

# Diseño y Construcción de un Prototipo de Robot Bípido Autónomo con Desplazamiento Dinámico para el Laboratorio de Robótica Industrial de la ESPE Extensión Latacunga.

*Marco Singaña, Jacqueline Llanos, Eduardo Morillo, Juan Portero*

*Ingeniería Mecatrónica. Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.*

*Latacunga, Ecuador.*

*masingania@espe.edu.ec*

*jacqueline.llanos.ec@gmail.com*

*eamp2289@gmail.com*

*jcportero89@hotmail.com*

**Resumen** – El presente proyecto muestra la creación de un robot bípido, para conformar una base de conocimientos sólida para el estudio y desarrollo de la cinemática, dinámica y modelado de este tipo de robots. La concepción del robot bípido se dio mediante una ardua investigación que tiene como principal característica el enlace de varios programas que fueron dando forma a cada uno de los sistemas. Los resultados obtenidos en el proyecto permiten concluir que se creó un robot bípido capaz de caminar autónomamente y detectar los obstáculos que se encuentren frente a él, realizando una acción para esquivar los mismos. Los complementos Robotics Toolbox y SimMechanics de Matlab, en conjunto con la tarjeta electrónica Arbotix-M y los servomotores Dynamixel AX-12A representan un acierto significativo de la investigación para el desarrollo de aplicaciones robóticas.

**Palabras clave:** Robótica, robot bípido, prototipo, cinemática, modelado.

**Abstract** – This project shows the creation of a biped robot, to form a solid base of knowledge for the study and development of kinematics, dynamics and modeling of this type of robots. The conception of the biped robot occurred through an arduous investigation that has as main characteristic the link of several programs that were shaping to each one of the systems. The results obtained in the project allow to conclude that the biped robot created is able to walk independently and detect obstacles that are in front of him, realizing an action to avoid the same ones. The complements Robotics Toolbox and SimMechanics of Matlab in conjunction with the electronic card Arbotix-M and Dynamixel AX-12A servomotors represent a significant success of the research for the development of robotic applications.

**Key word:** Robotics, biped robot, prototype, kinematics, modeling.

## I. INTRODUCCIÓN

En el vasto mundo de la robótica hay varias áreas que aun están en investigación o que no se han desarrollado completamente, además que frente al avance latente de diversos prototipos de robots bípedos a nivel mundial, los cuales tratan de imitar o asemejar sus acciones y movimientos al del ser humano; se presenta este artículo que describe el diseño y la construcción de un robot bípido.

## II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### A. Robots Bípedos

Los robots bípedos forman parte de la robótica móvil con patas, estos robots tienen dos extremidades inferiores para realizar su desplazamiento, se observa un ejemplo de este tipo de robots en la Fig. 1.



Fig. 1. Ejemplo de robot bípido.

Los robots bípedos más conocidos son los humanoides, al intentar imitar el comportamiento del caminado, acciones efectuadas y apariencia del ser humano, que por excelencia es el ser vivo que mejor aprovecha la locomoción bípida. La caminata bípida es una de las más complicadas al momento de imitar en comparación con cuadrúpedos o hexápodos debido a la complejidad de mantener el equilibrio.

Además hay que aclarar que un robot bípedo no necesariamente puede ser un robot humanoide, pero todos los robots humanoides son robots bípedos.

### B. Locomoción de Robots Bípedos

Se realiza de forma similar a la de un ser humano, es decir, mediante una concatenación de movimientos controlados en respuesta a un sistema retroalimentado en tiempo real; para los robots bípedos su locomoción se da de dos maneras:

- Locomoción estática o caminata pasiva: Ésta caminata hace referencia a sistemas robóticos que caminan sin necesidad de control ni de actuadores, es así que su movimiento se genera únicamente por acción de la gravedad y a través de una pendiente en el piso [1].
- Locomoción dinámica o caminata activa: Se la relaciona directamente con robots que poseen un sistema de control complejo, utilizan actuadores y sensores; así el robot desarrolla tareas complejas como caminar en diferentes direcciones, subir escalones o permanecer en una pierna [1].

### C. Cinemática de Robots Bípedos

La cinemática del robot estudia el movimiento del mismo con respecto a un sistema de referencia [2]. Debido a que en el proyecto se desarrolló la cinemática directa de robot se detalla en concepto de la misma.

- Cinemática directa: Las posiciones de las articulaciones ya están determinadas y el problema radica en encontrar la configuración del efector final [3]. Existen varios métodos para encontrar la cinemática directa de un robot, entre los más conocidos se tienen: las relaciones geométricas, el método por cuaternios y las matrices de transformación homogénea.

### D. Dinámica de Robots Bípedos

Se ocupa de la relación entre las fuerzas que actúan sobre un cuerpo y el movimiento que en él se origina, por lo tanto, el modelo dinámico tiene por objetivo conocer la relación entre el movimiento del robot y las fuerzas que involucran el mismo [2].

