

## DESARROLLO DE UN ROBOT HUMANOIDE DE DIECIOCHO GRADOS DE LIBERTAD PARA EL ANÁLISIS DE MOVIMIENTOS ARTICULADOS CASO: LABORATORIO DE ROBÓTICA – E.M.I.

### DEVELOPMENT OF AN EIGHTEEN-DEGREE-OF-FREEDOM HUMANOID ROBOT FOR ANALYSIS OF ARTICULATED MOVEMENTS CASE: ROBOTICS LAB - E.M.I.

Ing. José Andrés Cuellar Larico <sup>1 \* §</sup>

Recibido: Agosto 26, 2023; Aceptado: Octubre 2, 2023

#### RESUMEN

El presente trabajo de investigación es un desarrollo de un robot humanoide que se inserta dentro del ámbito de la INGENIERÍA MECATRÓNICA, que nace a partir de la necesidad de tener robots humanoides de 18 grados de libertad de tecnología abierta, más específicamente para el análisis de movimientos articulados a través de un dispositivo de estudio.

Este proyecto representa un esfuerzo significativo en la creación de un robot humanoide altamente versátil que cuenta con un impresionante conjunto de dieciocho grados de libertad. Su desarrollo responde a la creciente demanda de herramientas avanzadas en el campo de la ingeniería mecatrónica, específicamente orientadas al análisis de movimientos articulados.

Ubicado en el Laboratorio de Robótica de la E.M.I., este proyecto busca llenar un vacío en la investigación y desarrollo de robots humanoides de tecnología abierta. La capacidad de este robot para simular y analizar movimientos articulados es fundamental, ya que estos movimientos se asemejan a los de un ser humano, lo que abre un amplio abanico de aplicaciones en campos tan diversos como la biomecánica, la ergonomía, la industria de entretenimiento y la atención médica.

En resumen, el desarrollo de este robot humanoide de dieciocho grados de libertad en el Laboratorio de Robótica de la E.M.I. es un paso significativo en la investigación y la aplicación de tecnología robótica avanzada. Su versatilidad y capacidad para analizar movimientos articulados prometen contribuir en gran medida a diversos campos de la ingeniería y la ciencia, al tiempo que establece un estándar para futuras investigaciones en el ámbito de la mecatrónica y la robótica.

**Palabras claves:** Humanoide, Grados de libertad, Robótica.

#### ABSTRACT

The present investigation work is a development of a humanoid robot that falls within the field of MECHATRONIC ENGINEERING. It arises from the need for open technology humanoid robots with 18 degrees of freedom, specifically for the analysis of articulated movements through a study device.

This project represents a significant effort in the creation of a highly versatile humanoid robot with an impressive set of eighteen degrees of freedom. Its development responds to the growing demand for advanced tools in the field of mechatronic engineering, specifically tailored for the analysis of articulated movements.

Located in the Robotics Laboratory of E.M.I., this project aims to fill a gap in the research and development of open-technology humanoid robots. The robot's ability to simulate and analyze articulated movements is essential, as these movements closely resemble those of a human, opening up a wide range of applications in diverse fields such as biomechanics, ergonomics, the entertainment industry, and healthcare.

In summary, the development of these eighteen degrees of freedom humanoid robot in the Robotics Laboratory of E.M.I. is a significant step in the research and application of advanced robotic technology. Its versatility and capacity to analyze articulated movements promise to make a substantial contribution to various fields of engineering and science, while setting a standard for future research in the field of mechatronics and robotics.

**Keywords:** Humanoid, Degrees of Freedom, Robotics.

**Citación:** Cuellar Larico José Andrés. **DESARROLLO DE UN ROBOT HUMANOIDE DE DIECIOCHO GRADOS DE LIBERTAD PARA EL ANÁLISIS DE MOVIMIENTOS ARTICULADOS CASO: LABORATORIO DE ROBÓTICA – E.M.I.** Revista Científica EMINENTE 2023, 7-2: 89-97.

<sup>1</sup> Ingeniero Mecatrónica – Carrera de Ingeniería Mecatrónica - Unidad Académica La Paz - Escuela Militar de Ingeniería. Investigador de la Dirección Nacional de Investigación, Ciencia y Tecnología

\* Corresponde al Autor (correo electrónico: joseandrescuellarlarico@gmail.com).

