



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



TEMA:

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT BÍPEDO AUTÓNOMO CON DESPLAZAMIENTO DINÁMICO PARA EL LABORATORIO DE ROBÓTICA INDUSTRIAL DE LA ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA.”**

**AUTORES:** Morillo Poveda Eduardo Andrés  
Portero Ibarra Juan Carlos

**TUTORES:** Ing. Marco Singaña  
Ing. Jacqueline Lllanos

Latacunga, Julio del 2014



# Introducción

- En el presente proyecto se presenta el “Diseño y construcción de un prototipo de robot bípedo autónomo con desplazamiento dinámico para el laboratorio de Robótica Industrial de la ESPE Extensión Latacunga”. El objetivo del proyecto es desarrollar un robot bípedo capaz de caminar autónomamente, con la capacidad de detectar y esquivar los obstáculos que se encuentren frente a él a una distancia aproximada de 40 [cm].



# *Capítulo I*

# *Fundamentos*

# *teóricos*



# Robot

- Definición:



- Morfología: Estructura Mecánica.  
Sistemas de Accionamiento.  
Sistema Sensorial.  
Sistema de Control.  
Elementos terminales.



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# Robótica Móvil

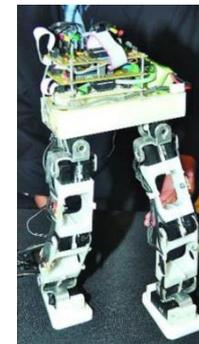
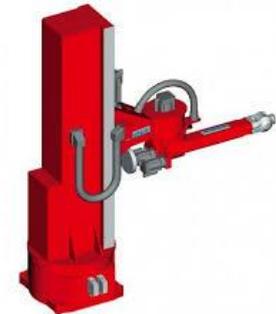
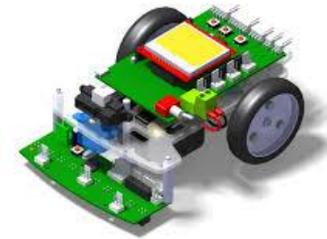
Los robots móviles terrestres se clasifican de acuerdo al modo de su desplazamiento.

Robots móviles con ruedas.

Robots móviles articulados.

Robots móviles con patas.

Robots Bípedos



# Robots Bipedos.

- Tienen dos extremidades inferiores para realizar su desplazamiento por eso su nombre de bípedos.

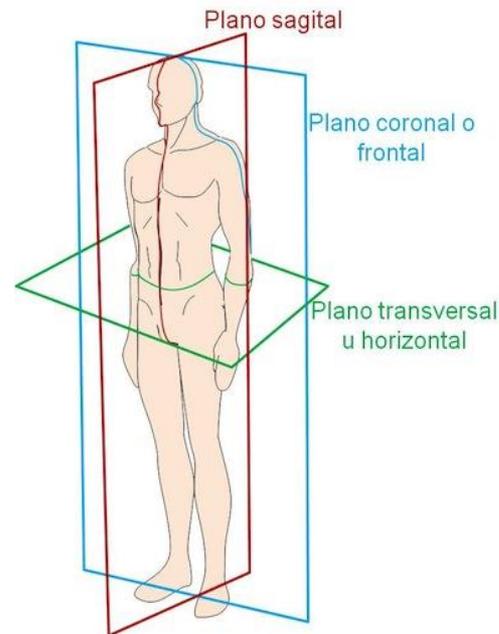
- Historia:



# Locomoción Humana

- La caminata humana es una actividad aprendida en la infancia, requiere además estabilidad y movilidad para lograr caminar de forma continua y poder realizar cambios de dirección o cambios de velocidad.

- Planos anatómicos:

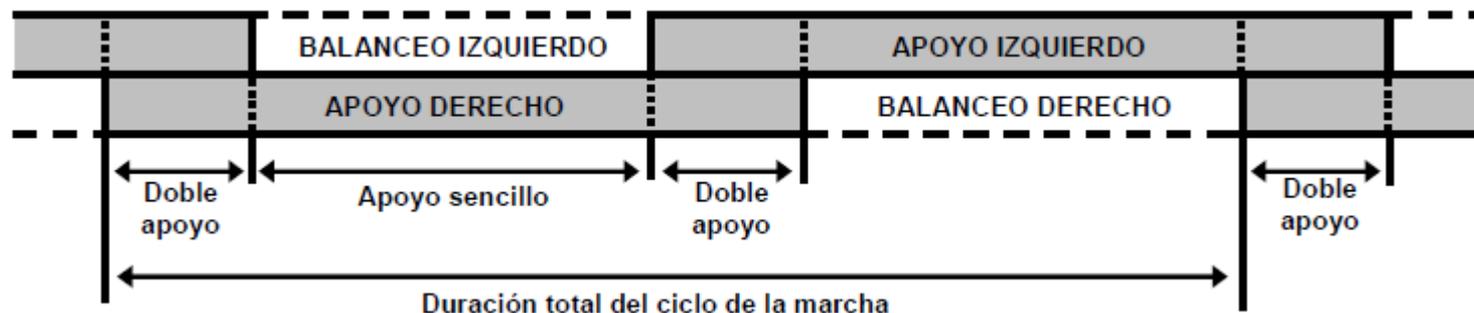


# Ciclo de marcha

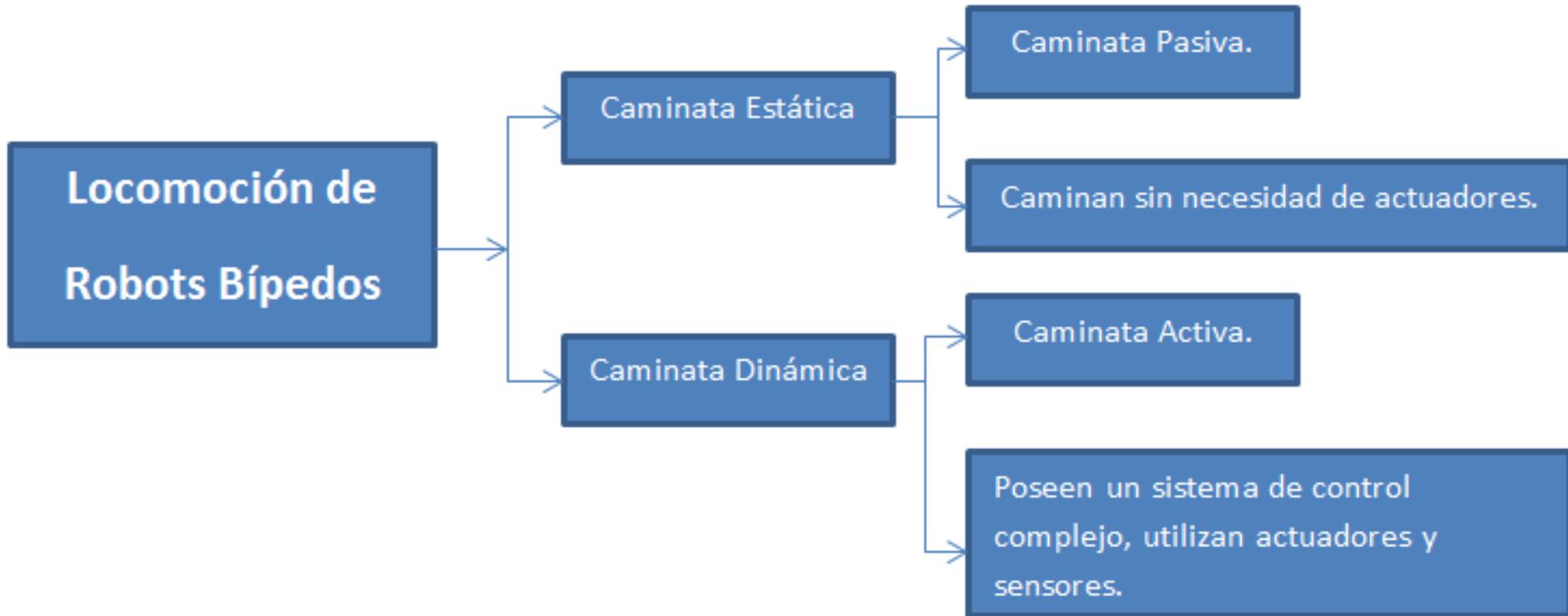
- El ciclo está dividido en dos fases:

**Fase de Apoyo:** Cuando una pierna está en contacto con el suelo, también se utiliza el término apoyo doble que es cuando las dos piernas están en contacto con el suelo.

