



CENTRO DE INVESTIGACIONES
EN OPTICA, A.C.

“CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT CUADRÚPEDO PARA TAREAS DE AGRICULTURA”

“Versión Definitiva. Incluye cambios sugeridos por
revisores”



Tesis que para obtener el grado de Maestro en Optomecatrónica

Presenta: Hugo Alberto Moreno Jiménez

Director de Tesis: Dr. Gerardo Ramón Flores Colunga

Visto Bueno
Dr Gerardo Flores
29 de octubre de 2020

León · Guanajuato · México
Octubre de 2020

Índice general

Agradecimientos	7
Resumen	8
Abstract	10
Lista de acrónimos	12
1. Introducción	13
1.1. Antecedentes	14
1.1.1. Robots hidráulicos	15
1.1.2. Robots eléctricos	16
1.2. Estado del arte	18
1.3. Alcance y objetivos del proyecto	20
2. Pautas del diseño	22
2.1. ¿Por qué un robot cuadrúpedo?	22
2.2. Eficiencia energética	22
2.3. Morfología	24

2.4. Estabilidad	25
3. Diseño mecánico	27
3.1. Diseño pierna	28
3.2. Diseño cuerpo principal	32
3.3. Hardware completo	33
4. Modelado y Control	35
4.1. Control principal	36
4.1.1. Orientación	36
4.1.2. Marcha	38
4.2. Control secundario (pierna)	39
4.2.1. Calculo cinemático	40
4.2.2. Cinemática directa	40
4.2.3. Cinemática inversa	42
4.2.4. Sistema de control de posición con PID (Servomotor)	43
5. Experimentación	47
5.1. Respuesta de una pierna	47
5.2. Respuesta general del robot	49
5.2.1. Software de pruebas generales.	50
5.2.2. Configuración piernas	51
5.2.3. Movimientos robot	52
6. Conclusiones	55
7. Trabajo futuro	56
Bibliografía	57

Índice de figuras

1.1. Primer robot caminante. Ilustraciones tomadas de P,Gonzalez.”Quadrupedal locomotion”,(2006). [1]	14
1.2. GE Walking Truck (1962).	15
1.3. Big Dog, Boston dynamics (2008) [2].	16
1.4. HyQ, Italian Institute of Technology (2011) [3].	16
1.5. LittleDog (2011) [4]	17
1.6. Cheetah II, MIT (2014) [5].	17
1.7. Robot cuadrúpedo de código abierto (2020) [6].	18
1.8. SPOT (2020) [7].	19
1.9. Robots cuadrúpedos desarrollados por el Biomimetic Robotics Lab del MIT.	19
1.10. Robots cuadrúpedos con fines comerciales.	20
2.1. Reacciones durante las fases de la caminata. Ilustración realizada en software CAD (Diseño asistido por computadora).	24
2.2. Cadena cinemática del robot cuadrúpedo, Ilustración realizada en software CAD.	25
3.1. Render del modelo CAD junto al robot cuadrúpedo fabricado.	27

3.2.	Diseño CAD de la pierna.	28
3.3.	Vista aislada del diseño CAD del muslo y rodilla.	30
3.4.	Disposición del los componentes de la cadera.	31
3.5.	Dimensiones finales del robot.	32
3.6.	Configuración de las piernas.	33
3.7.	Diagrama completo del hardware.	34
4.1.	Desglose de tareas de los controladores.	35
4.2.	Representación de los ángulos de Tait-Bryan	36
4.3.	Cinemática roll, pitch.	37
4.4.	Cinemática yaw	37
4.5.	Marcha 1	39
4.6.	Marcha 2	39
4.7.	Cinemática pierna 3 GDL.	41
4.8.	Cinemática inversa.	41
4.9.	Diagrama del control de posición.	44
4.10.	Respuesta del control PID.	46
5.1.	Setup de pruebas.	48
5.2.	Respuesta pierna.	49
5.3.	Gráfica de la respuesta de los motores ante el seguimiento de posición.	49
5.4.	Soporte para pruebas sin carga.	50
5.5.	Acciones del mando.	51
5.6.	Cadera modular	52
5.7.	Configuración de las piernas.	52
5.8.	Se muestra el robot manteniendo diferentes alturas.	53
5.9.	Se muestra el robot manteniendo diferentes ángulos.	53
5.10.	Trayectoria y respuesta de la caminata.	54
5.11.	Secuencia de la caminata en la base de pruebas.	54

Índice de tablas

4.1. Tabla de compensaciones de alturas y ángulos.	38
--	----

Agradecimientos

Varias son las personas que me han apoyado en la realización de esta tesis y a lo largo de mi estancia en esta institución, con sinceridad les agradezco por estar ahí y aportar a mi desarrollo personal y profesional ya sea de forma directa o indirecta. Agradezco a mi asesor el Dr. Gerardo Flores, Tanto por su guía para realizar esta tesis, como por su apoyo y consejo los cuales fueron de gran importancia para mí. A mis sinodales por su apoyo en la corrección de esta tesis. Agradezco a mis compañeros del laboratorio de percepción y robótica (LAPYR), por su apoyo y disposición, lo cual facilitó en gran medida la realización de los diferentes proyectos en los que me involucre durante mi maestría. Quiero agradecer especialmente a mis padres y hermanos, por sus consejos y apoyo constante el cual fue fundamental para sobrellevar los obstáculos y poder conseguir este objetivo. Finalmente agradezco al CIO y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), este trabajo fue apoyado en parte por el FORDECYT-CONACYT bajo el proyecto 292399 "Generación de estrategias científico-tecnológicas con un enfoque multidisciplinario e ínter institucional para afrontar la amenaza que representan los complejos ambientales en los sectores agrícola y forestal de México". muchas gracias por darme su voto de confianza y por todo el apoyo recibido.

Resumen

En esta tesis se aborda el diseño, fabricación y control de un robot cuadrúpedo para tareas de agricultura, ya que estos robots presentan varias ventajas con respecto a otros vehículos, debido en parte a que el patrón de movimiento de los mamíferos aporta una gran adaptabilidad y flexibilidad, que es necesaria ya que el entorno de las tierras de cultivo es complejo y cambiante. El robot presentado tiene la capacidad de realizar un amplio rango de movimientos manteniendo su estabilidad general y permitiéndole realizar movimientos estáticos y dinámicos. El diseño realizado toma como inspiración tanto de robots existentes, como el SPOT de Boston Dynamics [7] o el Mini Cheetah del MIT [8], así como de la naturaleza al incluir elementos elásticos, que, como los tendones y músculos, contribuyen con la locomoción al almacenar energía cinética, y usarla para aumentar las capacidades del robot. Este robot será la base para futuros trabajos, donde se continuará con la mejora física del robot y se implementará inteligencia artificial para el control de movimientos, trayectorias del robot y la implementación de marchas que le permitan sortear eficientemente los obstáculos propios de las áreas de cultivo, lo que le permitirá moverse por entornos irregulares e inestables. Estas características, permitirán al robot desplazarse con seguridad en áreas de cultivo, para realizar diferentes tareas como cosecha, abono, riego entre otros. Con esto en mente, se presenta un robot ligero y económico que permite una rápida duplicación y la capacidad de realizar

mejoras de forma modular, lo que permite avanzar con el rediseño de la estructura actual, así como los materiales de la misma para brindar mejores prestaciones, así como implementar nuevos aditamentos que permitan mejorar la propiocepción del robot y su interacción con el entorno.

Abstract

This thesis presents the design, manufacture and control of a quadruped robot for agricultural tasks. These robots have several advantages over other vehicles, partially because the movement pattern of mammals provides a great adaptability and flexibility, which is necessary because the environment of farmland is complex and changing. The presented robot has the capacity to carry out a wide range of movements maintaining its general stability and allowing it to carry out static and dynamic movements. The design was inspired from existing robots such as the Boston Dynamics SPOT [8] or MIT's Mini Cheetah [8], as well as from nature, which includes elastic elements, such as tendons and muscles, that contribute to locomotion by storing kinetic energy, and using it to increase the robot's capabilities. This robot will be the base for future works, where it will be continued with the improvement of physical structure of the robot and it will be implemented artificial intelligence for the control of movements, trajectories of the robot, and the implementation of marches that permit him to circumvent efficiently the obstacles proper of the areas of cultivation, which will permit him to move for irregular environments and unstable. These features will allow the robot to move safely in farming areas, to perform different tasks such as harvesting, fertilizing, irrigation, among others. With this in mind, it is presented a light and economic robot that allows a quick duplication and the capacity to realize improvements in a modular way, what allows

to advance with the redesign of the current structure as well as the materials of the same one to offer better benefits as well as to implement new attachments that allow to improve the proprioception of the robot and its interaction with the environment.

Lista de acrónimos

GDL — Grados de libertad.

EM — Electro magnético

CDG — Centro de gravedad

CAD — Diseño asistido por computadora

ESC — Control electrónico de velocidad

Instituciones

DARPA — Defense Advanced Research Projects Agency.

MIT — Instituto tecnológico de Massachusetts.

Materiales

PLA — Ácido poliláctico

ABS — Acrilonitrilo butadieno estireno

TPS — Elastómero termoplástico

ABS — Acrilonitrilo butadieno estireno.

CAPÍTULO 1

Introducción

La capacidad de adaptación para evadir obstáculos imprevistos o atravesar diferentes tipos de terrenos, así como la tolerancia a errores, es esencial cuando se trata de robots móviles que trabajan en áreas remotas o en ambientes peligrosos donde es imposible tener la certeza de las condiciones del terreno o llevar a cabo reparaciones. Debido a esto, se han propuesto diferentes tipos de soluciones, sin embargo, a través de millones de años de evolución, la naturaleza ya ha encontrado un sistema que permite el desplazamiento sobre terrenos irregulares, el cual está presente en la mayoría de los animales terrestres y es la locomoción cuadrúpeda o pronograde. Los robots cuadrúpedos presentan mayor ventaja, respecto a los basados en ruedas u orugas [1], dentro de terrenos irregulares, espacios peligrosos y/o de difícil acceso, por lo que son más adecuados para su uso en estos entornos al no requerir de superficies grandes para el apoyo de las extremidades o de áreas planas para su desplazamiento. Dadas las ventajas mencionadas, dentro del campo de la agricultura, el robot cuadrúpedo es una alternativa mejor que otros vehículos, ya que el patrón de movimiento de los mamíferos aporta una gran adaptabilidad y flexibilidad, que es necesaria ya que el entorno de las tierras de cultivo es complejo. a pesar de las ventajas que este tipo de robots aportan, la investigación dirigida

hacia esta área es reducida debido a que en estos entornos el robot requiere contar con un control de equilibrio mayor. por lo que exige sistemas mecánicos y de control más complejos. En SU et al. [9] y Fu et al. [10] se exploran las ventajas y estrategias de marcha para su uso dentro del campo agrícola.

1.1. Antecedentes

La investigación de los robots caminantes se ha llevado desde mucho tiempo atrás, El primer documento acerca de un robot caminante aparece en 1870, el cual es un mecanismo de 4 barras inventado por el ruso matemático P. L. Chebyshev. Este mecanismo se muestra en la figura 1.1 a). El funcionamiento de este consiste en dibujar una trayectoria casi recta y paralela al piso durante la mitad del ciclo, y levantar la extremidad del suelo durante la otra mitad, ver figura 1.1 b). Por lo que, al desfasar este movimiento para cada una de las piernas se logra una caminata, no obstante, este dispositivo sólo puede caminar en un terreno perfectamente plano y nivelado ya que le es imposible adaptarse al terreno al no contar con ningún mecanismo que se lo permita.

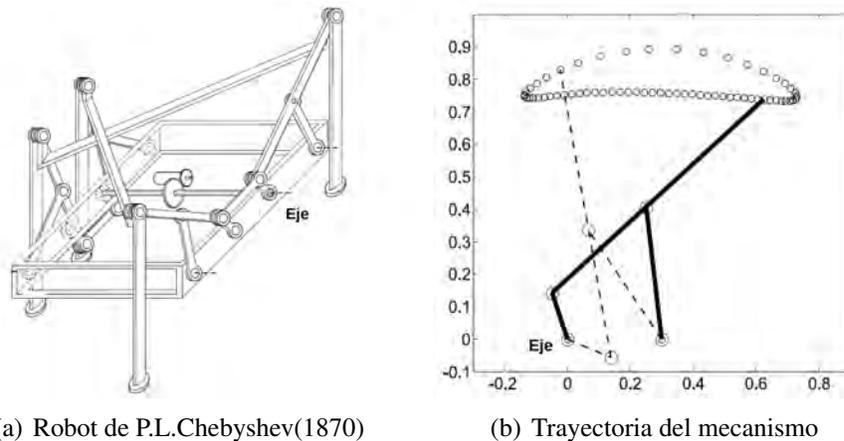


Figura 1.1: Primer robot caminante. Ilustraciones tomadas de P,Gonzalez."Quadrupedal locomotion",(2006). [1]

Así mismo, el trabajo del ingeniero polaco M. G. Bekker en el Centro de Tanques y Automóviles del Ejército de EE.UU. permitió el desarrollo del GE Walking Truck (1962) [11].

este cuadrúpedo, tenía un cuerpo de 3 m de largo y un peso de 1400 *kg*, su construcción fue iniciada por R. S. Mosher en 1962. Utilizaba un motor de gas de 90 *HP*, el control de las piernas lo realizaba un operario montado en el robot. el cual controlaba las 12 articulaciones del robot con manijas y pedales en manos y pies. Figura 1.2

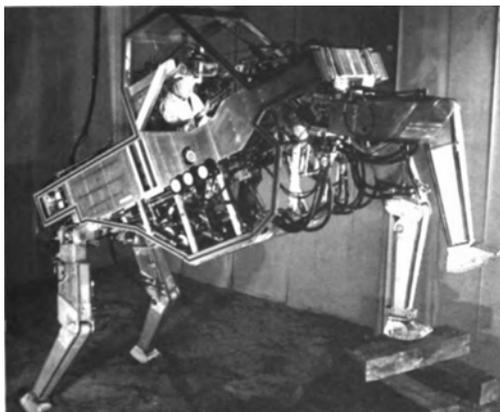


Figura 1.2: GE Walking Truck (1962).

A partir de estas investigaciones, el desarrollo de los robots cuadrúpedos continuó avanzando para crear robots autónomos capaces de dar apoyo a las personas y realizar tareas como el transporte de objetos en lugares peligrosos o de difícil acceso. A continuación se muestran algunos de los robots fabricados en estas 2 décadas.

1.1.1. Robots hidráulicos

Los robots de accionamiento hidráulico presentaron un área de estudio de interés en años anteriores debido a la robustez y fuerza que pueden entregar este tipo de sistemas, sin embargo a pesar de esto resultaron ser energéticamente ineficientes. Lo anterior debido al peso del motor a gasolina que utilizaban para generar la presión hidráulica necesaria para mover el peso de los mismos algunos ejemplos de estos son.

