparse por la codificación interna.

A pesar de que la librería cuenta con una serie de comandos integrados, los usados en el código para validaciones generales son:

- `odriveCAN.RunState(axis,8)`: Cambia un motor a modo control en lazo cerrado, condición necesaria para que pueda seguir órdenes de movimiento como posición, velocidad o torque.
- `odriveCAN.SetPosition(axis,position)`: Ordena al motor ir a una posición determinada. Es el comando más usado en las rutinas de prueba y simulación de caminata.

- `odriveCAN.Heartbeat(hb,msg)`: Lee el mensaje (`msg`) periódico que envía cada ODrive, obteniendo información sobre su estado y posibles fallos, una vez codificado lo almacena en la variable `hb`.

Gracias a esta librería, el código principal se mantiene claro y enfocado en la lógica del robot, mientras que el envío y recepción de mensajes CAN se maneja de forma confiable y estandarizada.

4.4.2 Lógica y funciones principales

La lógica de control y monitoreo central implementada en el firmware se basa en un flujo estructurado de inicialización, gestión de comunicaciones y ejecución de comandos hacia los controladores ODrive mediante el bus CAN. La Figura 4.13 ilustra de forma simplificada este flujo, destacando las funciones principales y la interacción entre ellas.

En la etapa de inicio, el sistema configura los periféricos esenciales: interfaz CAN a 250 [kbps], puertos seriales, estructuras de datos y pines de control. Para la gestión de parámetros de cada motor, se utiliza la estructura `MotorConfig`, diseñada para centralizar la configuración y facilitar el control individual de cada eje:

```
// La estructura 'MotorConfig' define las propiedades de cada motor.
struct MotorConfig {           //Estructura de Configuración
    uint8_t node_id;           // Node ID en el bus CAN
    float pos_a;                // Posición inicial (vueltas)
    float pos_b;                // Posición final (vueltas)
    float current_target;      // Último objetivo enviado
    unsigned long lastMoveTime; // Último cambio
    unsigned long intervalo_ms; // Tiempo de espera entre movimientos
    float last_position_deg;    // Última posición en grados
    float last_current_A;       // Última corriente
};
```

Cada instancia de esta estructura almacena tanto los parámetros de control (posiciones objetivo, límites, intervalo de ejecución) como variables para el seguimiento del estado en tiempo real (posición y corriente leída), permitiendo que las funciones de control accedan a toda la información relevante desde un único lugar.