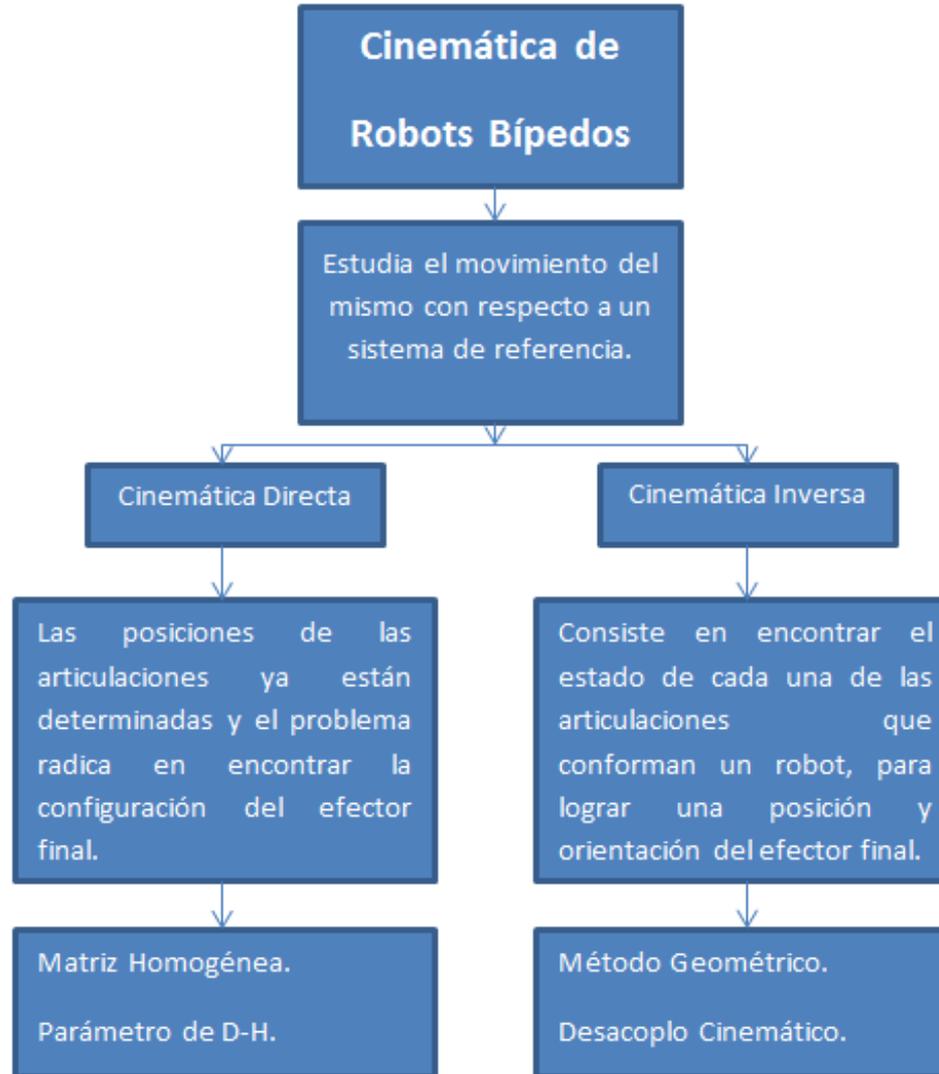
**Fase de Balanceo:** Cuando una pierna no contacta con el suelo.



# Locomoción de Robots Bípedos



# Cinemática



# Dinámica

- Se ocupa de la relación entre las fuerzas que actúan sobre un cuerpo y el movimiento que en él se origina.
- El modelo dinámico de un robot es uno de los aspectos más complejos de la robótica, por lo cual el modelo dinámico debe ser resuelto de manera iterativa mediante la utilización de un proceso numérico.
- **ZMP.** Es el punto de momentos cero, es el punto dentro de la superficie de contacto en el cual la reacción neta del piso actúa en el momento en que el robot está dinámicamente estable.



# Materiales

Debido a la diversidad de materiales existentes, nace la necesidad de elegir un material que cumpla con los requerimientos necesarios para el proyecto.

ABS



Polietileno-polipropileno

MDF



Medium Density Fibreboard

Aluminio



# Sistema de Control

## Técnica Heurística:

Se la puede definir como un conjunto de reglas metodológicas no necesariamente formalizadas positivas y negativas, que sugieren o establecen cómo proceder y evitar problemas a la hora de generar soluciones y elaborar hipótesis.



# Comunicación Inalámbrica

**Tecnología ZigBee:** es un protocolo de comunicaciones inalámbrico basado en el estándar de comunicaciones para redes inalámbricas IEEE 802.15.4. Este protocolo realiza las comunicaciones a través de una única frecuencia, es decir, de un canal, normalmente puede escogerse un canal de entre 16 posibles para la banda libre de 2.4 [GHz].

**Módulos Xbee:** Brindan una buena forma de agregar conectividad inalámbrica, estos módulos pueden comunicarse en arquitecturas punto a punto, punto a multi punto o en una red de malla .

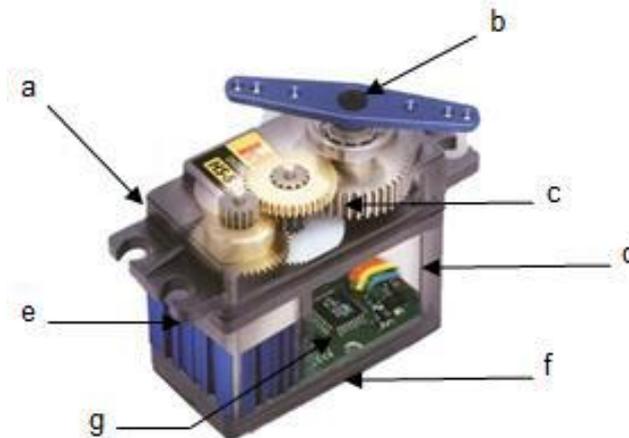


# Servomotor

Es un dispositivo similar a un motor de corriente continua, que tiene la capacidad de ubicarse en cualquier posición dentro de su rango de operación.

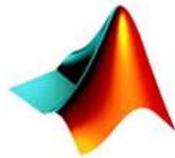
Las partes de un servomotor son:

**a.** Cubierta superior, **b.** Flecha o eje, **c.** Engranajes Reductores, **d.** Cubierta, **e.** Motor DC, **f.** Cubierta inferior, **g.** Circuito de Control.