El Big Dog de Boston dynamics [2], que se ve en la figura 1.3, es un robot con 16 articulaciones. utiliza un motor de gasolina como fuente de alimentación, este robot resulto muy poco eficiente debido al extenso mantenimiento que requería y el gran tamaño y peso del

motor necesario para mover un robot con sus características.



Figura 1.3: Big Dog, Boston dynamics (2008) [2].

El robot HyQ desarrollado en el Italian Institute of Technology (2011) [3], cuenta con 3 articulaciones de revoluta en cada pierna, terminando con una articulación prismática para ayudar al equilibrio. El robot HyQ es muy grande, con 1m de largo y 50 cm de ancho. Con un peso de 70 kg. Ver figura 1.4.



Figura 1.4: HyQ, Italian Institute of Technology (2011) [3].

1.1.2. Robots eléctricos

Dada la ineficiencia de los robots hidráulicos y a los avances tecnológicos de los motores eléctricos, mas específicamente a los motores sin escobillas (brushless) así como a las capacidades de las baterías, el diseño de robots cuadrúpedos actualmente esta enfocado al uso de este tipo de actuadores, los cuales han demostrado tener una eficiencia energética superior a

los hidráulicos. Algunos de estos robots se nombran a continuación.

LittleDog (2011) [4], es un pequeño robot desarrollado con fondos de DARPA para impulsar los avances en los algoritmos de locomoción en terreno irregular. En su momento LittleDog sirvió como una plataforma común entre múltiples equipos de investigación que permitió la comparación directa de los algoritmos creados por los mismos. Este robot se muestra en la figura 1.5.

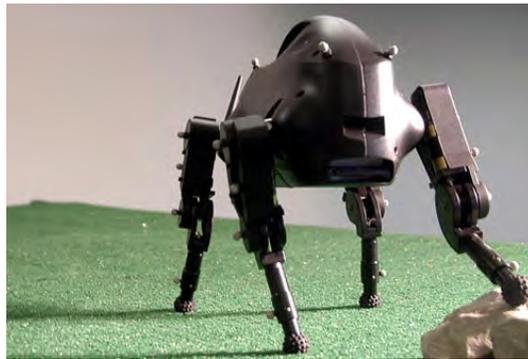


Figura 1.5: LittleDog (2011) [4]

El robot Cheetah, es un robot cuadrúpedo de 12 grados de libertad (GDL), este robot inicio su desarrollo a partir de una asociación entre Boston Dynamics y el laboratorio de Biomimética del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT). La intención principal de este robot era que alcanzara velocidades altas, lo que dio como resultado un robot con una velocidad máxima experimental de 45 *Kph*.

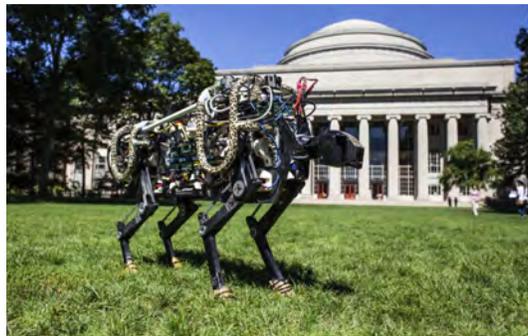


Figura 1.6: Cheetah II, MIT (2014) [5].

Al terminar la asociación el MIT continuó trabajando en el desarrollo de una nueva versión de este robot, el Cheetah II (2014) [5]. debido a la experiencia obtenida con el Cheetah I y al diseño óptimo del actuador, se logro un funcionamiento eficiente alcanzando velocidades de $0-6,4\text{ m/s}$. Este robot puede ejecutar giros suaves y saltar de forma autónoma los obstáculos, este robot se muestra en la figura 1.6.

En Felix Grimmering(2020) [6], se presenta un robot cuadrúpedo de código abierto de 8-GDL, pensado para apoyar la investigación de locomoción de robots con patas con un robot robusto y duradero de bajo peso que puede ser manejado con seguridad por un solo investigador, este robot tiene un peso de de $2,2\text{ kg}$, cuenta con un amplio rango de movimiento, está ensamblado a partir de ocho módulos actuadores idénticos y cuatro patas con sensores de contacto, mostrado en la figura 1.7.

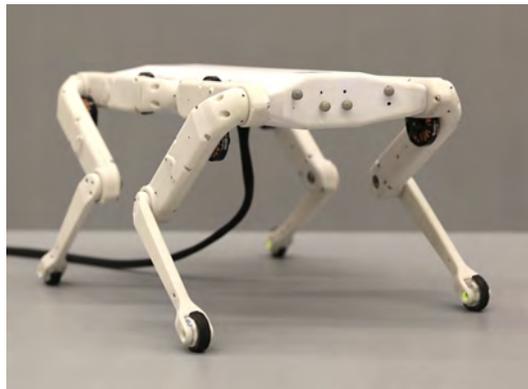


Figura 1.7: Robot cuadrúpedo de código abierto (2020) [6].

1.2. Estado del arte

En los últimos años, debido a su desarrollo constante, se han visto grandes progresos en cuanto a la movilidad y estabilidad de los robots cuadrúpedos dadas las ventajas que podrían ofrecer en terrenos irregulares, respecto a sus contra partes con ruedas. Entre los robots cuadrúpedos más avanzados se encuentran los desarrollados por Boston Dynamics como:

El SPOT (2020) [7] es su último robot presentado. Es un robot industrial de 65 libras

y está diseñado para uso industrial y comercial, para actividades de vigilancia, resguardo y extracción de elementos. El SPOT se muestra en la figura 1.8.



Figura 1.8: SPOT (2020) [7].

Así mismo, el Biomimetic Robotics Lab del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) se encuentra impulsando el estudio de las capacidades de locomoción dinámica de los robots cuadrúpedos con su plataforma Cheetah, la cual ha tenido varias iteraciones, donde las más importantes y de relevancia para este proyecto son:

Cheetah 3 (2018) [12]. Este robot presentaba un nuevo diseño de piernas que incluía la actuación propioceptiva y un amplio rango de movimiento en la cadera y las rodillas. Ver figura 1.9 a).

Mini Cheetah (2019) [8]. Es un robot robusto destinado a permitir un rápido desarrollo de los sistemas de control de los robots cuadrúpedos. El robot utiliza actuadores modulares retroactivables personalizados que permiten el control de fuerza, un alto par y robustez a los impactos. Mostrado en la figura 1.9 b).



(a) Cheetah 3 (2018) [12]



(b) Mini Cheetah (2019) [8]

Figura 1.9: Robots cuadrúpedos desarrollados por el Biomimetic Robotics Lab del MIT.

Otros robots cuadrúpedos que presentan un gran avance dentro de sus propias áreas son:

ALPHRED 2 (2020) [13], el cual es un robot cuadrúpedo diseñado tanto para la locomoción como para la manipulación. Con el propósito de ser utilizado para la entrega de paquetes, este robot tiene un diseño cinemático radialmente simétrico que proporciona un mayor espacio de trabajo para los efectores finales y permite al robot reconfigurarse en diferentes modos para realizar diferentes tareas. mostrado en la figura 1.10 a).

ANYmal (2017) [14] es un robot cuadrúpedo desarrollado para operar en entornos difíciles. Tiene un peso de 30 *kg* y una altura de 0,5 *m*. Se construyó de forma modular para un mantenimiento sencillo y su diseño se centró en la capacidad de movimiento dinámico. El sistema está sellado herméticamente para alcanzar el estándar IP67 y protegido para sobrevivir a las caídas. Cuenta con sensores lidar para la localización y el mapeo del terreno. Mostrado en la figura 1.10 b).



(a) ALPHRED 2 (2020) [13]



(b) ANYmal (2017) [14]

Figura 1.10: Robots cuadrúpedos con fines comerciales.

1.3. Alcance y objetivos del proyecto

El robot presentado en este trabajo será la base para implementar inteligencia artificial en el control de movimientos y trayectorias que le permitan adaptarse a terrenos irregulares e inestables, así como optimizar el consumo energético, por lo que, tanto el costo, tiempo, la facilidad de fabricación y la capacidad de mejora del prototipo serán aspectos muy importantes, considerando con especial atención el rango de movimientos y la estabilidad del robot.

Objetivo general:

Fabricar un robot cuadrúpedo que permita, experimentar con el uso de diferentes tipos de control. para su implementación en tareas agrícolas.

Objetivos específicos:

- **Diseño mecánico.** Crear un diseño de fácil fabricación, que permita un amplio rango de movimientos.
- **Control.** Realizar un control de posición que permita en conjunto manipular de forma efectiva la posición y orientación general del robot así como cada una de sus extremidades de forma independiente.
- **Marcha.** Implementar una marcha básica que permita observar la viabilidad de este robot para futuros experimentos.

2.1. ¿Por qué un robot cuadrúpedo?

Como ya se ha mencionado con anterioridad, los robots caminantes presentan varias ventajas al enfrentarse a terrenos irregulares, respecto a los basados en ruedas u orugas, pues no requieren de superficies planas para su andar, así como el hecho de no necesitar áreas grandes para posar sus extremidades, lo que a su vez reduce los daños al terreno por su andar. Así mismo, el número mínimo de patas para una locomoción estática estable es de 4 (ver la sección [2.4 Estabilidad](#)), manteniendo un polígono de soporte amplio, lo que permite diferentes distribuciones de la carga.

2.2. Eficiencia energética

Una de las características críticas a tomar en cuenta para el desarrollo de cualquier robot que pretenda ser autónomo es la eficiencia energética, un atributo indispensable para asegurar el éxito del robot en aplicaciones reales. En *Design Principles for Energy-Efficient* (2015)

[15] se nombran 4 pautas a tomar en cuenta para mejorar la eficiencia del sistema de un robot cuadrúpedo.

- **Alta densidad de par del motor:** Este principio de diseño sugiere emplear motores EM de alta densidad de par para minimizar la pérdida de energía en los actuadores. Este principio concierne directamente al calentamiento causado por el efecto de Joule, reduciendo la corriente eléctrica necesaria para proporcionar el par para la locomoción. Según este artículo, si la densidad de par del motor se duplica sin cambiar otros factores como la masa del motor y las características de disipación de calor, el calentamiento por el efecto de Joule puede reducirse en un 75 %. Por lo tanto, en un requisito de par determinado, el aumento de la densidad de par del motor es muy deseable para una locomoción eficiente sin comprometer la dinámica del sistema.
- **Regeneración de la energía:** La locomoción con patas implica un flujo dinámico de energía bidireccional desde la fuente de energía hasta la interacción con el suelo. En la locomoción con patas hay periodos en cada zancada en los que la pata hace un trabajo negativo [16], [17]. Estos periodos incluyen los momentos de contacto con el suelo, donde los pares de torsión y las velocidades angulares están en dirección opuesta entre sí. La Figura 2.1. ilustra este concepto, por lo que es deseable recuperar esa energía en lugar de disiparla.
- **Transmisión mecánica de baja impedancia:** Este principio indica que el uso de medios de transmisión con baja impedancia es preferible, ya que el aumento de la impedancia mecánica impide el logro de un control de la fuerza propioceptiva altamente dinámico y aumenta las pérdidas por fricción [18], lo que compromete la eficacia de la regeneración de energía durante el trabajo negativo, por lo que una transmisión por banda sería preferible a una por engranes. Sin embargo, se indica que el empleo de engranajes reduce significativamente las demandas de par en los motores al tiempo que aumenta la densidad de par, además de que la adición de los engranajes añade inercia y amortiguación reflejadas del actuador al eje de salida.

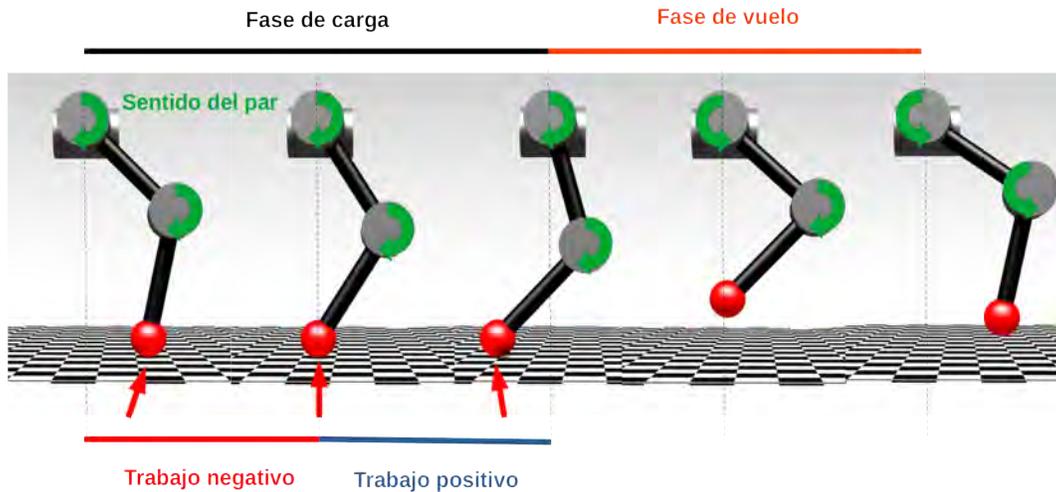


Figura 2.1: Reacciones durante las fases de la caminata. Ilustración realizada en software CAD (Diseño asistido por computadora).

- **Piernas de baja inercia:** Este punto nos indica que la baja inercia de las piernas puede reducir los requerimientos de torque durante las fases de la locomoción que impliquen una aceleración rápida y por lo tanto, un alto torque. Dado el límite del par, la baja inercia de la pierna permite un movimiento de giro más rápido, y por tanto, es deseable contar con piernas ligeras y procurar reducir en su mayoría los elementos que componen las mismas.

Además de estas pautas existen otras formas de aumentar la eficiencia energética, en Kun Yang et al.(2018) [19], se contempla la eficiencia energética enfocada en la trayectoria, mientras que en Tianfa Li et al.(2020) [20] se contempla desde el controlador del motor, generando una señal de impulso para el motor que reduzca el consumo del mismo, mientras que en Shmue(2013) [21], se enfoca en las transiciones entre marchas. Sin embargo dada la etapa del proyecto este trabajo se enfocara en la eficiencia mecánica que corresponde a las 4 pautas anteriores.

