



# Diseño y construcción de un robot bípedo para experimentación de la marcha

## Design and construction of a bipedal robot for gait experimentation

Diego A. Bravo M.<sup>+1</sup>  Jeison Tacué\*  Franco Gutierrez\* y Jaime Tabango\*

<sup>+</sup>Departamento de Física, Universidad del Cauca, Colombia

\*Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control, Universidad del Cauca, Colombia

**Resumen.** En este trabajo se presentan los resultados del diseño y construcción de un robot bípedo de 12 grados de libertad, para la experimentación de trayectorias articulares de marcha. Se presentan los modelos físico-matemáticos del robot (modelo geométrico y de la dinámica simplificada). El prototipo permite monitorear el centro de gravedad del robot mediante sensores de presión instalados en los pies, además del punto de momento cero, usado para evaluar la estabilidad de la marcha. La validación de los experimentos realizados se hizo mediante simulación del modelo y la comparación con el robot real.

**Palabras Claves.** Centro de gravedad; punto de momento cero; robot bípedo; trayectorias de marcha.

**Abstract.** In this work, the results of the design and construction of a bipedal robot with 12 degrees of freedom are presented, for the experimentation of gait joint trajectories. The physical-mathematical models of the robot (geometric model and simplified dynamics) are presented. The prototype allows the robot's center of gravity to be monitored by means of pressure sensors installed in the feet, in addition to the zero moment point, used to evaluate the stability of the gait. The validation of the experiments carried out was done by simulating the model and comparing it with the real robot.

**Keywords.** Biped robot; center of gravity; walking trajectories; zero moment point.

**Como citar.** Diego A Bravo M., Jeison Tacué, Franco Gutierrez, Jaime Tabanngo. Design and construction of a bipedal robot for gait experimentation, *Jou. Cie. Ing.*, vol. 14, no. 2, pp. 11-23, 2022. doi:10.46571/JCI.2022.2.3

**Recibido:** 28/06/2021    **Revisado:** 1/08/2022    **Aceptado:** 7/09/2022

<sup>1</sup> e-mail: [dibravo@unicauca.edu.co](mailto:dibravo@unicauca.edu.co)

## 1. Introducción

En la actualidad en el mercado se encuentran robots de bajo costo y de pequeño formato (ROBONOVA, KONDO, BIOLOID, entre muchos otros), de mediana y alta funcionalidad (Qrio, Hoap, NAO, Darwin) y en paralelo grandes proyectos de presupuestos exorbitantes (ASIMO, HUBO, HRP, ATLAS), [1]. Algunos robots como BIOLOID, RoBoHoN, NAO, Poppy y Qrio han sido utilizados para educar, otros como el ASIMO, Geminoid F, Robothespian, Romeo y Wakamaru han sido diseñados principalmente para comunicarse con humanos, buscando proporcionar información y asistencia, otros como el ATLAS, DRC-HUBO y Petman se enfocan en brindar protección en diversos aspectos, [2]. Los robots bípedos diseñados para la educación y desarrollo, son de gran utilidad para generar avances de carácter científico, sin embargo, en diversas situaciones estos dispositivos presentan limitaciones, un claro ejemplo son los humanoides BIOLOID, ROBONOVA y KONDO, si bien sus interesantes precios no rebasan los 2.000 USD, sus prestaciones físicas y de procesamiento lógico-matemático basadas en microprocesadores de baja y mediana gama son escasas y condicionadas, esta situación se ha evidenciado en proyectos como el de la universidad de Middlesex, en el que fue necesario adaptar un nuevo sistema embebido, tipo computadora, para dar continuidad a la experimentación de técnicas de control de equilibrio avanzadas y generación de marcha on-line sobre el robot BIOLOID [3], esto se debe en gran parte a que en la marcha bípeda se necesita la ejecución de algoritmos on-line y off-line para la generación de trayectorias de referencia de marcha, en donde es necesario transformar durante cada instante de muestreo la posición cartesiana de los pies en una posición articular conjunta, lo cual implica solucionar iterativamente los modelos cinemático directo e inverso del robot [4], de forma paralela, se debe ejecutar alguna técnica de control de equilibrio para efectuar la trayectoria de marcha previamente generada, por tanto, los dispositivos originales de procesamiento no son capaces de brindar una solución completa y eficiente [5], puesto que se requiere alta precisión de cálculo y velocidad de procesamiento, [6]. Un caso particular de esta situación es la del robot BIOLOID y su procesador CM530 [7], sobre el cual únicamente se ha logrado estudiar técnicas de generación de marcha off-line, en los trabajos de pregrado y posgrado realizados sobre esta plataforma al interior de la Universidad del Cauca [8, 9]. Dicho planteamiento también ha permitido observar que la complejidad de los modelos dinámicos del robot bípedo son una elección importante a tener en cuenta para generar técnicas robustas de marcha, ya que existe una relación proporcional entre la rigurosidad del modelo y el gasto computacional, [10]. Los estudios realizados han indicado que al usar modelos matemáticos completos se requiere conocimiento preciso de la dinámica multicuerpo del robot, incluyendo masas, centros de masa, inercias de los actuadores y otros datos difícilmente conocidos [11], no obstante, respecto a la concordancia entre el modelo y el robot real, la reproducción de la dinámica de robots bípedos bajo este enfoque es medianamente superior en comparación al uso de enfoques como el de dinámica simplificada, [12, 13]. Un aspecto adicional en este trabajo consiste en el uso del Framework ROS, para desarrollo de software de robots, o también conocido como sistema operativo para robots, [14]. ROS también incorpora un conjunto de paquetes denominados ROS control que proporcionan la capacidad de aplicar y gestionar controladores para robots con un enfoque de rendimiento en tiempo real, y además facilita la integración entre Matlab y los robots que operan bajo este Framework [15, 16]. En este artículo, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Es posible construir un prototipo de robot bípedo de ámbito académico, que adopte un modelo dinámico simplificado el cual se ejecute sobre el sistema operativo ROS para la experimentación de trayectorias articulares de marcha off-line?