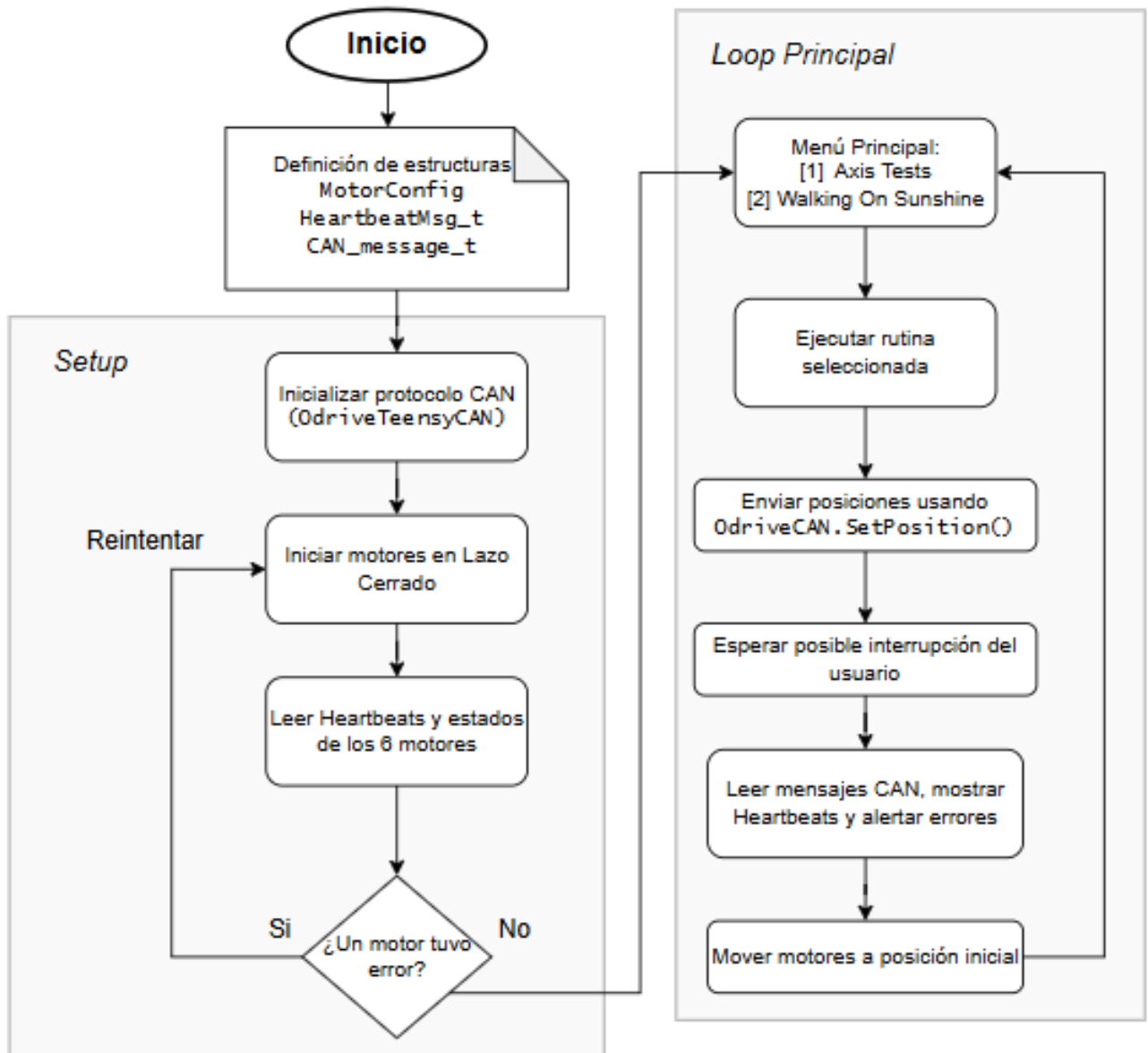


Figura 4.13: Diagrama de flujo para validación de actuadores integrado en robot B1P0

Una vez configurado el hardware, el sistema ejecuta la secuencia de inicialización de motores. Mediante la función RunState, cada ODrive recibe el comando para entrar en Closed Loop Control. Para confirmar que el cambio de estado fue exitoso y que no existen fallos, se utilizan los mensajes Heartbeats que el ODrive transmite de forma periódica. La gestión de estos mensajes se realiza principalmente en dos funciones:

- leerErroresCAN(): Lee todos los mensajes CAN entrantes, filtra los que correspondan a Heartbeats y analiza el contenido para verificar si existe algún axisError o si el estado

(currentState) difiere del esperado. En caso de error, el eje se coloca en IDLE de forma automática.

- `imprimirHeartbeats()`: Realiza una lectura puntual de los Heartbeats de todos los ejes, mostrando por consola valores clave como `axisError`, estado actual y banderas de procedimiento.

Durante la operación, el sistema mantiene un ciclo de lectura continua de mensajes CAN, lo que permite reaccionar ante fallos o desconexiones en tiempo real.

Para la ejecución de movimientos, las funciones `SetPosition`, `SetVelocity` y `SetTorque` envían comandos precisos a los motores, tomando como referencia los datos definidos en la estructura `MotorConfig`. El retorno a la posición inicial se gestiona con `moverMotoresAPosicionInicial()`, que envía repetidamente las posiciones de reposo para garantizar que no se active el watchdog del ODrive.

El bucle principal funciona como un menú interactivo que permite seleccionar distintas rutinas de prueba o ejecución. Durante la ejecución de cualquier rutina, la función `esperarConInterrupcion()` supervisa entradas del usuario para interrumpir el movimiento y devolver el sistema a un estado seguro.

En conjunto, este flujo de instrucciones permite un control seguro y organizado de múltiples ejes, priorizando el diagnóstico en tiempo real, inicialización estructurada y alta escalabilidad.

4.5. Diseño 3D de robot bípedo

El diseño tridimensional del robot bípedo B1P0 se desarrolla en Autodesk Fusion 360, con el objetivo de integrar todos los actuadores, sistemas electrónicos y cableado en una plataforma física coherente con la arquitectura de control previamente descrita. Este modelo 3D permite visualizar la disposición de los seis actuadores, la estructura de soporte, los puntos de montaje, piernas y cuerpo, asegurando que los componentes tengan el espacio y fijación necesarios para su operación.

El robot B1P0 como se ha mencionado anteriormente presenta una arquitectura modular por niveles, el primer piso o nivel más bajo está apartado para sistemas de potencia y baterías, el nivel del medio está destinado para dispositivos de control y monitoreo, por último el nivel superior está reservado para agregar sensores LiDAR, cámaras de profundidad o incluso cargas livianas. Este tipo de estructuras facilita el mantenimiento y sustitución de componentes.

Cada pierna dispone de tres grados de libertad (6 DoF robot completo) distribuidos en los ejes de cadera, rodilla y tobillo, permitiendo un rango de movimientos suficiente para las pruebas de locomoción previstas en esta etapa del desarrollo.