Esta relación se la conoce como el modelo dinámico, el mismo que relaciona matemáticamente:

- La localización del robot definida por sus variables articulares o por las coordenadas de localización de su extremo, y sus derivadas: velocidad y aceleración.
- Las fuerzas y pares aplicados en las articulaciones o en el extremo del robot.
- Los parámetros dimensionales del robot, como longitud, masas e inercias de sus elementos.

## III. DISEÑO DEL ROBOT BÍPEDO

### A. Parámetros de Diseño

En base al estudio del arte realizado se establecen los parámetros de diseño del robot bípedo.

- Tamaño: Entre 25 y 50 [cm] de altura.
- Peso: Entre 0.75 y 1.5 [Kg].
- Grados de libertad: 10 para las extremidades inferiores.
- Comunicación: Por cable o inalámbrica.
- Voltajes: Entre 3 y 12 [V].

### B. Diseño de la Estructura del Robot Bípedo

Las piezas de la estructura del robot bípedo nacen de la creatividad e inventiva de los autores del proyecto; mediante la observación de robots humanoides de las marcas Bioid, NAO y Kondo se comprendió el funcionamiento de cada uno de los grados de libertad y la forma de las extremidades, de esta manera la estructura del robot bípedo queda conformada como se muestra en la Fig. 2.

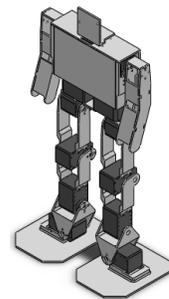


Fig. 2. Ensamblaje del robot bípedo.

### C. Estudio Estático de la Estructura del Robot Bípedo

Se realizó este estudio en el paquete SolidWorks Simulation, asignando el material ABS a las piezas que conforman la estructura del robot bípedo y a los servomotores se les asignó como material un polímero, en la Fig. 3 se muestran los resultados de este análisis.

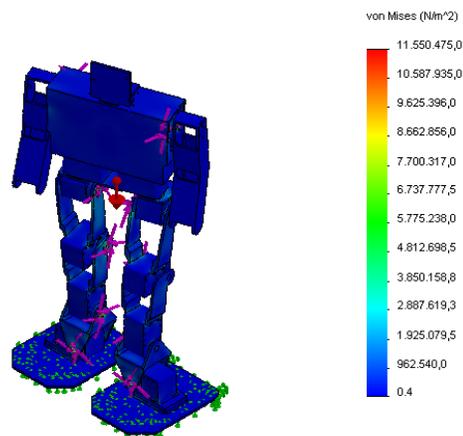


Fig. 3. Estudio estático del robot bípedo.

El esfuerzo máximo que soporta la estructura es de 11.55 [MPa]; mediante la teoría de Von Mises [4] se comprueba que el material no tiene fallo ante las fuerzas y torques a los que está sometida la estructura del robot bípedo, se muestran los cálculos realizados.

$$\sigma_{VonMises} < \sigma_{LimiteElastico} \quad (1)$$

$$11.55 [MPa] < 38.8 [MPa]$$

Además se considera que el esfuerzo de diseño tiene que ser mayor al esfuerzo máximo que soporta la estructura para que no exista fallo en la misma [5].

$$\sigma_d \geq \sigma' \quad (2)$$

Dónde:

- $\sigma_d$ : Esfuerzo de diseño.
- $\sigma'$ : Esfuerzo soportado por la estructura.

A su vez el esfuerzo de diseño es:

$$\sigma_d = \frac{S_y}{N} \quad (3)$$

Dónde:

- $S_y$ : Resistencia a la flexión.
- $N$ : Factor de seguridad.

Al aplicar la Ec. 2 y Ec. 3 considerando un factor de seguridad de 1.5 y la resistencia a la flexión de 45 [MPa] según datos del material se obtiene.

$$\frac{S_y}{N} = \sigma_d$$

$$\frac{45 [MPa]}{1.5} = 30 [MPa]$$

$$\sigma_d \geq \sigma'$$

$$30 [MPa] \geq 11.55 [MPa]$$

De esta manera se comprueba que el esfuerzo de diseño es mayor al esfuerzo que soporta la estructura.

Al analizar el gráfico del factor de seguridad que se muestra en la Fig. 4 se comprueba que el valor mínimo es de 3.36 siendo un valor óptimo para el diseño del robot bípedo.

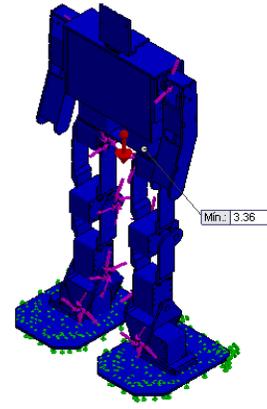


Fig. 4. Factor de seguridad del robot bípedo.

#### D. Cinemática del Robot Bípedo

Se determinan los parámetros D-H (Denavit Hartenberg) de una de las piernas del robot bípedo, mediante el procedimiento de [6], obteniendo el gráfico de la Fig. 5 y los datos de la Tabla 1.