<sup>§</sup> Dirección de contacto Investigador primer autor: Plan 561 Zona Satélite C/Placido Molina N°1172 - Telf.: (+591) 78838447- La Paz - Bolivia.

## INTRODUCCIÓN

La robótica es una rama de la tecnología que fue tomando un auge de forma exponencial, dado que a lo largo de su historia ha ayudado a la humanidad en diversas áreas, como ser el área de salud, industrial, educativa, militar, entre otras.

De esta manera La Escuela Militar de Ingeniería (EMI) creó la carrera de Ingeniería Mecatrónica con el fin de poder formar profesionales competentes en el desarrollo de mecanismos inteligentes, a través de su diseño, análisis, mantenimiento e implementación para responder a las necesidades de un entorno determinado en diferentes actividades de los seres humanos y del sector productivo. Demostrando competencia en la formulación de soluciones tecnológicas de automatización y robótica, para esto cuenta dentro de sus instalaciones con un laboratorio de robótica, sin embargo, gran parte de la formación se desarrolla de forma teórica por falta o carencia de equipos.

Los Robots Humanoides son aquellos que se diseñan específicamente para imitar la apariencia o funcionamiento de los seres humanos. Estos robots poseen en su mayoría elementos antropomórficos, como dos brazos, dos piernas e incluso un rostro. (Nota de EDS Robotics, 2021)

Para poder posicionar la cada extremidad superior de un robot humanoide es necesario contar con tres grados de libertad (GDL) y para cada extremidad inferior se tiene que contar con seis grados de libertad (GDL), dando así un total de 18 grados de libertad para su funcionamiento.

El presente trabajo estará destinado al apoyo del aprendizaje y formación profesional de los estudiantes de Ingeniería Mecatrónica de la Escuela Militar de Ingeniería (EMI) Unidad Académica La Paz (UALP).

En el laboratorio de robótica de la Escuela Militar de Ingeniería (EMI) Unidad Académica La Paz existen 9 Kits Bioloid, de los cuales seis son la versión Premium y tres versiones GP, de estos, las unidades centrales de mando (Figura 3) son de tecnología cerrada, el mantenimiento o reemplazo de cada servomotor tiene un costo elevado dado a que no son comerciales y así mismo las baterías de estos kits por el tiempo de uso ya no tienen la misma autonomía por el desgaste de las celdas.

Para representar un espacio tridimensional todo movimiento necesita 6 GDL, esto representa los movimientos rotacionales sobre un solo eje coordinado que luego estos permitirán el movimiento de eslabones adelante/atrás, arriba/abajo, izquierda/derecha, de tal forma que para un equipo con 3 GDL generalmente estaría representado por 3 movimientos rotacionales, con 4 GDL estaría representado por 4 movimientos rotacionales y así sucesivamente. De tal manera que teniendo más grados de libertad se puede crear movimientos cinemáticos cada vez más complejos.

El análisis cinemático se centra en el estudio de las coordenadas de cinemática directa e inversa ya sean de tipo polar o rectangular, este análisis requiere dispositivos que cumplan con ciertas características de movimiento y posicionamiento, un dispositivo de carácter académico debe contar con al menos 4 GDL, esto influye en el aprendizaje y uso de herramientas en los laboratorios, con los robots humanoides no se tiene la capacidad de realizar un análisis cinemático debido a que son de tecnología cerrada.

Por este motivo, es necesario brindar una herramienta de desarrollo tecnológico al laboratorio de robótica, para ello es necesario realizar un diseño, análisis y orientación de movimientos cinemáticos de un robot humanoide y de esta forma contar con un dispositivo didáctico para que los estudiantes puedan hacer uso de esta herramienta

Figura 1. Kit Bioloid



Fuente: Robotis

## OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un robot humanoide de dieciocho grados de libertad para el análisis de movimientos articulados como dispositivo didáctico para el laboratorio de robótica de la Escuela Militar de Ingeniería.

## METODOLOGÍA

La metodología, para mejor entendimiento se dividió en 3 fases. La primera fase consistió en analizar las articulaciones, movimientos y restricciones que tiene el kit bioloid para poder aplicar una ingeniería inversa para el mismo.