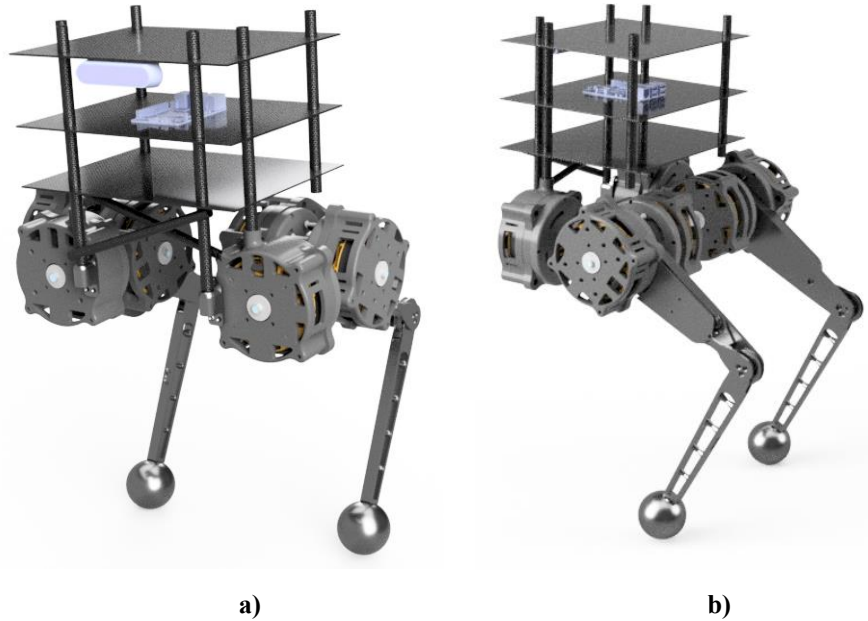


Figura 4.14: Modelo 3D de robot B1P0; a) vista frontal, b) vista trasera

La Figura 4.14 muestra diferentes vistas del modelo 3D del robot, destacando modularidad y la anatomía basada en “tobillos” (visualmente simulan rodillas) hacia atrás optimizando su impulso y menor gasto energético como se menciona en los estudios de Haberland y Kim [4].

Tal como se establece en los objetivos de esta memoria, se omiten estudios avanzados de mecánica estructural, análisis de esfuerzos o cálculos de resistencia de materiales. El diseño presentado corresponde a una configuración funcional orientada a la validación del sistema electrónico y de control, constituyendo un primer prototipo sobre el cual podrán realizarse iteraciones posteriores.

5. Resultados

5.1. Pruebas de torque

A partir de las pruebas experimentales que se realizaron anteriormente al motor Eaglepower, se logra caracterizar dicho motor sin reductor obteniendo sus parámetros más relevantes. Estos datos son de suma relevancia para comparar el desempeño del actuador QDD y por supuesto, caracterizarlo en secciones posteriores.

De la sección 2.2.1 se sabe que el torque eléctrico de un motor de corriente continua está dado por:

$$\tau = K_a \Phi I_a \quad (5.1)$$

Para efectos prácticos, es común reemplazar $K_a \Phi$ por una constante, llamada constante de torque K_T . Como se menciona anteriormente, esta constante se determina en experimentos anteriores, cuyo valor promedio es

$$K_{T_mean} \approx 0.42 \left[\frac{Nm}{A} \right] \quad (5.2)$$

Además, el torque máximo de saturación se determinó que era 1.78 [Nm] a una corriente de 4.17 [A]

Con estos datos en mente, procedemos a armar un setup experimental como se muestra en la Figura 5.1 para medir el torque aplicado en una balanza digital, teniendo en mente la distancia entre el eje de giro y el punto de apoyo (220 [mm]).

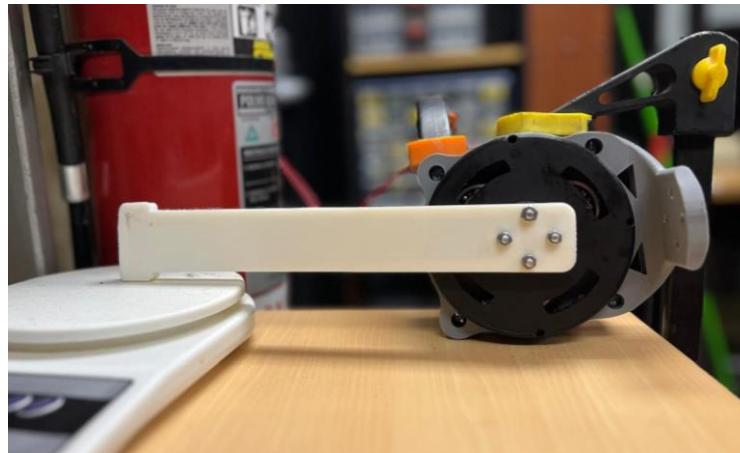


Figura 5.1: Setup experimental: actuador, balanza digital y brazo de fuerza de 220 [mm]

El objetivo de este experimento es poder obtener el torque máximo de saturación implementando el reductor planetario, es por esto que se ajusta el controlador de posición del actuador de tal manera de obtener respuestas agresivas y exigentes, forzándolo a sus límites de corriente. Después de una serie de pruebas de torque, se obtiene las siguientes muestras en condiciones de máxima corriente.