2.3. Morfología

Los robots caminantes o con patas pertenecen a la clase de base flotante o free-floating systems, es decir, a sistemas que no están rígidamente conectados a su entorno, ya que pueden

moverse a cualquier lugar del espacio utilizando el suelo como soporte. Estos interactúan con el entorno a través de múltiples y continuamente cambiantes puntos de contacto para mantenerse inmóviles o impulsarse hacia adelante, lo que da lugar a que el centro de gravedad (CDG) sea dinámico. Por tanto, se tienen que plantear criterios para mantener en la medida de lo posible la estabilidad general del sistema. Ver la figura 2.2. Los principales movimientos de las extremidades para generar locomoción hacia adelante y atrás, ocurren en los planos de las piernas que son paralelos al plano sagital para la mayoría de los mamíferos [22], en este caso cada pierna cuenta con tres articulaciones, de las cuales dos tienen su eje normal a este plano, este tipo de piernas ha sido ampliamente utilizado por ejemplo: Starleth(2012) [23], Scalf(2011) [24] y los mostrados en la Sección: Estado del arte 1.2 exceptuando a ALPHRED. En Gao et al. (2016) [25], se estudia la morfología de este tipo de robots en torno a la estabilidad estática.

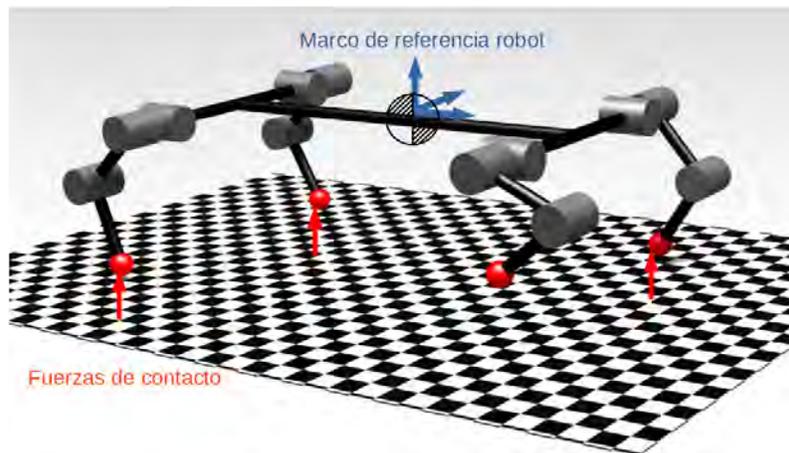


Figura 2.2: Cadena cinemática del robot cuadrúpedo, Ilustración realizada en software CAD.

2.4. Estabilidad

Uno de los principales criterios para el desarrollo de este tipo de robots es la estabilidad. McGhee y Frank (1968) [26] definieron la estabilidad estática de un robot caminante ideal por primera vez, la cual dice que un robot ideal es estáticamente estable si la proyección horizontal de CDG se encuentra dentro del patrón de soporte. Esto suponiendo que el robot

tiene piernas sin masa, y asumiendo que la dinámica del sistema está ausente. Un ejemplo de esta estabilidad la encontramos en los insectos, ya que utilizan sus piernas (relativamente sin masa) para apoyar su cuerpo al mismo tiempo que caminan y proporcionan un impulso. Dada su secuencia de pasos, estos pueden mover el cuerpo mientras mantienen el equilibrio, pero aunque los andares estáticamente estables simplifican el control, durante el movimiento de las extremidades reales (con peso) se encuentran algunos efectos inerciales y otros componentes dinámicos (fricción, elasticidad, etc.) que restringen los movimientos del robot a velocidades bajas y constantes. Por lo que aunque la locomoción con estabilidad estática facilita el control del movimiento, limita la velocidad. La única manera de aumentar la velocidad del robot es considerar la dinámica del robot en el control de estabilidad del mismo. La complejidad intrínseca de considerar toda la dinámica del robot llevó a algunos investigadores a buscar soluciones diseñando máquinas muy simplificadas mecánicamente que tienen sólo unos pocos grados de libertad [27], [28], o a simplificar los modelos dinámicos al adoptar los criterios de estabilidad diseñados para bípedos. Sin embargo, el movimiento de estos cuadrúpedos se limita a terrenos llanos, porque utilizando el criterio de estabilidad basado en el Punto de Momento Cero [29], el cual sólo es válido para superficies planas, la idoneidad de cada criterio para cada aplicación particular (es decir, las fuerzas de manipulación y el momento presente, el terreno desigual, etc.) no está nada claro. No obstante, el uso de un criterio de estabilidad no adecuado para la aplicación a efectuarse puede impedir que la tarea tenga éxito.

CAPÍTULO 3

Diseño mecánico

En este capítulo se muestra el desarrollo del diseño del robot cuadrúpedo, teniendo como características deseadas un bajo tiempo y costo de fabricación, amplio rango de movimientos, estabilidad y modulabilidad en la mayoría de sus componentes. Todo esto para aumentar su capacidad de mejora.

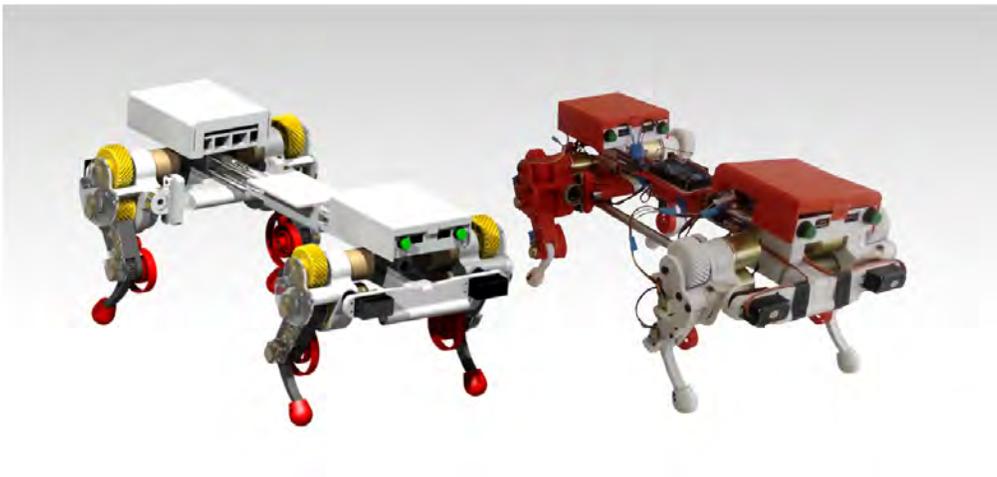


Figura 3.1: Render del modelo CAD junto al robot cuadrúpedo fabricado.

3.1. Diseño pierna

El diseño de la pierna es crucial para la fabricación de un robot cuadrúpedo, ya que en esta parte se encuentra el mayor nivel de complejidad tanto en diseño como en control. El diseño de la pierna tomó como base la configuración utilizada por robots con años de investigación a sus espaldas, como lo son el SPOT (2020) [7] y el Mini Cheetah (2019) [8], los cuales cuentan con una buena estabilidad estática y dinámica además de un amplio rango de movimientos.

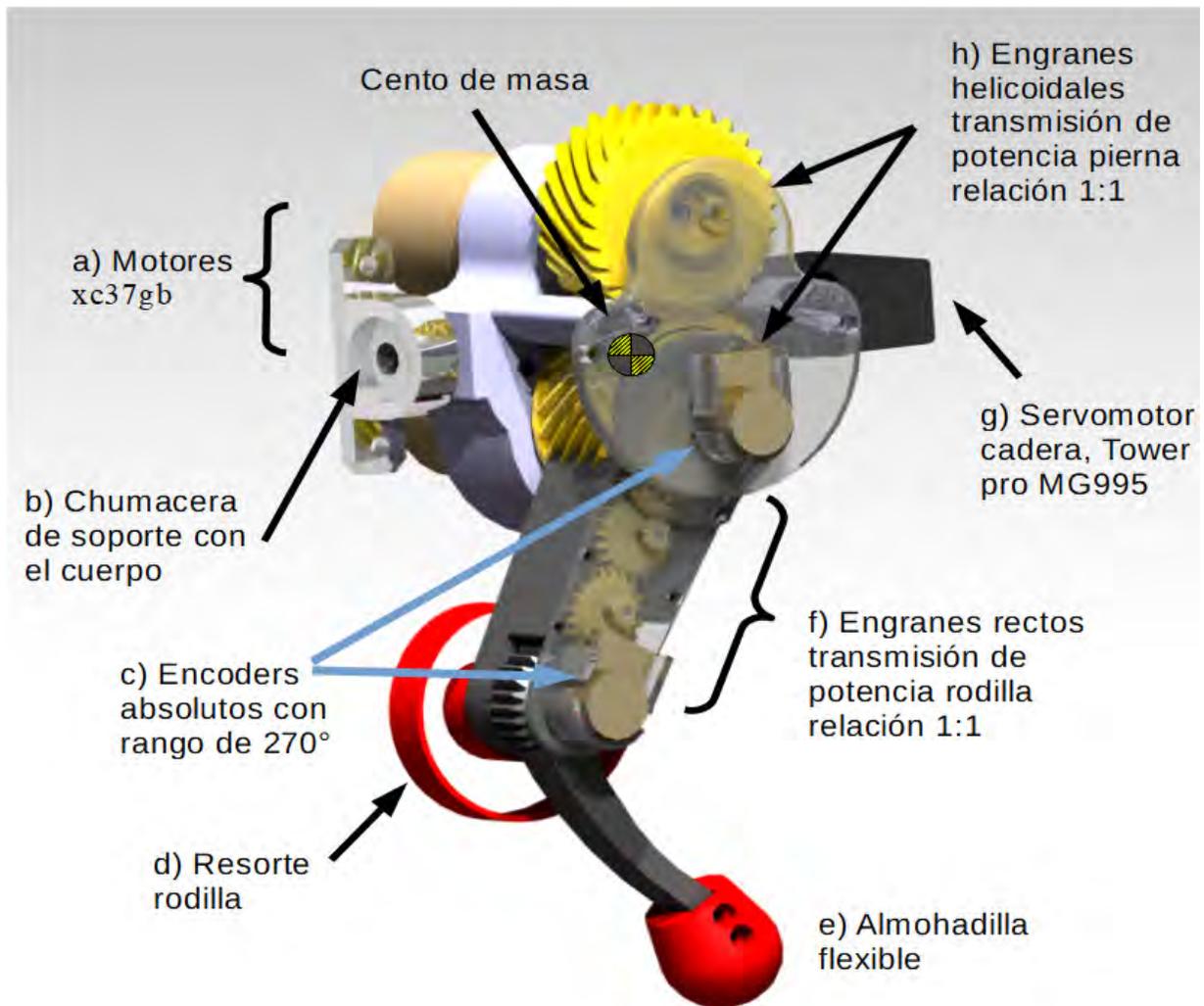


Figura 3.2: Diseño CAD de la pierna.

La estructura general de la pierna está fabricada con polímeros imprimibles en 3D (PLA, ABS, TPS y Nylon), esto debido a la versatilidad que otorga trabajar con esta tecnología [30], [31], [32]. Así como el poco tiempo que requiere pasar del diseño a la fabricación. Además, el diseño se realizó tomando en cuenta el cambio a otros materiales como aluminio o fibra de carbono en un futuro. Se escogió como actuador el moto-reductor DC xc37gb debido a que cuenta con una robusta transmisión por engranes, que otorga una velocidad de 30 rpm y un torque de 12 kg/cm . Se seleccionó un motor DC debido a su fácil controlabilidad y a su bajo peso con respecto a los motores a pasos. En este caso, no se optó por motores brushless de alto torque debido a que requieren de controladores de velocidad (ESC) especiales que no se encuentran con distribuidores nacionales.

Características a resaltar del diseño: Siguiendo las pautas mencionadas en la Sección 2, así como las características descritas al inicio del capítulo, a continuación se describen algunos de los puntos principales del diseño mostrado en la figura 3.2.

- **a)** Los motores se colocaron lo más cerca al cuerpo principal, lo cual reduce la inercia y por tanto, aumenta la velocidad de la pierna.
- **b)** La distribución de masa de los componentes se realizó colocando el CDG al centro del eje imaginario que se forma entre el servomotor de la cadera y la chumacera, por lo que el peso de los motores y el de las piernas está equilibrado y es soportado en su mayoría por esta chumacera.
- **c)** Se colocaron potenciómetros a modo de encoders absolutos, estos permiten una lectura entre 0 y 270° y además funcionan como eje de soporte secundario para la pierna en los puntos de rotación.
- **d)** Se diseñaron resortes para almacenar energía de forma pasiva durante la fase de vuelo, esto a su vez reduce los efectos de las colisiones de aterrizaje y mejora el agarre evitando deslizamientos [33]. Estos resortes permiten aportar torque durante la fase de carga, ver Figura 2.1, a costa de requerir torque durante la fase de vuelo, pero ya que no hay cargas que soportar durante esta fase, resulta conveniente su almacenamiento.

El material utilizado para su fabricación es nailon, el cual al tener una resistencia a la tensión de 57 Mpa , una resistencia a la flexión de 57 Mpa y tener un punto de ruptura por elongación al 190% , nos permite tener un resorte útil para varias sesiones de prueba.

- e) La almohadilla se fabricó en TPU flexible para aumentar el agarre y reducir el impacto durante la locomoción, también se diseñó de forma modular para intercambiar rápidamente entre almohadillas según sea necesario durante los experimentos.
- f) Este tren de engranes se encarga de la transmisión de potencia entre el motor que sirve de eje principal de la pierna y la rodilla, su relación es de 1:1 y fueron fabricados con Nailon debido a su baja fricción y resistencia a los impactos de 12 KJ/m^2 . Esto se aprecia mejor en la Figura 3.3, en la cual se observa el tren de engranes encargado de transmitir el par desde el eje de giro del muslo a la rodilla y el papel del potenciómetro como eje secundario de la rodilla.

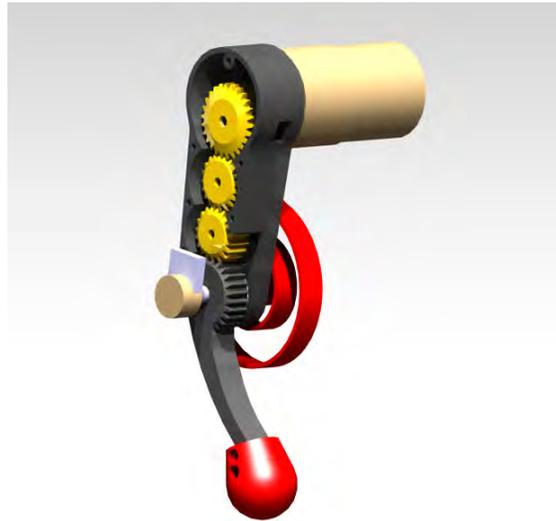


Figura 3.3: Vista aislada del diseño CAD del muslo y rodilla.

