

Diseño CAD y simulación SITL (Software-in-the-Loop) de un robot cuadrúpedo para pruebas de concepto y control de movimiento

CAD Design and SITL (Software-in-the-Loop) Simulation of a Quadruped Robot for Concept Testing and Motion Control

Hugo A. Moreno¹, Luis M. Valentin-Coronado², and Gerardo Flores³

¹Laboratorio de Percepción y Robótica (LAPyR), Centro de Investigaciones en Óptica, A.C., León, Guanajuato, 37150 México.

²Centro de Investigaciones en Óptica, A.C., Aguascalientes 20200, México, y Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología, México City 03940, México.

³Texas A&M International University, Laredo, TX 78041, Estados Unidos.
hugoamj@gmail.com¹, luismvc@cio.mx², gerardo.flores@tamiu.edu³

Resumen

Actualmente, existe un creciente interés en el uso de robots cuadrúpedos en aplicaciones industriales, agrícolas y recreativas, debido a las ventajas que ofrecen sobre otros tipos de vehículos. Su patrón de movimiento inspirado en los mamíferos, les proporciona mayor adaptabilidad y flexibilidad en terrenos complejos. Sin embargo, las plataformas abiertas disponibles para impulsar investigaciones en este campo son escasas. En este trabajo se presentan los avances en el diseño, simulación y control de un robot cuadrúpedo, cuyo objetivo es servir como una plataforma accesible que promueva la experimentación y el desarrollo de este tipo de vehículos. A lo largo del artículo, se describe el diseño CAD del robot, la simulación de sus mecanismos utilizando motores de físicas y la simulación *Software-in-the-Loop* (SITL). Como resultado del diseño y la simulación, se obtuvo un prototipo de un robot cuadrúpedo versátil de fácil fabricación y bajo costo, adecuado para su uso como plataforma de investigación en el desarrollo de robots cuadrúpedos.

Palabras clave: Robot cuadrúpedo, Robot con patas, Simulación robótica, Diseño asistido, Cinemática.

1. Introducción

En las últimas décadas, los robots cuadrúpedos han sido ampliamente estudiados, logrando notables avances en su capacidad para realizar diversas tareas. Esto se debe, en gran parte, a su adaptabilidad para moverse en diferentes tipos de terreno, aprovechando su estabilidad (Raibert, 2008; Wang et al., 2016; Xu et al., 2022) y su menor complejidad cinemática y mecánica en comparación con robots de seis u ocho patas (Tian et al., 2016; L. Zhang et al., 2019). Además, su patrón de movimiento, inspirado en mamíferos cuadrúpedos, les permite desplazarse por terrenos irregulares y espacios peligrosos o de difícil acceso, sin requerir grandes superficies de apoyo o zonas planas, otorgándoles ventajas sobre los vehículos con ruedas y orugas (De Santos et al., 2006).

Considerando que algunas tareas como la inspección, la búsqueda y rescate o simplemente la navegación deben ejecutarse en zonas remotas, como bosques, o entornos peligrosos, como zonas industriales, en donde es difícil conocer con certeza las condiciones del terreno o realizar reparaciones, el uso de robots cuadrúpedos y su versatilidad se vuelve relevante. Sin embargo, a pesar de las ventajas que aportan, la investigación dirigida al desarrollo de robots cuadrúpedos es limitada, ya que en estos entornos el robot requiere un mayor control del equilibrio, lo que demanda sistemas mecánicos y de control más complejos. Por ejemplo, en los trabajos de Su y F. Zhang (Su et al., 2018; F. Zhang et al., 2019) se exploran, con detalle, las ventajas y estrategias de marcha para su uso dentro del ámbito agrícola.

Entre los robots cuadrúpedos con mayor desarrollo se destacan: SPOT (BostonDynamics, 2020), diseñado y desarrollado por Boston Dynamics para uso industrial y comercial en actividades de vigilancia, resguardo y extracción de elementos; el Mini Cheetah (Katz et al., 2019) del Biomimetic Robotics Lab del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), un robot robusto destinado a permitir un rápido desarrollo de los sistemas de control para robots cuadrúpedos; y el ANYmal (Hutter et al., 2017), un robot diseñado para operar

en entornos difíciles, construido de forma modular para un mantenimiento sencillo y enfocando en la capacidad de movimiento dinámico.

1.1 Contribución

En este trabajo se presentan las fases inicial e intermedia del desarrollo de un robot cuadrúpedo de bajo costo, diseñado como una plataforma de investigación orientada al estudio de la morfología y el control de este tipo de robots. Las etapas abordadas incluyen el diseño CAD (*Computer-Aided Design*), la simulación físicamente realista y la simulación SITL (*Software-in-the-Loop*). La figura 1 muestra la representación gráfica de estas etapas. El propósito de estas fases es realizar pruebas de concepto morfológicas e implementar controles de movimiento básicos para facilitar la posterior fabricación del robot. Las herramientas computacionales empleadas permiten agilizar el proceso de prototipado y desarrollo. Además, las simulaciones realizadas permiten optimizar los costos de fabricación al prever errores mediante modelos físicamente realistas, y reducir los riesgos operativos al probar los controles en un entorno SITL antes de su implementación en el prototipo físico. El enfoque de este proyecto también es aplicable al desarrollo de otros vehículos. Por ejemplo, Flores presenta un dron con control basado en flaps (Flores et al., 2023), donde las herramientas de simulación son clave para validar conceptos. Lo que demuestra la versatilidad de estas tecnologías, ya que su uso facilita el diseño de plataformas móviles complejas y eficientes.