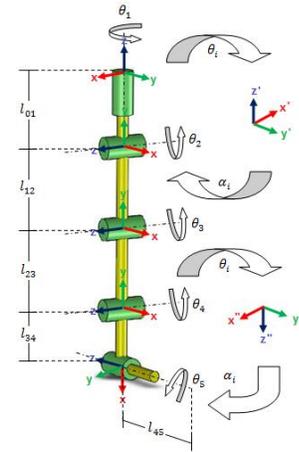


Fig. 5. Obtención de los parámetros D-H.

Tabla. 1. Parámetros D-H.

Articulación	$\theta$	$d$	$\alpha$	$a$
1	$\theta_1 + \pi/2$	$l_{01}$	0	$\pi/2$
2	$\theta_2$	0	$l_{12}$	0
3	$\theta_3$	0	$l_{23}$	0
4	$\theta_4 - \pi/2$	0	$l_{34}$	$\pi/2$
5	$\theta_5$	0	$l_{45}$	0

Una vez obtenidos los parámetros D-H para la pierna del robot bípedo se procede a la obtención de la matriz de transformación homogénea.

$$T = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4$$

Mediante el Robotics Toolbox de Matlab [7], se realiza el algoritmo para obtener la cinemática directa del robot bípedo, generando como resultado la gráfica de la pierna del robot que se muestra en la Fig. 6.

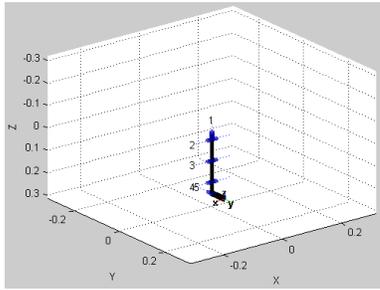


Fig. 6. Cinemática directa de la pierna del robot bípedo.

### E. Dinámica del Robot Bípedo

Para resolver la dinámica de un robot se necesitan los datos de la masa, centro de gravedad y matriz de inercia de cada uno de los eslabones con respecto a la base del robot, estos valores se obtuvieron a través de SolidWorks y se ingresaron en el Serial Link (robot) de Matlab que previamente se creó en la cinemática del robot.

Mediante el Robotics Toolbox [7], se resuelve la dinámica del robot por medio de funciones que permiten su cálculo, con estas funciones se obtienen los torques máximos aplicados a cada una de las articulaciones del robot bípedo, mostrando los resultados de la Fig. 7.

$$Q = \begin{matrix} -0.0000 & 0.2892 & -0.0044 & -0.2331 & -0.0000 \end{matrix}$$

Fig. 7. Torques máximos aplicados al robot bípedo.

El torque mayor es equivalente a 0.3 [Nm]; por lo tanto los servomotores a seleccionar deben brindar un torque mayor a este valor para que el robot bípedo pueda soportar toda la carga (peso) y se mantenga en equilibrio.

### F. Diseño del Sistema Electrónico

En base al funcionamiento requerido para el desenvolvimiento del robot, se muestra en la Fig. 8 cómo va a estar estructurada la etapa electrónica del robot bípedo.

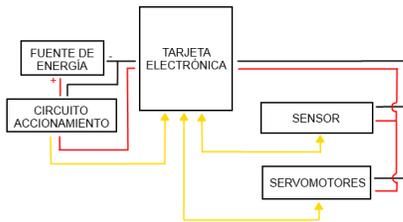


Fig. 8. Diagrama del sistema electrónico.

El circuito de accionamiento se diseñó y construyó por los autores de este proyecto, los demás componentes se seleccionaron de los existentes en el mercado en base a los parámetros requeridos para el correcto funcionamiento del robot bípedo.

### G. Modelamiento del Robot Bípedo

Se utilizó el software SimMechanics Link para enlazar SolidWorks con el entorno de Matlab, de esta manera se convierte la

estructura de las extremidades inferiores del robot bípedo en diagramas de bloques para ser utilizados por Simulink a través de SimMechanics. En el modelo se crearon subsistemas y máscaras para una mejor presentación, como se indica en la Fig. 9.

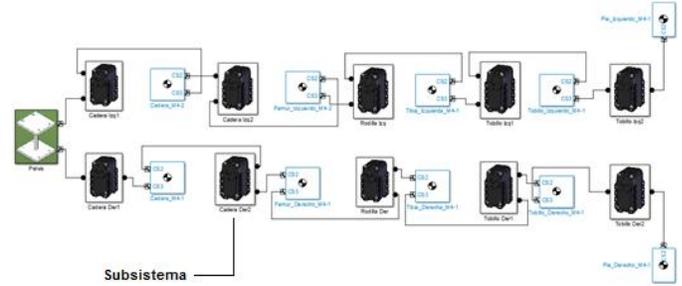


Fig. 9. Modelado del robot bípedo.

Dentro de cada subsistema se encuentran los bloques necesarios para que el robot pueda leer las trayectorias desde variables externas por medio del bloque *From Workspace*, estas variables creadas por medio del Robotics Toolbox a través de la función *jtraj* tienen las trayectorias del ser humano en el plano sagital de cada una de las articulaciones (cadera, rodilla y tobillo), se utilizan las trayectorias del ser humano para comprobar que no exista fallo en la estructura, es decir que no choquen los elementos y que no existan impedimentos de tipo estructural; las trayectorias reales del robot bípedo se obtendrán más adelante.