- g) Este servomotor se encarga de los movimientos de la cadera. Cuenta con un torque de 12 Kg/cm y una velocidad de $0,18 \text{ seg}/60^\circ$
- h) Estos engranes se encargan de la transmisión de potencia entre el motor superior y

la pierna. Ya que en este punto se ejerce el mayor par por la distancia entre el punto de contacto con el suelo y tener una mayor superficie de contacto, se optó por engranes helicoidales, estos al igual que los engranes rectos se fabricaron en Nailon. En la Figura 3.4 es fácil observar que el motor de la rodilla sirve a su vez como eje de giro de la pierna, lo que reduce la inercia y mantiene la mayoría de la masa al centro del eje imaginario que atraviesa la chumacera hasta el servomotor.

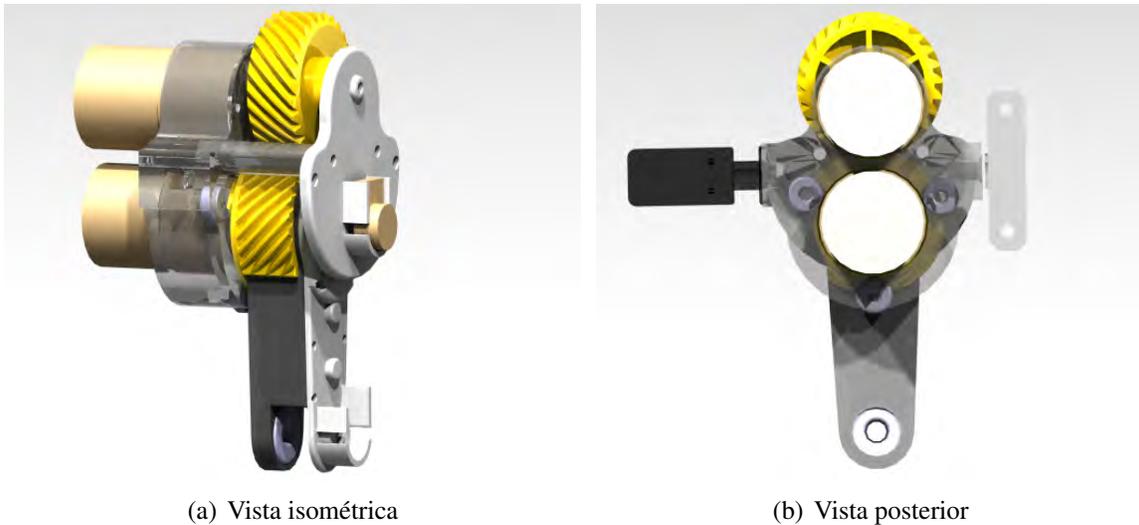


Figura 3.4: Disposición del los componentes de la cadera.

- Estructura: Es necesario contar con piernas de baja inercia, por lo que se diseñaron con el menor peso posible, reduciendo el material en la medida que las propiedades del mismo lo permitieran. En este caso se utilizó PLA, el cual es ligero y cuenta con una resistencia a la tensión de 60 Mpa y una resistencia a la flexión de 87 Mpa , lo que mantiene estable la estructura general.
- Disposición de los elementos: Los componentes fueron colocados de tal manera que permitieran el mayor rango de movimientos posible a la pierna, permitiendo una rotación de 170° en la rodilla, 190° en la pierna y 140° en la cadera.

Como se puede apreciar en la Figura 3.2, los componentes se acoplaron de la mejor manera posible, otorgándole a los mismos, en la medida de lo posible, más de una función. Aprove-

chando sus características para aportar rigidez a la estructura de la pierna, se optimizaron las dimensiones y densidades de los componentes impresos en 3D para reducir el peso, así como las dimensiones tanto del muslo como del pie para asegurar que se aprovechara al máximo el torque aportado por los motores.

3.2. Diseño cuerpo principal

Para el diseño del cuerpo principal se buscó mantener un bajo peso, así como dar rigidez a la cadera para evitar el balanceo, mantener un diseño modular y poder trabajar con distintas configuraciones de piernas para escoger la mejor para este robot.

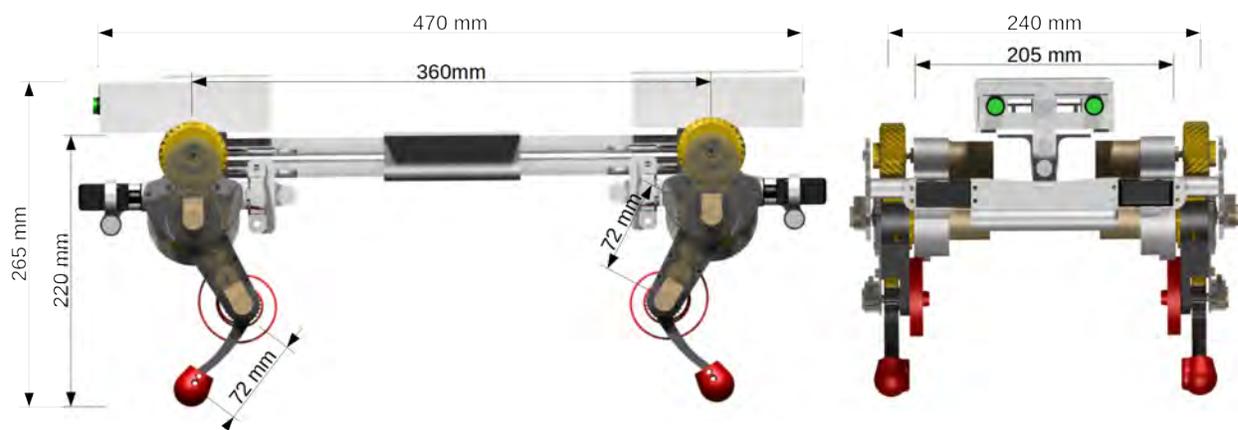
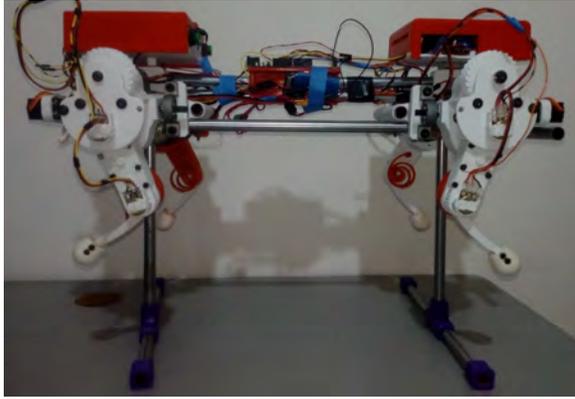


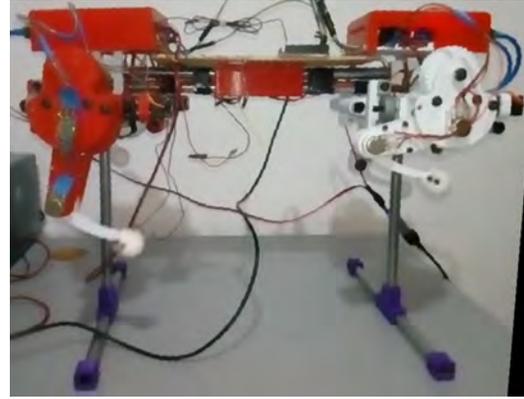
Figura 3.5: Dimensiones finales del robot.

Características a resaltar del diseño: El cuerpo principal se fabricó de PLA y se colocaron tubos de acero de 13mm de diámetro para dar rigidez. Al igual que la pierna, este se diseñó de forma modular, de tal forma que las partes delantera y trasera son intercambiables e invertibles, lo que permite trabajar con 2 tipos de configuración, ver Figura 3.6, de las piernas para realizar pruebas y decidir la mejor opción ya que son pocos los trabajos que tratan las ventajas de las diferentes configuraciones como en [34], [35] y [36]. De entre las dos configuraciones mostradas, al realizar experimentos de caminata, la más estable para el robot resultó ser la configuración 1.

Otra característica de este diseño es que el largo del tronco es ajustable, permitiendo variar



(a) Configuración 1



(b) Configuración 2

Figura 3.6: Configuración de las piernas.

el largo total del robot desde 370 mm hasta 480 mm para estudiar los efectos de tener el CDG lejos o cerca de las piernas. Las dimensiones finales del robot se muestran en la Figura 3.5. El peso final del robot con la electrónica es de 3.9 Kg, por lo que lo podemos considerar ligero.

Posibles mejoras: El diseño de este robot puede ser mejorado de varias maneras, siendo la principal el cambio de los motores DC utilizados por motores brushless de alto torque, lo cual a su vez mejoraría la velocidad y capacidad de carga del robot, por lo que se podrían implementar materiales más rígidos. Así mismo, otra mejora podría ser el uso de encoders magnéticos absolutos, estos permiten medir el ángulo del eje de la articulación si tener contacto directo, lo que permitirá medir de forma más precisa el ángulo de las articulaciones, además de que estos encoders son pequeños y ligeros.

3.3. Hardware completo

Como ya se ha mencionado, el objetivo de este robot es buscar algoritmos basados en inteligencia artificial que le permitan un control óptimo en entornos irregulares. Por eso se ha optado por tener dos formas de interactuar con este, siendo la primera a través de una computadora, en este caso usando Matlab, para probar las marchas y ajustar parámetros, y la segunda utilizando un mando con el cual mover el robot para probar dichas marchas y configuraciones. El encargado de generar las trayectorias o acciones a ejecutar será Matlab o

el controlador central (Arduino Mega), el cual le indicará a cada controlador secundario cuál es la posición requerida para cada extremidad, y serán estos los que se encargarán de mover las articulaciones de cada pierna para realizar el seguimiento de la trayectoria. Ver la Figura 3.7.

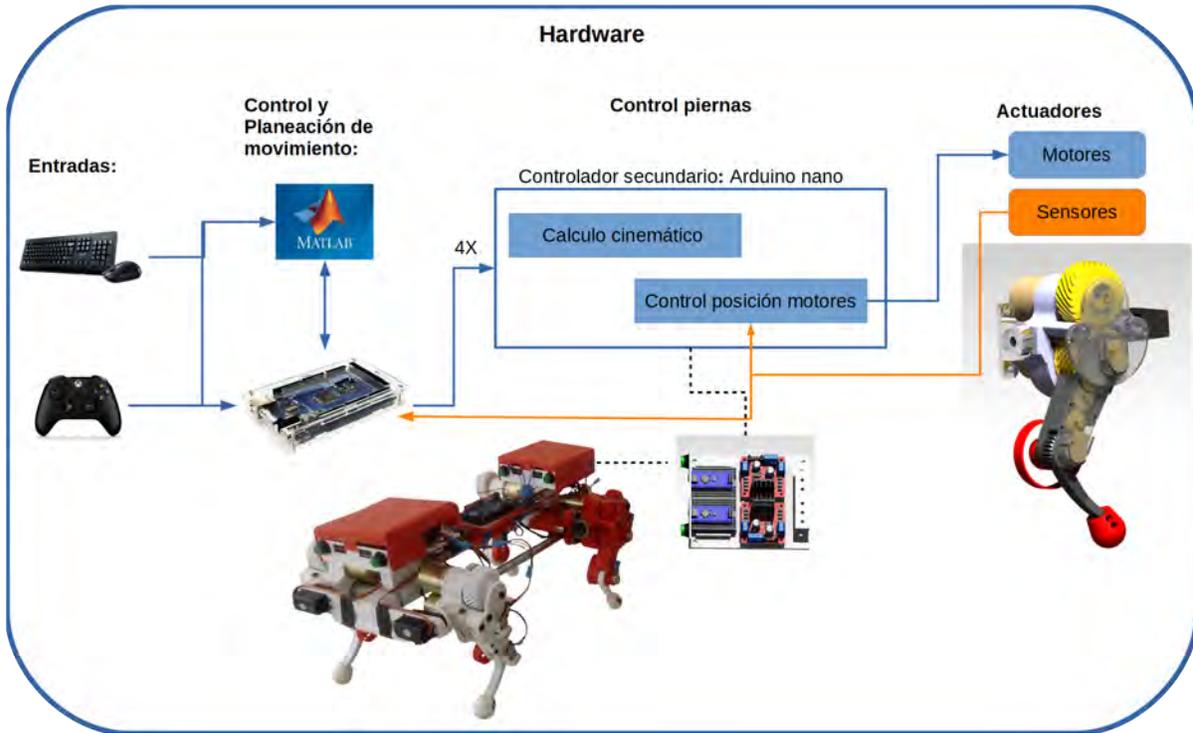


Figura 3.7: Diagrama completo del hardware.

Modelado y Control

El control del robot está dividido en 2 partes: a) La generación de las trayectorias y acciones generales del robot, siendo estas las marchas y posiciones estáticas, así como la corrección de la postura de cada una de las piernas. b) El control de posición local de cada pierna.

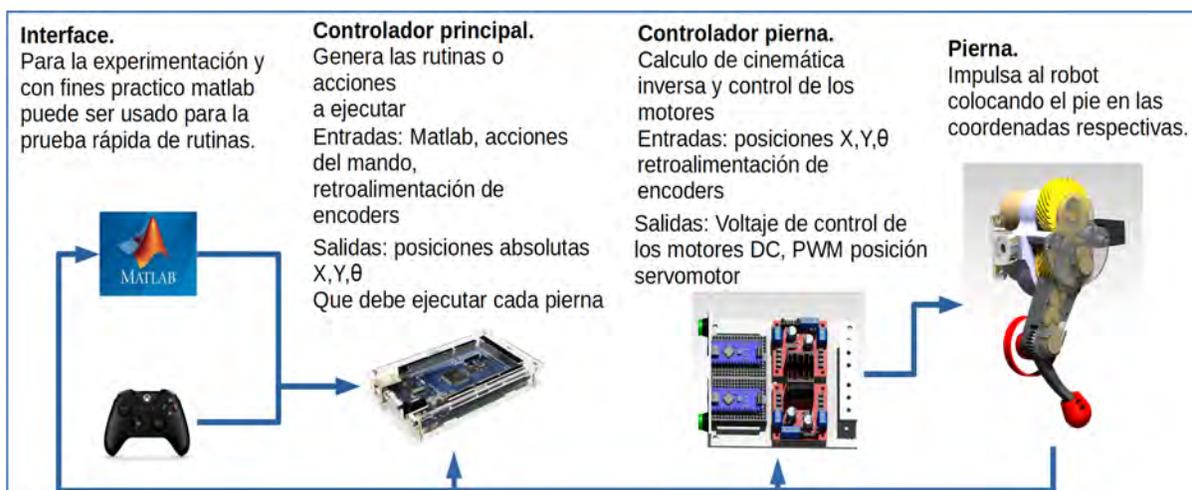


Figura 4.1: Desglose de tareas de los controladores.

Estas tareas se han dividido para reducir la carga del controlador principal, ya que la arquitectura propia de los controladores Atmel no permite la ejecución paralela de estos procesos. Ver el desglose de las tareas en la Figura 4.1.