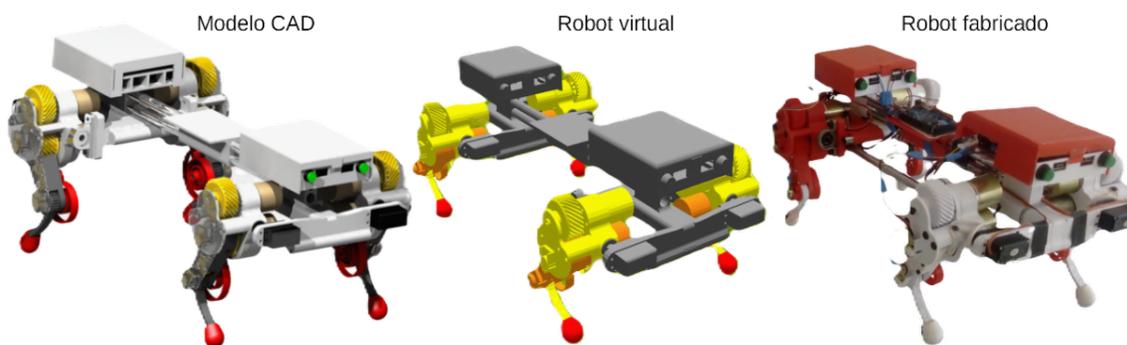


Figura 1. Render del modelo CAD, Robot virtual y robot cuadrúpedo fabricado.
Fuente: Autoría propia

2. Metodología Propuesta

La metodología implementada para el desarrollo de este proyecto se muestra en la Figura 2.

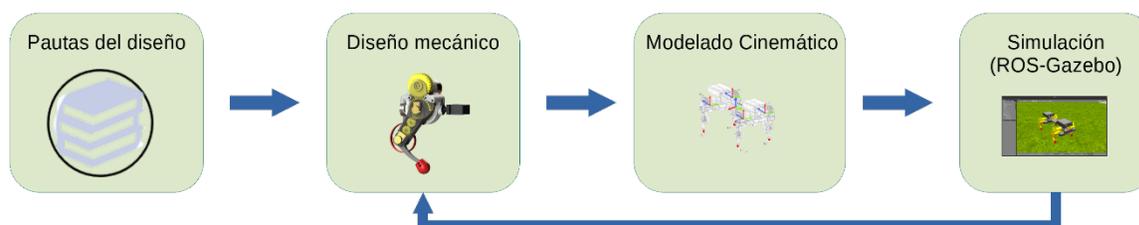


Figura 2. Diagrama de la Metodología propuesta.
Fuente: Autoría propia

Esta metodología se divide en cuatro etapas fundamentales:

1. **Selección de las pautas de diseño:** En esta fase se definen los criterios y requerimientos principales que guiarán el desarrollo del robot. Estos incluyen aspectos como la funcionalidad, el entorno operativo, las restricciones mecánicas y los materiales a utilizar, con el fin de asegurar la viabilidad del proyecto.

2. **Diseño mecánico (CAD):** Se realiza el diseño del robot utilizando herramientas de diseño asistido por computadora (CAD). Esta etapa permite visualizar la estructura y los componentes del robot, garantizando que cumplan con los requisitos definidos previamente y que su ensamblaje sea eficiente.
3. **Modelado cinemático:** En esta fase se desarrolla un modelo cinemático del robot para estudiar los movimientos posibles de las articulaciones y el comportamiento general del sistema. Esto permite establecer relaciones entre las variables de entrada y salida, facilitando la creación de algoritmos de control para lograr un desplazamiento eficiente.
4. **Simulación realista en entorno virtual:** Se implementa una simulación con físicas “realistas” del robot en un entorno virtual, permitiendo evaluar su rendimiento y realizar pruebas sin riesgos. Esta fase incluye la simulación SITL, que ayuda a verificar los controles desarrollados y optimizar el diseño antes de la fabricación física.

Cada una de estas etapas es crítica para el éxito del proyecto, ya que su correcta ejecución determina la calidad del desarrollo en las fases posteriores. Además, la integración progresiva de los resultados obtenidos en cada etapa garantizará una correcta implementación del robot.

2.1 Pautas del diseño

Para el desarrollo de este robot cuadrúpedo se buscó cumplir con características inspiradas en robots vanguardistas en esta área, como el SPOT (BostonDynamics, 2020), el Mini Cheetah (Katz et al., 2019) y el ANYmal (Hutter et al., 2017). Estos robots tienen una morfología de 12 articulaciones, 3 por cada pierna, configuradas de forma similar. Dada la estabilidad estática y dinámica que han demostrado, representan un excelente punto de partida para este proyecto.

Además, se tomaron en cuenta los principios de eficiencia energética propuestos en “*Design Principles for Energy-Efficient*” (Seok et al., 2015), los cuales son:

- **Alta densidad de par del motor:** Motores con torque elevado.
- **Regeneración de energía:** Capacidad de recuperar parte de la energía durante el movimiento.
- **Transmisión mecánica de baja impedancia:** Reducción de la resistencia en los sistemas de transmisión para aumentar la eficiencia.
- **Piernas de baja inercia:** Diseño ligero en partes móviles para minimizar la inercia, mejorando el control y reduciendo el consumo energético.

Asimismo, se priorizaron otras características esenciales para facilitar la fabricación y el desarrollo:

- **Diseño compatible con impresión 3D:** Componentes fáciles de producir mediante impresión 3D aditiva o Modelado por Deposición Fundida (FDM).
- **Uso de materiales ligeros, económicos y de fácil adquisición:** Para reducir los costos y simplificar la producción.
- **Amplio rango de movimientos:** Para maximizar la flexibilidad y adaptabilidad del robot en diversas tareas.
- **Estabilidad y modularidad:** Componentes modulares que permitan una fácil mejora, reparación y personalización, facilitando la experimentación e investigación continua.

Estas pautas buscan garantizar que el robot cuadrúpedo sea eficiente, funcional, accesible y adaptable a múltiples aplicaciones, permitiendo el desarrollo en este campo. robot.

