

Desarrollo de un robot bípedo para fines de robótica educativa en Tecnoacademia Cúcuta

Development of a biped robot for educational robotics purposes in Tecnoacademia Cucuta

MsC. Oscar M.
Duque S¹⁻⁵

MsC. Jorge L.
Fuentes²

MsC. Jair E.
Araujo³

MsC. Dayana N.
Galvis⁴

Ing. Luis F.
Calderón R⁴

oduques@sena.edu.co

jlfuentes@sena.edu.co

jearaujo@sena.edu.co

dngalvis@sena.edu.co

luis.calderon@unipam
plona.edu.co

¹.ORCID 0000-0001-6246-604X, Centro CEDRUM, Grupo CEDRUM NDS-Regional N.D.S, Tecnoacademia Cúcuta, Cúcuta, Colombia

² ORCID 0000-0002-4062-5588, Centro CEDRUM, Grupo CEDRUM NDS-Regional N.D.S, Tecnoacademia Cúcuta, Cúcuta, Colombia

³ ORCID 0000-0003-3869-950X, Centro CEDRUM, Grupo CEDRUM NDS-Regional N.D.S, Tecnoacademia Cúcuta, Cúcuta, Colombia

⁴ ORCID 0000-0002-8200-5969, Centro CEDRUM, Grupo CEDRUM NDS-Regional N.D.S, Tecnoacademia Cúcuta, Cúcuta, Colombia

⁵ Universidad de Pamplona - Programa de Ingeniería Mecatrónica, Villa del Rosario, Colombia

Resumen.

En este documento se presenta el desarrollo de un robot bípedo tipo humanoide denominado "TecnoBot", debido a que fue realizado en colaboración con Tecnoacademia Cúcuta, y el cual quedará implementado en dicho espacio donde será utilizado por los estudiantes de media técnica y bachillerato, e instructores que allí trabajan. Se inicia con el estudio de las morfologías más conocidas de robots tipo humanoides, y el estudio de antecedentes para tener una idea más clara en lo que al diseño refiere, seguido se hace una selección de elementos, un diseño por medio de un software CAD, el modelado cinemático, una serie de secuencias para el control por medio de una apk y finalmente un manual de usuario y unas guías de aprendizaje para los estudiantes de Tecnoacademia Cúcuta.

Palabras Clave: *Apk, Robot bípedo, Tecnoacademia, morfologías, modelado cinemático,*

Abstract

This document presents the development of a humanoid biped robot called "TecnoBot", because it was made in collaboration with Tecnoacademia Cúcuta, and which will be implemented in that space where it will be used by students of technical middle and high school, and instructors who work there. It begins with the study of the most known morphologies of humanoid robots, and the background study to have a clearer idea as far as the design is concerned, followed by a selection of elements, a design through CAD software, kinematic modeling, a series of sequences for control through an apk and finally a user manual and learning guides for students of Tecnoacademia Cúcuta.

Keywords: *Biped robot, Tecnoacademia, morphologies, kinematic modeling, apk.*

I. INTRODUCCIÓN

Con los actuales avances de la robótica y las tecnologías emergentes gran parte de las empresas implementan dentro de ellas como brazos robóticos, sin embargo, se han desarrollado igualmente otro tipo de robots como robots móviles que son implementados en áreas específicas de trabajo y/o tareas específicas. Por otro lado, grandes empresas como Honda con su robot ASIMO o SoftBank Robotics con su robot NAO han diseñado los más actualizados robots tipos humanoides, haciendo tareas que un ser humano puede hacer o incluso ejecutarlas de una manera más precisa y concisa. Sin embargo, no solo las grandes empresas realizan todo tipo de robots, Tecno Academia en sus espacios de trabajo y de enseñanza, permite a los estudiantes explorar todas las ramas de la robótica.

Para el desarrollo de este proyecto fue necesario seguir unos lineamientos los cuales estaban enlazados entre sí para poder avanzar en cada uno de los objetivos planteados, iniciando con un estudio de los robots humanoides más conocidos y antecedentes que ayudaron a tener una idea más clara de lo que se deseaba realizar, seguido a esto se cumplieron ciertos objetivos para llegar finalmente a la realización de un manual de usuario y unas guías de aprendizaje para que los estudiantes aprendan un poco más sobre cómo controlar el robot y sus movimientos. La finalidad de este proyecto es que los estudiantes logren incentivarse más sobre las tecnologías emergentes y sobre todo la robótica.

II. METODOLOGÍA

Con los actuales avances tecnológicos que hay a nivel mundial, se ha ido buscando mejorar el desarrollo de robots humanoides, por lo tanto, grandes empresas como Honda y Sony han ido mejorando y desarrollando robots humanoides capaces de interactuar y comunicarse con las personas; es por esto que, han sido usados en áreas como la medicina, educación, ventas, entre otros.

Robots de la generación E

Honda inicia el desarrollo de sus robots basado en el modelo humano, en la parte inferior del cuerpo (las piernas). Después de una investigación que estudia las formas de caminar crea los robots con características humanoides.

Siendo la serie E (Figura 1) los primeros robots desarrollados por Honda, con E0 (1986) logran realizar una caminata pero con pasos lentos, por medio de E1, E2 y E3 (1987-1991) logran tener una marcha más rápida, llegando a alcanzar el paso normal del ser humano de 3Km/h, sin embargo, por medio de los últimos robots desarrollados de esta serie los robots E4, E5 y E6 (1991-1993) los cuales logran caminar establemente aumentando a 40 cm la longitud de la rodilla y llegan a alcanzar el paso rápido de un ser humano de 4.7Km/h, llegando finalmente con E6 bajar y subir escaleras, caminar sobre pendientes o pisar obstáculos sin perder el equilibrio.



Figura No. 1: Primeros robots bípedos desarrollados por Honda
Fuente: Honda global Robots P1, P2 y P3

Fue entre los años 1992-1997 que Honda decide evolucionar sus modelos e incluir la parte superior del cuerpo humano, creando su primer robot tipo humanoide (Figura 2). P1 adopta el modelo de un cuerpo humano con extremidades

superiores. P2 Honda logró realizar movimientos realistas del cuerpo humano, finalmente, con P3 logran mejorar su tamaño llevándolo a ser del tamaño de un cuerpo humano.



Figura No. 2: Robot P1, P2 y P3. Fuente: Honda global

Robot ASIMO

ASIMO (Figura 3) por sus siglas en ingles “Advanced Step in Innovative Mobility”, según Honda, en su página web afirma que “ASIMO es un robot humanoide bípedo que se ha desarrollado con el objetivo de que los robots coexistan y sean útiles para las personas”, este robot desarrollado por Honda Robotics lleva décadas de trabajo desde sus modelos iniciales el cual fue modificado hasta llegar a la versión que se conoce actualmente.

Sin embargo, tras más de una década de investigación se buscaba mejorar dichos prototipos llegando a su forma más reciente ASIMO.