4.1. Control principal

En esta sección se muestra como se realizan las tareas del controlador principal, el cual a grandes rasgos recibe información del mando y/o Matlab, que le indican tanto la altura como las coordenadas angulares que debe tomar el robot, el inicio de la locomoción y la velocidad de la misma, a partir de esta información calcula las posiciones relativas que debe tomar cada una de las piernas y envía esta información a los controladores secundarios encargados de posicionar las piernas.

4.1.1. Orientación

La orientación general del robot esta definida por las coordenadas angulares o ángulos de Tait-Bryan [37], siendo estos, Cabeceo (yaw), elevación (pitch) y ángulo de alabeo (roll). Ver la Figura 4.2.

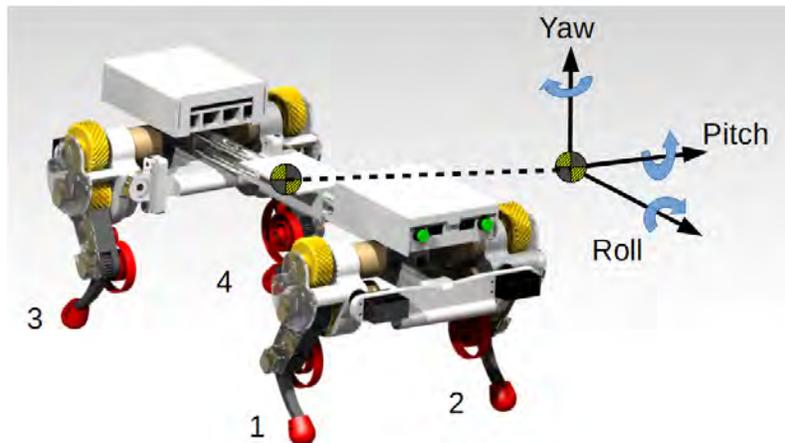


Figura 4.2: Representación de los ángulos de Tait-Bryan

La posición angular del robot esta dada por la interacción de las alturas de cada pierna así como el ángulo de los servomotores de la cadera. El cálculo de la compensación de alturas

necesaria para roll y pitch es relativamente sencillo y están dados por las variables h_2 y h_3 respectivamente. Ver las ecuaciones 4.1, 4.2, y la Figura 4.3:

$$h_2 = b_1 \text{sen} \alpha \tag{4.1}$$

$$h_3 = b_2 \text{sen} \beta \tag{4.2}$$

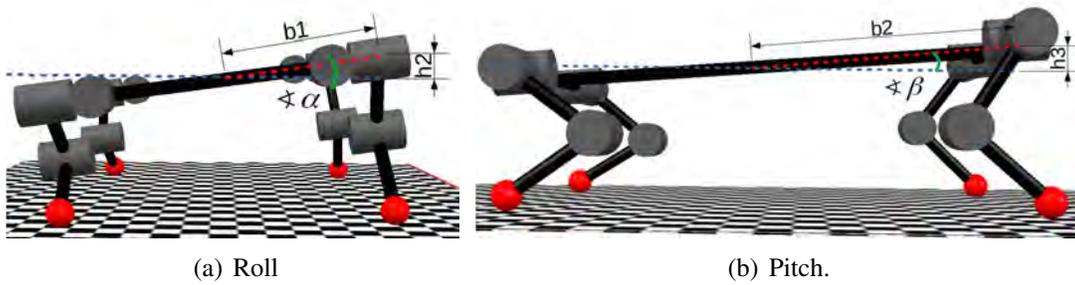


Figura 4.3: Cinemática roll, pitch.

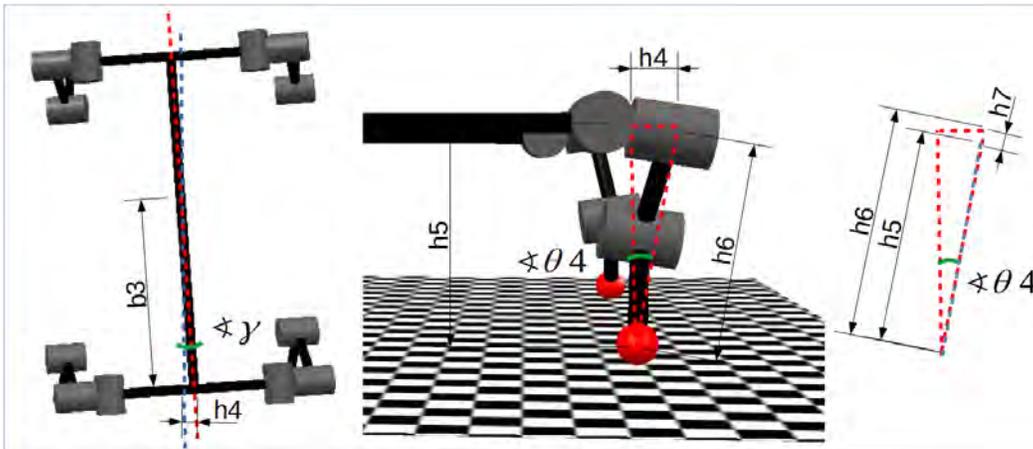


Figura 4.4: Cinemática yaw

Así mismo para yaw Figura 4.4. Se calcula el desplazamiento $h4$, y a partir de este, el ángulo necesario θ_4 y por ultimo la altura de compensación $h7$ que representa la diferencia entre $h6$ y la proyección de $h5$ en $h6$:

$$h4 = b3 \operatorname{sen} \gamma \quad (4.3)$$

$$\theta_4 = \tan^{-1} \frac{h4}{h5} \quad (4.4)$$

$$h6 = \frac{h5}{\cos \theta_4} \quad (4.5)$$

$$h7 = h6 - h5 \quad (4.6)$$

Estas alturas de compensación se suman o restan a la altura del CDG la cual es proporcionada por el mando o matlab, dependiendo de la posición de la pierna, numerada segun lo mostrado en la Figura 4.2. También se compensan los ángulos necesarios. A continuación se muestra una tabla donde se describen las compensaciones en cada pierna.

Tabla 4.1: Tabla de compensaciones de alturas y ángulos.

# Pierna	Compensación altura			Compensación ángulo		
	h2 (Roll)	h3 (Pitch)	h7 (Yaw)	α (Roll)	θ_4 (Yaw)	β (Pitch)
1	+	+	+	+	-	+
2	-	+	+	+	-	+
3	+	-	+	-	+	-
3	-	-	+	-	+	-

4.1.2. Marcha

Como ya se explicó anteriormente el controlador principal también se encarga de la marcha, dada la fase temprana del robot, solo se cuenta con un tipo de marcha, esta corresponde a una caminata, en la que en todo momento hay al menos dos extremidades en contacto con el suelo, esto para mantener la estabilidad del robot, para las pruebas se utilizaron 2 trayectorias distintas para la fase de vuelo, la primera conformada por líneas rectas, ver Figura 4.5, y la segunda describe una parábola, ver Figura 4.5. los parámetros a modificar de estas marchas son dirección (adelante, atrás) velocidad y altura del paso.

El punto azul indica la posición del par de piernas diagonalmente opuestas (1,4) ver Figura:4.2. El punto rojo indica la posición de las piernas (2,3). Como podemos observar en ambas trayectorias la marcha inicia con todas las extremidades colocadas sobre el piso, durante la primera mitad del ciclo son las piernas 1 y 4 las encargadas de impulsar el robot hacia delante, la siguiente mitad del ciclo inicia de igual forma con todas las piernas en contacto con el piso, pero ahora el otro par de extremidades se encargan de impulsar al robot.

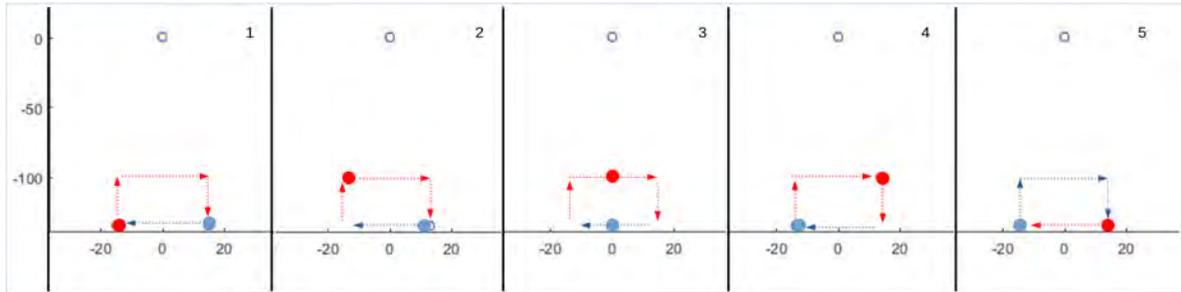


Figura 4.5: Marcha 1

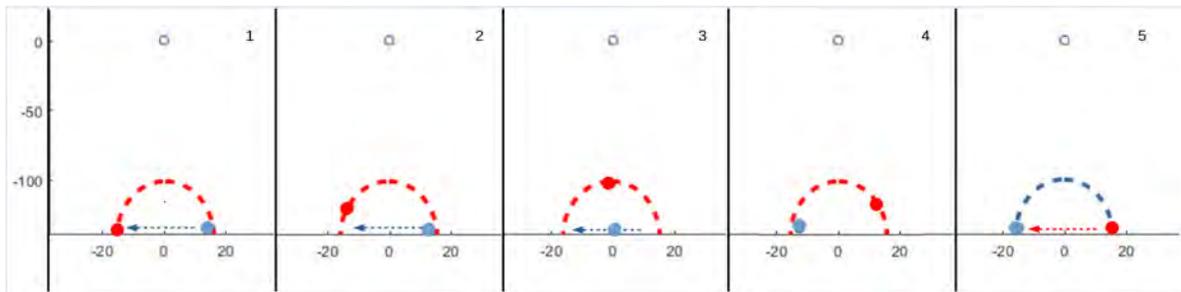


Figura 4.6: Marcha 2

4.2. Control secundario (pierna)

En esta sección se muestra cómo se realiza el control de posición de cada pierna, lo que conlleva el cálculo cinemático de la misma, así como el control de posición de cada articulación.

Se puede dividir el control de la pierna en 2 partes. Según lo mostrado en la Figura 4.1, nuestro controlador secundario recibirá como entrada la posición X, Y, θ , que representan la distancia longitudinal, altura y ángulo en el que debe colocarse el pie respectivamente. Por lo tanto, primero han de ser calculados los ángulos θ_1 y θ_2 de las articulaciones que permitan al pie llegar a esa posición, y en segundo lugar hemos de controlar el voltaje aplicado a cada motor para mantener cada articulación en el ángulo indicado.

4.2.1. Cálculo cinemático

El modelo cinemático describe la relación entre las variables de la articulación de la pierna $(q_1, \dots, q_n)^T$ y la posición y orientación del pie $(x, y, z, r, p, y)^T$. El modelo cinemático de una cadena articulada puede dividirse en dos problemas: la cinemática directa y la inversa. La cinemática directa da la posición y orientación del pie $(x, y, z, r, p, y)^T$ en términos de las variables de la articulación $(\theta_1, \dots, \theta_n)^T$. Por el contrario, el problema inverso da las variables de la articulación en términos de la posición y orientación del pie [38].

4.2.2. Cinemática directa

Existen métodos para el cálculo sistemático de la cinemática, sin embargo, dada la poca complejidad de nuestra pierna al tener solo 3 grados de libertad (GDL), es sencillo utilizar métodos geométricos tradicionales. En este caso se calculan de manera aislada los primeros 2 GDL que representan el movimiento en el plano (X', Y') , donde el eje Y' concuerda con el eje Y . Sobre este eje se presenta el desplazamiento longitudinal. Figura 4.7 a). Así mismo, en 4.7 b) se aprecia la altura aportada al cuerpo principal h , y el desplazamiento transversal T .

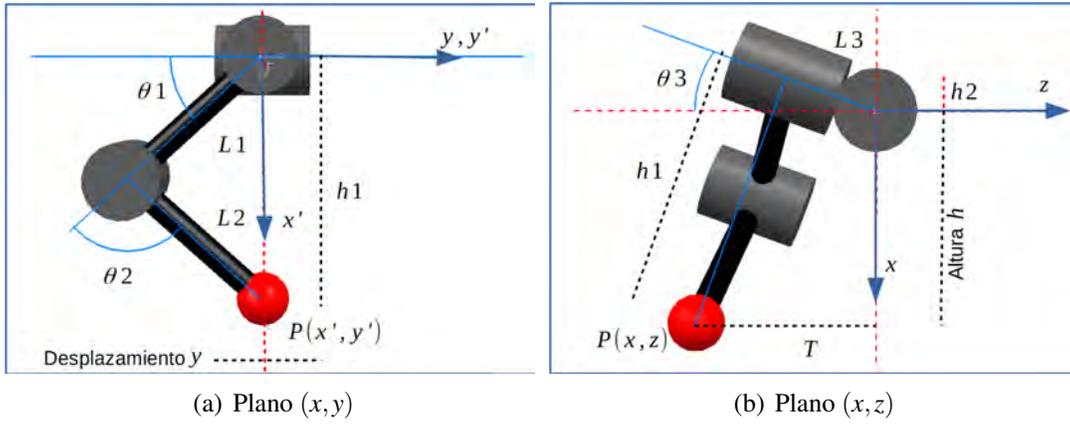


Figura 4.7: Cinemática pierna 3 GDL.

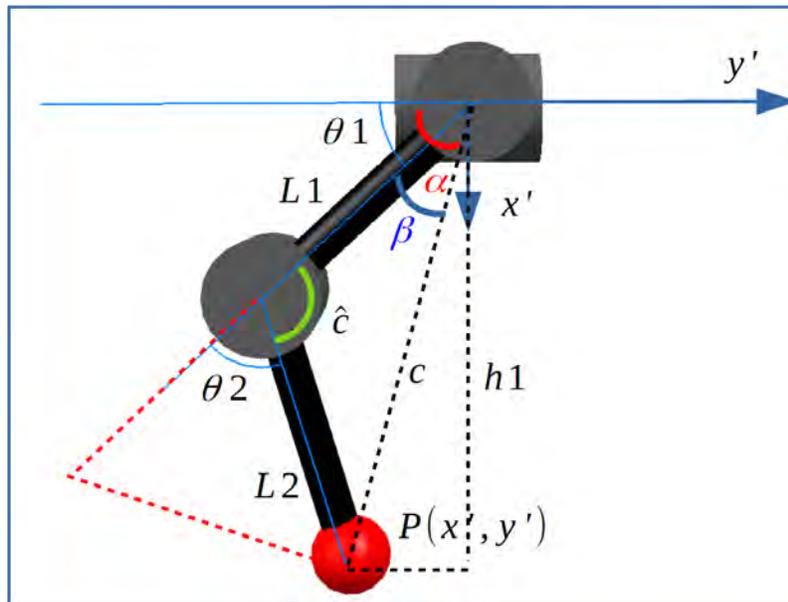


Figura 4.8: Cinemática inversa.