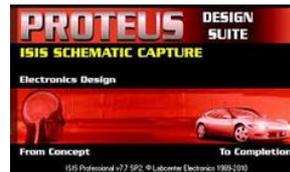
# Software

En las distintas partes del proyecto se utilizaron los siguientes programas:



MATLAB®

SimMechanics  
Robotics Toolbox  
Simulink



CURA



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# Software



PyPose



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# *Capítulo II*

# *Diseño y Selección*

# *de Dispositivos*



# Parámetros de Diseño

## **Parámetros Mecánicos:**

Tamaño: 25 - 50 [cm].

Peso: 0.75 - 1.5 [kg].

Grados de libertad: para las piernas del robot son 10, de los cuales 4 serán los encargados de simular la cadera, 2 realizarán el giro de las rodillas (izquierda y derecha) y 4 simularán el movimiento de los tobillos (izquierdo y derecho) .

## **Parámetros de Comunicación y Electrónicos:**

Comunicación: Alámbrica e Inalámbrica.

Rango de voltaje: 3 – 12 [V].



# Funcionamiento

El robot bípedo camina hacia el frente de forma autónoma sobre una superficie lisa; el robot consta de un sensor de ultrasonido el cual detecta los obstáculos que se encuentren frente a él a una distancia aproximada de 40 [cm]; al sensar un obstáculo el robot detiene su marcha y el sistema de control procede a accionar los servomotores de cada una de las piernas, los cuales están destinados a realizar los movimientos coordinados que hacen posible el giro hacia la derecha del robot para esquivar el obstáculo y así éste continúe su marcha mientras no exista otro obstáculo en frente.



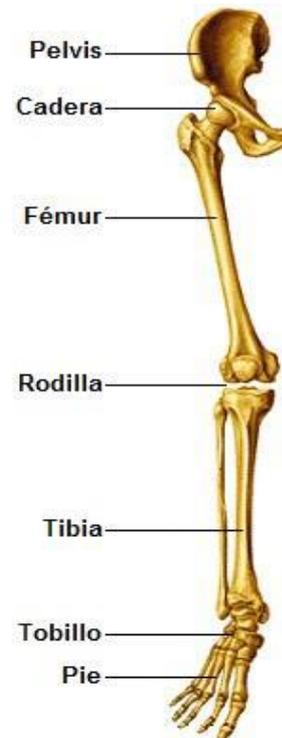
# Diseño del Sistema Mecánico

- **Diseño de la estructura del robot bípedo.**
- **Análisis estático de la estructura del robot.**
- **Cinemática del robot bípedo.**
- **Dinámica del robot bípedo.**



# Diseño de la estructura del robot bípedo

Al igual que en el cuerpo humano, se busca que cada parte de la estructura del robot bípedo sea semejante a la distribución de las extremidades inferiores.



**ESPE**

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# Diseño de la estructura del robot bípedo

Obtención del peso del servomotor genérico:

- Servomotor Dynamixel MX-28: 72 [gr] (Trossen Robotics, Dynamixel MX-28T Robot Actuator, 2014)
- Servomotor Kondo KRS-788HV: 47.5 [gr] (Robot Shop, 2009)
- Servomotor Dynamixel AX-12A: 55 [gr] (Trossen Robotics, 2014)
- Servomotor Hitec HS422: 45.5 [gr] (SuperRobotica, 2002)

El peso del servomotor genérico es:

$$\frac{72 + 47.5 + 55 + 45.5}{4} = 55 \text{ [gr]}$$



# Diseño de la estructura del robot bípedo

Obtención del torque para el servomotor genérico:

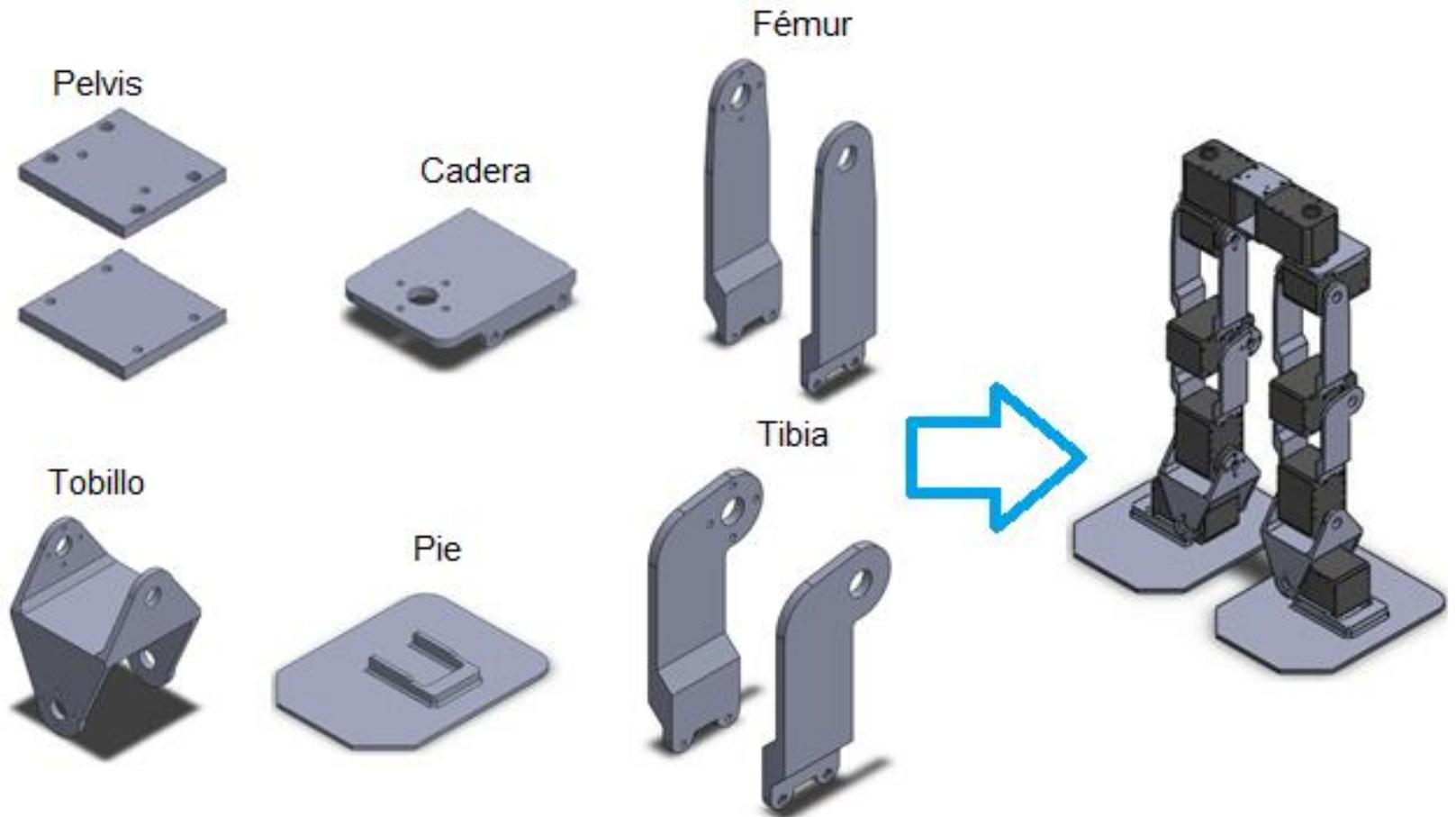
- Servomotor Dynamixel MX-28: 31.6 [kg\*cm] (Trossen Robotics, Dynamixel MX-28T Robot Actuator, 2014)
- Servomotor Kondo KRS-788HV: 10 [kg\*cm] (Robot Shop, 2009)
- Servomotor Dynamixel AX-12A: 15.3 [kg\*cm] (Trossen Robotics, 2014)
- Servomotor Hitec HS422: 4.1 [kg\*cm] (SuperRobotica, 2002)