La segunda fase, siendo la más importante, consistió en realizar el diseño y desarrollo del humanoide, el empleo de herramientas que sustentan los análisis realizados, así como el diseño a través de software CAD (Diseño Asistido por Computadora) y CAM (Manufactura asistida por computadora), también en este capítulo intervienen los mecanismos de robots y el diseño de estos. Además de los componentes electrónicos de control.

En la tercera fase se analizó las características mecánicas y la validación técnica del sistema propuesto, el mismo documenta los diversos aspectos que sustentan la viabilidad en el desarrollo del sistema mecatrónico.

### Materiales

- Filamento PLA
- Impresora 3D
- Componentes electrónicos

### Desarrollo

#### 1. Antecedentes

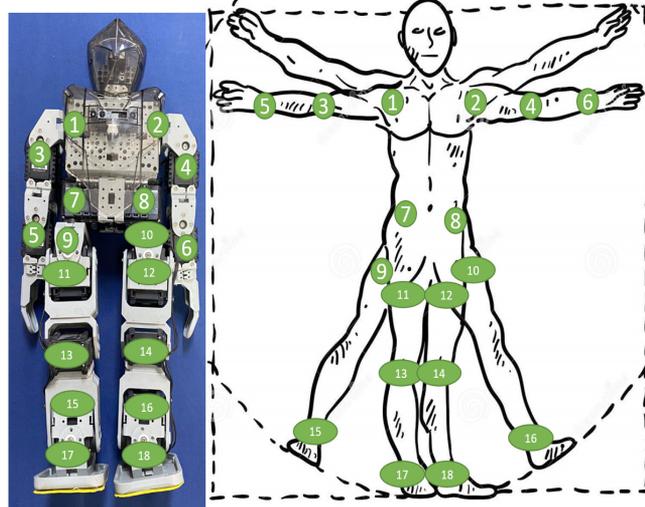
Para poder analizar los movimientos del humanoide se lo dividió en 3: Torso, extremidades superiores y extremidades inferiores.

N°	Segmento	Servomotores	
1	Torso	1, 2, 7, 8	
2	Extremidades Superiores	Derecho	1, 3, 5
		Izquierdo	2, 4, 6
3	Extremidades Inferiores	Derecho	7, 9, 11, 13, 15, 17
		Izquierdo	8, 10, 12, 14, 16, 18

- Torso: Se analizó 4 servomotores que lo conforman siendo la unión con cada extremidad.
- Extremidades Superiores: Se analizó 6 servomotores, 3 por cada extremidad superior teniendo así un movimiento de 3 GDL por cada extremidad superior.

- Extremidades Inferiores: Se analizó 12 servomotores, 6 por cada extremidad dando así 6 GDL por cada extremidad inferior.

Figura 2. Servomotores del robot humanoide



Fuente: Elaboración propia.

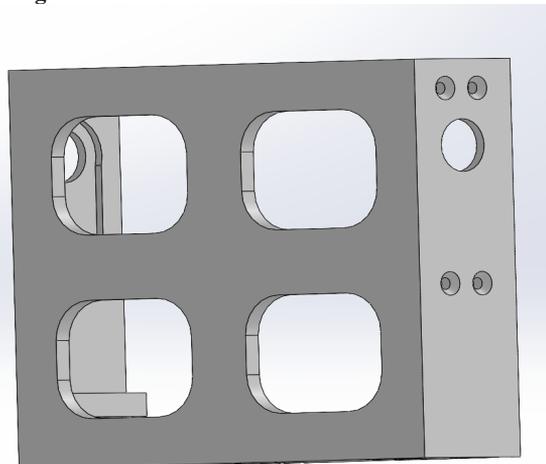
La figura 2, muestra la ubicación de cada servomotor

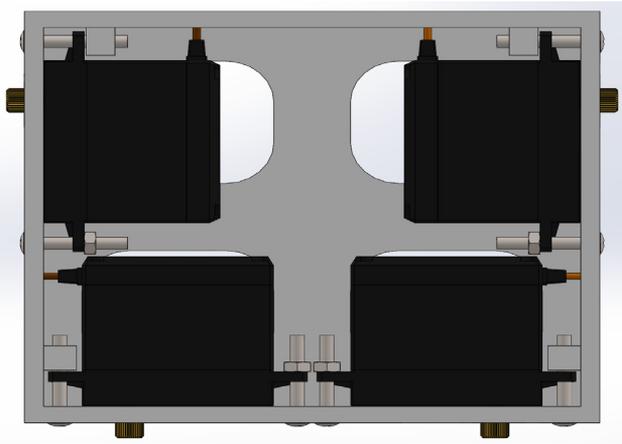
## 2. Diseño y Desarrollo del Humanoide.