Al realizar la simulación, en la Fig. 10 se muestra el robot bípedo caminando y en la Fig. 11 se indican las trayectorias que cumplen las articulaciones del robot bípedo.

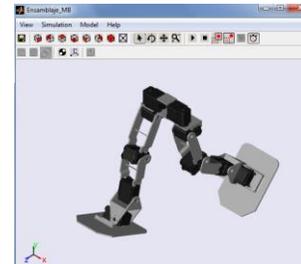


Fig. 10. Secuencia de caminado en Simulink.

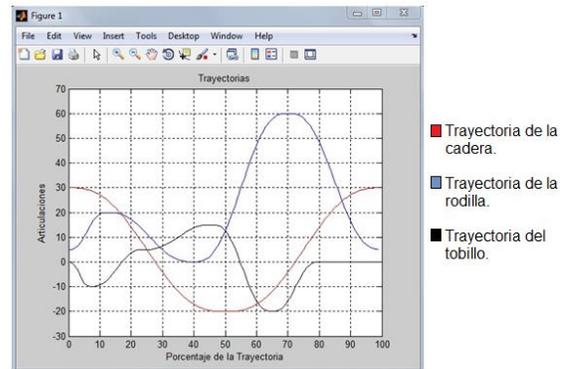


Fig. 11. Trayectorias de las articulaciones.

## H. Diagrama de Flujo del Sistema de Control

En la Fig. 12 se indica el diagrama de flujo del funcionamiento del sistema de control del robot bípedo.

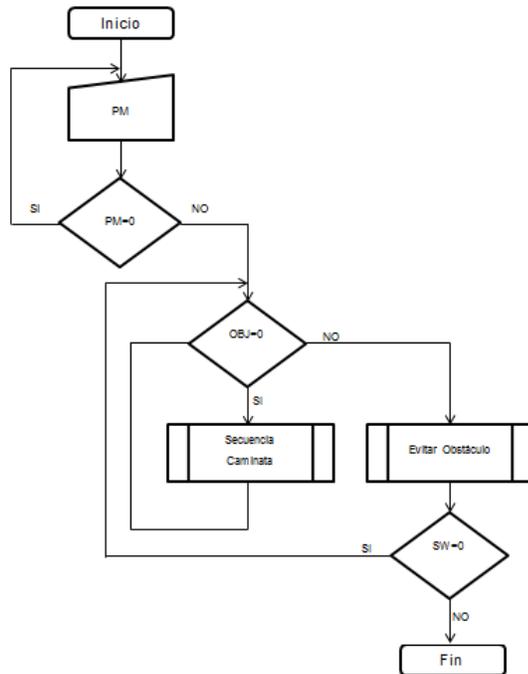


Fig. 12. Diagrama de flujo del sistema de control.

Dónde:

- PM: Es la variable de la puesta en marcha del robot.
- OBJ: Es la variable del sensor que permitirá saber si existe un obstáculo o no frente al robot.
- Secuencia caminata: Es un subprograma donde están las trayectorias para la caminata y donde se procede a verificar si el sensor detecta un obstáculo o no.
- Evitar obstáculo: Es un subprograma donde se encuentra la secuencia que realiza el robot para evitar el obstáculo aquí la variable SW y la variable OBJ regresan a sus valores iniciales para continuar con la caminata.
- SW: Es una variable que permitirá seguir con la caminata mientras no se cambie de estado el switch para terminar la marcha.

## IV. CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN

### A. Construcción

Las piezas fueron construidas en material ABS mediante una impresora 3D, en base al diseño realizado previamente en SolidWorks.

### B. Implementación

Los sistemas mecánico, eléctrico y electrónico que conforman el robot bípedo se implementaron de forma secuencial, dando como resultado el ensamblaje de la Fig. 13.



Fig. 13. Implementación del robot bípedo.

### C. Obtención de las Trayectorias del Robot Bípedo

La obtención de las trayectorias que deben seguir los servomotores Dynamixel AX-12A para realizar el caminado, fueron almacenadas mediante la aplicación PyPose desarrollada en el software libre Python y llevada hacia una aplicación grafica mediante WxPython.

En las Fig. 14 y 15 se muestran las trayectorias que se obtuvieron para la caminata del robot bípedo tanto en el plano sagital como en el plano frontal; con estas trayectorias el robot no pierde la estabilidad al momento de caminar y tiene un correcto funcionamiento.

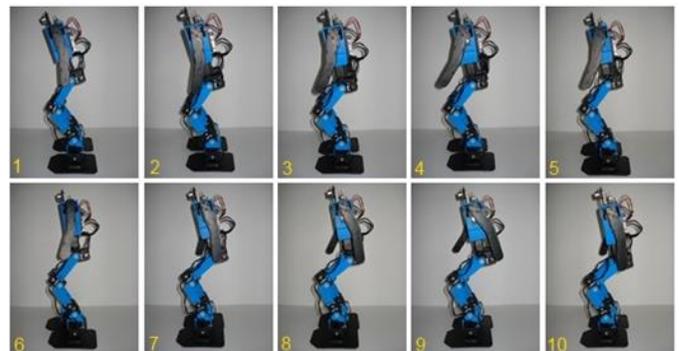


Fig. 14. Trayectorias del robot bípedo en el plano sagital.