2.2 Diseño mecánico

Para satisfacer las características deseadas en términos de funcionalidad, eficiencia y bajo costo, se seleccionaron materiales y componentes adecuados tanto para la estructura del robot como para su futura fabricación. Los materiales propuestos incluyen polímeros imprimibles en 3D (FMD), como PLA, ABS, TPS y Nailon. Para las estructura que requieran mayor rigidez se utilizará perfiles de aluminio, motores reductores DC xc37gb de 30 RPM y 12Kg/cm de torque, y servomotores MG995.



2.2.1 Diseño de la pierna

El diseño de la pierna es un elemento crucial para asegurar el rendimiento y buen funcionamiento de un cuadrúpedo, ya que concentra la mayor complejidad tanto en su diseño como en su control. La configuración de la pierna se inspiró en la morfología del SPOT y Mini Cheetah, reconocidos por su excelente estabilidad tanto estática como dinámica, además de ofrecer un amplio rango de movimientos. Cada pierna cuenta con tres articulaciones rotacionales. La Figura 3 muestra el modelo 3D de la pierna.

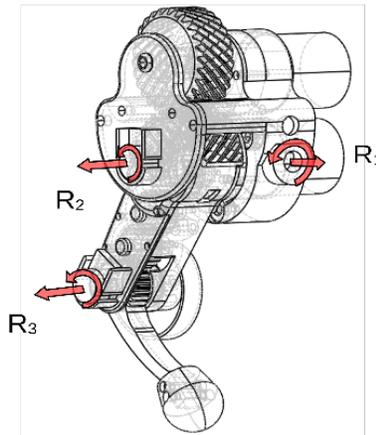


Figura 3. Cadena cinemática de la pierna del robot cuadrúpedo (Ilustración realizada en software CAD).
Fuente: Autoría propia

Características del diseño:

- a) **Motores agrupados en el tronco:** Los motores se agruparon y soportaron en el cuerpo principal del robot, reduciendo la inercia durante la marcha.
- b) **Centro de gravedad optimizado:** El centro de gravedad (CDG) de cada pierna se posicionó cerca del eje imaginario entre el servomotor de la cadera y la chumacera, asegurando que el peso de los motores y las piernas esté equilibrado, siendo soportado principalmente por la chumacera.
- c) **Encoders absolutos:** Se utilizaron potenciómetros como encoders absolutos, permitiendo lecturas entre 0° y 270° . Estos potenciómetros también funcionan como ejes de soporte secundarios en los puntos de rotación de la pierna.
- d) **Resorte de nailon:** Un resorte de nailon se incorporó para el almacenamiento pasivo de energía, ayudando a reducir los efectos de las colisiones durante la marcha.
- e) **Almohadillas de TPU:** Se añadieron almohadillas de TPU flexible en las patas para aumentar el agarre y reducir el impacto durante la locomoción.
- f) **Tren de engranajes de nailon:** Se utilizó un tren de engranajes con una relación de transmisión 1:1 entre el motor y la rodilla, ofreciendo baja fricción y alta resistencia a impactos (12 KJ/m^2).
- g) **Servomotor para la cadera:** El servomotor utilizado para los movimientos de la cadera proporciona un torque de 12 Kg/cm y una velocidad de 0.18 s/60° .
- h) **Engranajes helicoidales:** Se emplearon engranajes helicoidales para la transmisión de potencia entre el motor superior y la pierna, debido a que este punto experimenta el mayor par. Los engranajes, fabricados en nailon al igual que los rectos, reducen la inercia y mantienen la masa centrada en el eje que conecta la chumacera con el servomotor.
- i) **Estructura de baja inercia:** Las piernas se diseñaron con el menor peso posible, utilizando PLA, un material ligero con una resistencia a la tracción de 60 MPa y una resistencia a la flexión de 87 MPa , lo que garantiza la estabilidad estructural.
- j) **Optimización del rango de movimiento:** Los componentes se colocaron estratégicamente para maximizar el rango de movimiento de la pierna, permitiendo una rotación de 170° en la rodilla, 190° en la pierna y 140° en la cadera.

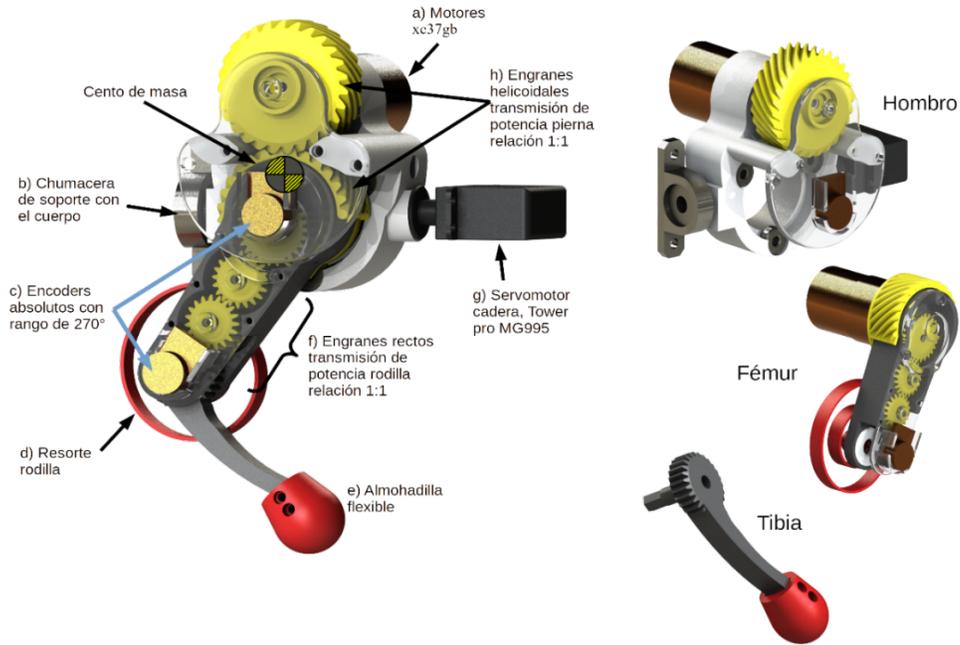


Figura 4. Descripción gráfica de las diferentes partes que componen la pierna.
 Fuente: Autoría propia