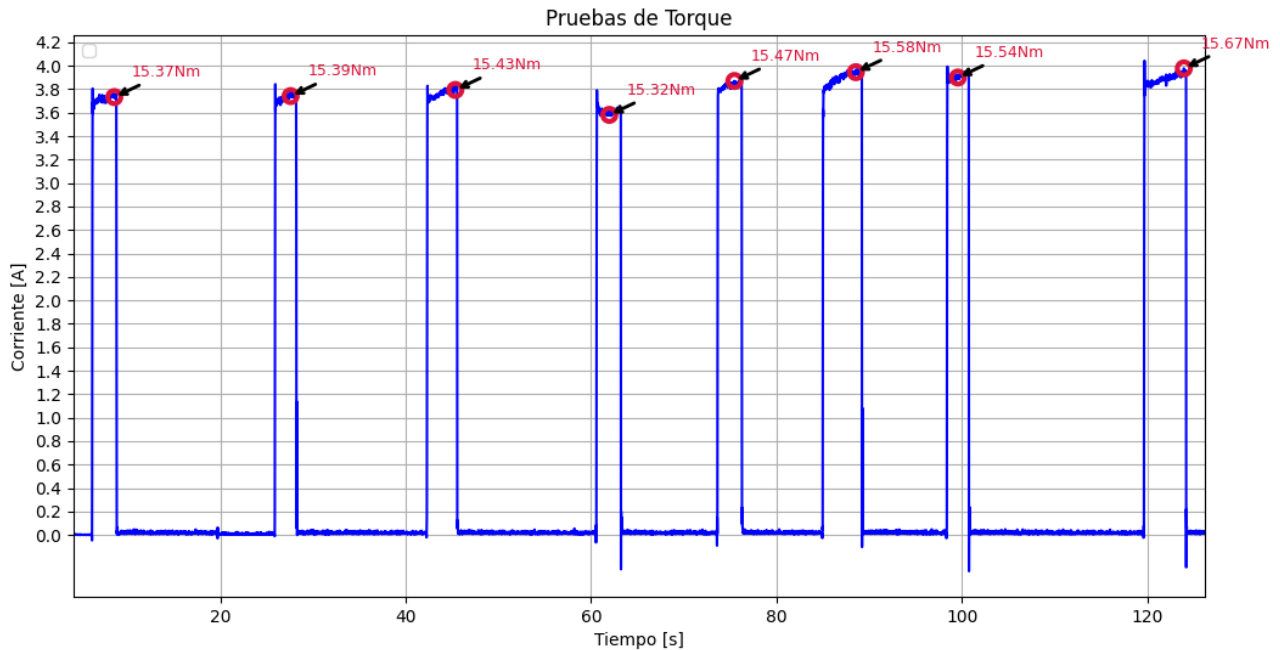


Figura 5.2: Resultados experimentales de torque en condiciones de saturación

Se puede ver en la Figuras 5.2, que a pesar de que la corriente tiende a aumentar ligeramente, la fuerza generada por el actuador apenas logra llegar a los 15.67 [Nm], siendo este valor el torque máximo medido en las pruebas de manera constante. Cabe destacar que en el momento de medir este valor máximo de Torque se presentan sonidos agudos en los inductores del motor, aumentando también su temperatura, lo que indica claramente el momento de saturación y corriente máxima que soporta el motor, la cual alcanzó los 3.98 [A], muy cercano a la corriente máxima medida en pruebas con el motor sin reductor (4.17 [A]).

Como observación importante, es posible medir valores de torque mayores al de saturación mostrado, sin embargo estas mediciones deben ser con una instrumentación mucho más precisa para poder observar peaks de torque en un instante de tiempo muy acotado.

Con estos datos en mente, se puede ver que el torque final obtenido con el reductor planetario aumentó alrededor de 8.8 veces en comparación al torque inicial sin reductor, lo cual es aproximadamente la relación de transmisión de diseño 9:1.

5.2. Caracterización final de actuadores

La caracterización comparativa entre el motor base y el actuador QDD desarrollado para el robot B1P0 evidencia mejoras significativas en parámetros clave. El incremento de la relación de transmisión a 9:1 permite elevar el torque máximo de 1.78 [Nm] a 15.67 [Nm], manteniendo una corriente de saturación similar, lo que indica una mayor eficiencia en la conversión de energía eléctrica en torque útil. La Tabla 5.1 detalla cada comparación.

Tabla 5.1: Caracterización final de actuador QDD propioceptivo

Parámetro	Motor	Actuador QDD Robot B1P0
Masa (g)	336	750
Diámetro (mm)	92	139
Ancho (mm)	28.5	108
KV (rev/V)	90	10
KT (Nm/A)	0.42	3.94
Relación de Transmisión	1:1	9:1
Torque máximo de saturación (Nm)	1.78	15.67
Corriente a torque de saturación (A)	4.17	3.98
Potencia máxima (W)	91.74	87.56
Densidad de torque (Nm/kg)	5.3	20.9
Eficiencia (%)	-	95%

La densidad de torque pasa de 5.3 [Nm/kg] en el motor base a 20.9 [Nm/kg] en el actuador, casi cuadruplicando su capacidad relativa y permitiendo un diseño más compacto y potente. La eficiencia medida del 95% confirma que las pérdidas mecánicas y eléctricas del sistema de transmisión son mínimas.