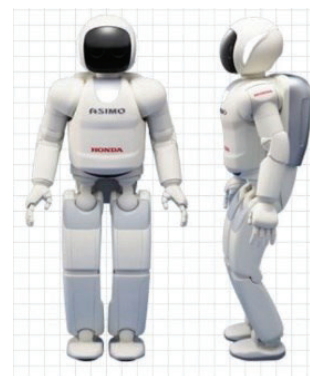


Figura No. 3: Robot ASIMO. Fuente: Honda global

Finalmente, tenemos la evolución de los robots desarrollados por Honda Global (Figura 4), desde su primer robot E0 hasta el más reciente y avanzado de su gama, ASIMO.

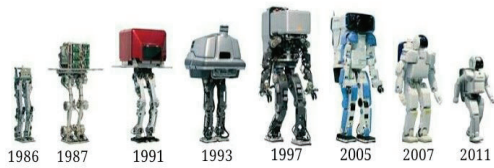


Figura No. 4: Evolución de los robots desarrollados por Honda.
Fuente: Autor.

NAO de SoftBank Robotics

NAO es el primer robot desarrollado por SoftBank Robotics, es una herramienta de programación y se ha convertido en un estándar especialmente en educación e investigación. Actualmente NAO (Figura 5) es usado en áreas como la educación, investigación y en la salud, ya que es un robot capaz de interactuar con los usuarios, lo cual lo hace un buen asistente para las empresas y centros de salud.

En su forma interactiva busca fomentar la inclusión, promoviendo la participación de estudiantes con discapacidades como autismo, trastornos emocionales y de comportamiento haciendo que se reduzca la timidez, la falta de confianza y la frustración al proporcionar una comunicación que pueda mejorar las habilidades, la autoestima y las interacciones positivas.



Figura No. 5: NAO de SoftBank Robotics. Fuente: SoftBank Robotics.

Qrio de Sony

Qrio (pronunciado "Curio", que significa búsqueda de curiosidad, Figura 6) es un pequeño humanoide desarrollado por Sony en Shinbashi, Japón (2003), después de un amplio desarrollo desde su modelo inicial (SDR, Sony Dream Robot) hasta lo que llegó a ser su forma más reciente Qrio.

Sony crea este pequeño humanoide capaz de realizar actividades como escuchar, hablar, cantar, caminar, correr, bailar, reconocer caras y agarrar objetos, lo cual fue excepcionalmente avanzado para su época, lamentablemente el 26 de enero de 2006 Sony anunció que detendría el desarrollo de Qrio.



Figura No. 6: Robot Qrio de Sony. Fuente: IEEE Robots.

Otros robots humanoides

Título: Generación automática de marcas para un robot humanoide.

Autor(es): Cristian Villate, César Peña, Oscar Guadrón

Universidad: Universidad de Pamplona (Colombia).

Año: 2016

Este robot denominado Bioloid (Figura 7), desarrollado en la Universidad de Pamplona posee dieciocho grados de libertad. El algoritmo contempla las restricciones cinemáticas presentes dentro del modelo físico del robot y crea trayectorias de forma estocástica para generar la marcha.

En este trabajo los autores realizan como primera medida el fundamento matemático, en el cual se tienen en cuenta un análisis de movimiento de forma pseudoestática y la cinemática directa por medio del método de desplazamiento Screws ya que por medio del método tradicional Denavit-Hartenberg tendría un grado mayor de complejidad.



Figura No. 7: Diseño mecánico del robot Bioloid. Fuente: Autor.

Título: Modelado y control de un robot bípedo de nueve grados de libertad

Autor: José Emmanuel Torres Gronerth

Universidad: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas

Año: 2009

Este estudio presenta la primera parte de una nueva metodología para obtener un diseño de prótesis de pierna óptimo. El estudio parte del diseño de un robot bípedo de base, de nueve grados de libertad. El robot diseñado es probado y validado en simulación en un espacio de tres

dimensiones, un controlador basado en el modelo del robot es implementado, obteniéndose errores de seguimiento muy pequeños ante consignas articulares de tipo polinomial.

Los autores diseñan un robot bípedo básico compuesto por dos piernas (Figura 8), cada una con cuatro grados de libertad; tres de estos son rotoides, con su eje de giro paralelo a la base (cadera, rodilla, tobillo) y el cuarto con su eje de giro perpendicular a la base, el tronco posee dos grados de libertad, uno de ellos compartido con la cadera, estos dos últimos se utilizan para estabilizar el robot durante el ciclo de caminata.



Figura No. 8: Estructura mecánica del robot bípedo. Fuente: Autor.

Título: Diseño mecánico y análisis cinemático del robot humanoide AXIS.

Autor: Efraín Hernández Franco

Universidad: Universidad Panamericana

Año: 2014

Este trabajo realiza el desarrollo e implementación del robot humanoide AXIS (Figura 9), el cual cuenta con 4 extremidades (20 GDL en total), está construido con aluminio, por lo que es ligero y compacto además de ser fuerte y robusto. AXIS incorpora algoritmos inteligentes que le brindan un alto grado de autonomía para realizar tareas como caminar, girar, agacharse, acostarse y levantarse, además, es capaz de realizar seguimiento y reconocimiento de objetos usando una videocámara en su cabeza.

Para el diseño, el autor tiene en cuenta las dimensiones físicas de los eslabones, el par motor de las articulaciones y la fuente de alimentación. El equilibrio perfecto requiere una gran cantidad de ajustes y experimentación, por lo que AXIS fue desarrollado para ser más ligero, robusto y de gran rendimiento.



Figura No. 9: Robot humanoide AXIS. Fuente: Autor.

III. SELECCIÓN DE MATERIAL Y COMPONENTES ELECTRÓNICOS

Estableciendo criterios para la selección de cada elemento y material para desarrollar el robot se procede a realizar tablas de selección teniendo en cuenta dichos criterios y estableciendo porcentajes de relevancia para estos, llegando finalmente a la selección de los materiales más acordes a los criterios previstos, como se observa en la Tabla 1. Cabe destacar que la selección de dichos elementos tuvo en cuenta los materiales con los que contaba Tecno Academia Cúcuta, ya que por medio de este centro de aprendizaje fue que se hizo posible el desarrollo del robot bípedo.

Selección de material mecánico

Morfología

Para la selección de la morfología se tienen en cuenta 3 tipos de diseño, en el primer diseño se contemplan los robots de la generación E en los cuales solo se tiene en cuenta las extremidades inferiores o “piernas”, los cuales a pesar de ser un diseño sencillo no logra satisfacer la necesidad de que el robot tenga una similitud al cuerpo humano.

El segundo diseño (similar al robot NAO) y tercer diseño (similar al robot AXIS) si contemplan la similitud a lo que sería un robot humanoide, sin embargo, el segundo diseño es un poco más complejo ya que tiene formas y piezas ovaladas, lo que aumenta la dificultad de su desarrollo, por otro lado, se elige realizar una morfología similar a la del robot AXIS con piezas cuadradas y un grado menos de complejidad para su elaboración.

Material de las piezas

Seguido de un estudio de los posibles materiales a usar que puedan tener una facilidad de maleabilidad y puedan ser resistentes se elige el aluminio como el material principal para el desarrollo y la elaboración de las piezas que puedan dar un mejor movimiento al robot.