Como se puede apreciar en la Figura 4, los componentes se configuraron con más de una función, aprovechando sus características para aportar rigidez a la estructura de la pierna, se optimizaron las dimensiones y densidades de los componentes utilizando el análisis de desplazamiento y factor de seguridad (FoD) para cada uno de los componentes (ver figura 5) asegurando un FoD mínimo de 1.5 para una fuerza aplicada de 3kgf en la almohadilla ya que se considera un peso total del cuadrúpedo de 2.5 Kg. Asimismo se redujo el peso y las longitudes de la tibia y fémur para reducir la inercia generada durante el movimiento y aprovechar el torque aportado por los motores.

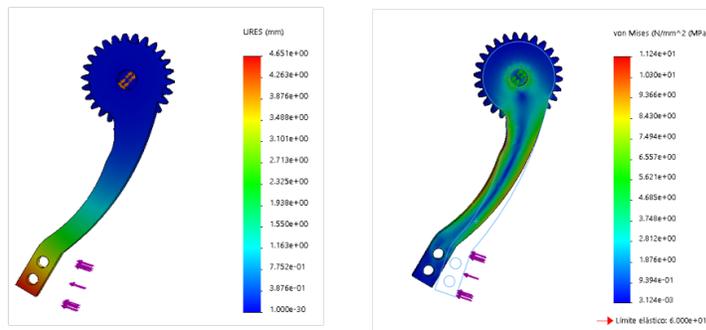


Figura 5. Análisis de estrés Von Mises y análisis de desplazamiento realizados en SOLIDWORKS.
 Fuente: Autoría propia

2.2.2 Diseño del cuerpo

El diseño del cuerpo principal, mostrado en la Figura 6, se realizó con un enfoque que busca mantener un peso reducido y proporcionar la rigidez necesaria en la cadera para minimizar el balanceo. Además, se optó por un diseño modular que permite probar distintas configuraciones de piernas, facilitando la selección de la opción más adecuada para este robot.



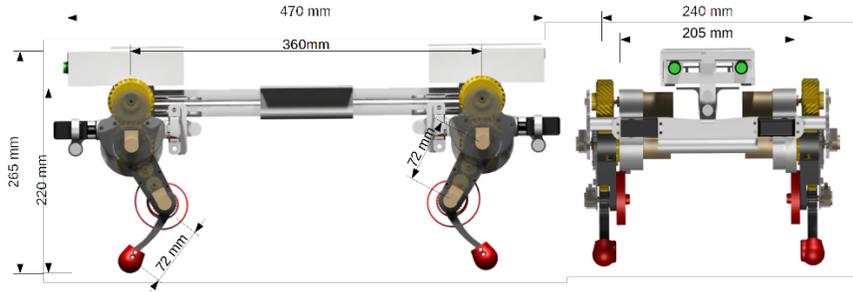


Figura 6. Render del Cuerpo completo del robot y sus dimensiones.
 Fuente: Autoría propia

El cuerpo principal se fabricó con PLA, y se añadieron tubos de aluminio de 12.7 mm de diámetro para proporcionar mayor rigidez. El diseño modular permite que las partes delantera y trasera sean intercambiables e invertibles.

2.3 Modelado de la cinemática inversa

El objetivo de la cinemática inversa es encontrar los valores que debe tomar cada una de las articulaciones del robot para que cada pata se coloque en la posición deseada con respecto al marco de referencia del robot (O_B). Así mismo, la combinación de estas posiciones permitirá rotar o trasladar este marco de referencia O_B a la posición deseada.

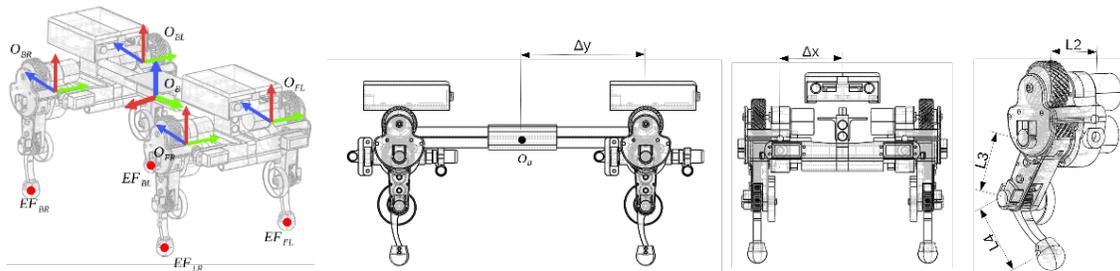


Figura 7. Localización gráfica de los marcos de referencia y dimensiones necesarias para el cálculo de la cinemática inversa
 Fuente: Autoría propia

El marco de referencia del robot ($O_B = (X_B, Y_B, Z_B)$) tiene su origen en el centro geométrico del torso. Y_B apunta hacia el frente del vehículo, X_B a la derecha y Z_B hacia arriba. A su vez, los marcos de referencia de cada una de las piernas tienen origen en la intersección entre el eje de giro de los motores de la pierna y la cadera ($O_P = (X_P, Y_P, Z_P)$) (ver Figura 7). Las variables de entrada para el cálculo de la cinemática inversa son: $(X_d, Y_d, Z_d, R_d, P_d, Y_d)$, donde (X_d, Y_d, Z_d) representan la traslación y (R_d, P_d, Y_d) representan la rotación deseada del cuerpo principal con respecto a la posición inicial y la posición de los cuatro efectores finales con respecto a O_B .