El torque del servomotor genérico es:

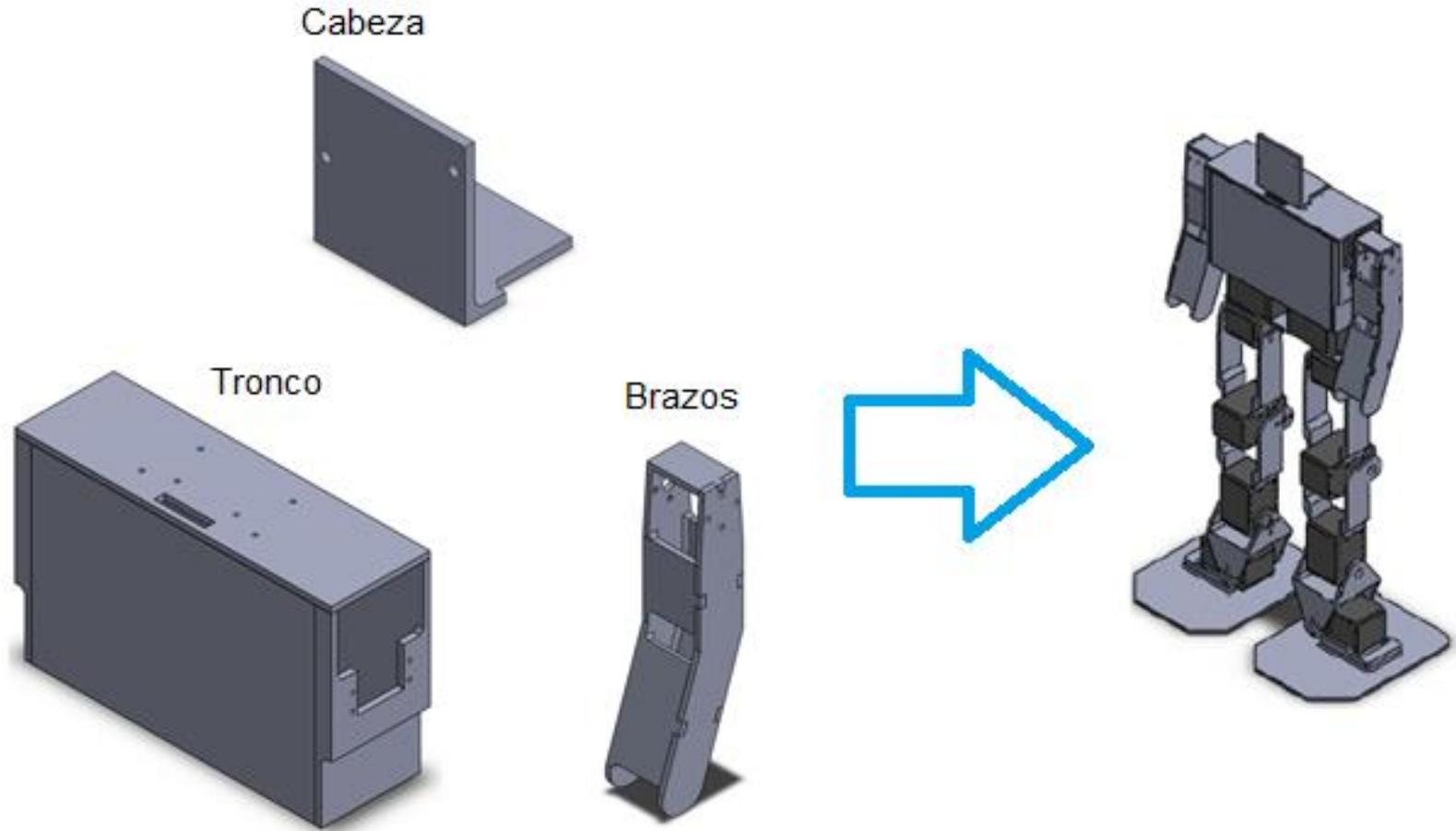
$$\frac{31.6 + 10 + 15.3 + 4.1}{4} = 15.25 [Kg * cm]$$



# Diseño de la estructura del robot bípedo



# Diseño de la estructura del robot bípedo



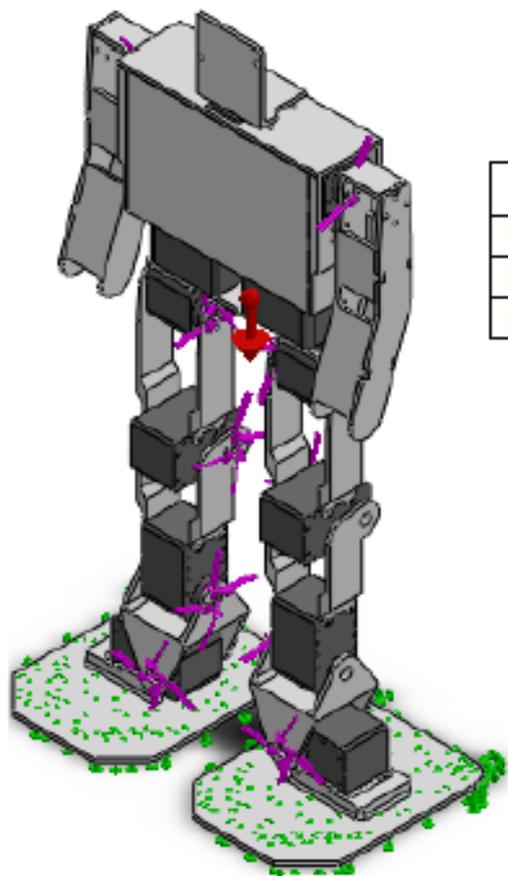
# Diseño de la estructura del robot bípedo

## **Justificación del material:**

Para esta estructura se ha elegido el material ABS ya que su uso es relativamente nuevo y está en auge su ocupación. Además el ABS al ser trabajado en una impresora 3D permite el prototipado rápido de las piezas sin importar el número de ellas, ya que se va a obtener una forma igual a la esperada.