### 2.1. Diseño

Primero se empezó con el torso del humanoide posicionando 2 servomotores de forma vertical y 2 de forma horizontal, a partir de las medidas de del servomotor y de la tornillería necesaria para asegurarlos se llegó al diseño final como se muestra en la figura 3.

Figura 3. Servomotores del torso del humanoide

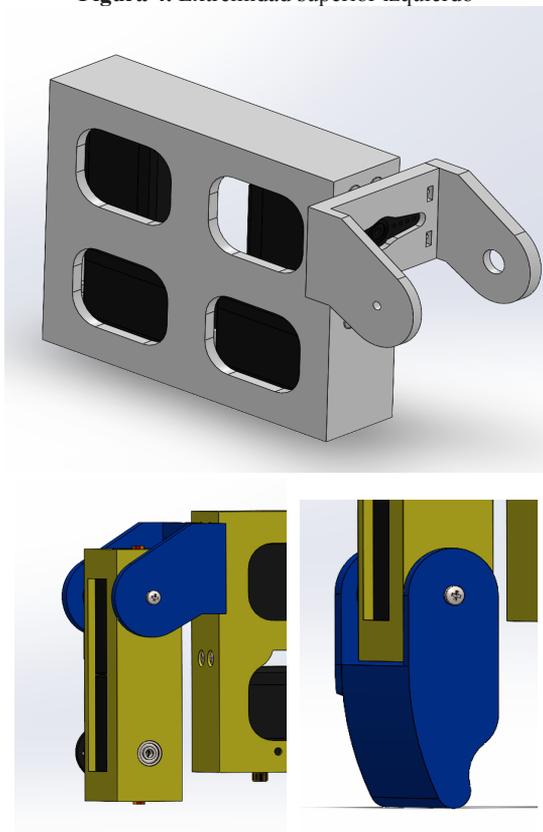




Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se realizó el diseño de las extremidades superiores donde se ubicó 2 servomotores de forma horizontal diseñando un acople para este y una pieza para que encajen los servomotores de esta manera solo se tuvo que realizar un diseño de una extremidad para el humanoide dado a que se aplicaría una simetría para la extremidad opuesta.