## 2. Materiales y Métodos

El diseño del bípedo involucra pensar en etapas futuras que darán continuidad al proyecto, por tanto, este debe ser capaz de desplazarse en línea recta y realizar giros, Igualmente se contrasta el diseño articular del robot con la estructura articular de los seres humanos, debido a que

somos capaces de realizar los movimientos requeridos, en consecuencia, se planteó desarrollar un robot bípedo con 6 grados de libertad (GDL) por cada pierna, distribuidos de la siguiente forma: 3 GDL en la cadera, 1 GDL en la rodilla y 2 GDL en el tobillo. Al tener claridad del número de articulaciones y en vista de que el semillero de robótica de la Universidad del Cauca cuenta con dos estructuras metálicas para robots bípedos y seriales cada una de 6GDL, se planteó lo siguiente: usar las estructuras disponibles y realizar modificaciones que permitan obtener una estructura de soporte para el prototipo. Inicialmente se hizo el diseño asistido por computador (CAD), con el fin de establecer las dimensiones geométricas de manera simulada y posteriormente realizar la implementación física del prototipo.

### 2.1. Modelo CAD del robot bípedo

Respecto al diseño estructural del robot bípedo, se ha optado por seguir la metodología sugerida por Drillins y Contini [17], que parten de la estimación estadística de las longitudes del cuerpo humano a partir de su estatura, por este motivo, dichas longitudes son un factor multiplicativo con respecto a la altura (H), como se muestra en la Fig. 1.

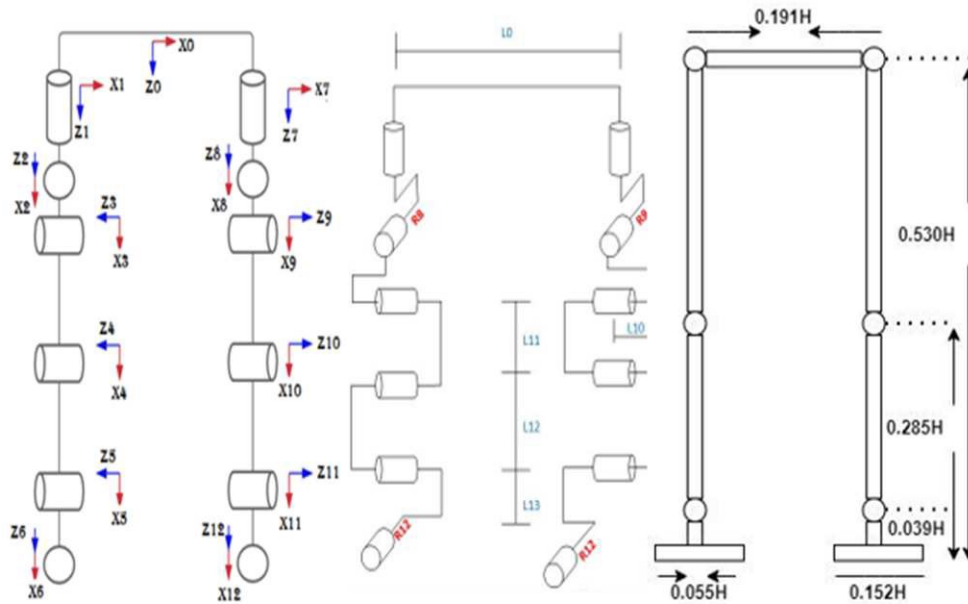


Figura 1: Longitudes y ejes del modelo geométrico del robot bípedo.

$$\begin{aligned}
 \text{Thigh} &= (0.530 - 0.285) \cdot H = 23.1 \text{ cm} \\
 \text{Fibula} &= (0.285 - 0.039) \cdot H = 23.2 \text{ cm} \\
 \text{Ankle} &= 0.039 \cdot H = 3.68 \text{ cm} \\
 \text{Footwidth} &= 0.055 \cdot H = 5.18 \text{ cm} \\
 \text{Longfoot} &= 0.152 \cdot H = 14.34 \text{ cm} \\
 \text{Hips} &= 0.191 \cdot H = 18.01 \text{ cm}
 \end{aligned} \tag{1}$$

En la Fig. 2, se puede observar el ensamblaje del robot bípedo en CAD y el prototipo ensamblado, en esta se muestra una vista frontal, lateral y posterior del robot respectivamente.

### 2.2. Modelo geométrico directo del robot bípedo

La tabla de parámetros geométricos del robot de la Fi. 1 utilizando la convención de Denavit-Hartenberg se muestra en la Tabla 1.



Figura 2: Modelo CAD del robot bípedo y prototipo real.

Tabla 1: Parámetros geométricos del robot.