$$\begin{aligned}
 EF_{FR} &= [xt, yt, zt] \\
 EF_{FL} &= [xt, yt, zt] \\
 EF_{BR} &= [xt, yt, zt] \\
 EF_{BL} &= [xt, yt, zt]
 \end{aligned} \tag{1}$$

Definición de la matriz de transformación general:



$$Mrot = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(R_d) & -\sin(R_d) \\ 0 & \sin(R_d) & \cos(R_d) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(P_d) & 0 & \cos(P_d) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(P_d) & 0 & \sin(P_d) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(Y_d) & -\sin(Y_d) & 0 \\ \sin(Y_d) & \cos(Y_d) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$Mtrans = \begin{bmatrix} | & & | & dx \\ | & Mrot & | & dy \\ | & & | & dz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Donde (R_d, P_d, Y_d) son los ángulos de roll, pitch y yaw deseados, y (X_d, Y_d, Z_d) son los desplazamientos deseados del cuerpo. Finalmente, se calculan las matrices de transformación específicas para cada una de las patas del robot:

$$\begin{aligned} MTOFL &= Mtrans \cdot Mt[\Delta x, \Delta y, 0, \pi/2, -\pi/2, 0] \\ MTOFR &= Mtrans \cdot Mt[\Delta x, -\Delta y, 0, \pi/2, -\pi/2, 0] \\ MTOBL &= Mtrans \cdot Mt[-\Delta x, \Delta y, 0, \pi/2, -\pi/2, 0] \\ MTOBR &= Mtrans \cdot Mt[-\Delta x, -\Delta y, 0, \pi/2, -\pi/2, 0] \end{aligned} \quad (4)$$

Donde Mt es la matriz de transformación homogénea desde O_B hasta la posición del marco de referencia específico de cada pierna. $\Delta x, \Delta y$ son las distancias lineales desde O_B hasta cada marco de referencia O_n .

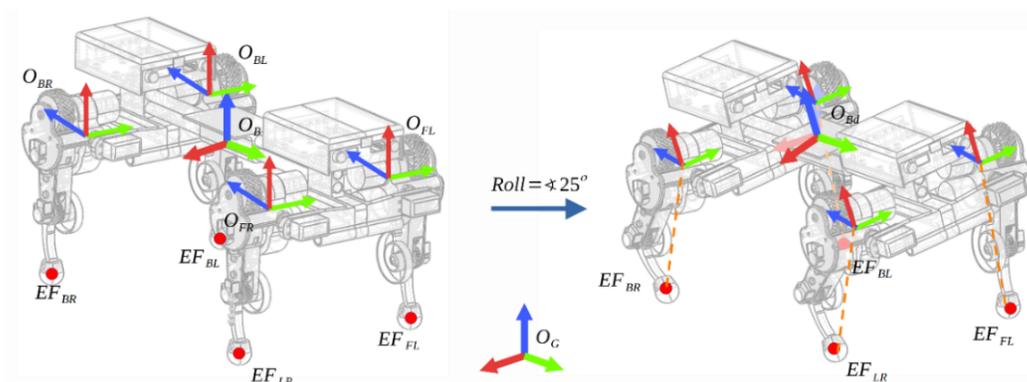


Figura 8. Localización gráfica de los marcos de referencia desde la posición deseada tras una rotación de 25° en roll y posición de los efectores finales con respecto a cada marco de referencia de su respectiva pata.
Fuente: Autoría propia

2.3.1 Cálculo de posición de los efectores finales con respecto al marco de referencia transformado

Al multiplicar la matriz de transformación específica por el vector de posiciones $[x, y, z, 1]$, se obtiene el vector $[x_t, y_t, z_t, 1]$, donde la "t" denota que son coordenadas transformadas al nuevo marco de referencia. En este caso, se utiliza la inversa de la matriz de transformación, ya que se espera que la posición del efector final no cambie con respecto a la posición del marco de referencia de la base O_B .

$$MTO_{FL}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} xO_B \\ yO_B \\ zO_B \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} xO_{FL} \\ yO_{FL} \\ zO_{FL} \\ 1 \end{bmatrix} \tag{5}$$

Donde $(xO_{FL}, yO_{FL}, zO_{FL})$ representa la posición del efector final de esa pierna EF_{FL} , con respecto a su marco de referencia O_{FL} . Tras esto, se calcula la cinemática inversa de la pierna para encontrar la posición angular de cada articulación, donde $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ son los ángulos que deben tomar las articulaciones R_1, R_2, R_3 de cada pierna, respectivamente.

$$Pos_{FL} = [xO_{FL}, yO_{FL}, zO_{FL}]$$

$$F = \sqrt{xO_{FL}^2 + yO_{FL}^2 + L2^2}$$

$$H = \sqrt{F^2 + zO_{FL}^2}$$

$$\theta_1 = \arctan(yO_{FL}/xO_{FL}) + \arctan(F/(L2)) \tag{6}$$

$$D = (H^2 - L3^2 - L4^2)/(2 \cdot L3 \cdot L4)$$

$$\theta_3 = -\arctan(\sqrt{1 - D^2}/D)$$

$$E = \arctan((L4 \cdot \sin(\theta_3))/(L3 + L4 \cdot \cos \theta_3))$$

$$\theta_2 = \arctan(zO_{FL}/F) - E$$

Realizando estas operaciones para cada pierna se obtiene la posición angular de cada una de las articulaciones para colocar el robot cuadrúpedo en la posición deseada. Las longitudes L_2, L_3 y L_4 se muestran en la Figura 7.

2.4 Software

En esta sección se describe brevemente el software desarrollado para la simulación, control de posición, comunicación y arquitectura.