Eléctrico

En esta se relaciona la fuente de alimentación de todos los elementos electrónicos, por lo que se busca tener una batería que pueda ofrecer una mayor capacidad de voltaje, de los elementos a tener en cuenta se considera la batería de litio polímero (LiPo) de 6000 mAh, ya que esta ofrece una gran cantidad de corriente y voltaje, al igual que soporta una gran carga.

Control

Al igual que en la parte eléctrica, es necesario tener aquellos componentes que puedan ofrecer un mayor rendimiento.

Tarjeta de control

Teniendo en cuenta ciertos criterios se elige la Arduino Mega2560 como la tarjeta principal, ya que ofrece una variedad de pines analógicos y digitales, al igual que mayor cantidad de pines que funcionan para la comunicación serial con otras tarjetas.

Tarjeta de control de servomotores

Debido a que es una cantidad considerable de servomotores a controlar es necesario utilizar una placa que ofrezca un mejor control de estos. Por esta razón, se selecciona la tarjeta de 32 canales por el control de grandes servomotores y funcionamiento correcto de los mismos.

Actuación

Para los elementos de actuación fue necesario considerar ciertas pautas previas a la selección, ya que es necesario considerar factores como el torque para poder realizar dicha selección.

Por medio de la ecuación 1 se plantea un cálculo con valores aproximados para poder hacer la respectiva selección de los elementos de actuación

$$\tau = F * d$$

Ecuación 1: Ecuación para el cálculo del torque.

Donde, τ es el torque a calcular; F es la fuerza aplicada sobre el servomotor y d es la distancia máxima total de los eslabones.

Dicho cálculo se aplica únicamente a las articulaciones que se consideran críticas, como el servomotor del hombro y el servomotor de la cadera.

Teniendo para el brazo:

- Distancia aproximada de 15 cm
- Peso aproximado de los servomotores 165 gr (55 gr cada servomotor, 3 articulaciones)
- Peso aproximado de los eslabones 95 gr

Con esto se reemplaza en la del torque teniendo lo planteado en la ecuación 2 de la siguiente manera:

$$\tau = (0.095 + (0.055 * 3))Kgf * 15cm$$

$$\tau = 3.9 Kgf * cm$$

Ecuación 2: Cálculo del torque en el hombro.

Para la cadera se tiene:

- Distancia aproximada de 16 cm
- Peso aproximado de los servomotores 165 gr (55 gr cada servomotor, 3 articulaciones)
- Peso aproximado de los eslabones 120 gr

Por lo tanto, se reemplaza en la ecuación del torque, llegando a lo planteado en la ecuación 3:

$$\tau = (0.120 + (0.055 * 3))Kgf * 16 cm$$

$$\tau = 4.56 Kgf * cm$$

Ecuación 3: Cálculo de torque en la cadera.

Sin embargo, a estos cálculos es necesario aplicar un factor de servicio el cuál se define en un 15% sin carga y 30% con carga, en este caso ya que no se tendrá que soportar carga se aplica el 15%, teniendo como resultado lo planteado en la ecuación 4 para el brazo:

$$\tau = 3.9 * 1,15$$

$$\tau = 4.485 Kgf * cm$$

Ecuación 4: Torque del brazo aplicando factor de servicio.

Mediante la ecuación 5 se plantea para la pierna:

$$\tau = 4.56 * 1,15$$

$$\tau = 5.244 Kgf * cm$$

Ecuación 5: Torque de la pierna aplicando factor de servicio.

Con lo anterior mencionado se evalúan los posibles servomotores a utilizar, y se eligen los servomotores de piñonería metálica, los cuales tienen un mayor torque y dan mejor soporte por el material de sus piñones.

Con lo mencionado anteriormente se llega finalmente a la Tabla 1, en la cual se ven los elementos finales seleccionados.

Tabla 1: Materiales seleccionados.

Tipo	Elemento/Componente
Mecánico	Morfología tipo robot AXIS (piezas de formas cuadradas)
	Material de aluminio para la elaboración de las piezas
Eléctrico	Batería LiPo de 6000 mAh
Control	Arduino Mega2560
	Tarjeta de 32 canales para el control de servomotores
Actuación	Servomotor de piñonería metálica MG995 Torque: 9.4-11 Kg*cm
	Micro servomotor de piñonería metálica MG 90S

Fuente: Autor.

IV. DISEÑO DEL SISTEMA MECÁNICO

Una vez realizada la selección de elementos se procede a la etapa de diseño de los elementos mecánicos. Para esto se requiere un programa CAD, y se hace uso de SolidWorks ya que es bastante completo y con el cual se puede realizar cualquier tipo de elementos.

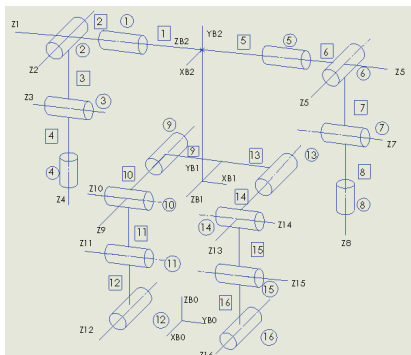


Figura No. 10: Movimiento de las articulaciones. Fuente: Autor.

Primero, es necesario establecer ciertos criterios u objetivos con los cuales el diseño debe cumplir para tener una idea más clara con lo que se quiere para realizar los movimientos más básicos de las articulaciones y como pueden estar acoplados entre sí, dichos criterios se pueden observar de una mejor manera en el Anexo 1.

Mediante estos criterios se empieza a desarrollar cada una de las piezas de los eslabones que permiten la movilidad de las articulaciones.

Los puntos más claves a considerar fueron el dimensionamiento de los eslabones que funcionan como acople entre articulaciones, ya que estos se deben adaptar al tamaño de los servomotores y tener una pequeña holgura para que puedan tener la movilidad suficiente, llegando finalmente a lo visto en la Figura 11 donde se muestran los brazos del robot y la Figura 12.

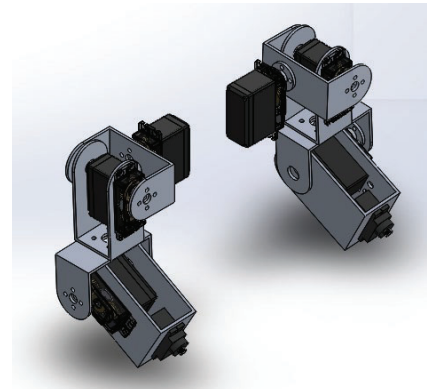


Figura No. 11: Brazos del robot. Fuente: Autor.

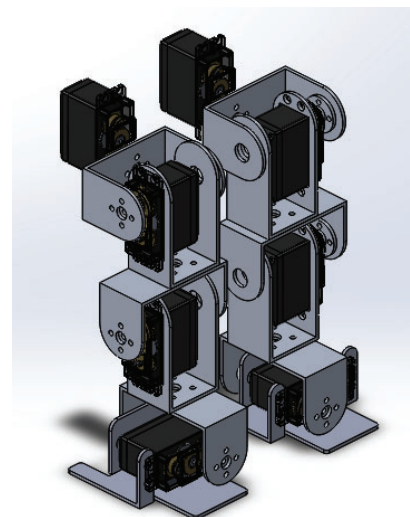


Figura No. 12: Piernas del robot. Fuente: Autor.