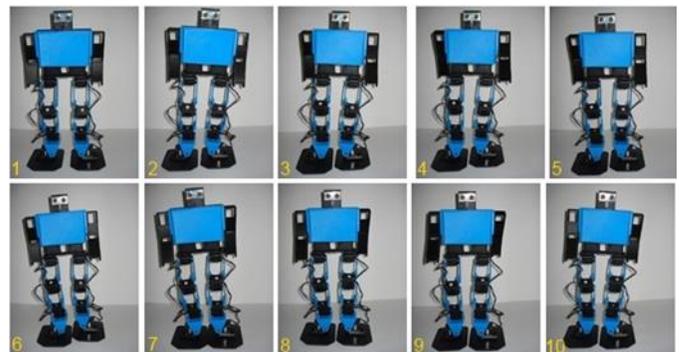


Fig. 15. Trayectorias del robot bípedo en el plano frontal.

Las Fig. 16 y 17 muestran las trayectorias del giro hacia la derecha del robot bípedo tanto en el plano sagital como en el plano frontal; al probar estas trayectorias el robot no tiene riesgo de caídas al momento de realizar el giro.



Fig. 16. Trayectorias del giro a la derecha del robot bípedo en el plano sagital.

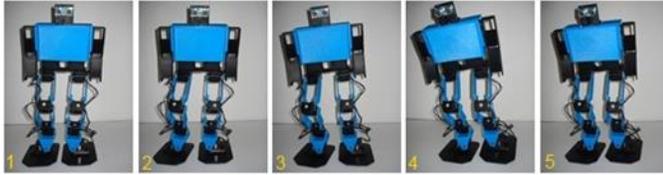


Fig. 17. Trayectorias del giro a la derecha del robot bípedo en el plano frontal.

Las Fig. 18 y 19 muestran las trayectorias del giro hacia la izquierda del robot bípedo en el plano sagital y frontal; con estas trayectorias de giro el robot no corre riesgo de caídas.



Fig. 18. Trayectorias del giro a la izquierda del robot bípedo en el plano sagital.

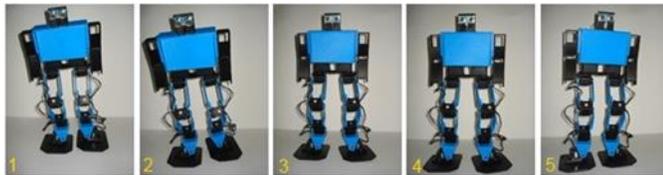


Fig. 19. Trayectorias del giro a la izquierda del robot bípedo en el plano frontal.

#### D. Algoritmo de Control

El algoritmo de control fue desarrollado en el Software IDE de Arduino debido a que la tarjeta electrónica Arbotix-M Robocontroller utilizada para este proyecto es compatible con este software, brindando además bibliotecas que permiten el control de los servomotores Dynamixel AX-12A, también consta con bibliotecas que permiten el enlace del software PyPose para la lectura de la base de datos de las posiciones almacenadas haciendo posible el caminado del robot bípedo al enviar esta información para ser ejecutada por los servomotores de manera sencilla.

## V. PRUEBAS Y RESULTADOS

### A. Pruebas de Resistencia del Material ABS

Se han tomado los datos del estudio realizado por [8], donde se realizaron ensayos de tracción en base a la norma ASTM D638-10 y se usaron probetas del Tipo I para polímeros, se somete a cada probeta a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta que se produce la rotura, obteniendo los datos de la Tabla 2.

Tabla. 2. Parámetros de Ensayo de Tracción.

# de probeta	$\sigma$ [MPa]	$\delta$ [mm]	$\xi$	E [MPa]
1	20.40	0.49	0.010	2082.0
2	20.30	0.36	0.007	2818.1
3	20.31	0.55	0.011	1847.4

Dónde:

- $\sigma$ : Esfuerzo axial [MPa].
- $\delta$ : Diferencia de longitudes final e inicial [mm].
- $\xi$ : Deformación convencional.
- E: Módulo de Young [MPa].

El esfuerzo máximo obtenido en las pruebas del material ABS es de 20.40 [MPa], con este esfuerzo hay una deformación de apenas 0.5 [mm]; el esfuerzo máximo del diseño del robot bípedo es de 11.55 [MPa], obteniendo como resultado que la estructura no corre riesgo de ruptura ya que está sometida a un máximo del 56,6% de todo el esfuerzo que resiste el material.

### B. Posición en la que se Requiere Mayor Torque

Para realizar esta prueba se colocó al robot en la posición que muestra la Fig. 20.



Fig. 20. Posición de análisis de mayor torque.