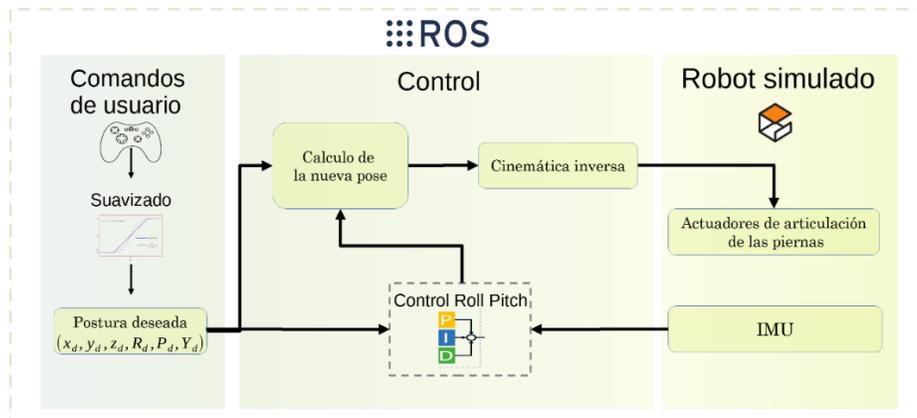


Figura 9. Estructura de los bloques de control integrados en la simulación SITL. Fuente: Autoría propia

El software requerido para el control se desarrolló en el sistema operativo UBUNTU 20.04. La comunicación entre sus diferentes partes se realiza con ROS (Robot Operatig Sistem). El sistema puede dividirse en tres bloques principales: 1) comando de usuario, 2) control de la pose del robot, y 3) simulación del robot. Estos bloques se muestra en el diagrama de la Figura 9.

Con el uso de un mando, se recibe la postura deseada por el usuario, siendo esta $(X_d, Y_d, Z_y, R_d, P_d, Y_d)$, donde (X_d, Y_d, Z_y) representan el desplazamiento lineal del cuerpo desde la posición por defecto (ver Figura 8), y (R_d, P_d, Y_d) representan la orientación deseada del cuerpo. Estas órdenes son suavizadas utilizando una función rampa dependiente del tiempo para evitar movimientos bruscos.

Las órdenes ingresadas por el usuario son procesadas por el sistema de control, donde se calcula la pose deseada en función del comando recibido. A partir de esta información, se aplica la cinemática inversa para determinar la posición específica que debe adoptar cada una de las articulaciones del robot. Esta información es enviada a los motores correspondientes para ejecutar los movimientos planeados. Posteriormente, se implementa un mecanismo de retroalimentación utilizando una Unidad de Medición Inercial (IMU) virtual, la cual proporciona datos en tiempo real sobre la orientación del robot. Estos datos son comparados con la orientación deseada, y la diferencia entre ambas se utiliza para ajustar la pose mediante un control PID (Proporcional, Integral y Derivativo). El control PID permite minimizar el error entre la orientación esperada y la real, garantizando una corrección eficiente en cada ciclo de control (ver Figura 11).

2.4.1 Simulación

Con el objetivo de realizar diferentes pruebas de concepto, revisiones y experimentación preliminar sin necesidad de proceder inmediatamente a la fabricación física, se implementó la simulación en la plataforma Gazebo. Gazebo es un entorno de simulación 3D, que incluye un motor de física, de código abierto que proporciona un conjunto de herramientas avanzadas para la simulación de estructuras mecánicas, sensores, actuadores, cámaras y otros dispositivos. Además, Gazebo permite modelar el comportamiento del robot con una dinámica realista, lo que facilita la evaluación temprana de su desempeño, estabilidad y respuesta ante diversos entornos.

Esta simulación también hace posible una integración con ROS, lo que agiliza el desarrollo de controladores y la comunicación entre diferentes módulos del robot. Además, esta conexión facilita la implementación del enfoque SITL, donde se pueden probar los algoritmos de control en tiempo real dentro de la simulación antes de su transferencia al robot físico.

En resumen, la simulación realista es una herramienta clave para optimizar el proceso de diseño y desarrollo del robot, ya que minimiza los riesgos, reduce los costos de material y acelera el proceso iterativo al permitir ajustes rápidos en el diseño y los algoritmos. Esto garantiza que, al momento de la fabricación física, el modelo ya haya pasado por un proceso exhaustivo de validación y ajuste.

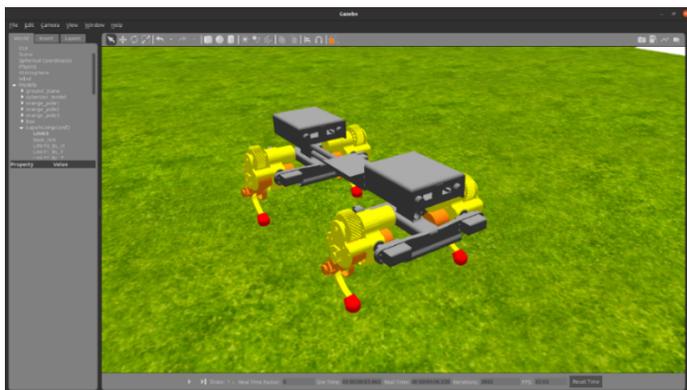


Figura 10. Robot en el entorno de simulación GAZEBO.
Fuente: Autoría propia

El modelo del robot fue creado contemplando las características reales para asegurar la veracidad de su comportamiento en el mundo real. El modelo mecánico toma en cuenta el peso, la densidad y las matrices de inercia reales de los componentes. Los actuadores y sensores también tienen limitaciones de rango, velocidad y torque, al igual que los reales. En la Figura 10 se muestra el robot en el entorno de simulación.

3. Resultados

El diseño propuesto para el robot cuadrúpedo ofrece un amplio rango de movimiento en sus articulaciones, lo que le permite adaptarse eficientemente a diversas condiciones de terreno. La estructura fue diseñada para ser fabricada mediante impresión 3D por FDM (Fabricación por Deposición Fundida), utilizando materiales ligeros y de fácil acceso. Estos materiales fueron sometidos a simulaciones virtuales para verificar su comportamiento frente a las cargas previstas, asegurando la integridad del robot.