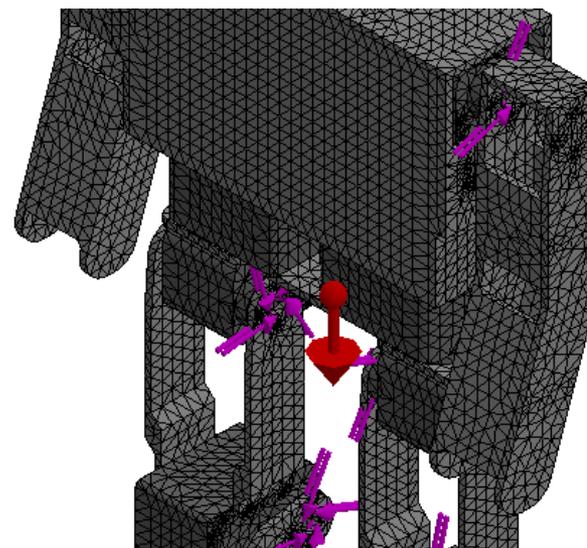


# Análisis estático de la estructura del robot



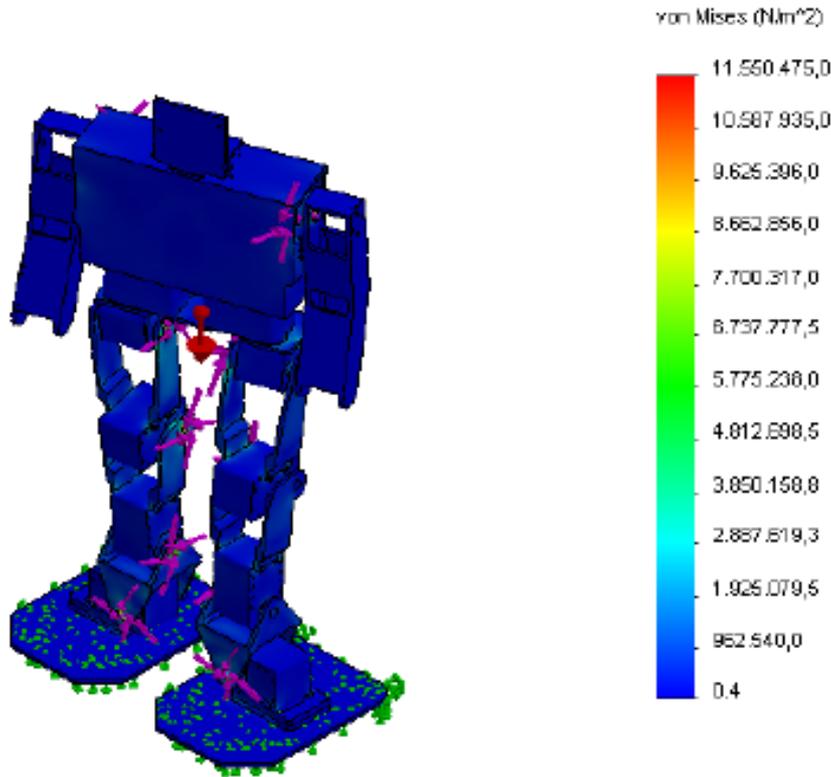
SIMBOLOGÍA	
Flecharoja	Vector Gravedad
Flechas verdes	Sujeción al piso
Flechas moradas	Torques

Malla: 5[mm]



# Análisis estático de la estructura del robot

$$\sigma_{VonMises} < \sigma_{LimiteElastico}$$
$$11.55 [MPa] < 38.8 [MPa]$$



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

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

$$\sigma_d \geq \sigma'$$

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

Dónde:

- $\sigma_d$ : Esfuerzo de diseño.
- $\sigma'$ : Esfuerzo soportado por la estructura.
- $S_y$ : Resistencia a la flexión.
- $N$ : Factor de seguridad.



# Análisis estático de la estructura del robot

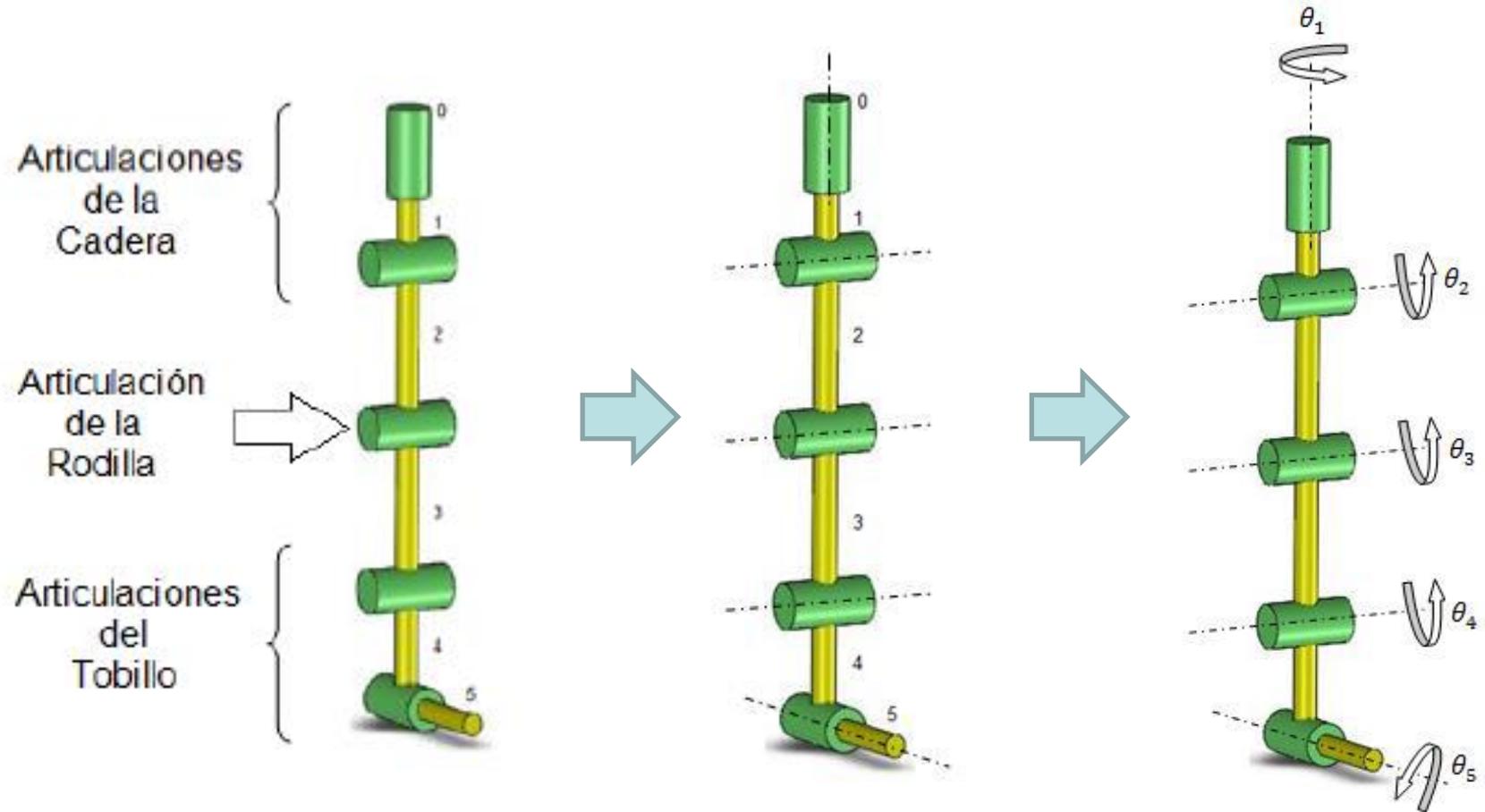


Finalmente en base a los resultados obtenidos en este análisis estático se concluye que la estructura resiste y no tiene fallos de seguridad estructural con el material asignado.