Como se observa en la Fig. 15 el robot es capaz de conservar esta posición debido a que el torque generado (0.3 [Nm]) es menor al entregado por los servomotores (1.5 [Nm]). Obteniendo como resultado que la estructura no sufre ningún fallo mientras se produce el mayor torque.

### C. Velocidad de Desplazamiento del Robot Bípedo

Para esta prueba se tiene dos objetivos:

- El primer objetivo permite determinar el rango de las velocidades a las cuales el robot mantiene el equilibrio, para lo cual se calculó la velocidad de desplazamiento del robot varias veces variando el tiempo de ejecución de cada posición. Estas pruebas dieron como resultado la gráfica velocidad vs estabilidad mostrada en la Fig. 21.

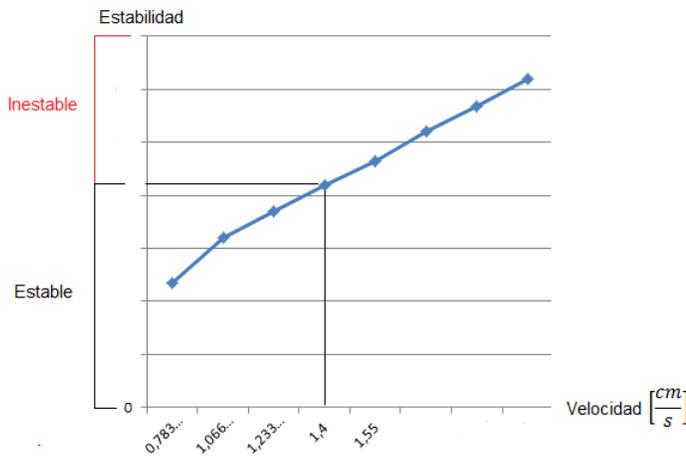


Fig. 21. Gráfica velocidad vs estabilidad.

De la gráfica de la Fig. 21 se concluye que en valores menores a 1,4 [cm/s] el robot es capaz de mantener el equilibrio durante el caminado, mientras que en velocidades mayores a 1,4 [cm/s] éste tiende a perder el equilibrio.

- El segundo objetivo es obtener la velocidad a la que camina de forma correcta el robot bípedo y se realizó manteniendo las mismas condiciones de tiempo 30 [s], al medir la distancia recorrida en este tiempo y calcular la velocidad de desplazamiento se obtiene la Tabla 3.

Tabla. 3. Resultados de la Velocidad.

Tiempo PyPose	Tiempo Prueba	Desplazamiento	Velocidad
500 [ms]	30 [s]	23.5 [cm]	0.78 $\frac{cm}{s}$
500 [ms]	30 [s]	23.7 [cm]	0.79 $\frac{cm}{s}$
500 [ms]	30 [s]	24 [cm]	0.80 $\frac{cm}{s}$
500 [ms]	30 [s]	23.45 [cm]	0.78 $\frac{cm}{s}$
500 [ms]	30 [s]	23.2 [cm]	0.77 $\frac{cm}{s}$

Realizando un promedio de las velocidades obtenidas, se tiene como resultado que la velocidad a la que se desplaza y funciona correctamente el robot bípedo es de 0.78 [cm/s].

#### D. Detección de Obstáculos

El objetivo es poner a prueba el sensor de ultrasonido, para verificar si la constitución, el color o la textura de los obstáculos afectan la detección de los mismos. La prueba se realiza colocando al frente del robot diferentes tipos de obstáculos, en la Tabla 4 se detalla si el sensor fue o no capaz de sensar los mismos.

Tabla. 4. Resultados de la Detección de Obstáculos.

Caso	Si detecta	No detecta
1 (pared color verde claro).	X	
2 (madera color café oscuro).	X	
3 (espejo).	X	
4 (cartulina color blanco).	X	
5 (obstáculo de color negro).	X	

Mediante la Tabla 4 se emite como resultado final que el sensor si fue capaz de sensar todos los tipos de obstáculos utilizados para las pruebas.

#### E. Distancia de Sensado

Con esta prueba se verifica la distancia real a la cual el sensor detiene el robot bípedo para poder realizar el giro. Esta distancia se establece a través de una herramienta de medición que se ubica en el piso entre el robot y el obstáculo; al realizar esta prueba se obtiene la Tabla 5.

Tabla. 5. Resultados de la Distancia de Sensado.

Número de Prueba	Distancia Establecida [cm]	Distancia Medida [cm]	Error [cm]
1	40	38	2
2	40	39	1
3	40	38.5	1.5
4	40	39.3	0.7
5	40	38.8	1.2

Se realiza un promedio de los datos del error que se produce en la medición del sensor el cual es de 1,28 [cm], el mismo que para el proyecto no es significativo.

#### F. Pruebas Generales de Funcionamiento

- La primera prueba que se realizó (Fig. 22), fue el encendido mediante el switch y que el robot se ponga en la posición erguido, se inició la marcha al pulsar el botón de accionamiento, el robot bípedo caminó hacia el frente hasta que encontró un obstáculo a una distancia aproximada de 40 [cm], al detectar el obstáculo procedió a girar a la derecha 90 grados, al no tener otro obstáculo a 40 [cm] de distancia procedió con el caminado hacia el frente.