Otro factor a tener en cuenta fue el dimensionamiento del torso, ya que en este estará toda la parte de control del robot, como elementos eléctricos y electrónicos, para lo cual se llega a lo visto en la Figura 13.

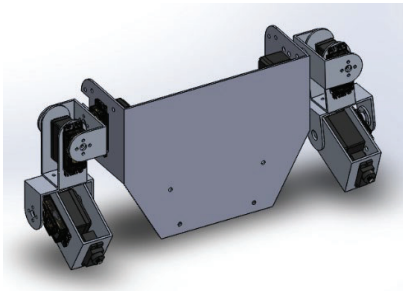


Figura No. 13: Torso y brazos del robot. Fuente: Autor.

Junto a esto se tienen en cuenta otras piezas como tapas del torso y la base en la cual estará soportada la batería, y acoplando todo esto se llega a tener finalmente el diseño del robot mostrado en la Figura 14.

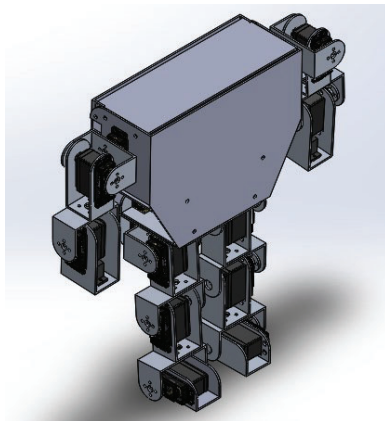


Figura No. 14: Diseño final del robot. Fuente: Autor.

V. MODELO CINEMÁTICO

El modelo cinemático en robótica consiste en localizar o describir en forma geométrica la localización de las articulaciones y algunos puntos de interés del robot. Se define también la cinemática del robot como:

“El estudio del movimiento del mismo con respecto a un sistema de referencia sin considerar las fuerzas que intervienen”[1]

Modelado cinemático

Si bien hay varios métodos de modelado cinemático, se opta por realizar dicho modelado por medio del algoritmo Denavit-Hartenberg, ya que este es una relación entre rotaciones y traslaciones, de esta forma se relaciona cada eslabón junto con el anterior y finalmente se llega a una matriz de transformación homogénea total en la cual esté relacionada el extremo del robot respecto a un punto de referencia o base.

Para tener en cuenta:

S_{B0} , S_{B1} , S_{B2} sistemas bases de los eslabones para el cálculo de los parámetros (ver Figura 10)

B_{PD} , B_{PI} Bases piernas derecha e izquierda

E_{BD} , E_{BI} Extremo de los brazos derecho e izquierdo

S_1 , S_2 , ..., S_n es una forma de simplificar el seno de alguna articulación Ej: $S_1 = \sin(q_1)$

C_1 , C_2 , ..., C_n es una forma de simplificar el coseno de alguna articulación Ej: $C_1 = \cos(q_1)$

Por lo tanto, aplicando dicho algoritmo a la morfología del robot (ver Figura 10) se llegan a los siguientes análisis matemáticos.

Teniendo el sistema base (SB_0) cuya MTH se define mediante la ecuación 6:

$$S_{B0} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ecuación 6: MTH del sistema SB_0 .

Ahora, teniendo la MTH del sistema del extremo de la pierna derecha ($SBPD$) y este a su vez relacionado con la articulación 12, como se muestra la ecuación 7

$$T_{BPD}^{B0} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -J \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T_{12}^{BPD} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -S \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ecuación 7 Relación del extremo de la pierna derecha con el SB_0 .

Teniendo las MTH anteriores es posible empezar a aplicar los parámetros DH 10-13, por lo tanto, se tiene los siguientes parámetros DH para la pierna derecha del robot los cuales se pueden ver en la Tabla

Tabla 2: Parámetros DH pierna derecha.

Articulación	θ_i	d_i	a_i	α_i
12	q_{12}	0	$-M$	$\frac{\pi}{2}$
11	q_{11}	0	$-L$	0
10	$\pi + q_{10}$	0	0	$\frac{\pi}{2}$
9	$-\frac{\pi}{2} + q_9$	$-K + T$	J	0

Fuente: Autor.

Aplicando el parámetro DH 14 se obtienen las matrices que relacionan las articulaciones de la pierna derecha en la ecuación 8.

$$T_{11}^{12} = \begin{bmatrix} C12 & 0 & S12 & -M * C12 \\ S12 & 0 & -C12 & -M * S12 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{10}^{11} = \begin{bmatrix} C11 & -S11 & 0 & -L * C12 \\ S11 & C11 & 0 & -L * S12 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_9^{10} = \begin{bmatrix} -C10 & 0 & -S10 & 0 \\ S10 & 0 & C10 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{B1}^9 = \begin{bmatrix} C(9 - \frac{\pi}{2}) & -S(9 - \frac{\pi}{2}) & 0 & J * C(9 - \frac{\pi}{2}) \\ S(9 - \frac{\pi}{2}) & C(9 - \frac{\pi}{2}) & 0 & J * S(9 - \frac{\pi}{2}) \\ 0 & 1 & 1 & T - K \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ecuación 8: Relación entre las articulaciones de la pierna derecha.

Finalmente, aplicando el punto **DH 15** se obtiene la matriz total que relaciona la pierna derecha con el sistema base, como se muestra en la ecuación 9.

$$T_{B1}^{B0} = T_{BPD}^{B0} * T_{12}^{BPD} * T_{11}^{12} * T_{10}^{11} * T_9^{10} * T_{B1}^9 =$$

$$\begin{bmatrix} nx & ox & ax & px \\ ny & oy & ay & py \\ nz & oz & az & pz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ecuación 9: MTH total de la pierna derecha.

En la cual las primeras dos matrices de transformación de la ecuación 9, es el movimiento de rotación y traslación que habría que realizar para relacionar la pierna derecha al S_{B0} .

Para la pierna izquierda, se hallan una vez más los parámetros DH 10-13 esta vez tomando como referencia el S_{B1} como sistema base de esta pierna, teniendo lo mostrado en la Tabla 3.

Tabla 3: Parámetros DH pierna izquierda.

Articulación	θ_i	d_i	a_i	α_i
S_{B1}^{DH13}	0	0	N	0
13	$-\frac{\pi}{2} + q13$	0	0	$-\frac{\pi}{2}$
14	$q14$	0	P	0
15	$q15$	0	Q	$\frac{\pi}{2}$
16	$q16$	0	R	0

Fuente: Autor.

Se establece la MTH que habría que desplazar el sistema S_{B1} hasta la articulación 13 (ecuación 10) para hallar la matriz de transformación total de la pierna izquierda.

$$T_{13}^{B1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & N \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & K - T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ecuación 10: Relación de la articulación 13 con respecto al S_{B1} .