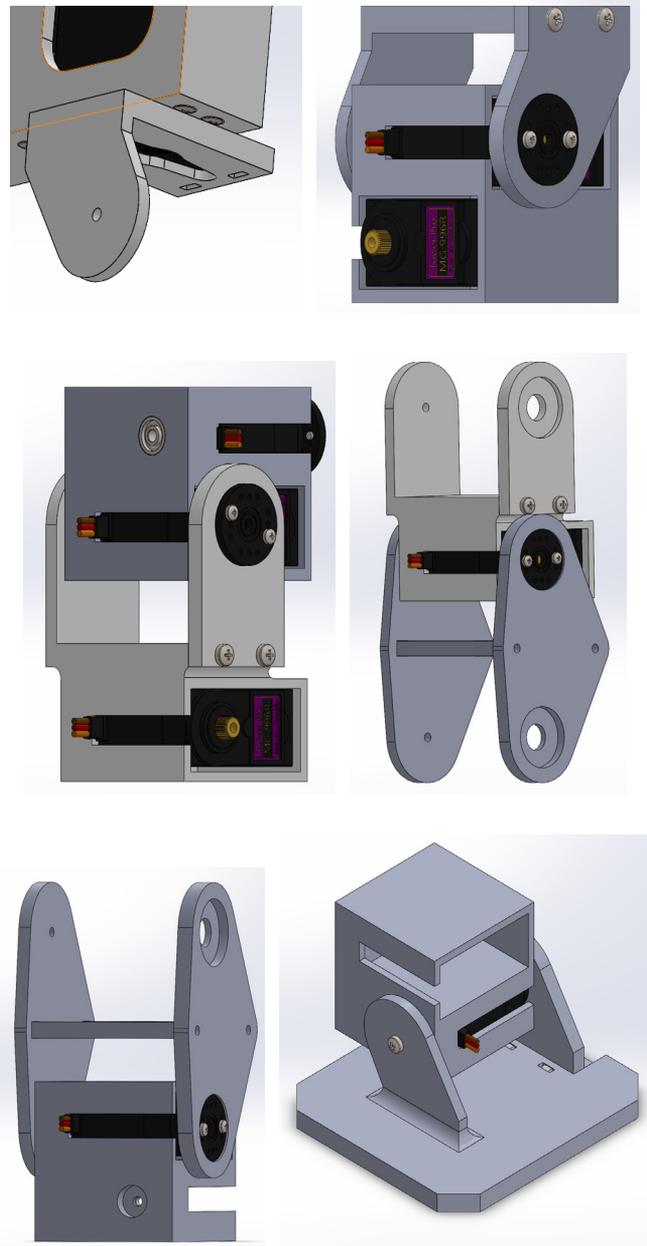
Figura 4. Extremidad superior izquierdo



Fuente: Elaboración propia.

Luego se realizó con el diseño de las extremidades inferiores, este es el más largo dado a que cuenta con 6 GDL, y debido a esto consta de diferentes piezas y uniones como se aprecia en las siguientes figuras

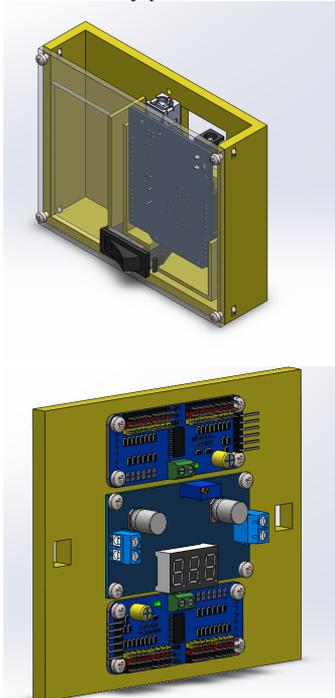
Figura 5. Extremidad inferior izquierdo



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se diseñó la parte frontal y posterior del humanoide donde estarán los componentes electrónicos del humanoide como se ve en la figura

Figura 6. Parte Frontal y posterior del robot humanoide



Fuente: Elaboración propia.

## 2.2. Desarrollo

Con todas las piezas realizadas se realizó un listado de las mismas contando con 21 piezas que constituyen al robot humanoide y de esta manera realizar un tiempo estimado de impresión 3D y el filamento necesario para cada pieza utilizando el laminador CURA ULTIMAKER

Figura 7. Listado de piezas

N°	Nombre	Imagen	Tiempo	Filamento (gr)
1	Acople inferior derecho		2 h 24 m	17
2	Acople inferior izquierdo		2 h 27 m	17
3	Acople superior derecho		2 h 24 m	17
4	Acople superior izquierdo		2 h 27 m	17
5	Mano Derecha		4 h 5 m	21
6	Mano Izquierda		4 h 5 m	21
7	Brazo		7 h 55m	57
8	Conector derecho		5 h 22 m	43
9	Conector izquierdo		5 h 29 m	44

10	Pie derecho		3 h 55 m	33
11	Pie izquierdo		3 h 55 m	33
12	Rodilla derecha		2 h 48 m	22
13	Rodilla izquierda		2 h 48 m	22
14	Torso		8 h 43 m	63
15	Union inferior derecho		6 h 31 m	52
16	Union inferior izquierdo		6 h 32 m	52
17	Union superior derecho		6 h 24 m	52
18	Union superior izquierdo		6 h 29 m	52
19	Soporte PCA y Regulador de Voltaje		7 h 13 m	36

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo un tiempo total de impresión de 107 horas con 55 minutos y 768 gramos de filamento necesario para la implementación del humanoide

Así mismo los componentes necesarios para el robot humanoide, como ser un Arduino Uno, Servomotores, Módulos PCA, Rodamientos, Tornillería, Tuercas, y demás insumos.