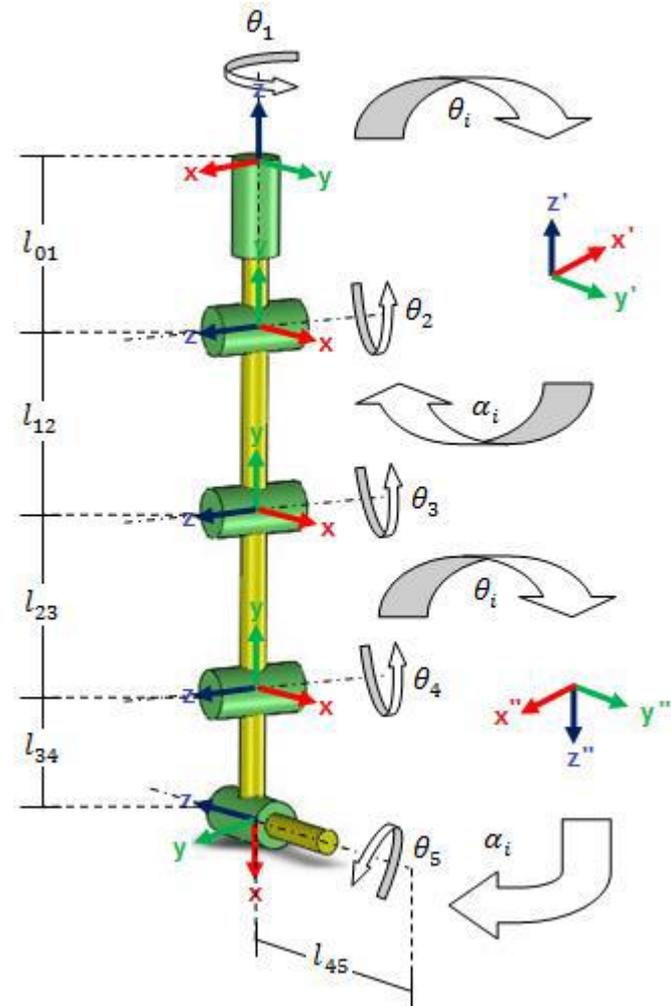
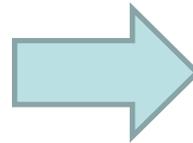
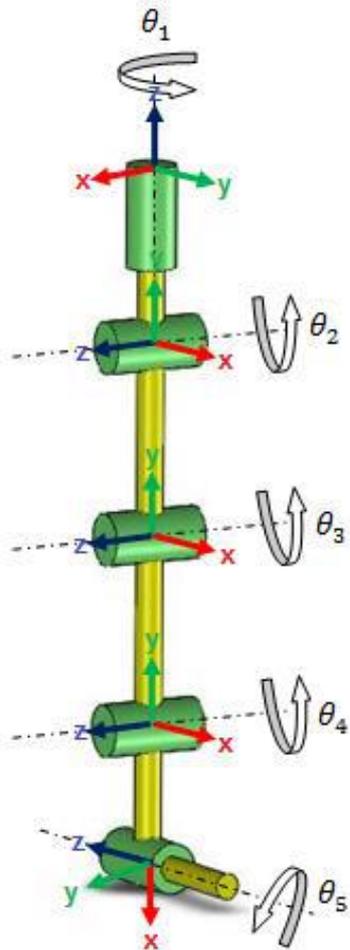


# Cinemática del robot bípedo

Se obtiene mediante los parámetros de D-H:



# Cinemática del robot bípedo



# Cinemática del robot bípedo

Al finalizar los pasos de los parámetros de D-H se obtiene la tabla de los mismos.

**Parámetros D-H**

Articulación	$\theta$	d	a	$\alpha$
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



# Cinemática del robot bípedo

Una vez obtenidos los parámetros D-H para la pierna del robot bípedo se procede a la obtención de la matriz de transformación homogénea que permite conocer la localización del efector final con respecto al sistema de coordenadas.

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

La matriz  ${}^0A_1$ :

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\cos\pi/2 \operatorname{sen}\theta_1 & \operatorname{sen}\pi/2 \operatorname{sen}\theta_1 & a_1 \cos\theta_1 \\ \operatorname{sen}\theta_1 & \cos\pi/2 \cos\theta_1 & -\operatorname{sen}\pi/2 \cos\theta_1 & a_1 \operatorname{sen}\theta_1 \\ 0 & \operatorname{sen}\pi/2 & \cos\pi/2 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

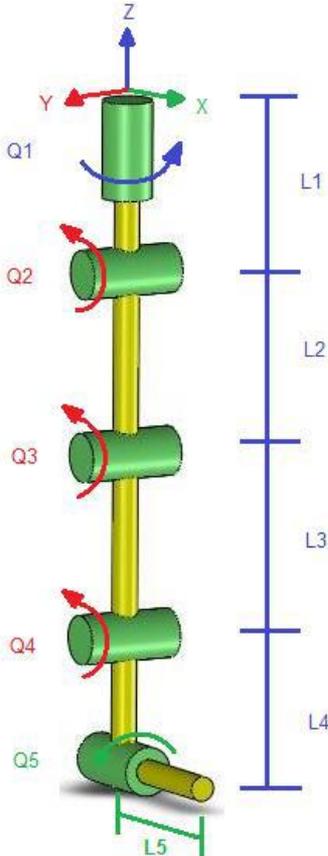
$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \pi/2) & 0 & \operatorname{sen}(\theta_1 + \pi/2) & 0 \\ \operatorname{sen}(\theta_1 + \pi/2) & 0 & -\cos(\theta_1 + \pi/2) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_{01} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} -\operatorname{sen}\theta_1 & 0 & \cos\theta_1 & 0 \\ \cos\theta_1 & 0 & \operatorname{sen}\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_{01} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



# Cinemática del robot bípedo en Matlab

Se obtienen las rotaciones y traslaciones necesarias para poder obtener la cadena cinemática del robot bípedo.



- Rotación de un ángulo  $Q_1$  alrededor del eje Z.
- Traslación de una longitud  $L_1$  a lo largo del eje Z.
- Rotación de un ángulo  $Q_2$  alrededor del eje X.
- Traslación de una longitud  $L_2$  a lo largo del eje Z.
- Rotación de un ángulo  $Q_3$  alrededor del eje X.
- Traslación de una longitud  $L_3$  a lo largo del eje Z.
- Rotación de un ángulo  $Q_4$  alrededor del eje X.
- Traslación de una longitud  $L_4$  a lo largo del eje Z.
- Rotación de un ángulo  $Q_5$  alrededor del eje Y.
- Traslación de una longitud  $L_5$  a lo largo del eje Y.

# Dinámica del robot bípedo

Mediante el Robotics Toolbox se puede resolver la dinámica de un robot por medio de funciones que permiten su cálculo.

Para poder 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, los mismos que son extraídos del programa SolidWorks.

Estos valores se deben ingresar en el **SerialLink** del robot.



# Dinámica del robot bípedo

Al completar el ingreso de todos los datos que requiere el Robotics Toolbox para realizar los cálculos de la dinámica del robot, se procede a verificar los mismos con la siguiente función:

```
>> pierna.dyn()
```

Finalmente se obtiene la resolución del problema dinámico inverso, el cual expresa las fuerzas y torques que intervienen en las articulaciones en función de la evolución de las coordenadas articulares y sus derivadas, esto es posible mediante la función:

```
>> Q = pierna.rne([0, -pi/2, 0, 0, 0], [0, 0, 0, 0, 0], [0, 0, 0, 0, 0])
```



# Dinámica del robot bípedo

Obteniendo los siguientes resultados, los valores se muestran en Newton por metro [Nm].

$Q =$

-0.0000      0.2892      -0.0044      -0.2331      -0.0000

Por lo tanto se concluye que los servomotores que se deben seleccionar deberán entregar un torque de por lo menos 0.3 [Nm] o superior para que el robot bípedo pueda soportar toda la carga.