$j$	$\sigma_j$	$\alpha_j$	$d_j$	$q_j$	$r_j$
1	0	0	$L_0/2$	$q_1$	$L_7$
2	0	$\pi/2$	0	$q_2$	0
3	0	$\pi/2$	$L_9$	$q_3$	$L_{10}$
4	0	0	$L_{11}$	$q_4$	$R_8$
5	0	0	$L_{12}$	$q_5$	0
6	0	$-\pi/2$	$L_{13}$	$q_6$	$R_{12}$
7	0	0	$L_0/2$	$q_6$	$L_7$
8	0	$-\pi/2$	0	$q_6$	$R_8$
9	0	$-\pi/2$	$L_9$	$q_6$	$L_{10}$
10	0	0	$L_{11}$	$q_6$	0
11	0	0	$L_{12}$	$q_6$	0
12	0	$\pi/2$	$L_{12}$	$q_6$	$R_{12}$

El modelo geométrico directo permite calcular la posición y orientación de los pies. El vector que denota la posición cartesiana del referente cero con respecto al marco de referencia inercial

(suelo) es  $gp0$  y la matriz de rotación que denota la orientación del referente cero con respecto al marco de referencia inercial es  $g\mathbf{R}0$ . En este caso, la rotación solo se hace en el eje  $z$  y el sentido de la marcha en el eje  $x$ . La matriz de rotación se escribe en términos de los ángulos de euler  $\phi$ ,  $\theta$  y  $\psi$ .

$$g\mathbf{R}0(\phi, \theta, \psi) = \begin{bmatrix} C\phi C\theta & C\phi S\theta S\psi - S\phi C\psi & C\phi S\theta C\psi - S\phi S\psi \\ S\phi C\theta & S\phi S\theta S\psi + C\phi C\psi & S\phi S\theta C\psi - C\phi S\psi \\ -S\theta & C\theta S\psi & C\theta C\psi \end{bmatrix}$$

Donde:

$$\begin{aligned} S\phi &\triangleq \sin \phi & C\phi &\triangleq \cos \phi \\ S\theta &\triangleq \sin \theta & C\theta &\triangleq \cos \theta \\ S\psi &\triangleq \sin \psi & C\psi &\triangleq \cos \psi \end{aligned}$$

Por notación se define  $\sigma \triangleq \{\phi, \theta, \psi\}$ , entonces la matriz de transformación para pasar del marco de referencia cero al referente inercial en términos de  $g\mathbf{R}0(\sigma)$  y  $gp0$  es

$$g\mathbf{T}0(\sigma) = \begin{bmatrix} g\mathbf{R}0(\sigma) & gp0 \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix}$$

La transformación  $g\mathbf{T}0(\sigma)$  permite expresar la posición de la base móvil del robot en términos del marco de referencia inercial. La matriz de transformación para pasar del marco de referencia  $j$  a  $j-1$  esta definida por un vector  $j-1pj$  que expresa la posición del marco  $j$  en  $j-1$  y una matriz de rotación  $j-1\mathbf{R}j$  que relaciona la orientación del marco  $j$  en  $j-1$ . Debido a que todas las articulaciones del robot son rotoides, los vectores  $j-1pj$  dependen únicamente de los parámetros geométricos del robot (Ver Tabla 1). La matriz de rotación depende, además, de un vector de posiciones articulares  $q$

$$j-1\mathbf{T}j(q) = \begin{bmatrix} j-1\mathbf{R}j(q) & j-1pj \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix}$$

Siendo:

$$j-1\mathbf{R}j(q) = \begin{bmatrix} Cq_j & -Sq_j & 0 \\ C\alpha_j Sq_j & C\alpha_j Cq_j & -S\alpha_j \\ S\alpha_j Sq_j & S\alpha_j Cq_j & C\alpha_j \end{bmatrix} \quad j-1pj = \begin{bmatrix} d_j \\ -r_j S\alpha_j \\ r_j C\alpha_j \end{bmatrix}$$

La transformación para pasar del marco de referencia 0 al marco de referencia 6 (pie derecho), se calcula en función de  $j-1\mathbf{T}j(q)$  tal que  $j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ .

$$0\mathbf{T}6(q) \triangleq \begin{bmatrix} 0\mathbf{R}6(q) & 0p6(q) \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} = \prod_{j=1}^6 j-1\mathbf{T}j$$

La transformación  $0\mathbf{T}6(q)$  permite determinar la posición del pie derecho con respecto al referente cero. Sin embargo, se desea expresar las posiciones en el marco de referencia inercial  $\langle x_g, y_g \rangle$ , esta matriz de transformación esta definida por:

$$g\mathbf{T}6(q, \sigma) \triangleq \begin{bmatrix} g\mathbf{R}6(q, \sigma) & gp6(q, \sigma) \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} = g\mathbf{T}0(\sigma)0\mathbf{T}6(q)$$

### 2.3. Modelo dinámico simplificado del robot bípedo

La dinámica de un robot bípedo puede ser aproximada por el sistema mecánico presentado en la Figura 3. Este consta de una masa  $M$ , igual a la masa total del robot, que se desliza con aceleración  $\ddot{x}$  sobre una mesa de masa nula. La aceleración gravitacional  $g$  genera una fuerza de magnitud  $f_m = Mg$  sobre la mesa en dirección contraria al eje  $Z$  del sistema coordenado  $\langle X, Z \rangle$ . Para mantener la altura  $z_c$  del CoM constante, se debe ejercer una fuerza de magnitud  $f_a = M\ddot{x}$  en dirección contraria al movimiento del CoM. Es decir, si la aceleración es  $\ddot{x} > 0$  se genera una fuerza  $f_a$  en dirección contraria al eje  $X$  y si  $\ddot{x} < 0$ , la fuerza  $f_a$  tendrá el mismo sentido del eje  $X$  [18].