Figura 8. Componentes

N°	Nombre	Cantidad
1	Arduino Uno	1
2	Servomotor MG996R	18
3	Modulo PCA 9685	2
4	Rodamiento 623ZZ	14
5	Tornillo M3x9mm	40
6	Tornillo M3x12mm	60
7	Tuercas M3	100
8	Cabeza Circular del Servomotor	12
9	Cabeza Rectangular del Servomotor	4

Fuente: Elaboración propia.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se tiene el diseño final y parte de la cinemática realizada para el humanoide.

Diseño: Se llegó al diseño final implementado como se ve en la figura 9, y posteriormente se realizó un soporte para que pueda estar suspendido de forma vertical mientras no se haga uso del mismo

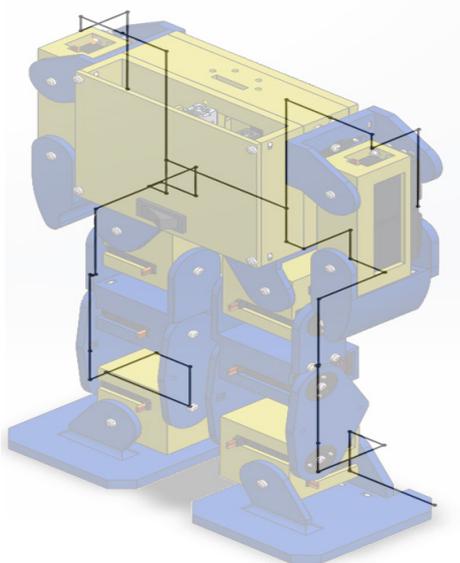
Figura 8. Robot Humanoide



Fuente: Elaboración propia.

Cinemática: Se realizó la cinemática en el programa MATLAB de forma separada para cada extremidad y tomando solo las longitudes de eje a eje debido a la complejidad que se tendría al realizar una cinemática de forma grupal, como se muestra en la figura 9.

Figura 9. Modelado del Robot Humanoide



Fuente: Elaboración propia.

El modelo cinemático de la extremidad superior izquierdo es:

$$\begin{pmatrix} art & \theta & d & \alpha & a \\ 1 & 0 & l_1 & 0 & 0 \\ 2 & \theta_1 & l_2 & 0 & 0 \\ 3 & 90 & l_3 & \alpha_1 & 0 \\ 4 & -90 & 0 & \alpha_2 - \alpha_1 - 90 & l_1 \end{pmatrix}$$

Donde:

La matriz A01 es:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

La Matriz A12 es:

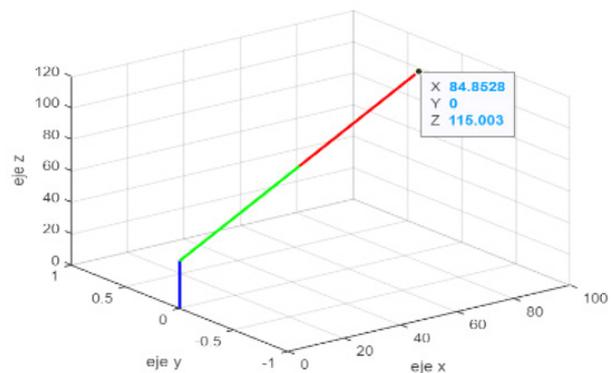
$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