Posterior a esto, aplicando el punto DH 14 a los parámetros de la Tabla 3 se tienen las matrices de transformación homogénea planteadas en la ecuación 11

$$T_{13}^{B1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & N \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & K - T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} T_{14}^{13} =$$

$$\begin{bmatrix} C(13 - \frac{\pi}{2}) & 0 & -S(13 - \frac{\pi}{2}) & 0 \\ C(13 - \frac{\pi}{2}) & 0 & C(13 - \frac{\pi}{2}) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{15}^{14} = \begin{bmatrix} C14 & -S14 & 0 & L * C14 \\ S14 & C14 & 0 & L * S14 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} T_{16}^{15} =$$

$$\begin{bmatrix} C15 & 0 & S15 & M * C15 \\ S15 & 0 & -C15 & M * S15 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{BPI}^{16} = \begin{bmatrix} C16 & -S16 & 0 & S * C16 \\ S16 & C16 & 0 & S * S16 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ecuación 11: Relación entre las articulaciones de la pierna izquierda.

Para la pierna izquierda, se aplica el punto **DH 15** para calcular la matriz de transformación homogénea total de la pierna izquierda.

$$T_{BPI}^{B1} = T_{13}^{B1} * T_{14}^{13} * T_{15}^{14} * T_{16}^{15} * T_{BPI}^{16} =$$

$$\begin{bmatrix} nx & ox & ax & px \\ ny & oy & ay & py \\ nz & oz & az & pz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ecuación 12: MTH total de la pierna izquierda.

Realizado el respectivo cálculo para las piernas, se procede a continuar con los parámetros para los brazos del robot, como primera medida se realiza la matriz de transformación homogénea del S_{B2} con respecto al S_{B1} , por lo tanto, se tiene la ecuación 13.

$$T_{B2}^{B1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & I \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ecuación 13: Relación del S_{B1} y el S_{B2} .

Definiendo lo anterior, donde el sistema de referencia para los brazos es el SB2, a lo cual se llegan a los siguientes parámetros DH, definidos en la Tabla 4, para el brazo derecho:

Tabla 4 Parámetros DH para el brazo derecho.

Articulación	θ_i	d_i	a_i	α_i
$^{SB2}DH_1$	0	$A + B$	0	0
1	$\frac{\pi}{2} + q1$	0	0	$-\frac{\pi}{2}$
2	$q2$	0	$-C$	$\frac{\pi}{2}$
3	$-\frac{\pi}{2}$	0	0	$\frac{\pi}{2}$
4	$q4$	D	0	0

Fuente: Autor.

$T_{BPI}^{B1} = T_{13}^{B1} * T_{14}^{13} * T_{15}^{14} * T_{16}^{15} * T_{BPI}^{16} =$
 $\begin{bmatrix} nx & ox & ax & px \\ ny & oy & ay & py \\ nz & oz & az & pz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ Se hallan cada matriz correspondiente al brazo derecho, aplicando el punto DH 14, se llega a la ecuación 14.

$$T_1^{B2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & A+B \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} T_2^1 = \begin{bmatrix} C(1+\frac{\pi}{2}) & 0 & -S(1+\frac{\pi}{2}) & 0 \\ S(1+\frac{\pi}{2}) & 0 & C(1+\frac{\pi}{2}) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ecuación 14 Relación entre las articulaciones del brazo derecho.

$$T_3^2 = \begin{bmatrix} C2 & 0 & S2 & -C * C2 \\ S2 & 0 & -C2 & -C * S2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} T_4^3 = \begin{bmatrix} C(3+\frac{\pi}{2}) & 0 & S(3+\frac{\pi}{2}) & 0 \\ S(3+\frac{\pi}{2}) & 0 & -C(3+\frac{\pi}{2}) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} T_5^4 = \begin{bmatrix} C(3+\frac{\pi}{2}) & 0 & S(3+\frac{\pi}{2}) & 0 \\ S(3+\frac{\pi}{2}) & 0 & -C(3+\frac{\pi}{2}) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{EBD}^4 = \begin{bmatrix} C4 & -S4 & 0 & 0 \\ S4 & C4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & D \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ecuación 14 Continuación.

Cuya matriz de transformación homogénea total por medio del punto DH 15 se llega a la ecuación 15 para el brazo

derecho, la cual relaciona el extremo del brazo con el sistema S_{B1} :

$$T_{EBD}^{B1} = T_{B2}^{B1} * T_1^{B2} * T_2^1 * T_3^2 * T_4^3 * T_{EBD}^4 =$$

$$\begin{bmatrix} nx & ox & ax & px \\ ny & oy & ay & py \\ nz & oz & az & pz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ecuación 15 MTH total del brazo derecho

Finalmente, para el brazo izquierdo, aplicando los puntos DH 10-13 se llegan a los parámetros definidos mediante la Tabla 5.

Tabla 5 Parámetros DH para el brazo izquierdo.

Articulación	θ_i	d_i	a_i	α_i
$^{SB2}DH_5$	0	$-(E \pm F)$	0	π
5	$-\frac{\pi}{2}$	0	0	$\frac{\pi}{2}$
6	$q6$	0	$-G$	$-\frac{\pi}{2}$
7	$\frac{\pi}{2} + q7$	0	0	$\frac{\pi}{2}$
8	qH	$-H$	0	0

Fuente: Autor.

A lo cual se llega a la ecuación 16 una vez aplicado el punto DH 14, para lo que se tiene:

$$T_5^{B2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -E-F \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ecuación 16 Relación entre articulaciones del brazo izquierdo.

$$T_6^5 = \begin{bmatrix} C(5-\frac{\pi}{2}) & 0 & S(5-\frac{\pi}{2}) & 0 \\ S(5-\frac{\pi}{2}) & 0 & -C(5-\frac{\pi}{2}) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} T_7^6 = \begin{bmatrix} C6 & 0 & -S6 & -G * C6 \\ S6 & 0 & C6 & -G * S6 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} T_8^7 = \begin{bmatrix} C(7+\frac{\pi}{2}) & 0 & S(7+\frac{\pi}{2}) & 0 \\ S(7+\frac{\pi}{2}) & 0 & -C(7+\frac{\pi}{2}) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} T_{EBI}^8 = \begin{bmatrix} C8 & -S8 & 0 & 0 \\ S8 & C8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -H \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ecuación 16 Continuación.

Llegando finalmente a la MTH total que define la relación entre el brazo izquierdo con el S_{B2} , llegando a la ecuación 17.

$$T_{EBI}^{B1} = T_{B2}^{B1} * T_5^{B2} * T_6^5 * T_7^6 * T_8^7 * T_{EBI}^8 =$$

$$\begin{bmatrix} nx & ox & ax & px \\ ny & oy & ay & py \\ nz & oz & az & pz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ecuación 17 MTH total del brazo izquierdo.

Sin embargo, las MTH totales anteriores solo están relacionando cada extremidad del robot con respecto a sus sistemas bases correspondientes, con esto hecho, es posible relacionar cada una de estas extremidades al sistema S_{B0} , y lo cual se compone mediante la multiplicación de matrices de las siguientes ecuaciones.