En conjunto, estos resultados validan el diseño del actuador como una solución óptima para aplicaciones de locomoción bípeda, donde se busca un actuador que entregue alto torque sin sacrificar su velocidad de respuesta y por supuesto, sin sacrificar su peso.

5.3. Prototipo final de robot bípedo e integración de actuadores

En esta sección se presentan las imágenes del prototipo final del robot bípedo B1P0, mostrando la integración física de los actuadores y su disposición en la estructura completa del robot.



Figura 5.3: Piezas 3D impresas y motores previo a ensamblaje

En la Figura 5.3 se muestran las piezas impresas en 3D esenciales para la construcción de cada actuador y pierna del robot, incluyendo motores.

En la Figura 5.4 se observa el interior de un actuador con y sin carcasa, viendo así el sistema de reductor planetario que fue propuesto a lo largo de esta memoria, con su respectivo porta planeta y rodamientos.

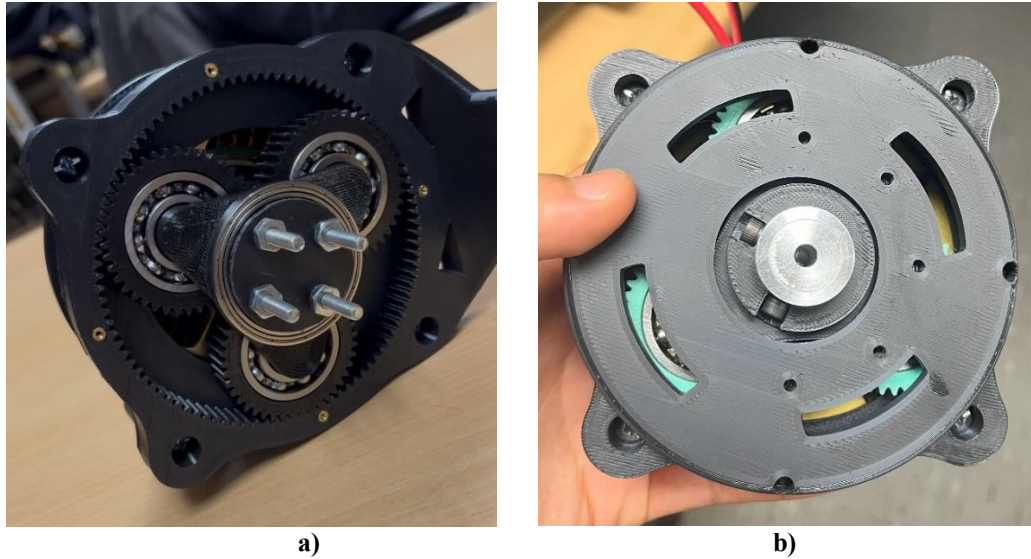


Figura 5.4: Actuator impreso; a) sin carcasa y salida de pernos, b) con carcasa y salida con polea dentada

Cabe mencionar que se diseñaron 2 tipos de actuadores que, en esencia funcionan de la misma manera pero el tipo de anclaje final es diferente. El actuator de la Figura 5.4 lado a) posee un eje de salida con 4 pernos incrustados que sirven como punto de apoyo para unir otros sistemas rígidos.

Por otro lado en la Figura 5.4 lado b) se construyó el mismo actuator pero el porta planeta es una polea dentada GT2 de 19 [mm] de diámetro. Por esta polea se rodea una correa dentada la cual permite transmitir el giro desde el actuator hacia una articulación inferior de la pierna. Solamente se diseñaron dos actuadores de este último modelo ya que solo era necesario dos correas para articular las dos piernas.



Figura 5.5: Pierna completa de robot B1P0 de 3 grados de libertad

Luego, en la Figura 5.5 se ensamblan los 3 actuadores, pie y muelle para construir una pierna completa del robot B1P0 en sus tres ejes de giro. Un detalle no menor es el uso de una esfera como punto de apoyo en el piso. Se toma esta decisión ya que al no contar con un cuarto actuador en la planta baja de la pierna, no se puede generar una articulación extra, por lo tanto, se debe optar por un punto de apoyo rígido en el piso. Sin embargo, para evitar posibles deslizamientos entre el plástico del pie y el piso, se propone a futuro envolver los dos pies del robot con alguna goma antideslizante.



Figura 5.6: Ensamblaje completo de los 6 actuadores (con drivers) y 2 piernas completas

La integración completa de actuadores, piernas y drivers se muestra en la Figura 5.6, como se mencionó antes, los únicos actuadores que cuentan con sistema de poleas son los que llevan las piernas, así poder articularlas.