Las ecuaciones que describen la posición del pie son las siguientes:

$$y = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (4.7)$$

$$h1 = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (4.8)$$

$$h = h1 \cos \theta_3 - L3 \sin \theta_3 \quad (4.9)$$

$$T = h1 \sin \theta_3 + L3 \cos \theta_3 \quad (4.10)$$

Donde (h) es la altura con respecto al cuerpo principal, (y) el desplazamiento longitudinal y (T) el desplazamiento transversal.

4.2.3. Cinemática inversa

Como ya se ha mencionado antes, la cinemática inversa nos permite calcular las variables de las articulaciones ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$) en términos de la posición y la orientación del pie, en este caso de la altura (h), el desplazamiento (y) y el ángulo de la cadera θ_3 . Como podemos observar, el cálculo se simplifica aún más, ya que θ_3 es conocida desde un principio. A partir del conocimiento de θ_3 calcularemos $h2$ (Figura 4.7), ya que la altura $h1$ es la proyección de esta, más h . Por lo que:

$$h2 = L3 \sin \theta_3 \quad (4.11)$$

$$h1 = \frac{h + h2}{\cos \theta_3} \quad (4.12)$$

Con lo cual podemos calcular θ_1 y θ_2 . Por el teorema de cosenos tenemos:

$$c^2 = L_1^2 + L_2^2 - 2L_1L_2 \cos(\hat{c}) \quad (4.13)$$

$$c^2 = (Px')^2 + (Py')^2 \quad (4.14)$$

$$\cos(\hat{c}) = \cos(180 - \theta_2) = (\cos(180)\cos(\theta_2)) + (\sin(180)\sin(\theta_2)) \quad (4.15)$$

$$\therefore \cos(\hat{c}) = -\cos \theta_2 \quad (4.16)$$

De las ecuaciones 4.13 a 4.16 podemos reescribir:

$$(Px')^2 + (Py')^2 = L_1^2 + L_2^2 - 2L_1L_2 \cos(\hat{c}) \quad (4.17)$$

$$\therefore \cos\theta_2 = \frac{(Px')^2 + (Py')^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2} \quad (4.18)$$

$$\text{sen}\theta_2 = \pm \sqrt{1 - \cos(\theta_2)^2} \quad (4.19)$$

Por último, para encontrar θ_1 tenemos que:

$$\text{tg}\alpha = \frac{Py'}{Px'} \quad (4.20)$$

$$\text{tg}\beta = \frac{L_2 \text{sen}\theta_2}{L_1 + L_2 \cos\theta_2} \quad (4.21)$$

$$\alpha = \theta_1 + \beta \therefore \theta_1 = \alpha - \beta \quad (4.22)$$

$$\theta_1 = \text{tg}^{-1} \frac{Py'}{Px'} - \text{tg}^{-1} \frac{L_2 \text{sen}\theta_2}{L_1 + L_2 \cos\theta_2} \quad (4.23)$$

4.2.4. Sistema de control de posición con PID (Servomotor)

Una vez calculados los ángulos que deben tener cada una de nuestras articulaciones para en conjunto mover al robot a una posición específica, lo que resta es mover dichas articulaciones hacia el lugar indicado, esto lo logramos con un control de posición o servomecanismo. Se denomina servomotor a los sistemas de control de posición que incorporan un motor DC, un sensor de rotación o encoder y un amplificador de error. Están diseñados específicamente para ser usados en sistemas de control.¹

En la Figura 4.9 se observa un diagrama simplificado del control de posición, donde según el error $e(t)$ entre el ángulo deseado y el real, se obtendrá una señal de control $u(t)$ dada por la ecuación

¹El control se realizó utilizando un PID, este control es muy simple pero satisface las necesidades actuales del proyecto, sin embargo ya se han planteado las bases para el control en espacio de estados del mismo y el modelado mecánico de la articulación, lo cual permitirá el uso de observadores para controlar variables como la velocidad y aceleración de las articulaciones.

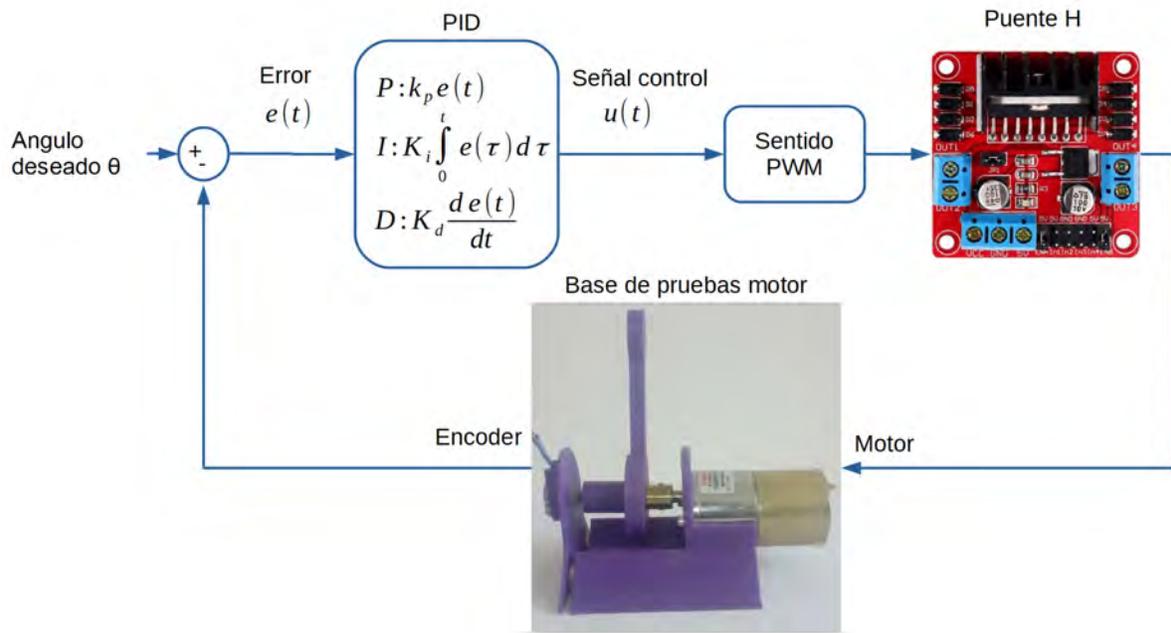


Figura 4.9: Diagrama del control de posición.

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{\tau_i} \int_0^t e(t) dt + K_p \tau_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.24)$$

A partir de esta señal de control se obtiene la señal PWM para el motor, así como su dirección según sea el signo de esta. Como se puede apreciar en la ecuación 4.24, esta depende de 3 constantes K_p , K_i y K_d . Estas constantes definen el comportamiento del control para el seguimiento del ángulo deseado. A continuación se listan los efectos de cada una de las constantes.

- K_p : Constante propia del control proporcional, el cual es el más importante, ya que mueve el motor la mayor parte del recorrido. La constante proporcional relaciona directamente la salida $u(t)$ y el error $e(t)$. Hipotéticamente, si solo se trabajara con el control proporcional suponiendo un $K_p = 25,5$ y nos encontráramos en 0° , si quisiéramos llevarlo a 180° , el valor sería de 255 (valor máximo del PWM) casi todo el recorrido hasta que finalmente llegáramos a 170° . A partir de ese momento el valor del PWM

iría bajando en proporción a la posición en la que se va acercando al punto designado. Si aumentáramos el valor de K_p , haríamos que se acercase un poco más, pero sin llegar al objetivo. Un k_p bajo nos acercaría al punto objetivo pero no llegaría, un K_p alto se pasaría y oscilaría alrededor del objetivo cada vez más lento, mientras que uno muy alto no dejaría de oscilar.

- K_d : Constante del control derivativo, el cual toma en cuenta la velocidad del motor a medida que se acerca al objetivo restándola. Este tipo de control elimina la oscilación ocasionada por K_p y K_i . Un K_d alto produce comportamientos ruidosos u oscilaciones arbitrarias, ya que sobre reacciona a los cambios de la entrada. Por lo mismo, este control es muy sensible ante sensores ruidosos al sobre estimar la señal del mismo. Si K_p es lo suficientemente bajo se reducirán las oscilaciones, sin embargo no llegará aún a la posición objetivo.
- K_i : Constante del control integral. Como ya se dijo, el control proporcional y el derivativo se acercan al objetivo, pero el control integral aumenta poco a poco el valor de $u(t)$ para hacer que el PWM pueda hacer llegar a la articulación al objetivo. Este control es muy sensible. Un valor alto en K_i hará que el eje del motor oscile exageradamente al aumentar demasiado el PWM para llegar al objetivo.

En resumen, el control proporcional se acerca al objetivo, el derivativo ajusta la velocidad y el integral da el último impulso para llegar idóneamente sin pasarse. Además de estos parámetros, otro importante es el tiempo de muestreo, pues este indica al controlador cada cuánto tiempo ha de realizar los cálculos, y entre más pequeño sea este, el tiempo de respuesta mejorará, pero no puede ser más bajo que el tiempo de procesamiento del programa. No actúa sobre el control proporcional, pero sí lo hace sobre los controles integral y derivativo. En la Figura 4.10 se muestra el seguimiento de la posición logrado con este control. Los parámetros utilizados para el PID son $K_p = 8, K_i = 0,001, K_d = 0,5$. Estos valores se determinaron experimentalmente, utilizando la base de pruebas mostrada en la Figura 4.9, se inicio con un valores de $K_p = 1, K_i = 0, K_d = 0,01$ y se aumento K_p hasta una velocidad que no generara oscilación permanente, luego se aumento k_d para reducir el sobre impulso y por ultimo se

aumento K_i para dar el ultimo empuje, repitiendo este proceso hasta encontrar la correcta sintonización, cabe mencionar que estos valores son referencia para todas las articulaciones pero se requirió de un ajuste fino de cada una utilizando el soporte de pruebas de la Figura 5.1. Se puede observar que el seguimiento es estable y el poco ruido generado por el encoder.

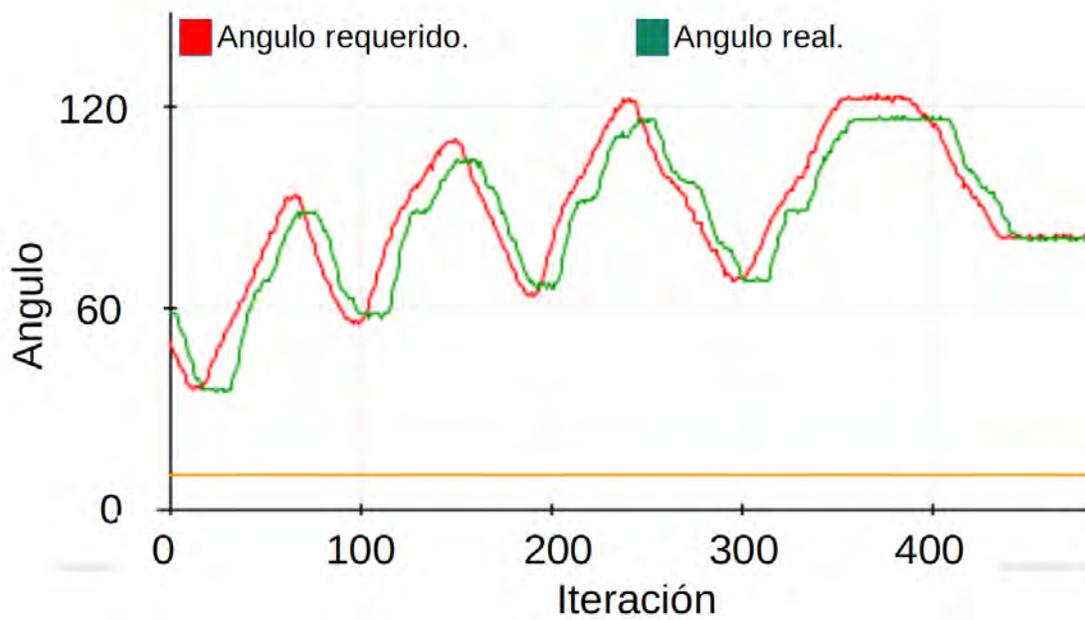


Figura 4.10: Respuesta del control PID.

CAPÍTULO 5

Experimentación

Este capítulo trata sobre las pruebas que se realizaron para asegurar la fiabilidad del sistema así como realizar mejoras a la par que se avanzaba con la fabricación. La experimentación se realizó en tres secciones principales: respuesta de una sola pierna, respuesta general del robot y marcha. cada una de las cuales se tratará en las siguientes secciones.

5.1. Respuesta de una pierna

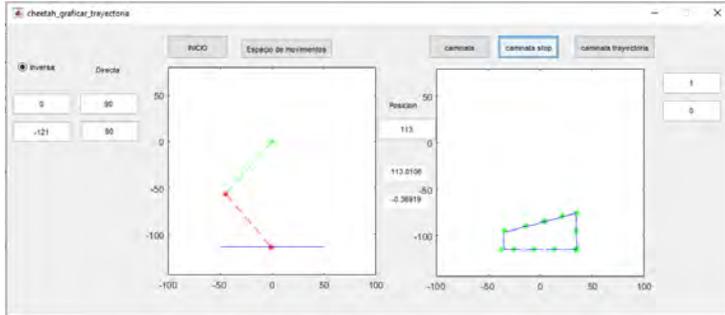
En esta sección se muestran las capacidades de la pierna obtenidas con pruebas realizadas, tanto para ajustar los parámetros como para encontrar sus limitaciones. Para estas pruebas se realizó un soporte y un software de pruebas, los cuales se describen a continuación. Figura 5.1.

EL software de pruebas se realizó en Matlab. Este software nos permite:

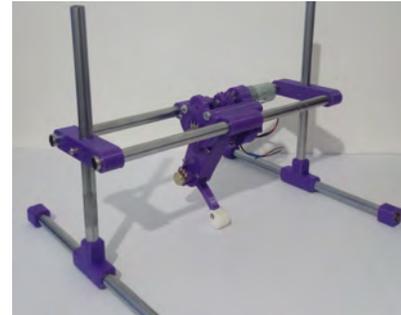
- 1) Realizar un mapa del espacio de movimientos útil de las articulaciones de la pierna.
- 2) Enviar posiciones estáticas para probar la respuesta del control de posición.

- 3) Enviar trayectorias y registrar la posición real del pie para comprobar la respuesta dinámica.

El soporte permite verificar la respuesta de la pierna tanto a acciones estáticas como dinámicas sin carga.



(a) Software para pruebas de la pierna.



(b) Soporte para pruebas.

Figura 5.1: Setup de pruebas.