Se implementó una cinemática inversa rápida, logrando un tiempo de resolución de 0.009 segundos para calcular la posición angular de las 12 articulaciones. Esto asegura una respuesta rápida y precisa del sistema, permitiendo que el robot ejecute movimientos fluidos en tiempo real. Además, la utilización de ROS como base del sistema de control facilitó la paralelización de los bloques de control (ver Figura 9), logrando una frecuencia de procesamiento de 150 Hz, suficiente para garantizar un desempeño estable y eficiente en tiempo real.

La simulación realista del modelo permitió comprobar la cohesión de los componentes propuestos y realizar ajustes iterativos sin necesidad de fabricar un prototipo físico en cada ciclo de pruebas. Entre las modificaciones realizadas durante su desarrollo se encuentran el largo de las extremidades y del torso, la densidad de las partes, los materiales y la morfología general.

El control de orientación permitió mantener al robot virtual en la orientación requerida a pesar de sufrir perturbaciones leves. Como se muestra en la Figura 11, se aprecia el seguimiento de la orientación en Roll y Pitch de forma estable.

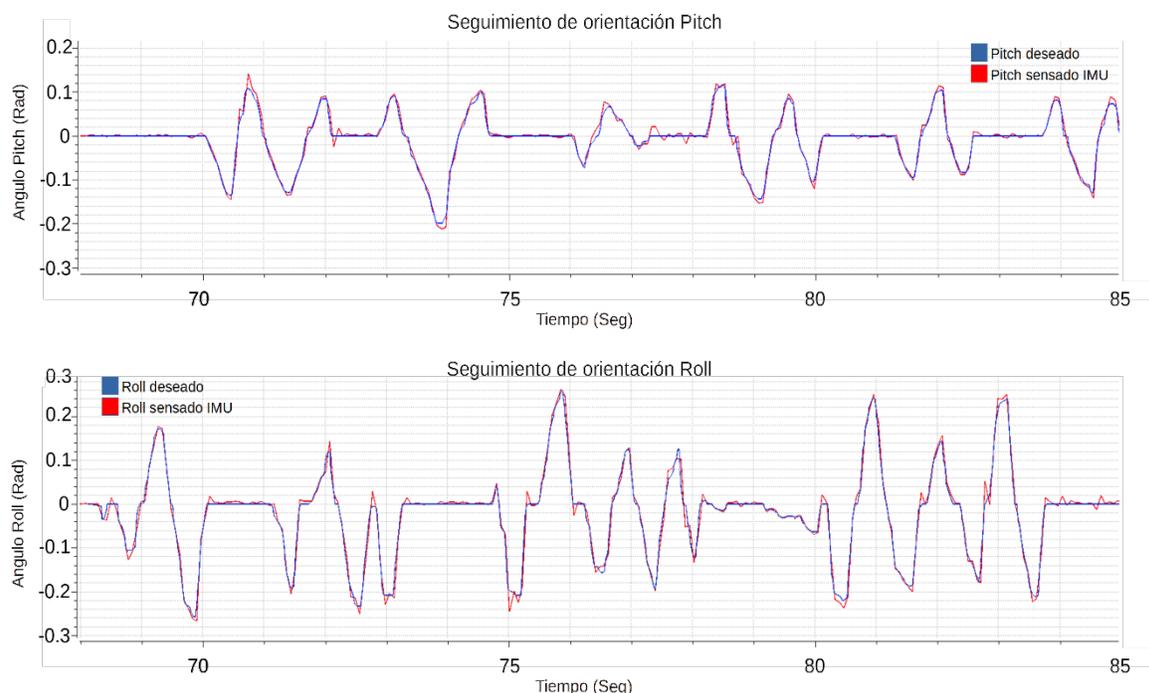


Figura 11. Grafica de seguimiento de la orientación deseada en Roll y pitch.
Fuente: Autoría propia



Además, se implemento una marcha simple en el robot, obteniendo un buen comportamiento que demostró ser apto para iniciar la fabricación del vehículo (ver Figura 12), y se provo al robot virtual en los diferentes escenarios mostrados en la Figura 13.

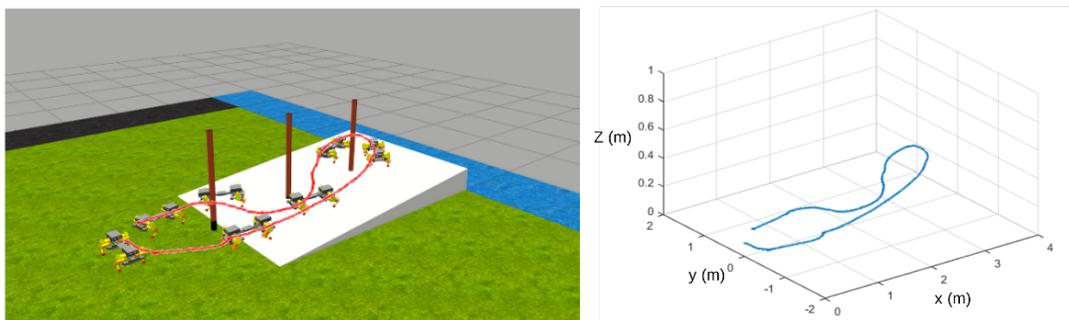


Figura 12. Se muestran a la izquierda una composición de diferentes imágenes capturadas del robot durante una prueba de marcha alrededor de obstáculos, sobre una plataforma inclinada, ya la derecha la trayectoria recorrida.
Fuente: Autoría propia



Figura 13. Se muestran diferentes escenarios para simulaciones.
Fuente: Autoría propia

Finalmente, gracias a la investigación presentada a lo largo de este trabajo, se comprobó el buen funcionamiento del robot propuesto, tanto mecánica como morfológicamente, así como en sus materiales. Este robot se fabricado sin mayores inconvenientes ahorrando recursos y tiempo en el prototipado (ver Figura 14).