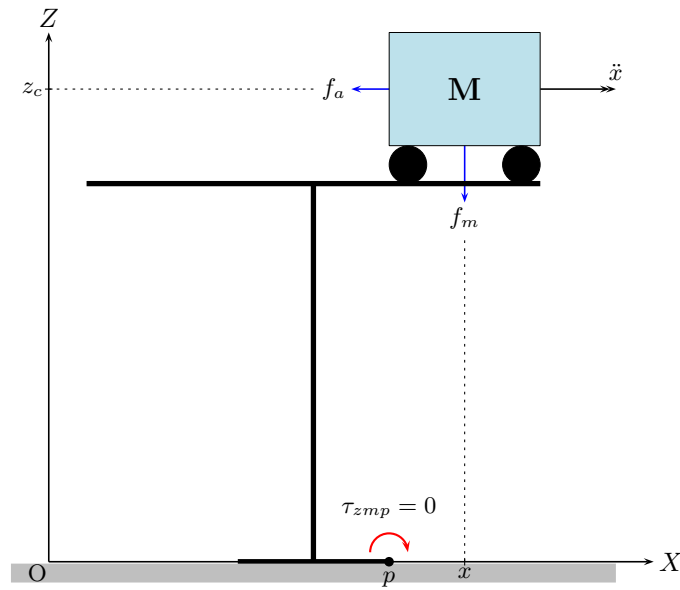


Figura 3: Modelo *cart-table*.

Las fuerzas  $f_m$  y  $f_a$  generan un momento resultante alrededor de un punto  $p$  arbitrario, ubicado sobre el eje  $X$  de  $\langle X, Z \rangle$  de la Figura 4. En el diagrama de fuerzas de la Figura 4, se muestra que  $f_m$  genera un momento que propende por una rotación en sentido horario y  $f_a$  por una rotación en sentido antihorario cuando  $\ddot{x} > 0$ . De la Figura 4 se deduce que el momento debido a  $f_m$  alrededor del punto  $p$  que se encuentra ubicado sobre el eje  $x$  es:

$$\begin{aligned}\tau_m(p) &= L f_m \sin \theta \\ &= L f_m \frac{(x-p)}{L} \\ &= f_m (x-p)\end{aligned}\quad (2)$$

El momento debido a  $f_a$  es

$$\begin{aligned}\tau_a(p) &= L f_a \cos \theta \\ &= L f_a \frac{z_c}{L} \\ &= f_a z_c\end{aligned}\quad (3)$$

De las ecuaciones (2) y (3) se obtiene que el momento resultante total alrededor del punto  $p$  es:

$$\begin{aligned}\tau(p) &= f_m (x-p) - f_a z_c \\ &= M g (x-p) - M z_c \ddot{x}\end{aligned}\quad (4)$$

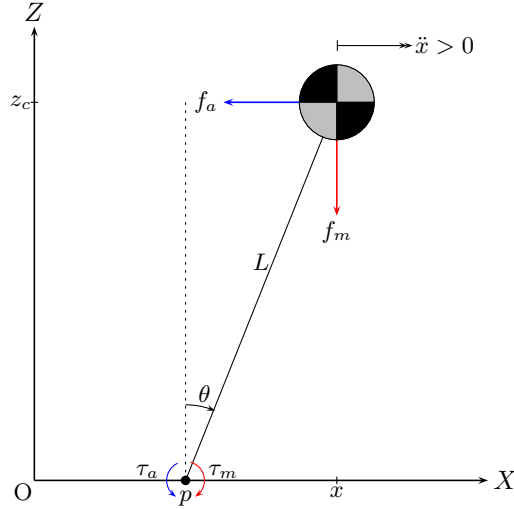


Figura 4: Diagrama representativo de las fuerzas que la masa  $M$  ejerce sobre la mesa. La posición  $(x, z_c)$  corresponde al centro de masa del robot.

El punto  $p$  donde se cancelan  $\tau_m(p)$  y  $\tau_a(p)$  se denomina el punto de momento cero. Dicho punto, denotado  $p_{zmp}$ , satisface entonces la siguiente igualdad:

$$\tau_{zmp} = M g (x - p_{zmp}) - M z_c \ddot{x} = 0 \quad (5)$$

De la Ec. (5), se obtiene la ecuación diferencial que relaciona la posición del punto de momento cero con la aceleración del centro de gravedad del robot

$$p_{zmp} = x - \frac{z_c}{g} \ddot{x} \quad (6)$$

A continuación se aplica la transformada de Laplace, con condiciones iniciales iguales a cero a la Ec. (6), con el fin de obtener la función de transferencia que relaciona la posición del centro de gravedad con la posición del punto de momento cero:

$$\frac{X(s)}{P_{zmp}(s)} = \frac{1}{1 - \frac{z_c}{g} s^2} \quad (7)$$

La anterior función de transferencia tiene dos polos reales, uno en  $s_1 = +\sqrt{g/z_c}$  y el otro en  $s_2 = -\sqrt{g/z_c}$ . Dado que uno de ellos tiene parte real positiva, el sistema representado por la Ec. (7) es inestable, indicando que para una entrada acotada del ZMP deseado  $p_{zmp}(t)$ , la salida resultante  $x(t)$  diverge. Por otro lado, se debe analizar el modelo Cart-Table tanto en el plano sagital como el frontal, en consecuencia, se deduce el nuevo sistema de ecuaciones diferenciales que describe el sistema en ambos planos:

$$\begin{aligned} p_{zmp_x} &= x - \frac{z_c}{g} \ddot{x} \\ p_{zmp_y} &= y - \frac{z_c}{g} \ddot{y} \end{aligned} \quad (8)$$

#### 2.4. Diseño electrónico del robot bípedo

En la Fig. 5 se muestra como están cableados los motores y los sensores de fuerza del robot. El robot es energizado mediante una batería de 11.1 V a 1000 mA, a su vez este voltaje es regulado a 5 V mediante el módulo x1406b para alimentar los motores, mientras que la tarjeta ESP32 posee su propio regulador el cual permite alimentar eléctricamente los sensores. Cabe resaltar que el bloque denominado `cito_sensor#`, se replica ocho veces (uno por cada sensor); este es un circuito seguidor de voltaje o amplificador de ganancia unitaria y es conocido como un amplificador de aislamiento. Aunque su ganancia es unitaria, se utiliza porque su resistencia de entrada es alta, por lo tanto, extrae una corriente despreciable de la fuente de señal y se utiliza para acondicionar la señal mediante un filtro, el cual ayuda a eliminar el ruido de alta frecuencia presente en la señal entregada por los sensores hacia la tarjeta de adquisición.