En la Figura 5.2 a), se observa el espacio de movimientos posibles de la pierna, donde la región verde indica el espacio óptimo para movimiento dinámico. Dentro de esta área, el par generado permite levantar más de 3 *KG* aplicados sobre el CDG de la pierna, además permite un movimiento de desplazamiento de 9 *cm*, lo que es suficiente para la locomoción del robot completo. En la Figura 5.2 b), se observa la respuesta de la pierna a una trayectoria discontinua (Puntos azules) y la trayectoria real descrita por el pie. (Puntos verdes)

En la Figura 5.3 se puede apreciar la respuesta de las articulaciones al ángulo requerido. Como se puede ver, la repuesta es rápida y bastante cercana al ángulo requerido.

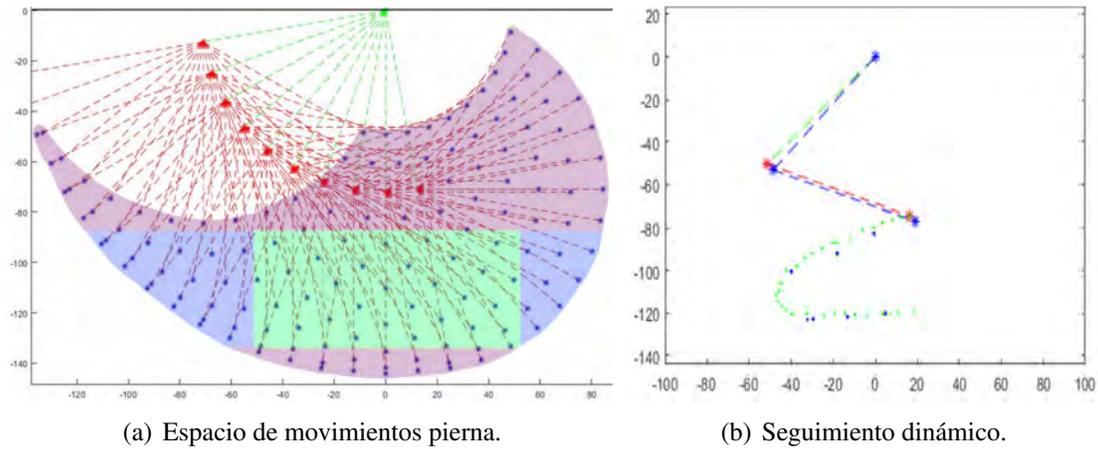


Figura 5.2: Respuesta pierna.

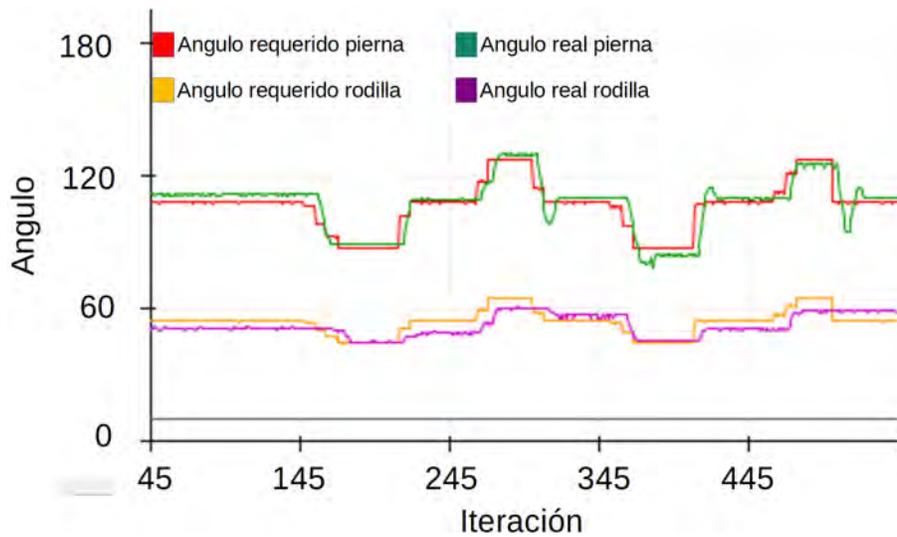


Figura 5.3: Gráfica de la respuesta de los motores ante el seguimiento de posición.

5.2. Respuesta general del robot

En esta sección se muestran las capacidades generales del robot, de acuerdo a las pruebas realizadas, Para esto se realizó un soporte y un software de pruebas, los cuales se describen a continuación. En la Figura 5.4, se muestra el soporte realizado para pruebas sin carga, el cual nos permite realizar la calibración angular de las articulaciones del robot, así como pruebas de seguimiento de trayectoria.

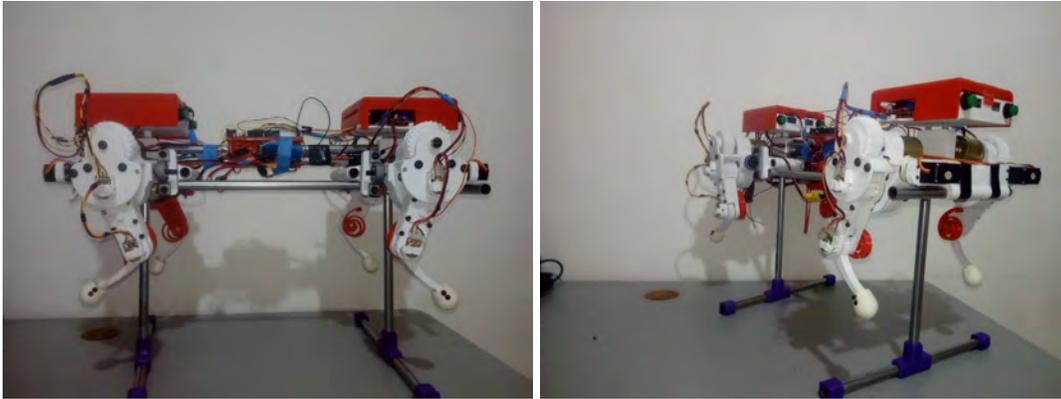


Figura 5.4: Soporte para pruebas sin carga.

5.2.1. Software de pruebas generales.

EL software de pruebas se realizó en Simulink de Matlab. Este software nos permite:

- 1) Recibir información de un mando para interactuar con el robot.
- 2) Según las ordenes recibidas por el mando calcula y envía las posiciones que debe tomar cada pierna.
- 3) Crear trayectorias para probar la respuesta del sistema.

Las ordenes que se pueden recibir a través del mando son la posición angular general del sistema, la altura del CDG, el inicio y fin de la marcha así como su velocidad. como se puede ver en la Figura 5.5, los valores pueden ser absolutos o incrementales esto quiere decir, que el valor por ejemplo de la altura en absoluto tomara el rango de la señal del joystick analógico $[-1, 1]$ como el rango de altura del robot $[50 \text{ mm}, 140 \text{ mm}]$ por lo que al soltar los controles estos volverían a una posición 0, teniendo una altura de 95 mm y 0 en los valores de roll, pitch y yaw. Por otro lado si estamos en modo incremental los valores incrementarían o se reducirían gradualmente en proporción al valor analógico del joystick por lo que al soltar el control los valores tanto de altura como angulares se mantendrán, En este caso para regresar a la posición 0 rápidamente es necesario presionar el joystick. En la Figura 5.5 se observa la configuración del control.

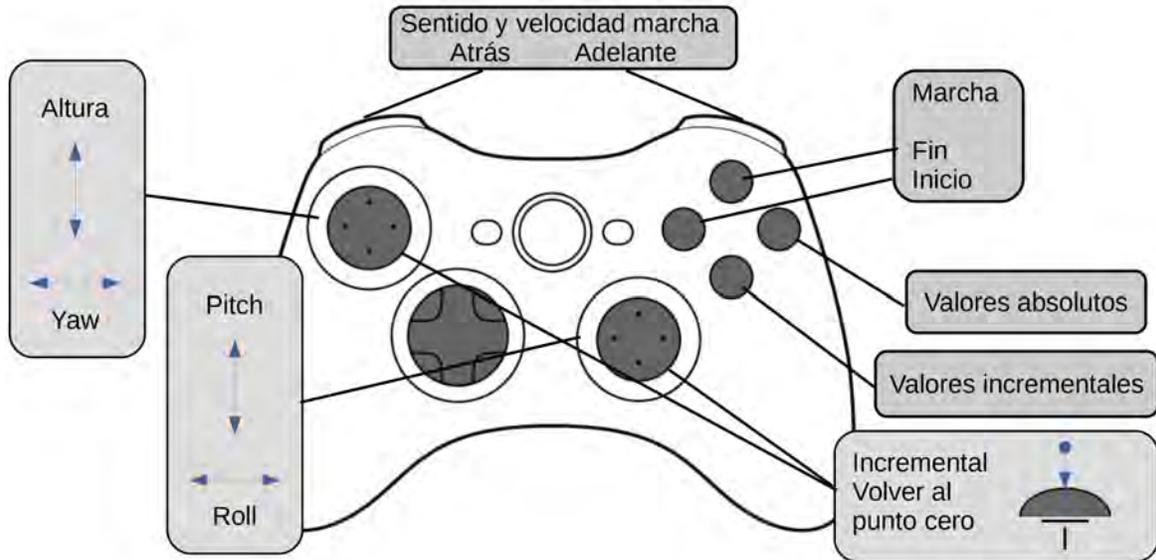


Figura 5.5: Acciones del mando.

La marcha utilizada se muestra en la Sección 4.1.2, utilizando esta marcha se logra una caminata estable.

5.2.2. Configuración piernas

Como se menciona en el Capítulo 3, debido al diseño modular de la cadera del robot Figura 5.6, la configuración de las piernas se puede dar de dos formas. donde la mas estable dada la marcha utilizada fue la configuración 1 mostrada en la Figura 5.7 esto debido a que el CDG se encuentra al centro del cuerpo, esta configuración permite distribuir equitativamente la carga de las piernas así como favorecer el agarre de las piernas al suelo para impulsar el cuerpo. La configuración 2 mostraría una mejor respuesta si el CDG se encontrara desplazado hacia el frente del marco del robot, lo que ocurriría de colocara un actuador como un brazo, o algún actuador pesado para realizar alguna tarea, lo cual requeriría un mayor trabajo de las piernas delanteras que de las traseras.

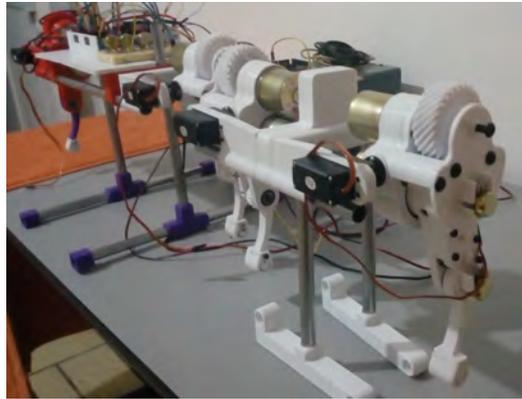
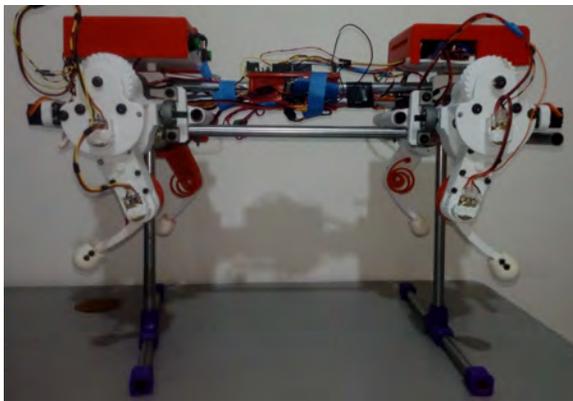
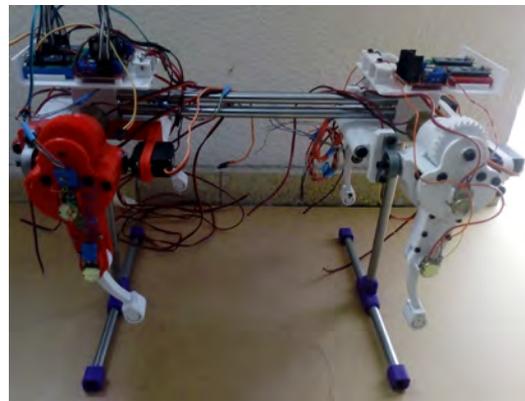


Figura 5.6: Cadera modular



(a) Configuración 1.

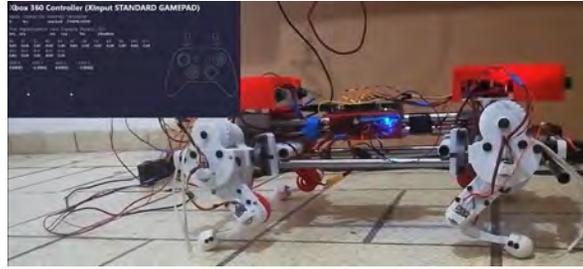


(b) Configuración 2.

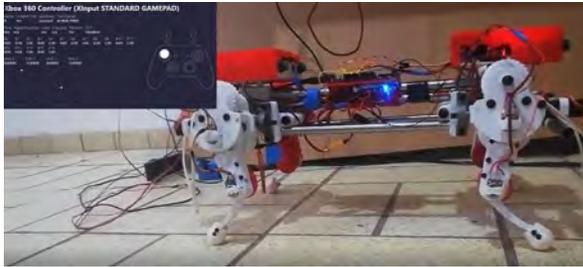
Figura 5.7: Configuración de las piernas.

5.2.3. Movimientos robot

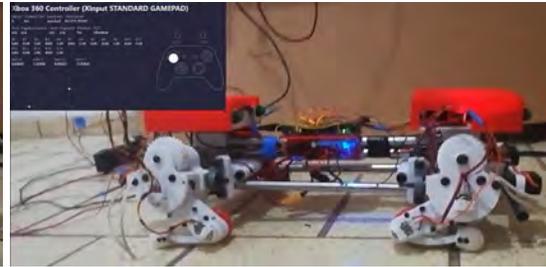
A continuación se muestran algunas imágenes del robot realizando diferentes acciones en respuesta a las ordenes del mando. En la Figura 5.8 se pueden observar la respuesta del robot al requerirle diferentes alturas, en la parte superior izquierda de cada imagen se muestra la orden dada por el mando. La Figura 5.9 muestra las acciones angulares (yaw, roll y yaw)



(a) Altura 95 mm .



(b) Altura 120 mm.



(c) Altura 50 mm.

Figura 5.8: Se muestra el robot manteniendo diferentes alturas.



(a) Pitch.

(b) Roll.



(c) yaw.

Figura 5.9: Se muestra el robot manteniendo diferentes ángulos.

Las imágenes de la Figura 5.11, muestran una secuencia de caminata del robot teniendo como entrada la trayectoria mostrada en la Figura 5.10 a) y como respuesta de una de las

piernas la señal mostrada en la Figura 5.10 b). En esta gráfica se observa el seguimiento de la trayectoria.