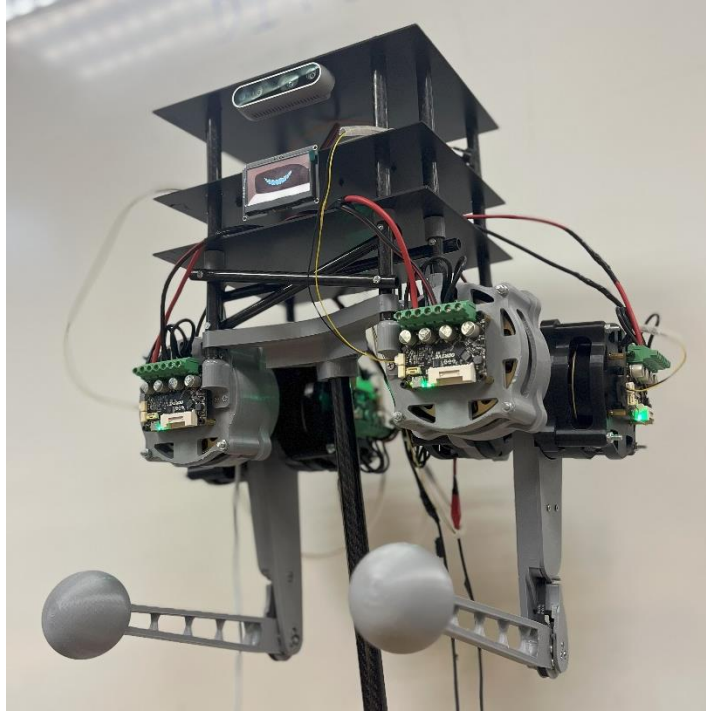


Figura 5.7: Robot B1P0 completamente armado con subsistemas eléctricos conectados

Finalmente, la integración de todos los sistemas tanto mecánicos, como electrónicos se implementan en la plataforma robótica B1P0 (Biped Penquista) mostrada en la Figura 5.7. Aquí todos los actuadores y piernas están unidos a un mismo cuerpo modular separado en niveles. Aunque en la imagen no se logra apreciar bien, dentro de estos niveles se encuentran los subsistemas de potencia y control que van conectados a una fuente de poder y a los actuadores. Además, de manera extra se desarrolló un atril para sostener el robot y realizar pruebas en un entorno más seguro libre de impactos con el suelo o posibles colisiones.

Aunque uno de los objetivos específicos era solamente el diseño en 3D del robot, con este primer prototipo funcional no solo se valida dicho diseño, si no que facilita las pruebas posteriores que se realizarán para validar el sistema de control basado en CAN y Odrive S1.

5.4. Validación del sistema de control en robot B1P0 basado en Odrive S1 y protocolo CAN

La validación del sistema se realiza integrando los seis actuadores modulares controlados por ODrive S1, interconectados mediante un CANbus configurado con identificadores únicos para cada eje y parámetros personalizados tal como se menciona en el capítulo de Diseño en Detalle. El código desarrollado en Teensy 4.1, utilizando la librería ODriveTeensyCAN, permite ejecutar comandos de control de posición y gestión de mensajes cíclicos como Heartbeats para el monitoreo en tiempo real del estado de cada actuador. Esta validación, junto con los códigos queda demostrado en un video público en un repositorio de GitHub, que se adjunta a continuación.

<https://github.com/Bastineitor73/Biped-Robot/tree/main>

Durante las pruebas, se verifica la correcta inicialización de todos los ejes en modo Closed Loop Control, creando funciones de redundancia para asegurar en cada instante la correcta comunicación.

En el video se puede ver como el robot sigue coordinadamente una de las rutinas programadas, la cual simula una caminata. Cabe mencionar que B1P0 está conectado a una fuente de alimentación DC momentáneamente para monitorear la corriente, sin embargo se espera que en trabajos futuros el robot incluya una batería externa y un monitoreo de variables eléctricas en tiempo real. El resultado final fue un sistema funcional y estable, capaz de gestionar diversos tipos de comandos y sobre todo, permitió coordinar de manera independiente cada actuador en una misma plataforma física, tal como se planteó en los objetivos de esta memoria.

6. Conclusiones

6.1. Sumario

El presente trabajo logró diseñar, implementar y validar actuadores Quasi Direct Drive (QDD) propioceptivos integrados en el robot B1P0, alcanzando una densidad de torque de 20.9 [Nm/kg] y una eficiencia del 95%, valores comparables a los obtenidos en instituciones líderes a nivel mundial. Se consolidó una arquitectura de control CAN multi-driver confiable y de baja latencia, junto con un software robusto para inicialización, monitoreo y control en tiempo real de seis actuadores.

La integración en un prototipo físico fabricado en impresión 3D permitió validar la operación coordinada de un robot de 6 grados de libertad como se muestra en el repositorio de Github, esto constituye una de las iniciativas pioneras en Chile en el ámbito de robots bípedos y estableciendo una base tecnológica sólida para proyectos futuros en robótica de alta dinámica.

6.2. Conclusiones

El desarrollo de este trabajo cumplió con los objetivos planteados, destacando especialmente el diseño e implementación de los actuadores QDD propioceptivos, que demostraron un rendimiento sobresaliente en las pruebas realizadas, lo cual se vio reflejado en la tabla de caracterización, donde el logro más notable que se pudo ver un aumento de casi 9 veces el torque inicial y una eficiencia de aproximadamente el 95%.