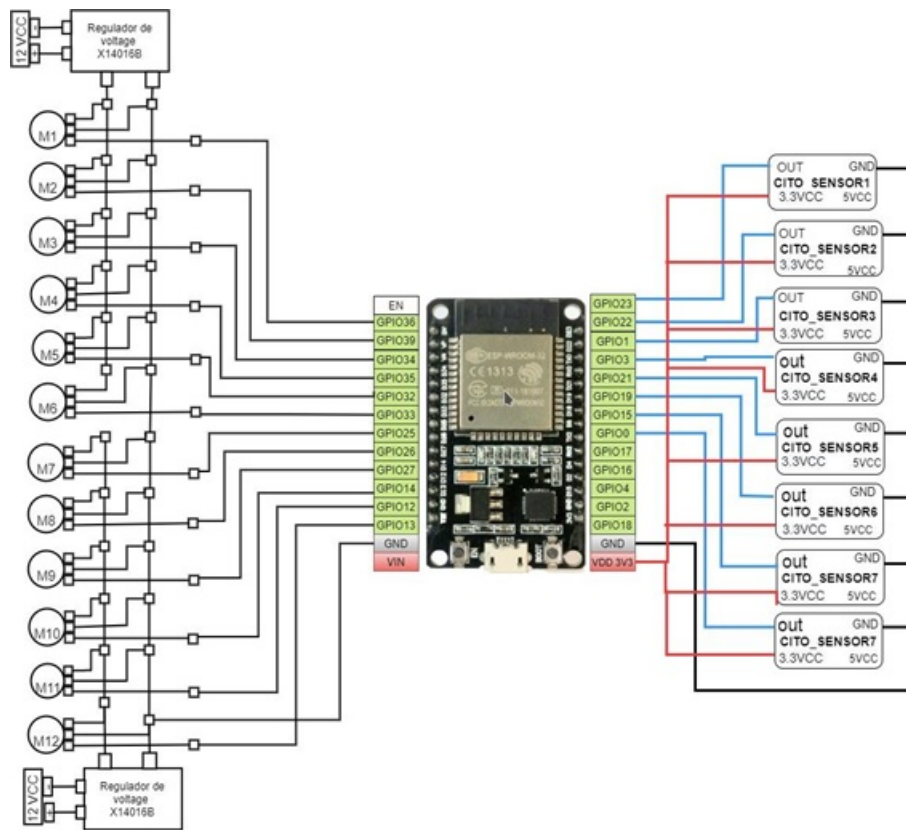


Figura 5: Diagrama eléctrico: motores y sensores.

#### 2.5. Arquitectura del software del robot bípedo

Robotic Operative System (ROS) es un marco distribuido de código abierto de procesos, el cual posee nodos que se comunican entre sí, para ejecutar funciones como control de hardware, planificación de movimiento e integración de sensores, este marco permite varios lenguajes de programación y se puede ejecutar desde diferentes dispositivos. En este trabajo se creó el nodo maestro desde un PC remoto usando el sistema de cómputo numérico Matlab, el cual se encarga de recibir la información de los sensores, realizar el cálculo del ZMP sobre el suelo y enviar al robot posiciones de referencia a los motores mediante un nodo suscriptor y un publicador por medio de wifi, (ver Fig. 6). En el robot se encuentra una tarjeta Raspberry pi 3b+ y una tarjeta ESP32, las cuales se comunican mediante el protocolo rosserial. La tarjeta ESP32 cumple



la función de enviar las posiciones articulares de referencia traducidos a señales PWM hacia los motores y también obtener la lectura analógica de los sensores debido que la Raspberry 3b+ solo cuenta con pines GPIO y no posee la cantidad necesaria de conversores ADC (Analog Digital Converter). Por otro lado, en la tarjeta Raspberry se encuentran dos nodos creados en Python, el primero hace el papel del publicador; encargado de enviar la información obtenida de los sensores, y el segundo es un nodo suscriptor el cual tiene como funcionalidad el recibir la información desde el PC remoto como estación de control.

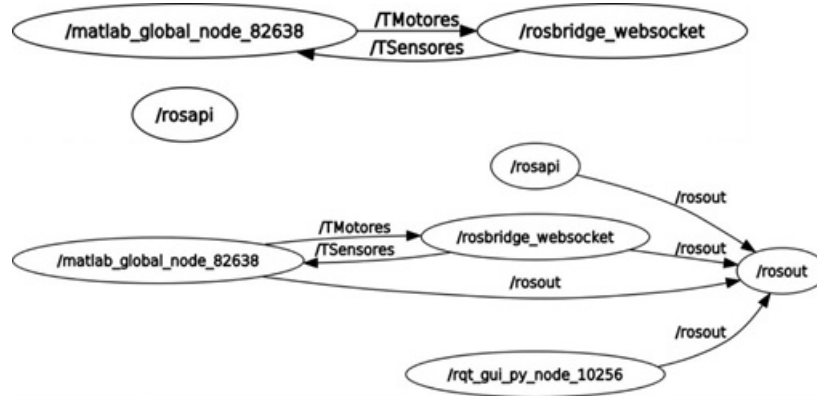


Figura 6: Diagrama de nodos, servicios y tópicos.