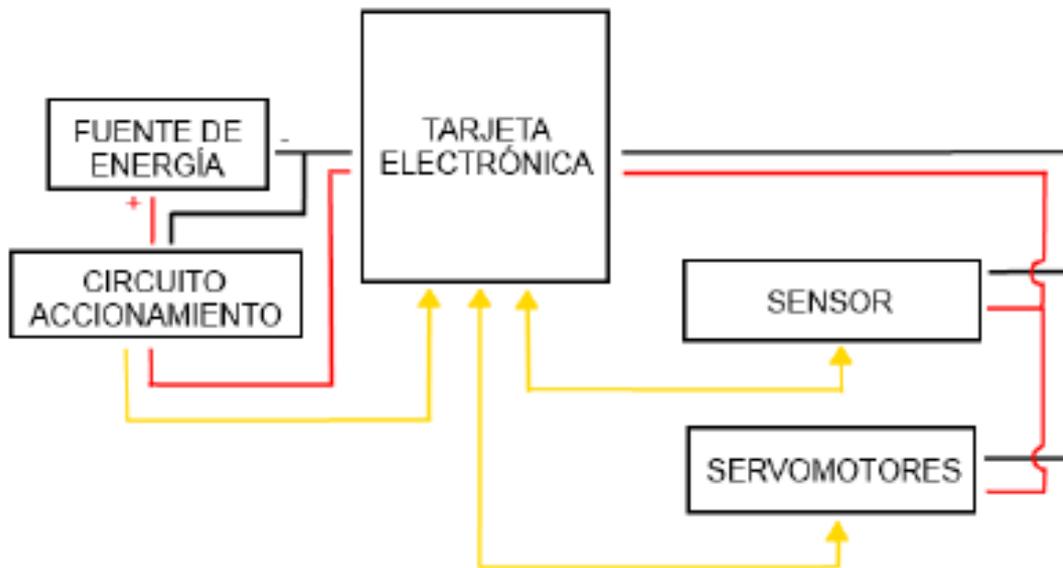


- **Introducción.**
- **Circuito de accionamiento.**
- **Parámetros establecidos para los diferentes componentes.**



# Introducción

En base al funcionamiento descrito se presentó un diagrama que contiene los elementos necesarios para cumplir con lo requerido.



Dónde:

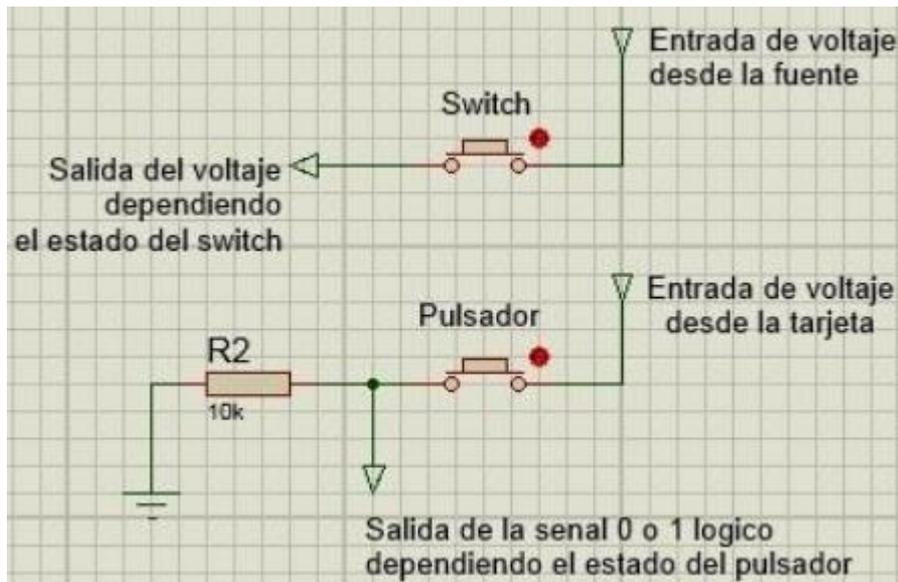
- Línea Roja: Voltaje Positivo.
- Línea negra: Tierra
- Línea Amarilla: Línea de comunicación



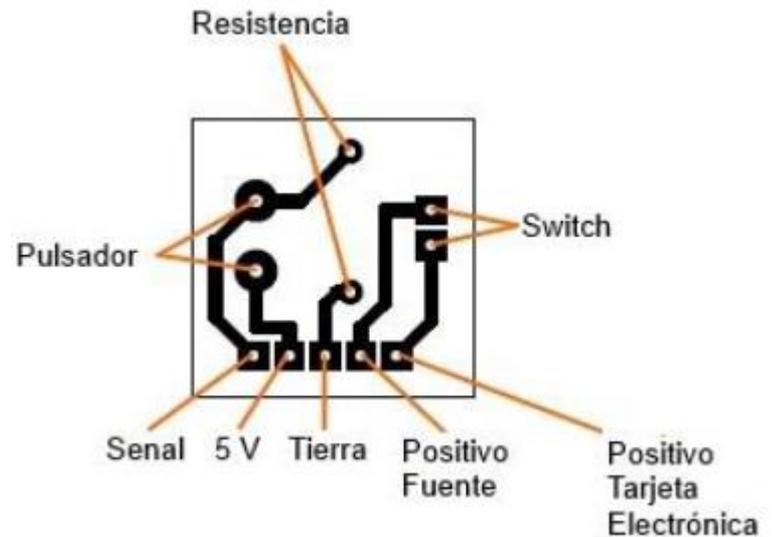
# Circuito de accionamiento

Este circuito está diseñado en el programa ISIS de Proteus y mediante el ARES se obtuvo el PCB del mismo.

## Circuito en ISIS



## PCB en ARES



# Parámetros establecidos para los diferentes componentes

## **Servomotores:**

- Torque
- Dimensiones
- Voltaje de alimentación
- Temperatura de funcionamiento
- Peso
- Comunicación
- Monitoreo de Variables

## **Sensor:**

- Comunicación
- Circuito de acondicionamiento
- Voltaje de alimentación
- Consumo de corriente
- Distancia de sensado
- Tamaño



# Parámetros establecidos para los diferentes componentes

## **Tarjeta electrónica:**

- Recursos
- Voltaje de alimentación
- Velocidad de procesamiento
- Campo de aplicaciones
- Método de programación
- Flexibilidad
- Consumo de corriente
- Temperatura de funcionamiento
- Número de I/O (entrada y salidas)

## **Dispositivos de comunicación:**

- Frecuencia de trabajo
- Flexibilidad
- Facilidad de conexión



# Parámetros establecidos para los diferentes componentes

## **Fuente de energía:**

- Portabilidad
- Relación espacio/peso
- Tiempo de duración
- Precio
- Suministro de voltaje
- Suministro de corriente

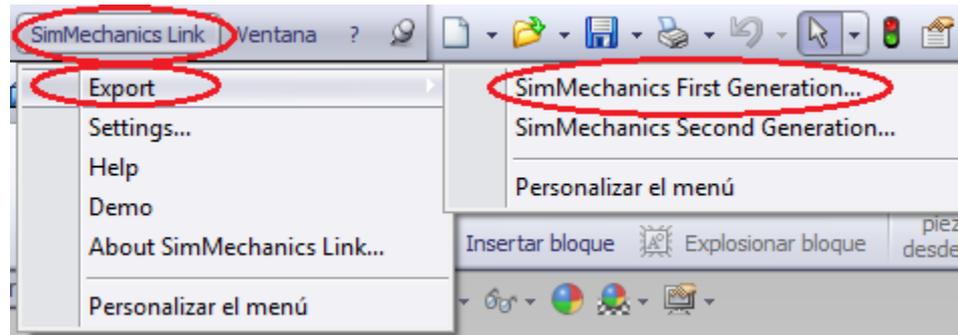


- **Modelamiento del robot bípedo.**
- **Trayectorias de movimiento del robot bípedo.**
- **Técnica de control.**