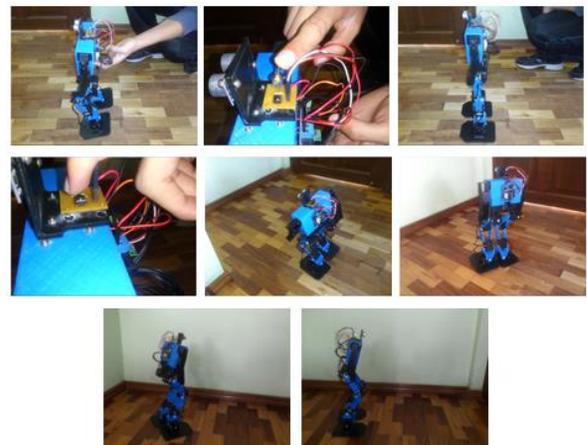


Fig. 22. Primera prueba de funcionamiento del robot bípedo.

- En la segunda prueba (Fig. 23), el robot bípedo tenía en frente y a su derecha un obstáculo, respectivamente; ambos a una distancia aproximada de 40 [cm]. Al detectar el obstáculo del frente, el robot procedió a girar hacia la derecha 90 grados, una vez finalizado este giro detectó el

siguiente obstáculo y procedió a girar 180 grados hacia su izquierda, al no encontrarse con un nuevo obstáculo frente del robot el mismo continuó con la caminata.



Fig. 23. Segunda prueba de funcionamiento del robot bípedo.

- En la tercera prueba (Fig. 24), el robot bípedo tenía en frente, derecha e izquierda un obstáculo; los tres a una distancia aproximada de 40 [cm], al detectar el primer y segundo obstáculo el robot realizó los giros respectivos como en la prueba dos, al detectar el tercer obstáculo el robot giró 90 grados hacia su izquierda, al no encontrarse con ningún obstáculo el robot bípedo continuó con la caminata hacia el frente.



Fig. 24. Tercera prueba de funcionamiento del robot bípedo.

Al concluir con las pruebas realizadas a todos los sistemas del robot bípedo, se obtiene como resultado el correcto funcionamiento del robot bípedo.

### G. Validación de Resultados

Por medio de un método estadístico se procedió a realizar la validación de los resultados obtenidos (hipótesis); en base a una tabla con los diferentes resultados de las pruebas que se realizaron al robot bípedo en pleno funcionamiento, se realizó el método del chi cuadrado como se muestra a continuación.

*Variable dependiente: Equilibrio.*

- $H_0$ : El robot no pierde el equilibrio durante cada una de las acciones que realiza o en todas las acciones se mantiene de igual forma el equilibrio.
- $H_1$ : El robot tiende a perder equilibrio durante todas las acciones.

Tabla. 6. Datos Observados para el Equilibrio.

Mantene el equilibrio	Durante la Caminata	En el giro de 90° a la derecha.	En el giro de 90° a la izquierda.	En el giro de 180° a la izquierda.	TOTAL
SI	85	72	50	80	287
NO	15	8	10	20	53
TOTAL	100	80	60	100	340

Tabla. 7. Datos Esperados para el Equilibrio.

	i	O	E	O-E	(O-E) <sup>2</sup>	$\frac{(O-E)^2}{E}$
Durante la Caminata. SI	1	85	84,411	0,588	0,346	0,004
Durante la Caminata. NO	2	15	15,588	-0,588	0,346	0,004
Durante el giro a la derecha. SI	3	72	67,529	4,470	19,986	0,295
Durante el giro a la derecha. NO	4	8	84,411	-4,411	19,463	0,23
Durante el giro a la izquierda 90°. SI	5	50	50,647	0,647	0,418	0,008
Durante el giro a la izquierda 90°. NO	6	10	15,588	-0,588	0,346	0,022
Durante el giro a la izquierda 180°. SI	7	8	12,470	-4,470	19,986	1,602
Durante el giro a la izquierda 180°. NO	8	20	9,352	0,647	0,418	0,0447
					$\chi^2$	3,45714724

$$\text{Grados de libertad} = (2-1) \cdot (4-1) = 3$$

Con los grados de libertad y con un nivel significativo de 0,05 se busca en la tabla del chi cuadrado [9], obteniendo un valor de 12,8381 para  $\chi^2$ .

El resultado obtenido (3,4571) es menor del que debería ser el valor de chi cuadrado (12,8381), por lo que  $p$  es menor de 0,05% y por lo tanto se acepta la hipótesis nula en la cual el robot no pierde el equilibrio, ni en la caminata, ni en cada giro que realiza; se dice que el robot mantiene el equilibrio de la misma manera en todas las acciones.

Este procedimiento se realizó de la misma forma para la *Variable dependiente: Detección de obstáculos*, obteniendo como resultado que el valor de chi cuadrado calculado es menor del que debería ser el valor de chi cuadrado (12,8381), por lo que  $p$  es menor de 0,05% y, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula en la cual no existe fallo en la detección de obstáculos por parte del robot bípedo en su trayectoria.