Cabe resaltar que los nodos; publicador y suscriptor tienen una similitud con una comunicación cliente servidor, en este caso, el suscriptor (cliente) solicita información al publicador (servidor) y éste comparte dicha información. La comunicación realizada para el intercambio de información para manipular el comportamiento articular del robot bípedo es la siguiente: Inicialmente se crea el servidor de ROS bridge, el cual permite la comunicación desde el centro de control remoto hasta el robot a través de wifi. Luego de establecer la comunicación mencionada, es necesario la obtención y envío de las señales de los sensores con la tarjeta ESP32 y compartirla con el centro de cómputo desde la tarjeta Raspberry Pi, mediante el nodo PubSensores y el tópico TSensores. Después se realiza la recepción, la manipulación de los datos y la devolución de información desde el centro de cómputo hacia el robot, teniendo en cuenta que la recepción se hace por el tópico TSensores y el nodo SusSensores, y la devolución se efectúa por el tópico TMotores y el nodo PubMotores. Desde la tarjeta Raspberry Pi se hace la captura de los datos enviados desde el centro de cómputo y se procede a compartirlos con la tarjeta ESP32, la captura de los datos se hace mediante el tópico TMotores y el nodo SusMotores, y se comparten con la ESP32 por el puerto serial. Finalmente se pasa la señal de referencia articular a cada uno de los motores desde la ESP32, como se muestra en la Fig. 7.

En la siguiente sección se presentarán los resultados de este trabajo de investigación.

### 3. Resultados y Discusión

#### 3.1. Caracterización de los sensores de presión

El sensor elegido para medir las fuerzas distribuidas sobre extremos de cada pie del robot es el Film Pressure Sensor (DF9-40), para caracterizarlo se tomaron 25 muestras de voltaje entregadas por el sensor de fuerza ante diferentes pesos, estas estaban dentro del intervalo de 0 a 5 kg, con el propósito de hallar la curva característica de respuesta del sensor, la cual relaciona el voltaje de salida versus la fuerza aplicada sobre el dispositivo, ver Fig. 8.

En total se usaron 8 sensores, 4 por cada pie. Estos se situaron en los vértices de cada zapato con la finalidad de encontrar las coordenadas  $ZMP_x$  y  $ZMP_y$ , que definen el ZMP del robot bípedo sobre el plano de avance.

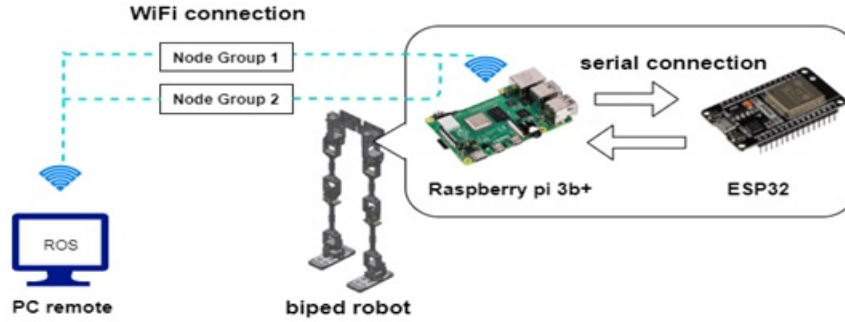


Figura 7: Diagrama de la arquitectura del software del robot bípedo.

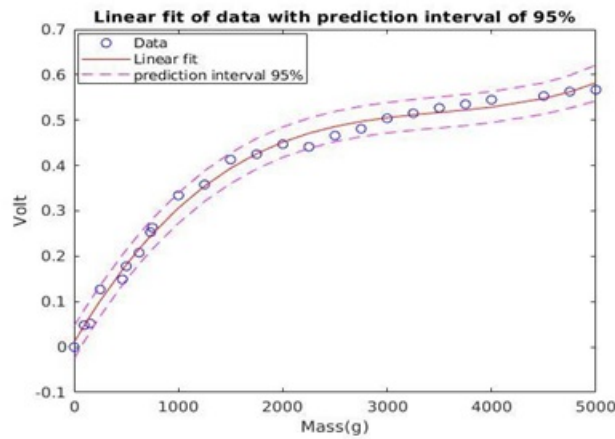


Figura 8: Curva característica del sensor de presión DF9-40.

$$ZMP_x = \frac{\sum_{i=1}^4 R_i \cdot X_i}{\sum_{i=1}^4 R_i}$$

$$ZMP_y = \frac{\sum_{i=1}^4 R_i \cdot Y_i}{\sum_{i=1}^4 R_i}$$

Para el cálculo de estos componentes, se utilizó Matlab, en este se obtienen las lecturas de fuerza de cada sensor, se definen las distancias de los sensores respecto a los ejes X e Y, se crea el polígono de soporte de referencia y se realiza la sumatoria vectorial de fuerzas por cada componente, es así como se obtiene el ZMP medido del robot bípedo.

### 3.2. Posición de Genuflexión del robot bípedo

Para encontrar la posición de genuflexión, fue necesario mover de manera experimental los motores de las articulaciones 3, 4, 5, 9, 10 y 11 para llevar al robot a una posición en la cual se encuentre de manera erguido y que su COP se mantenga en el centro del polígono de soporte. Además, para comprobar que la posición del COP del robot durante la genuflexión se encontraba en el centro del polígono de soporte, fue necesario el uso de los sensores de presión ubicados en los pies del robot. Por otro lado, con las lecturas obtenidas de los sensores de presión se calculó el ZMP del robot. Como evidencia del proceso anteriormente descrito se presenta una imagen del robot en el estado de genuflexión (Fig. 9), y la respectiva grafica que evidencia la ubicación del COP y el ZMP en dicha posición (Fig. 10).