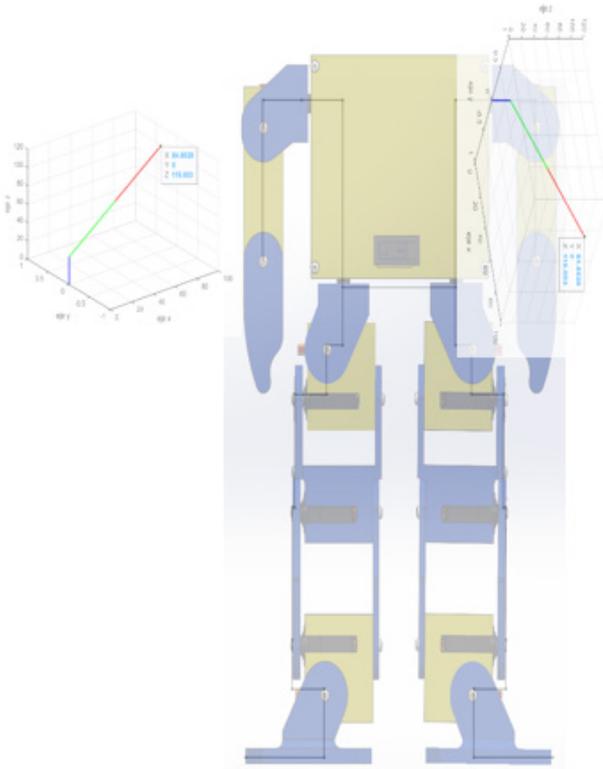
La Matriz A23 es:

$$\begin{pmatrix} 0 & -\cos\left(\frac{\pi\alpha_1}{180}\right) & \sin\left(\frac{\pi\alpha_1}{180}\right) & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sin\left(\frac{\pi\alpha_1}{180}\right) & \cos\left(\frac{\pi\alpha_1}{180}\right) & l_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Y su representación es:

Figura 10. Modelo de la Extremidad Superior Izquierdo





Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente para el modelado de la extremidad inferior izquierdo es:

$$\begin{pmatrix} art & \theta & d & \alpha & a \\ 1 & 90 & l_1 & \alpha_1 & 0 \\ 2 & 0 & l_2 & \alpha_2 & 0 \\ 3 & 0 & l_3 & \alpha_3 & 0 \\ 4 & 0 & l_4 & \alpha_4 & 0 \\ 5 & 0 & l_5 & \alpha_5 & 0 \\ 6 & -90 & l_6 & \alpha_6 & 0 \end{pmatrix}$$

La Matriz A01 es:

$$\begin{pmatrix} 0 & -\cos\left(\frac{\pi\alpha_1}{180}\right) & \sin\left(\frac{\pi\alpha_1}{180}\right) & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sin\left(\frac{\pi\alpha_1}{180}\right) & \cos\left(\frac{\pi\alpha_1}{180}\right) & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

La Matriz A12 es:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\left(\frac{\pi\alpha_2}{180}\right) & -\sin\left(\frac{\pi\alpha_2}{180}\right) & 0 \\ 0 & \sin\left(\frac{\pi\alpha_2}{180}\right) & \cos\left(\frac{\pi\alpha_2}{180}\right) & l_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

La Matriz A23 es:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\left(\frac{\pi\alpha_3}{180}\right) & -\sin\left(\frac{\pi\alpha_3}{180}\right) & 0 \\ 0 & \sin\left(\frac{\pi\alpha_3}{180}\right) & \cos\left(\frac{\pi\alpha_3}{180}\right) & l_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

La Matriz A34 es:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\left(\frac{\pi\alpha_4}{180}\right) & -\sin\left(\frac{\pi\alpha_4}{180}\right) & 0 \\ 0 & \sin\left(\frac{\pi\alpha_4}{180}\right) & \cos\left(\frac{\pi\alpha_4}{180}\right) & l_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

La Matriz A45 es:

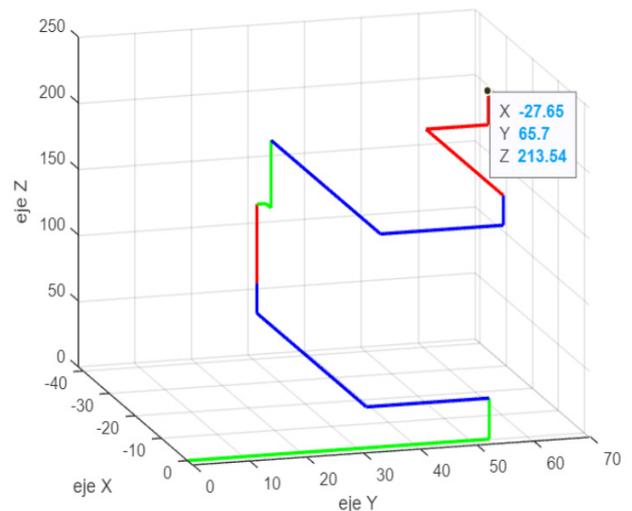
$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\left(\frac{\pi\alpha_5}{180}\right) & -\sin\left(\frac{\pi\alpha_5}{180}\right) & 0 \\ 0 & \sin\left(\frac{\pi\alpha_5}{180}\right) & \cos\left(\frac{\pi\alpha_5}{180}\right) & l_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