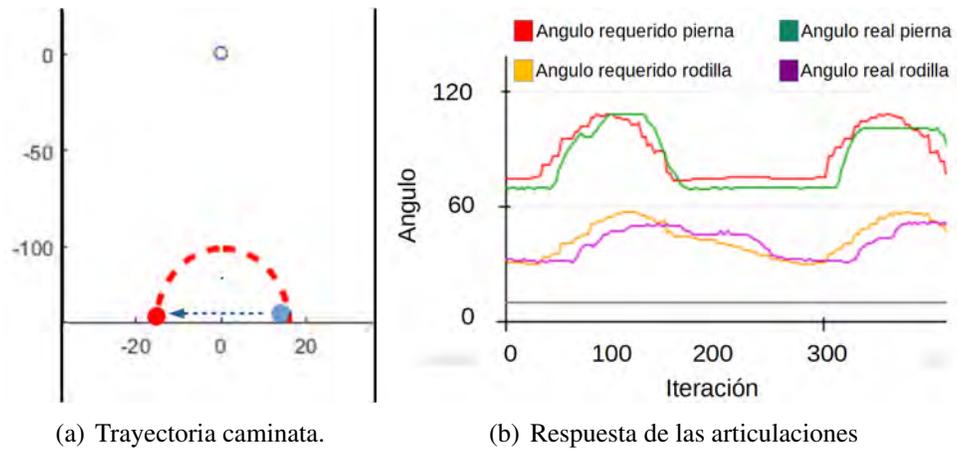


Figura 5.10: Trayectoria y respuesta de la caminata.

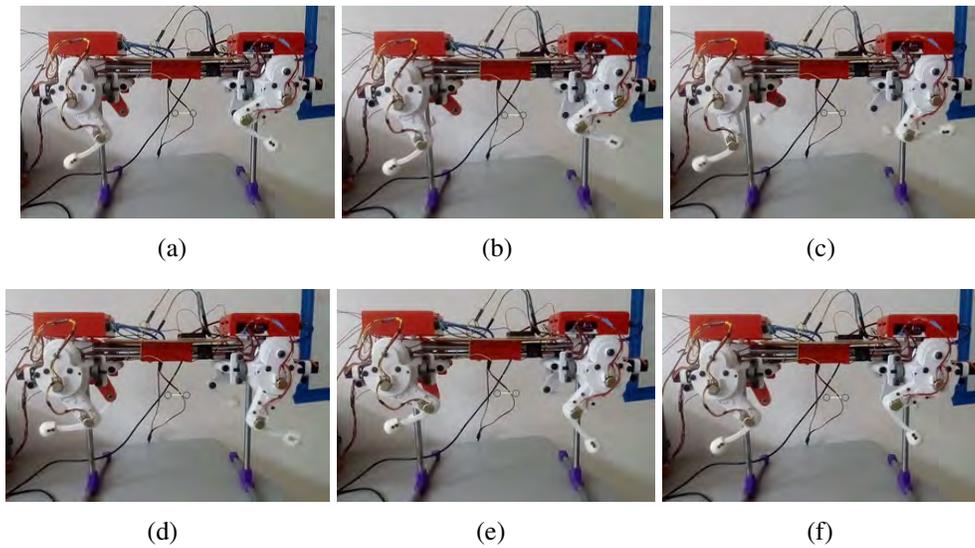


Figura 5.11: Secuencia de la caminata en la base de pruebas.

CAPÍTULO 6

Conclusiones

Esta tesis parte de la necesidad de desarrollar una plataforma que permita la investigación de la IA aplicada a la marcha robots cuadrúpedos, por lo que, se diseño y fabrico un robot versátil, ligero que permite realizar mejoras de forma modular, con el cual se darán los primeros pasos dentro de esta área. Este robot tiene un peso, sin batería de 3,9 *KG* puede levantar un peso extra de 1 *kg* en vertical, las articulaciones de las piernas tienen una velocidad limite de 95°/seg. Cada pierna puede realizar un amplio rango de movimientos mostrados en la Figura 5.2 inciso a), la articulación de la cadera puede moverse desde -45 a 90 grados. En general el robot puede tomar ángulos en yaw de $\pm 10^\circ$, roll de $\pm 30^\circ$ y pitch de $\pm 15^\circ$.

CAPÍTULO 7

Trabajo futuro

El robot fabricado es el resultado del primer acercamiento a este tipo de robots, por lo que hay varias mejoras y aditamentos que desarrollar para mejorar el prototipo, entre los cuales se pueden nombrar:

Mejoras mecánicas: Entre las mejoras mecánicas la mas importante es el cambio de los motores utilizados por motores brushless de alto torque, esto mejorara en gran medida las capacidades del robot. Así mismo experimentar con una transmisión por poleas para la articulación de la rodilla. y por ultimo fabricar algunas de las partes en materiales mas resistentes como aluminio o fibra de carbono para aumentar la rigidez del robot.

Mejoras control secundario: Como primer acercamiento el control de posición de las articulaciones se realizo con un control PID, este control respondió de satisfactoriamente para esta fase del prototipo, sin embargo presenta limitaciones en cuanto a las variables que se pueden controlar por lo que se pretende implementar un control de posición en espacio de estados con lo que al usar observadores se podrá controlar además de la posición el torque y la velocidad de la articulación, como el mostrado en [39].

Aditamentos: para mejorar la interacción del robot con el entorno se diseñaran y fabri-

caran diferentes sensores de contacto con el suelo, esto para permitir al robot interactuar de mejor manera con el entorno y poder así modificar la respuesta del sistema en función de esta, por ejemplo modificando la altura de los pasos según lo requiera el entorno. Experimentar con el uso de una cadera flexible, lo que podría otorga una mayor flexibilidad y capacidad de movimiento así como esto aumentar la eficiencia energética del sistema como se muestra en Dongliang et al. (2017) [40] y Gerrit A. et al. (2012) [41].

Bibliografía

- [1] P. Gonzalez, “Quadrupedal locomotion,” 2006.
- [2] M. Raibert, K. Blankespoor, G. Nelson, and R. Playter, “Bigdog, the rough-terrain quadruped robot,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 41, no. 2, pp. 10 822–10 825, 2008.
- [3] C. Semini, N. G. Tsagarakis, E. Guglielmino, M. Focchi, F. Cannella, and D. G. Caldwell, “Design of hyq—a hydraulically and electrically actuated quadruped robot,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, vol. 225, no. 6, pp. 831–849, 2011.
- [4] M. P. Murphy, A. Saunders, C. Moreira, A. A. Rizzi, and M. Raibert, “The littledog robot,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 30, no. 2, pp. 145–149, 2011.
- [5] H.-W. Park, M. Y. Chuah, and S. Kim, “Quadruped bounding control with variable duty cycle via vertical impulse scaling,” in *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, 2014, pp. 3245–3252.
- [6] F. Grimminger, A. Meduri, M. Khadiv, J. Viereck, M. Wüthrich, M. Naveau, V. Berenz, S. Heim, F. Widmaier, T. Flayols *et al.*, “An open torque-controlled modular robot

architecture for legged locomotion research,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 2, pp. 3650–3657, 2020.

- [7] BostonDynamics. (2020). [Online]. Available: <https://www.bostondynamics.com/spot>
- [8] B. Katz, J. Di Carlo, and S. Kim, “Mini cheetah: A platform for pushing the limits of dynamic quadruped control,” in *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2019, pp. 6295–6301.
- [9] W. Su, B. Li, L. Yuan, H. Zhang, H. Tan, and X. Xi, “Strategy and experiment of attitude control for quadruped mobile platform walking on three-dimensional slope used for agriculture,” *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, vol. 34, no. 4, pp. 80–91, 2018.
- [10] F. Zhang, Y. Wang, S. Teng, L. Zheng, J. Wang, and Z. Chen, “Development of agricultural bionic four-legged robot: Effect of head movement adjustment on the stability of goats,” *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol. 12, no. 4, pp. 10–15, 2019.
- [11] R. Mosher, “Test and evaluation of a walking truck,” in *Cornell Aeronautical Lab/ISTVS Off-road Mobility Research Symposium, Washington DC*, 1968.
- [12] G. Bledt, M. J. Powell, B. Katz, J. Di Carlo, P. M. Wensing, and S. Kim, “Mit cheetah 3: Design and control of a robust, dynamic quadruped robot,” in *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, 2018, pp. 2245–2252.
- [13] J. Hooks, M. S. Ahn, J. Yu, X. Zhang, T. Zhu, H. Chae, D. Hong, A. Kheddar, and C. Semini, “Alphred: A multi-modal operations quadruped robot for package delivery applications,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020.
- [14] M. Hutter, C. Gehring, A. Lauber, F. Gunther, C. D. Bellicoso, V. Tsounis, P. Fankhauser, R. Diethelm, S. Bachmann, M. Blösch *et al.*, “Anymal-toward legged robots for harsh environments,” *Advanced Robotics*, vol. 31, no. 17, pp. 918–931, 2017.

- [15] S. Seok, A. Wang, M. Y. Chuah, D. J. Hyun, J. Lee, D. M. Otten, J. H. Lang, and S. Kim, “Design principles for energy-efficient legged locomotion and implementation on the mit cheetah robot,” *Ieee/asme transactions on mechatronics*, vol. 20, no. 3, pp. 1117–1129, 2014.
- [16] M. Yoong, Y. Gan, G. Gan, C. Leong, Z. Phuan, B. Cheah, and K. Chew, “Studies of regenerative braking in electric vehicle,” in *2010 IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology*. IEEE, 2010, pp. 40–45.
- [17] A. Ruina, J. E. Bertram, and M. Srinivasan, “A collisional model of the energetic cost of support work qualitatively explains leg sequencing in walking and galloping, pseudo-elastic leg behavior in running and the walk-to-run transition,” *Journal of theoretical biology*, vol. 237, no. 2, pp. 170–192, 2005.
- [18] M. E. Dohring, E. Lee, and W. S. Newman, “A load-dependent transmission friction model: theory and experiments,” in *[1993] Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 1993, pp. 430–436.
- [19] K. Yang, Y. Li, L. Zhou, and X. Rong, “Energy efficient foot trajectory of trot motion for hydraulic quadruped robot,” *Energies*, vol. 12, no. 13, p. 2514, 2019.
- [20] T. Li, L. Zhou, Y. Li, H. Chai, and K. Yang, “An energy efficient motion controller based on slcp for the electrically actuated quadruped robot,” *Journal of Bionic Engineering*, vol. 17, pp. 290–302, 2020.
- [21] I. Shmue and R. Riemer, “Energetically optimal gait transition velocities of a quadruped robot,” in *2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*. IEEE, 2013, pp. 2747–2752.
- [22] S. Kim and P. M. Wensing, “Design of dynamic legged robots,” *Foundations and Trends in Robotics*, vol. 5, no. 2, pp. 117–190, 2017.

- [23] M. Hutter, C. Gehring, M. Bloesch, M. A. Hoepflinger, C. D. Remy, and R. Siegwart, “Starleth: A compliant quadrupedal robot for fast, efficient, and versatile locomotion,” in *Adaptive Mobile Robotics*. World Scientific, 2012, pp. 483–490.
- [24] X. Rong, Y. Li, J. Ruan, and B. Li, “Design and simulation for a hydraulic actuated quadruped robot,” *Journal of mechanical science and technology*, vol. 26, no. 4, pp. 1171–1177, 2012.
- [25] Y. Gao, V. Barasuol, D. G. Caldwell, and C. Semini, “Study on the morphological parameters of quadruped robot designs considering ditch traversability,” in *2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*. IEEE, 2016, pp. 283–288.
- [26] R. B. McGhee and A. A. Frank, “On the stability properties of quadruped creeping gaits,” *Mathematical Biosciences*, vol. 3, pp. 331–351, 1968.
- [27] M. H. Raibert, *Legged robots that balance*. MIT press, 1986.
- [28] H. C. Wong and D. E. Orin, “Dynamic control of a quadruped standing jump,” in *[1993] Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 1993, pp. 346–351.
- [29] M. Vukobratovic and D. Juricic, “Contribution to the synthesis of biped gait,” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, no. 1, pp. 1–6, 1969.
- [30] B. Tymrak, M. Kreiger, and J. M. Pearce, “Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-d printers under realistic environmental conditions,” *Materials & Design*, vol. 58, pp. 242–246, 2014.
- [31] S. Aslanzadeh, H. Saghlatoon, M. M. Honari, R. Mirzavand, C. Montemagno, and P. Mousavi, “Investigation on electrical and mechanical properties of 3d printed nylon 6 for rf/microwave electronics applications,” *Additive Manufacturing*, vol. 21, pp. 69–75, 2018.

- [32] R. Bahr, T. Le, M. M. Tentzeris, S. Moscato, M. Pasian, M. Bozzi, and L. Perregrini, “Rf characterization of 3d printed flexible materials-ninjaflex filaments,” in *2015 European Microwave Conference (EuMC)*. IEEE, 2015, pp. 742–745.
- [33] R. Alexander *et al.*, “Three uses for springs in legged locomotion,” *International Journal of Robotics Research*, vol. 9, no. 2, pp. 53–61, 1990.
- [34] H. Witte, R. Hackert, K. E. Lilje, N. Schilling, D. Voges, G. Klauer, W. Ilg, J. Albiez, A. Seyfarth, D. Germann *et al.*, “Transfer of biological principles into the construction of quadruped walking machines,” in *Proceedings of the Second International Workshop on Robot Motion and Control. RoMoCo’01 (IEEE Cat. No. 01EX535)*. IEEE, 2001, pp. 245–249.
- [35] T. Yue, K. Sun, C. Guo, and H. Liu, “Design and analysis of quadruped robot leg with variable configuration,” in *2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*. IEEE, 2018, pp. 904–909.
- [36] X. Zhang, H. Zheng, G. Xu, Z. Cheng, and L. Zhao, “A biological inspired quadruped robot: structure and control,” in *2005 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics-ROBIO*. IEEE, 2005, pp. 387–392.
- [37] G. Wu and H. Shen, “Kinematic geometry of the pnp robots,” in *Parallel PnP Robots*. Springer, pp. 17–56.
- [38] S. K. Saha, *Introduction to robotics*. Tata McGraw-Hill Education, 2014.
- [39] J. Ferrándiz Brotons, “Control digital en el espacio de estados de un prototipo de motor de corriente continua con arduino due,” Ph.D. dissertation, 2016.
- [40] D. Chen, N. Li, H. Wang, and L. Chen, “Effect of flexible spine motion on energy efficiency in quadruped running,” *Journal of Bionic Engineering*, vol. 14, no. 4, pp. 716–725, 2017.

- [41] G. A. Folkertsma, S. Kim, and S. Stramigioli, “Parallel stiffness in a bounding quadruped with flexible spine,” in *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, 2012, pp. 2210–2215.