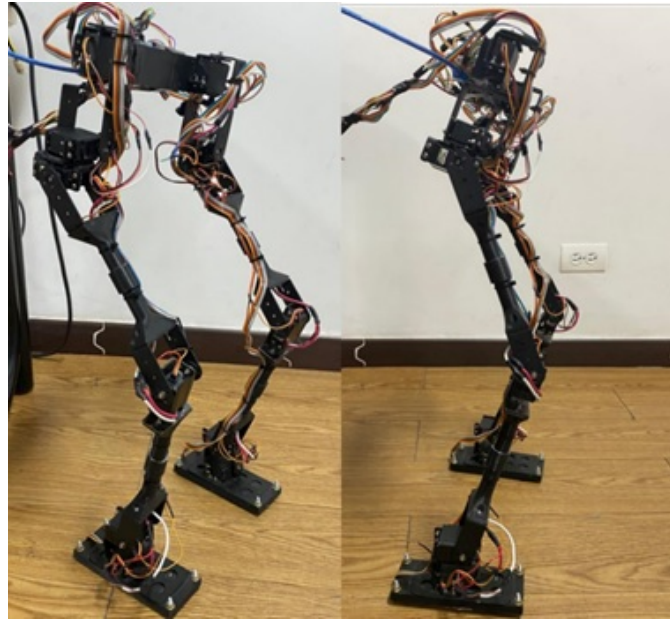


Figura 9: Robot bípedo en la posición de Genuflexión.



Figura 10: Posición del COP cuando el robot se encuentra en posición de genuflexión.

### 3.3. Trayectorias de marcha articulares suspendiendo el robot bípedo

Se planteó suspender el robot bípedo de una estructura colgante y enviar un patrón de marcha preestablecido y comparar los movimientos con el robot simulado en la herramienta Simulink Multibody, con el propósito de contrastar de manera visual la capacidad de seguimiento de trayectorias articulares. Se establecen las siguientes consideraciones a tener en cuenta para este experimento: (i). El robot se encuentra suspendido y su patrón de marcha es en línea recta. (ii). El robot simulado en Simulink Multibody presenta las mismas dimensiones, número de articulaciones y trayectorias de marcha que el robot real. (iii). Se realizarán 4 pasos de marcha. Como resultado de este experimento se realizó un video comparativo (<https://youtu.be/aNMcr4VbnsE>) en el cual se muestra el movimiento del robot real en comparación con el robot simulado, desde una vista frontal y lateral, sin embargo para datar los movimientos de manera formal en este documento de monografía, se capturaron los fotogramas

en los cuales el robot se encuentra en la posición inicial, después cuando avanza con el pie izquierdo hacia delante mientras el derecho va hacia atrás, luego cuando retoma la posición inicial y finalmente cuando el pie derecho avanza mientras el izquierdo se encuentra atrás, como en la Fig. 11. De este experimento se pudo observar, que el robot bípedo sigue las posiciones articulares predefinidas por el generador de patrones de marcha, sin embargo, al comparar estos movimientos con los simulados, se puede notar que algunos comportamientos no son tan pronunciados como en la simulación, esto es debido al peso del robot y el torque de los motores empleados en las articulaciones, pues en la simulación no se tiene en cuenta la fricción de los motores.

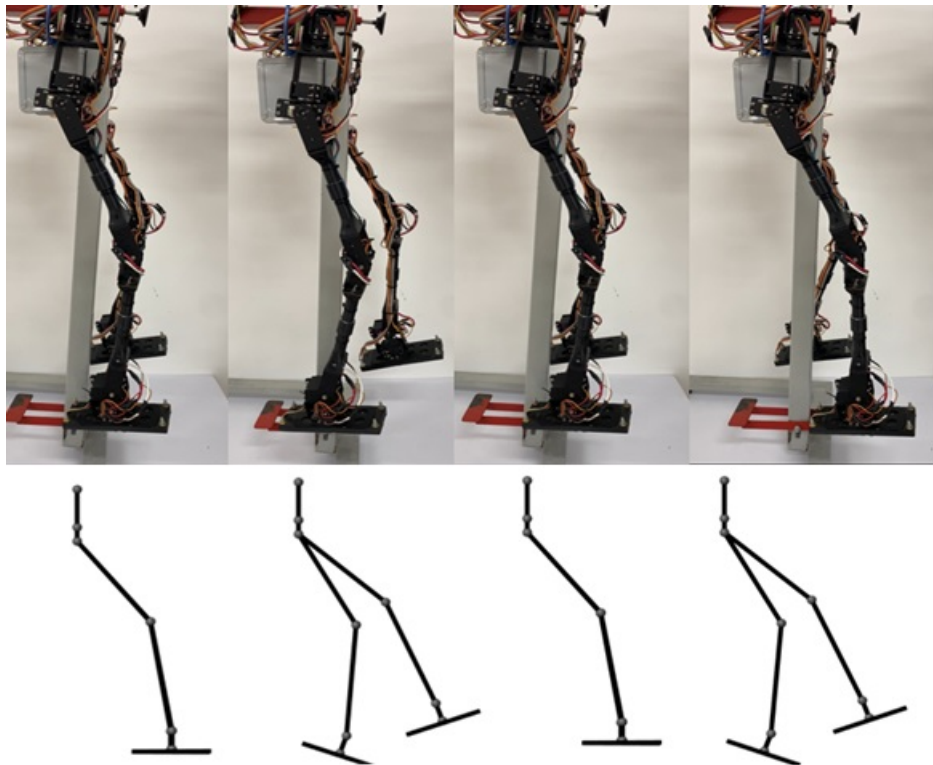


Figura 11: Trayectorias de marcha desde una vista lateral para el robot propuesto y el robot simulado.