Además, se implementó con éxito una arquitectura de control basada en protocolo CAN, asegurando comunicación confiable y de baja latencia entre el controlador central y los actuadores. El software desarrollado para gestión de mensajes, inicialización de motores y monitoreo en tiempo real mediante Heartbeats demostró ser robusto en las pruebas con el prototipo físico.

Si bien el rendimiento fue destacable, se identificó que una optimización en el peso y tamaño de las piezas 3D de los actuadores podría incrementar aún más la densidad de torque, uno de los objetivos clave de este proyecto.:

La fortaleza de este trabajo no radica únicamente en abordar temas de diseño de robótica avanzada, sino en establecer una metodología clara: "Se diseña, prototipa y valida". Un estilo de trabajo sumamente útil en ingeniería que crea un perfil profesional de alta competencia.

Construir un robot bípedo de este tamaño y complejidad desde cero no es una tarea sencilla, pues la robótica abarca múltiples disciplinas de la ingeniería, como mecánica, electrónica,

comunicaciones, programación, sensores, entre otros. Sin embargo, el robot B1P0 representa un hito para la Universidad de Concepción y para el desarrollo robótico en Chile, al materializar un sistema funcional de esta envergadura, inexistente hasta ahora en el país.

Más allá de los resultados técnicos, este trabajo sienta las bases para futuros proyectos de investigación y desarrollo, con el potencial de posicionar a la institución a nivel nacional en el campo de la robótica dinámica. B1P0 no es solo un prototipo, sino el primer paso hacia una nueva capacidad tecnológica local.

6.3. Trabajos futuros

A partir de los resultados obtenidos, se identifican líneas de mejora y proyección:

- Optimizar la estructura mecánica del robot, reforzando puntos críticos y reduciendo peso para aumentar la eficiencia energética.
- Explorar nuevos materiales que permitan mejorar la relación torque/peso sin comprometer rigidez.
- Diseñar una nueva generación de actuadores con engranajes planetarios internos al motor, reduciendo volumen y masa.
- Implementar controladores basados en cinemática inversa para estabilidad dinámica y estrategias avanzadas de locomoción.
- Crear un gemelo digital y entorno de simulación para validar modelos físicos, estrategias de control y futuros entrenamientos usando inteligencia artificial.

El desafío de estos trabajos es buscar la colaboración de distintos sectores de la academia, ya que si bien es cierto gran parte de la electrónica, mecánica y programación se validó en este proyecto, se identificaron claras optimizaciones en estructuras mecánicas y un abanico de conocimiento en los entornos de simulación y la inteligencia artificial.

Referencias

- [1] A. Katz, J. Di Carlo, and S. Kim, "Mini Cheetah: A platform for pushing the limits of dynamic quadruped control," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, 2019.
- [2] Agility Robotics, "Cassie: Dynamic bipedal locomotion," 2022. [Online]. Available: <https://agilityrobotics.com/robots>
- [3] LIMX Dynamics, "TRON – Full-size humanoid robot," *LIMX Dynamics*, 2024. [Online]. Available: <https://www.limxdynamics.com/en/tron1>. [Accessed: Jul. 10, 2024].
- [4] M. Haberland and S. Kim, "On extracting design principles from biology: II. Case study—the effect of knee direction on bipedal robot running efficiency," *Bioinspir. Biomim.*, vol. 10, no. 1, p. 016011, Feb. 2015.
- [5] B. Inostroza, "Diseño, implementación y caracterización de un actuador eléctrico propioceptivo," Dept. Elect. Eng., Univ. Concepción, Concepción, Chile, Tech. Rep. PELN-2024, Dec. 2024.
- [6] ODrive Robotics, "ODrive: High-performance motor control," 2023. [Online]. Available: <https://odriverobotics.com/>
- [7] Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), "Accidentes fatales y graves en la minería chilena," Departamento de Planificación, Control de Gestión y Estudios, Santiago, Chile, jul. 2015. [Online]. Disponible en: www.sernageomin.cl.
- [8] P. Soto Altamirano, "Estadísticas de Accidentabilidad," Superintendencia de Seguridad Social (SUSESO), Santiago, Chile, abr. 2021. [Online]. Disponible en: www.suseso.cl.
- [9] A. Hattori, "Design of a High Torque Density Modular Actuator for Dynamic Robots," M.S. thesis, Dept. Mech. Eng., Massachusetts Inst. Technol., Cambridge, MA, 2020.
- [10] A. Singh, N. Kashiri, and N. Tsagarakis, "Design of a Quasi-Direct-Drive Actuator for Dynamic Motions," in *Proc. 1st Int. Electron. Conf. Actuator Technol.: Mater., Devices Appl.*, 2020.
- [11] C. Semasinghe, D. Taylor, and S. Rezazadeh, "Design of Actuators for a Humanoid Robot with Anthropomorphic Characteristics and Running Capability," *Actuators*, vol. 14, no. 243, 2025.