La matriz que relaciona la pierna izquierda al S_{B0} , se compone mediante la multiplicación de matrices de la ecuación 18.

$$T_{BPI}^{B0} = T_{B1}^{B0} * T_{BPI}^{B1}$$

Ecuación 18 Relación de la pierna izquierda al S_{B0} .

Matriz de transformación que relaciona el brazo derecho al sistema S_{B0} , se observa en la ecuación 19.

$$T_{EBD}^{B0} = T_{B1}^{B0} * T_{EBD}^{B2}$$

Ecuación 19 Relación del brazo derecho al S_{B0} .

Y finalmente se relaciona el brazo izquierdo al S_{B0} mediante la ecuación 20.

$$T_{EBI}^{B0} = T_{B1}^{B0} * T_{EBI}^{B2}$$

Ecuación 20 Relación del brazo izquierdo al S_{B0} .

Validación del modelo matemático

Una vez realizado el respectivo análisis matemático y el ensamble mecánico de los componentes del robot, se procede a realizar una breve validación de dicho modelo cinemático para verificar que este funcione, para esto por medio de un código de Matlab y mediante una simulación por medio de este software, se hacen unas pequeñas mediciones y se realiza una comparación entre lo simulado y lo medido físicamente.

Se realiza una serie de posicionamiento de los brazos y se realiza una tabla para la comparación de estos, ver Tabla 6:

Teniendo los valores de la Tabla 6, es posible calcular el porcentaje de error del modelo cinemático respecto al valor real medido, por medio de la ecuación 21.

$$\%e = \frac{Vesperado - Vreal}{Vesperado} * 100$$

Ecuación 21: Ecuación para cálculo del porcentaje de error.

Tabla 6: Validación del modelo cinemático.

Extremidad	Prueba	Ángulo (°)				Medidas (cm)					
						Medido			Esperado		
		q1	q2	q3	q4	X	y	z	x	y	z
Brazo derecho	1	90	0	0	0	12,5	-13	31	13	-14	30
	2	90	90	0	0	-1	-28	31	-0,8	-28	30
	3	45	0	45	0	10,3	14,4	24	11	-14	25
Brazo izquierdo	4	-90	0	0	0	12,3	13,5	30	13	-14	30
	5	-90	90	0	0	-0,9	28,5	30	-0,8	28	30
	6	-45	0	-45	0	10,5	13,7	24	11	14	25

Fuente: Autor.

Aplicando esta ecuación a los valores medidos es posible calcular el porcentaje de error como se plantea en al Tabla 7.

Tabla 7: Porcentaje de error de las mediciones.

Prueba	Error (%)		
	X	Y	Z
1	1,57	5,00	5,76
2	25,00	1,82	3,39
3	1,90	2,86	3,61
4	3,15	3,57	1,69
5	12,50	3,64	2,71
6	0,00	2,14	4,82

Fuente: Autor.

Como se puede ver en la tabla 7, se tienen dos valores que superan el 10% de error, esto es debido a que el valor esperado es demasiado pequeño y cualquier mínima variación de este hace que sea un porcentaje de error considerable.

Tabla 8: Repetibilidad del extremo del brazo.

Prueba	Medición (cm)			Esperado
	X	Y	Z	
1	12,3	-13,1	31,5	X=12,7
2	12	-13,3	31	
3	12,3	-13,4	31,3	Y=-14
4	12,2	-13,3	30,9	
5	12,5	-13,5	31,2	Z=29,5
Desviación	0,182	0,148	0,239	

Fuente: Autor.

Por medio de la Tabla 8 es posible verificar que no hay gran dispersión de datos con respecto a la media, esto quiere decir que se tienen unas mediciones precisas, sin embargo, no son del todo exactas, para lo cual se grafica esto para el eje X (Figura 15), eje Y (Figura 16) y eje Z (Figura 17).

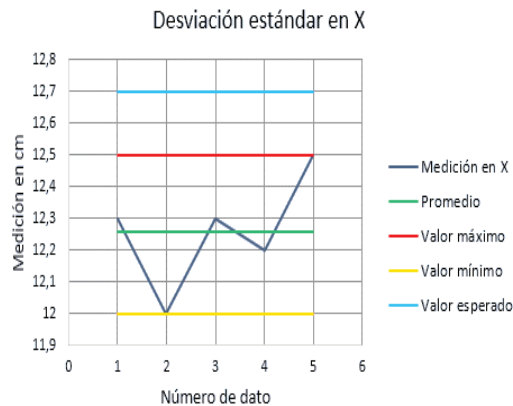


Figura No. 15: Desviación de datos en X. Fuente: Autor.

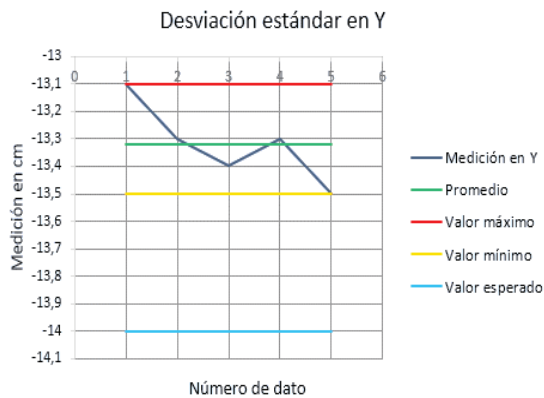


Figura No. 16: Desviación de datos en Y. Fuente: Autor.

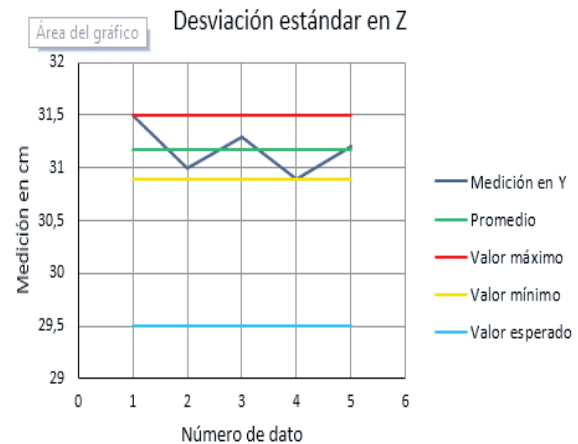


Figura No. 17: Desviación de datos en Z. Fuente: Autor.

Creación de secuencias por Matlab.

Teniendo el modelo cinemático del robot mediante matrices de transformación homogénea, es necesario realizar una simulación por medio de software, en este caso Matlab, para validar que dicho modelado matemático funciona correctamente, por lo tanto, por medio de Matlab es posible realizar simulaciones de movimiento de los eslabones, incluyendo en este código el modelo matemático y otras funciones para hacer posible la visualización gráfica.

Para esto es necesario realizar secuencias de movimientos, es decir, se van posicionando las articulaciones mediante las secuencias realizando primero el balanceo hacia la derecha (Figura 18), seguido a esto se da avance a la pierna izquierda para el avance del robot (Figura 19) y para finalmente equilibrar de nuevo el robot hacia la izquierda (Figura 20).