Los resultados obtenidos del método de chi-cuadrado referente al equilibrio y a la detección de obstáculos los cuales confirman que el robot funciona de manera correcta. Se concluye que se construyó un robot capaz de mantener el equilibrio durante la caminata y detectar obstáculos a una distancia de 40 [cm] aproximadamente, además la caminata dinámica se realiza sin detenerse; cumpliendo de esta manera con la hipótesis planteada para la realización de este proyecto.

## VI. CONCLUSIONES

- Se diseñó y construyó un prototipo de robot bípedo autónomo con desplazamiento dinámico con las siguientes características: velocidad de desplazamiento 0.78 [cm/s], peso 1.4 [Kg] y altura de 46,5 [cm].
- A velocidades menores a 1.4 [cm/s] el robot no pierde el equilibrio, por lo cual se define como velocidad de funcionamiento del robot 0.78 [cm/s].

- Mediante los cálculos realizados en conjunto con el software Matlab, se diseñó y simuló el modelo matemático del robot bípedo.
- Como concepción del diseño y la implementación realizada del robot bípedo, se tiene que el movimiento del caminado que el robot ejecuta se asemeja al del ser humano.
- El robot funciona correctamente de forma autónoma, permitiendo garantizar de esta forma que el algoritmo de control diseñado por medio del software libre de Arduino cumple los requerimientos exigidos para el desarrollo del proyecto.
- El uso del material ABS permite el ahorro de tiempo en la construcción de la estructura del robot bípedo, porque realiza el prototipado rápido de las piezas, ya sea que estas tengan formas simples o complejas.
- La construcción del robot bípedo se dio con nuevas tecnologías dándole así un realce para dejar atrás tecnologías obsoletas, de esta manera continuar acorde con el avance de la tecnología a nivel mundial.
- Factores como la fricción con el piso, construcción de los componentes y resolución de la impresora 3D afectan a la hora de realizar el caminado haciendo que el robot tienda a desviarse.

## REFERENCIAS

- [1] J. Santana, Control del equilibrio en el proceso de caminado de un robot bípedo, Guadalajara: Universidad de Guadalajara. Departamento de Electrónica, 2013.
- [2] A. Barrientos, L. Penin, C. Balaguer and R. Aracil, Fundamentos de Robótica, España: Mc Graw Hill, 2007.
- [3] S. Subir Kumar, Introducción a la Robótica, México: Mc Graw Hill, 2010.
- [4] SolidWorks, "SolidWorks Web Help," SolidWorks Web Help, 2011. [Online]. Available: [http://help.solidworks.com/2011/spanish/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/Checking\\_stresses/prot\\_vonm.html?id=ab4434bf64d487d8cbbf45682c1f4ef#Pg0](http://help.solidworks.com/2011/spanish/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/Checking_stresses/prot_vonm.html?id=ab4434bf64d487d8cbbf45682c1f4ef#Pg0).
- [5] R. Mott, Diseño de Elementos de Máquinas, México: Pearson Educación S.A, 2006.
- [6] O. Vele, "Cinemática de un Robot Bípedo," México, 2008, pp. 19-22.
- [7] P. Corke, Robotics, Vision and Control fundamental algorithms in Matlab, Queensland: Springer, 2011.
- [8] S. Chancusi and P. Navarrete, Diseño y construcción de una impresora 3D auto-replicable controlada inalámbricamente para el prototipado de piezas plásticas de bajo costo, mediante software libre, Iatacunga: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Departamento de ciencias de la Energía y Mecánica. Ingeniería Mecatrónica, 2014.
- [9] M. G. Carolina Rabin, "Instituto de Física, Facultad de Ciencias," 05 Mayo 2014. [Online]. Available: [http://labrad.fisica.edu.uy/docs/tabla\\_chi\\_cuadrado.pdf](http://labrad.fisica.edu.uy/docs/tabla_chi_cuadrado.pdf). [Accessed 21 Julio 2014].



**Marco Singaña.** Es graduado de la Escuela Politécnica Nacional en Electrónica y Control, cuenta con un Diplomado Superior en Redes Digitales Industriales, un Masterado en Redes y Telecomunicaciones, está cursando un Masterado en Diseño, Producción y Automatización Industrial en la Escuela Politécnica Nacional. Actualmente es docente de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga.



**Jacqueline Llanos.** Es Ingeniera Electrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Magister en Ciencias de la Ingeniería Mención Eléctrica de la Universidad de Chile. Actualmente es docente de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Sus áreas de investigación son en controladores avanzados, identificación de sistemas, modelos de predicción, micro-redes, energías renovables, aplicaciones de controladores inteligentes.



**Eduardo Morillo.** Es graduado de Ingeniería en Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE en el año 2014. Áreas de Interés: Robótica, Domótica, Automatización de procesos, Software CAD/CAM.



**Juan Portero.** Es graduado de Ingeniería en Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE en el año 2014. Áreas de Interés: Robótica, Instrumentación, Automatización de procesos, Software CAD/CAM.