#### 4. Conclusiones

En este trabajo se diseñó y construyó un robot bípedo de 12 grados de libertad, el prototipo construido permite la experimentación para distintos patrones de marcha, en este artículo se evaluó la posición de genuflexión y un generador de trayectorias de marcha sinusoidales, estas pruebas mostraron que el sistema electrónico permite mantener el centro de gravedad y el punto de momento cero dentro del polígono de soporte (polígono convexo formado por el área de los pies del robot). El robot diseñado puede ser usado por los estudiantes de la Universidad del Cauca para sus prácticas académicas en el área de la robótica, el sistema operativo ROS permitió conectar diferentes nodos, lenguajes, y programas de forma remota, siendo muy útil por su versatilidad a la hora de realizar experimentos en robótica. Un aspecto para mejorar en trabajos futuros es usar una tarjeta que posea las características necesarias para el funcionamiento del robot como lo son pines analógicos para los sensores, pines PWM para

los motores y comunicación inalámbrica entre otras, esto permitirá reducir los tiempos de envío de información, reducir conexiones entre las tarjetas, minimizar el uso de diferentes programas entre otras.

### Agradecimientos

Los autores de este artículo expresan sus más sinceros agradecimientos a la Universidad del Cauca por todo el apoyo que les fue dado en la realización del proyecto.

### Referencias

- [1] F. H. Martínez Sarmiento, E. J. Gómez, and D. A. Zárate Díaz, "Concepto de robot humanoide antropométrico para investigación en control," *Tecnura*, vol. 19, pp. 55–65, may 2016.
- [2] J. Linert and P. Kopacek, "Humanoid robots robotainment," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 30, pp. 220–225, 2018. 18th IFAC Conference on Technology, Culture and International Stability TECIS 2018.
- [3] D. A. Bravo and C. F. Rengifo, "Generación de trayectorias de marcha para un robot humanoide a partir de captura de movimiento," *Ciencia en Desarrollo*, vol. 12, pp. 31–42, May 2021.
- [4] D. Bravo and C. Rengifo, "Design of a dynamic simulator for a biped robot," *Modelling and Simulation in Engineering*, vol. 2021, pp. 1–12, 05 2021.
- [5] D. Bravo and C. Rengifo, "Estabilidad y control de sistemas mecánicos de base móvil," *Revista Mexicana de Física*, vol. 18, pp. 69–75, 01 2021.
- [6] J. Tacué, C. Rengifo, and D. Bravo, "An experimental energy consumption comparison between trajectories generated by using the cart-table model and an optimization approach for the bioloid robot," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 17, no. 2, pp. 1–14, 2020.
- [7] J. Tacué, "Análisis comparativo del consumo de energía eléctrica en trayectorias de marcha offline para el robot bípedo bioloid," Master's thesis, Universidad del Cauca, 2018.
- [8] D. A. Bravo, *Generación de trayectorias para un robot bípedo basadas en captura de movimiento humano*. PhD thesis, Universidad del Cauca, 2016.
- [9] F. Gutierrez and J. Tabango, "Diseño y construcción de un prototipo de robot bípedo basado en dinámica simplificada cart-table y el sistema operativo ros para la experimentación de trayectorias articulares de marcha off-line," tech. rep., Universidad del Cauca, 2022.
- [10] C. Rengifo and D. Bravo, "Trajectory generation from motion capture for a planar biped robot in swing phase," *Ingeniería y Ciencia*, vol. 11, pp. 53–75, 07 2015.
- [11] D. A. Bravo and C. F. Rengifo, "Dynamics filter for walking trajectories from human motion capture," in *2016 IEEE Colombian Conference on Robotics and Automation (CCRA)*, pp. 1–6, Sept 2016.
- [12] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Harada, K. Yokoi, and H. Hirukawa, "Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point," in *2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.03CH37422)*, vol. 2, pp. 1620–1626 vol.2, 2003.
- [13] S. Kajita, M. Benallegue, R. Cisneros, T. Sakaguchi, S. Nakaoka, M. Morisawa, K. Kaneko, and F. Kanehiro, "Biped walking pattern generation based on spatially quantized dynamics," in *2017 IEEE-RAS 17th International Conference on Humanoid Robotics (Humanoids)*, pp. 599–605, 2017.
- [14] H.-M. Feng, C.-C. Wong, C.-C. Liu, and S.-R. Xiao, "Ros-based humanoid robot pose control system design," in *2018 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, pp. 4089–4093, 2018.
- [15] R. Delgado, B.-J. You, and B. W. Choi, "Real-time control architecture based on xenomai using ros packages for a service robot," *Journal of Systems and Software*, vol. 151, pp. 8–19, 2019.
- [16] G. K. Kalyani, "A robot operating system (ros) based humanoid robot control," Master's thesis, Middlesex University London, 2017.
- [17] D. Winter, *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*. Wiley, 2009.
- [18] S. Kajita, H. Hirukawa, K. Harada, and K. Yokoi, *Introduction to Humanoid Robotics*, vol. 1 of 1610-7438. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. Original Japanese edition published by Ohmsha Ltd., Tokyo 2005.