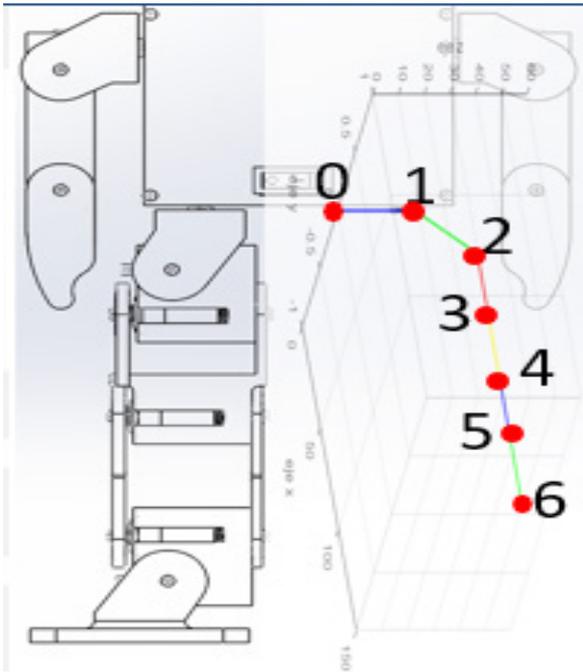
La Matriz A56 es:

$$\begin{pmatrix} 0 & \cos\left(\frac{\pi\alpha_6}{180}\right) & -\sin\left(\frac{\pi\alpha_6}{180}\right) & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sin\left(\frac{\pi\alpha_6}{180}\right) & \cos\left(\frac{\pi\alpha_6}{180}\right) & l_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

El modelo cinemático de la extremidad inferior izquierdo es:

Figura 11. Modelo de la extremidad inferior izquierdo





Fuente: Elaboración propia.

### CONFLICTO DE INTERÉS

El autor declara que no tiene conflictos de interés con la presente investigación.

### AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue posible gracias al apoyo de la Escuela Militar de Ingeniería, Dirección Nacional de Investigación Ciencia y Tecnología – DNICYT y la Carrera de Ingeniería Mecatrónica – EMI La Paz, por incentivar al desarrollo de nuevos conocimientos. Finalmente, un especial agradecimiento al Ing. Eddy Mier Cornejo por su constante apoyo.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ADSL ZONE. (13 de MAYO de 2022). Obtenido de ADSL ZONE: <https://www.adslzone.net/reportajes/tecnologia/impresion-3d/#554745-que-es-la-impresion-3d>
- [2] APA. (2022). APA Dictionary of Psychology. Recuperado el 30 de Marzo de 2022, de American Psychology Association: <https://dictionary.apa.org/motor-function>
- [3] BARRIENTOS ANTONIO, L. F. (28 de Diciembre de 1998). FUNDAMENTOS DE ROBOTICA. MADRID: McGraw-Hill. Obtenido de De Máquinas y Herramientas: <https://www.demaquinasyherramientas.com/mecanizado/introduccion-a-la-tecnologia-cnc>
- [4] BUDYNAS, R. G., & NISBETT, J. K. (2008). DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA DE SHIGLEY. New York: McGraw-Hill.
- [5] RODRIGUEZ, M. B. (2011). INGENIRIA INVERSA APLICADA: METODOLOGIA Y APLICACIONES INDUSTRIALES. MEDELLIN: UNIVERSIDA EAFIT. Obtenido de INGENIRIA INVERSA APLICADA: METODOLOGIA Y APLICACIONES INDUSTRIALES



#### Jose Andrés Cuellar Larico.

Nació en Santa Cruz - Bolivia, es Ingeniero Mecatrónico egresado de la Escuela Militar de Ingeniería – Unidad Académica La Paz, investigador junior en la Dirección Nacional de Investigación, Ciencia y Tecnología DNICYT-EMI.