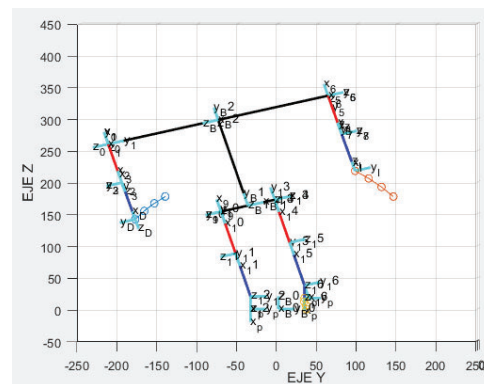


Figura No. 18: Balanceo a la derecha del robot. Fuente: Autor.

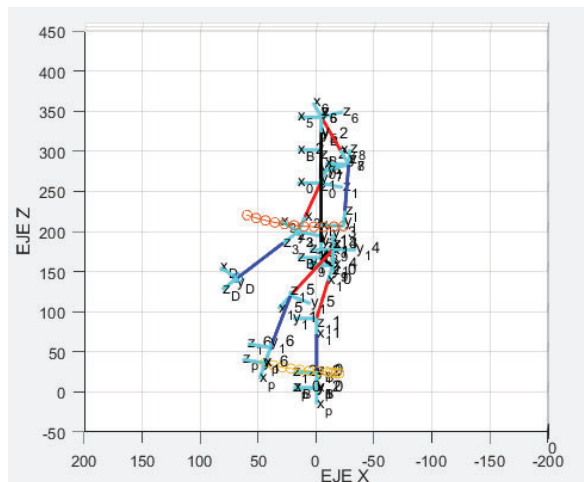


Figura No. 19: Avance de la pierna izquierda. Fuente: Autor.

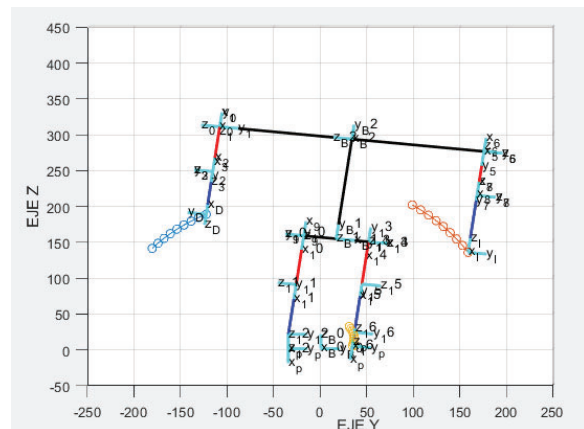


Figura No. 20: Equilibrio a la izquierda para avanzar el robot. Fuente: Autor.

Creación de secuencias por Arduino

A pesar de que se hizo una previa visualización de movimientos mediante Matlab, al programar el robot fue necesario la modificación de dichos ángulos previamente simulados por este software, a pesar de que solo se simuló el movimiento para una pierna, se tendría en cuenta el mismo movimiento para la siguiente extremidad, de esta forma, dicha simulación dio una idea más clara de que movimientos deberían de ejecutarse y que articulaciones debían posicionarse para permitir la marcha del robot.

En las siguientes figuras se evidencia las secuencias de movimiento realizadas por el robot físicamente, permitiendo corroborar lo hecho en la simulación, a lo cual se tiene el avance de la pierna izquierda (Figura 21) y el avance de la pierna derecha (Figura 22)

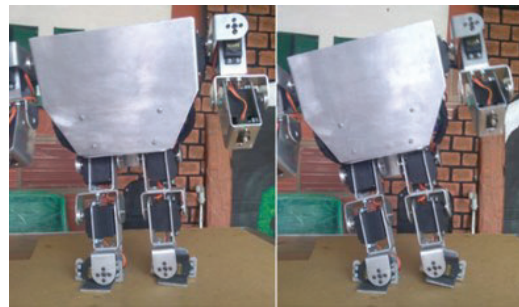


Figura No. 21: Avance de la pierna izquierda del robot. Fuente: Autor.

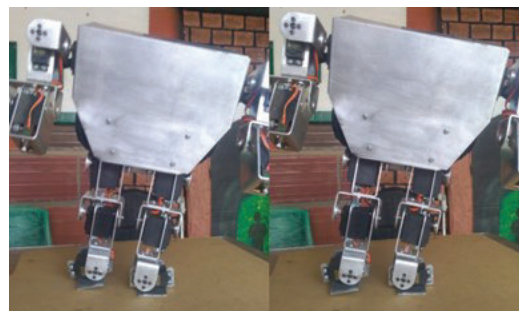


Figura No. 22: Avance de la pierna derecha del robot. Fuente: Autor.

VI. IMPLEMENTACIÓN

Una vez realizado todo lo anteriormente mencionado se procede a la realización de una interfaz, en este caso una aplicación para que los estudiantes de Tecno Academia Cúcuta puedan controlar el robot, ya que este proyecto fue realizado para que los estudiantes de dicho centro de aprendizaje se incentivarán más acerca de la robótica y una de las tantas ramas que esta posee, a lo cual dichos estudiantes podrán interactuar más con el robot al igual que puedan aprender a controlarlo.

Se realizan dos guías de aprendizaje las cuales constan de lo siguiente:

- Guía 1: Aprender sobre el control del robot, cómo manejar la aplicación, cómo conectar vía bluetooth el robot para dicho control.
- Guía 2: Conocimiento básico sobre la programación de Arduino y acerca de las funciones y comandos necesarios para realizar el movimiento de las extremidades superiores (brazos) y de esta forma puedan controlar el robot.

Como medida final se realiza un manual de usuario para que todo aquel que desee hacer uso del robot pueda hacerlo sin necesidad de tener amplios conocimientos sobre robótica, en dicho manual se plasma todo lo relacionado con el robot, su funcionamiento, conexión, cambio de piezas y mantenimiento de ser necesario.

IV. CONCLUSIONES

El desarrollo de morfologías bípedas ha avanzado desde sus inicios, en los que inicialmente se tenían en cuenta únicamente las partes inferiores del cuerpo humano y en la actualidad hay una gran variedad de cambios en el diseño de estos, lo cual permite tener una idea más clara y concisa de lo que se deseaba realizar sin tener un costo elevado de elaboración de las formas de sus eslabones. Mediante el estudio realizado de las morfologías es posible conocer aquellas que puedan cumplir más con lo esperado, por medio de tablas, y estableciendo criterios para la selección, es posible saber cuál es la que puede ser más acorde con el desarrollo del robot bípedo al igual que tener en cuenta el factor económico para la elaboración de las piezas. Por otro lado, Tecno Academia Cúcuta cuenta con una gran variedad de elementos electrónicos los cuales mediante tablas permite la selección de los elementos que pueden llevar a cabo de mejor manera el desarrollo del robot, viéndose todo esto en una tabla final en la que se plasma todos los elementos elegidos para la elaboración de este.