- [12] "Máquinas rotatorias," apuntes de clase, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- [13] P. Flores Hornero, "Driver basado en procesador ARM 32 bits para un motor DC brushless de tres fases empleando la técnica de campo orientado," Proyecto Final de Carrera, Dept. Ing. Sist. Automática, Univ. Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2011.
- [14] J. Zhao and Y. Yu, "Brushless DC Motor Fundamentals," Monolithic Power Systems, Application Note AN047, Rev. 1.0, July 2011.
- [15] R. A. Serway and J. W. Jewett, *Física para ciencias e ingeniería, volumen 1*. Cengage Learning, 2014.
- [16] R. Peña, "Máquinas de corriente continua," Fundamentos de Máquinas Eléctricas y Servosistemas/Control de Movimiento, apuntes de clase, 2014.
- [17] L. G. Meyer and T. D. Degler, "Torque density: An overlooked, but vital parameter in machine design," Eaton, Cleveland, OH, 2016.
- [18] M. Razeto and J. P. Quiroz, "Apuntes de engranajes," Sistemas Mecánicos, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Concepción, 2003.
- [19] C. Morales, "Trenes de engranes," Mecanismos, Departamento de Diseño Mecánico y Automatización, Universidad de Carabobo, 2006.
- [20] A. Martínez Requena, "Introducción a CAN bus: Descripción, ejemplos y aplicaciones de tiempo real," Proyecto Fin de Máster, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sistemas Informáticos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2017.
- [21] N. Kau, A. Schultz, N. Ferrante, and P. Slade, "Stanford Doggo: An Open-Source, Quasi-Direct-Drive Quadruped," in *Proc. 2019 Int. Conf. Robot. Autom. (ICRA)*, Montreal, QC, Canada, 2019.
- [22] A. Zhu, Y. Tanaka, F. Rafeedi, and D. Hong, "Cycloidal Quasi-Direct Drive Actuator Designs with Learning-based Torque Estimation for Legged Robotics," arXiv preprint arXiv:2410.16591, Oct. 22, 2024. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2410.16591>
- [23] J. C. Tuthill and E. Azim, "Proprioception," *Current Biology*, vol. 28, no. 5, pp. R194, Mar. 2018.
- [24] ODrive Robotics, "ODrive S1," ODrive Robotics Shop. [Online]. Available:

<https://shop.odriverobotics.com/products/odrive-s1>. [Accessed: 02-Aug-2025].

[25] ODrive, “Designing for Magnetic Encoders,” ODrive. [Online]. Available: <https://docs.odriverobotics.com/v/latest/articles/magnetic-encoders.html> (accessed Aug. 10, 2025).

[26] ODrive, “Controller,” ODrive. [Online]. Available: <https://docs.odriverobotics.com/v/latest/manual/control.html> (accessed Aug. 12, 2025).

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCION – FACULTAD DE INGENIERIA
RESUMEN DE MEMORIA DE TITULO**

Departamento	: Departamento de Ingeniería Eléctrica
Carrera	: Ingeniería civil electrónica
Nombre del memorista	: Bastián Nicolás Inostroza Sanzana
Título de la memoria	: Diseño e integración de actuadores quasi-direct drive propioceptivos en un robot bípedo de alta dinámica
Fecha de la presentación oral	: 02/09/2025
Profesor(es) guía	: José Rubén Espinoza Castro
Profesor(es) revisor(es)	: Leonardo Manuel Palma Fanjul y Rubén Sigifredo Peña Guíñez
Concepto	:
Calificación	:

Resumen (máximo 200 palabras)

Este trabajo presenta el diseño, implementación y validación de un actuador robótico Quasi Direct Drive propioceptivo, integrado en el robot bípedo B1P0 desarrollado en la Universidad de Concepción. El proyecto aborda los principales desafíos de la robótica bípeda: lograr actuadores de alta densidad de torque, bajo peso y retroalimentación precisa.

El actuador propuesto, basado en un motor BLDC con reductor planetario 9:1 y encoder magnético MA702, alcanzó una densidad de torque de 20.9 Nm/kg y una eficiencia del 95%, superando ampliamente al motor sin reductor (5.3 Nm/kg). Estos resultados lo sitúan en el nivel de diseños realizados en instituciones de referencia internacional.

Para su control se implementó una arquitectura electrónica distribuida mediante protocolo CAN, gestionada por un microcontrolador Teensy 4.1 y transceptores SN65HVD230. Se desarrolló además una librería propia (ODriveTeensyCAN) que permitió la inicialización, monitoreo en tiempo real y envío de comandos de posición, velocidad y torque a seis actuadores en paralelo.

La integración en un prototipo físico bípedo de 6 grados de libertad fabricado en impresión 3D validó la operación coordinada del sistema, constituyendo un hito en el desarrollo de robótica dinámica en Chile y sentando bases sólidas para futuras investigaciones en estructura, materiales, control avanzado y simulación.