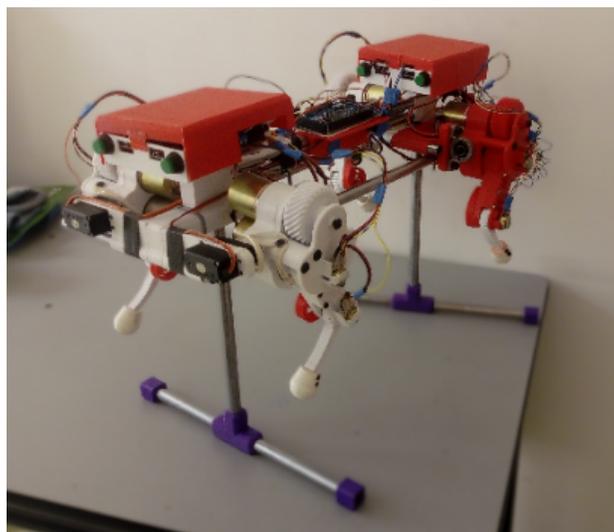


Figura 14. Robot Fabricado.
Fuente: Autoría propia

4. Conclusiones

Se desarrolló el diseño y la simulación SITL de un robot cuadrúpedo de bajo costo, destinado a ser una plataforma versátil para investigaciones futuras en torno a la morfología, control y desempeño de este tipo de robots. Las simulaciones realizadas permitieron optimizar la morfología y los materiales, lo que resultó en una reducción significativa del tiempo de prototipado y del costo de fabricación.

Las pruebas virtuales permitieron corroborar que el diseño propuesto es versátil y funcional y que mantiene las características clave establecidas en las pautas de diseño, incluyendo amplio rango de movimientos, capacidad para adaptarse a distintos terrenos, facilidad de fabricación mediante impresión 3D, bajo costo y uso de materiales accesibles, piernas de baja inercia, modularidad, entre otros. Estos resultados validan la viabilidad del robot como plataforma de investigación.

La metodología con base en simulaciones permitió detectar y corregir posibles problemas antes de fabricar el modelo físico, mejorando así la eficiencia del proceso de desarrollo.

Como trabajo futuro, la investigación se enfocará en el desarrollo de diferentes algoritmos de control de caminata para identificar la estrategia más eficiente y estable. Además, se explorará un control de seguimiento de trayectorias, que será probado en SITL antes de su implementación y ajustado en el robot físico para garantizar un rendimiento óptimo en escenarios reales.

5. Referencias

- BostonDynamics. (2020). *SPOT*. Available: <https://www.bostondynamics.com/spot>.
- De Santos, P. G., Garcia, E., & Estremera, J. (2006). Quadrupedal locomotion: An introduction to the control of four-legged robots. In *Quadrupedal Locomotion: An Introduction to the Control of Four-legged Robots*. <https://doi.org/10.1007/1-84628-307-8>
- Flores, A., Verdin, R., Moreno, H., & Flores, G. (2023). Development, model, simulation, and real test of a new fully actuated quadrotor. *2023 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2023*. <https://doi.org/10.1109/ICUAS57906.2023.10155795>
- Hutter, M., Gehring, C., Lauber, A., Gunther, F., Bellicoso, C. D., Tsounis, V., Fankhauser, P., Diethelm, R., Bachmann, S., Bloesch, M., Kolvenbach, H., Bjelonic, M., Isler, L., & Meyer, K. (2017). ANYmal - toward legged robots for harsh environments. *Advanced Robotics*, 31(17). <https://doi.org/10.1080/01691864.2017.1378591>
- Katz, B., Carlo, J. D., & Kim, S. (2019). Mini cheetah: A platform for pushing the limits of dynamic quadruped control. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2019-May*. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2019.8793865>
- Raibert, M. (2008). BigDog, the rough-terrain quadruped robot. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 17(1 PART 1). <https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.4278>
- Seok, S., Wang, A., Chuah, M. Y., Hyun, D. J., Lee, J., Otten, D. M., Lang, J. H., & Kim, S. (2015). Design principles for energy-efficient legged locomotion and implementation on the MIT Cheetah robot. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20(3). <https://doi.org/10.1109/TMECH.2014.2339013>
- Su, W., Li, B., Yuan, L., Zhang, H., Tan, H., & Xi, X. (2018). Strategy and experiment of attitude control for quadruped mobile platform walking on three-dimensional slope used for agriculture. *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 34(4). <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2018.04.010>
- Tian, X., Gao, F., Qi, C., Chen, X., & Zhang, D. (2016). External disturbance identification of a quadruped robot with parallel-serial leg structure. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 12(1). <https://doi.org/10.1007/s10999-014-9288-4>
- Wang, L., Du, W., Mu, X., Wang, X., Xie, G., & Wang, C. (2016). A geometric approach to solving the stable workspace of quadruped bionic robot with hand-foot-integrated function. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 37. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.07.001>



- Xu, R. W., Chin Hsieh, K., Chan, U. H., Un Cheang, H., Shi, W. K., & Tin Hon, C. (2022). Analytical Review on Developing Progress of the Quadruped Robot Industry and Gaits Research. *2022 8th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA)*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/ICARA55094.2022.9738583>
- Zhang, F., Wang, Y., Shuai, T., Zheng, L., Wang, J., & Chen, Z. (2019). Development of agricultural bionic four-legged robot: Effect of head movement adjustment on the stability of goats. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 12(4). <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20191204.4287>
- Zhang, L., Li, A., & Gao, Z. (2019). Modeling and analysis of flexible foot vibration of multi-foot bionic robot. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2019*. <https://doi.org/10.1109/ROBIO49542.2019.8961702>