El establecer los elementos de actuación y de control permite establecer las características dinámicas, físicas, eléctricas y demás, de manera que sea posible perfilar todos estos elementos en la relación de diseño como a nivel electrónico, el rango posible del robot, el posible consumo de los componentes electrónicos para la selección de la batería, entre otros factores a considerar para la elaboración del diseño mecánico. Sin embargo, hay factores que no se logran tener en cuenta a lo que se ve necesario la modificación del diseño del robot, por este motivo se realiza un rediseño de las articulaciones al igual que unas nuevas piezas para poder lograr el movimiento esperado y de esta forma el robot pueda realizar las secuencias de marcha de manera correcta, buscando también una mayor área de soporte del robot.

La realización del modelo cinemático permite obtener una representación matemática por medio de la multiplicación de matrices de transformación homogénea en la cual estén relacionados los eslabones entre sí por medio de la concatenación de dichas matrices y así poder ser usado en la simulación. Por ende, dado que un modelo cinemático en robótica permite conocer la ubicación de los sistemas de cada eslabón y estos estar relacionados entre sí a sistemas de referencia ubicados en el cuerpo del robot para seguidamente, por medio de concatenación de matrices, relacionar todos los sistemas o eslabones a un sistema de referencia base ubicado

en la parte central entre los pies del robot. Todo lo anterior mencionado se ve reflejado mediante la simulación realizada, en la cual es usado el modelo matemático como una representación de movimiento para de esta manera realizar las secuencias del robot bípedo, este modelo puede servir de igual manera para futuras mejoras del robot como lo son el generar el modelo cinemático inverso, realizar el análisis dinámico, pudiendo evolucionar y permitir de esta manera tener un mayor control sobre el robot y sus movimientos.

Por medio de la simulación es posible observar qué secuencia de movimientos debía realizarse para que el robot pudiera avanzar, tener la utilidad de poder usar la simulación para emular demás movimientos que se deseen realizar al igual que poder realizar la distribución de los centros de masa en caso de que se realicen futuras mejoras, sin embargo, los ángulos plasmados en la simulación no fueron los mismos que los expresados en los posicionamientos de los servomotores en el código de programación ya que estos fueron hallados mediante pruebas de ensayo y error, variando la posición de los servomotores y el tiempo de ejecución de dicha orden. El hallar dichos ángulos de posicionamiento fue complejo debido a que los servomotores no son muy robustos por lo que hace que su eje y los eslabones acoplados a él se muevan fácilmente, esto influyó significativamente al momento de realizar el ciclo de marcha ya que el robot puede perder el equilibrio, pero a pesar de esto se logró hallar una combinación que pudiese disminuir el riesgo de pérdida de equilibrio, pero no eliminando totalmente dicho riesgo.

Todo diseño al terminar su versión de prototipado debe asegurarse que pueda ser usado para el usuario final, por ende, en este trabajo se vincula un manual de uso de manera que se garantice el registro a perpetuidad de las opciones de uso y correcta manipulación, garantizando que el funcionamiento se dé de manera autónoma por el mismo usuario pudiendo plasmar de igual manera todo lo relacionado con el robot, junto a esto unas guías para que los aprendices del SENA aprendan a hacer el correcto uso del robot por medio de control inalámbrico o USB a través de comunicación serial.

RECONOCIMIENTOS

Reconocimientos a Tecnoacademia Cúcuta por la facilitación de los componentes eléctricos y electrónicos utilizados en el desarrollo del robot y a MsC. Oscar Manuel Duque Suarez por la gestión brindada para hacer esto posible y la asesoría prestada durante todo el desarrollo del proyecto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Barrientos, A., Peñin, L., Balaguer, C., Aracil, R. (2007). Fundamentos de Robótica 2ª edición. España: mcgraw-hill,. ISBN: 978-84-481-5636-7.

- [2] Hernández, E. (2014). Diseño Mecánico y Análisis Cinemático del Robot Humanoide AXIS. México. Universidad Panamericana. Laboratorio de mecatrónica y control de sistemas.
- [3] Torres, J. (2009). Diseño y construcción de un robot bípedo caminante. Trabajo de grado. Universidad Peruana de ciencias aplicadas. Facultad de Ingenierías.
- [4] Villate, D., Peña, C., Gualdrón, O. (2016). Generación automática de marchas para un robot humanoide. Universidad de Pamplona. Facultad de Ingenierías y Arquitectura.
- [5] Duque, O., Niño, M., & Puentes, A. (2018). 01-Diseño steam aplicado en el control de movimiento y simulación 3d con cinemática completa. conciencia y técnica: Revista Tecnoacademia, (2). Recuperado a partir de <http://revistas.sena.edu.co/index.php/conciencia/article/view/1951>
- [6] Duque, O., Niño, M., & Puentes, A. (2018). Control de movimiento y simulación 3D con cinemática completa de un prototipo de mano robotizada de 5 falanges de 5 GDL en el software CAD CATIA de Dassault Systems. Revista Sennova: Revista Del Sistema De Ciencia, Tecnología E Innovación, 3, 104-116. <https://doi.org/10.23850/23899573.1626>
- [7] C. Botero, J. Montoya, N. Sanchez, and F. Vergara, “Desarrollo de un manual de construcción y prototipo de un caminador Pasivo,” Bogotá :, 2014.
- [8] D. J. Marín Lancheros, “MODELAMIENTO DINÁMICO EN 3D Y DISEÑO DE OBSERVADOR PARA UN CAMINADOR BÍPEDO PASIVO,” Universidad de los Andes, 2016.
- [9] S. Montazeri Moghadam, M. Sadeghi Talarposhti, A. Niaty, F. Towhidkhah, and S. Jafari, “The simple chaotic model of passive dynamic walking,” Nonlinear Dyn., vol. 93, no. 3, pp. 1183–1199, 2018.
- [10] S. M. González, J. M. S. Ramírez, and E. J. R. Avella, “Técnicas de control para el balance de un robot bípedo: un estado del arte,” Rev. Tecnura, vol. 19, no. 43, pp. 139–162, 2015.
- [11] SONY, “Sony Global - Product & Technology Milestones-Robot,” 2015. [Online]. Available: <http://www.sony.net/SonyInfo/CorporateInfo/History/sonyhistory-j.html>. [Accessed: 30-Sep-2015].
- [12] A. Sklar, T. Ing, G. Tejera, I. R. Canetti, and I. C. Martínez, “Construcción de Robots Bípedos Damián Lezama,” 2005.
- [13] HONDA, “ASIMO by Honda | The World’s Most Advanced Humanoid Robot,” 2015. [Online]. Available: <http://asimo.honda.com/default.aspx>. [Accessed: 30-Sep-2015].
- [14] H. Ono, T. Sato, and K. Ohnishi, “Balance recovery of ankle strategy: Using knee joint for biped robot,” 2011 1st Int. Symp. Access Spaces, pp. 236–241, 2011.
- [15] T.-H. S. Li, Y.-T. Su, S.-H. Liu, J.-J. Hu, and C.-C. Chen, “Dynamic Balance Control for Biped Robot Walking Using Sensor Fusion, Kalman Filter, and Fuzzy Logic,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 59, no. 11, pp. 4394–4408, 2012.
- [16] C. Chevallereau and Y. Aoustin, “Self-stabilization of 3D walking via vertical oscillations of the hip,” in Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2015.