# Modelamiento del robot bípedo

EL modelado del robot bípedo se lo realiza importando el diseño desde SolidWorks de la siguiente manera:



Para importar este archivo a Matlab se utiliza el siguiente comando:

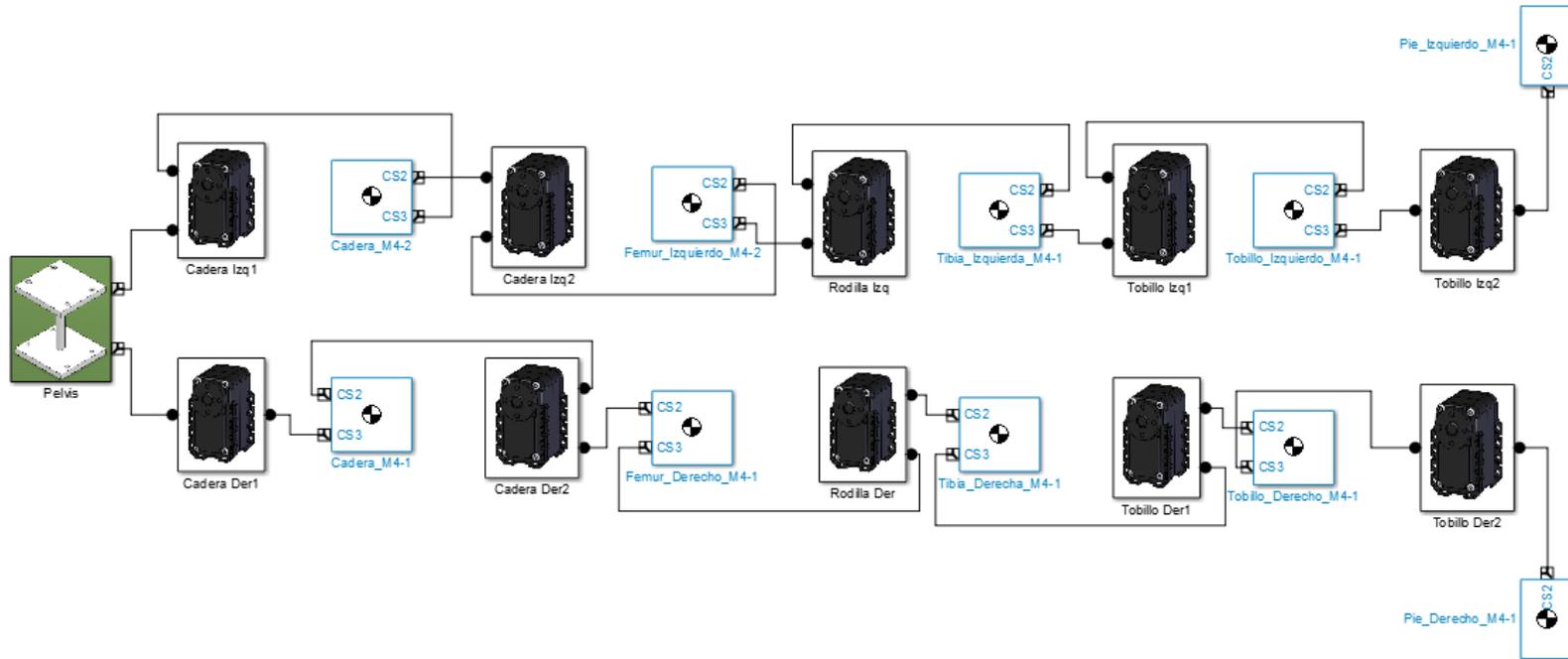
```
>> mech_import('Ensamblaje_MB.xml')
```

Este comando crea el modelado del robot mediante un diagrama de bloques.



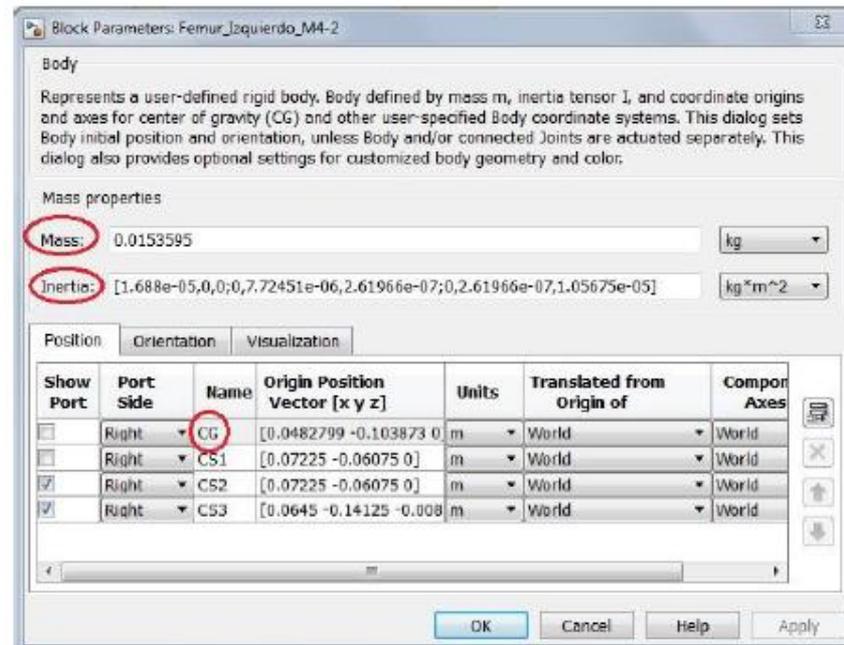
# Modelamiento del robot bípedo

Modelado del robot bípedo:



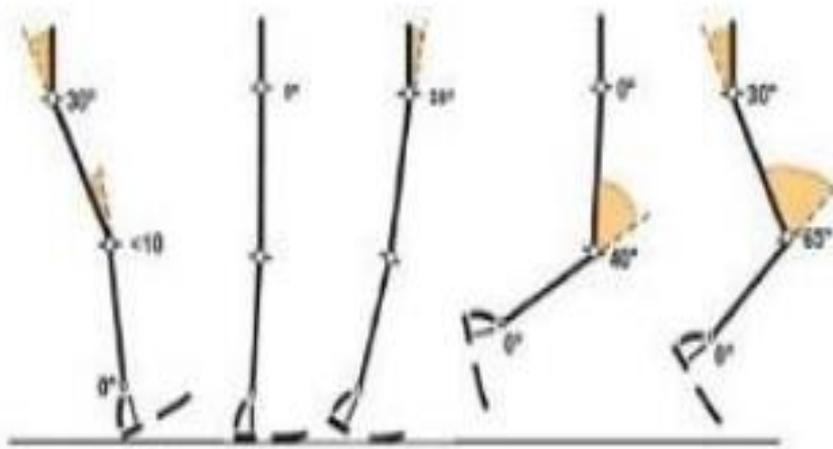
# Modelamiento del robot bípedo

Algo importante que hay que recalcar es que cada uno de los bloques que se crearon de las partes del robot, tienen incluido su masa (Mass), matriz de inercia (Inertia) y el centro de gravedad (CG), debido a que estos datos son tomados automáticamente del SolidWorks.



# Trayectorias de movimiento del robot bípedo

En base a los valores de la trayectorias obtenidos de un trabajo y mediante la función *jtraj*, se obtiene las trayectorias para ser utilizadas en la simulación del robot bípedo.

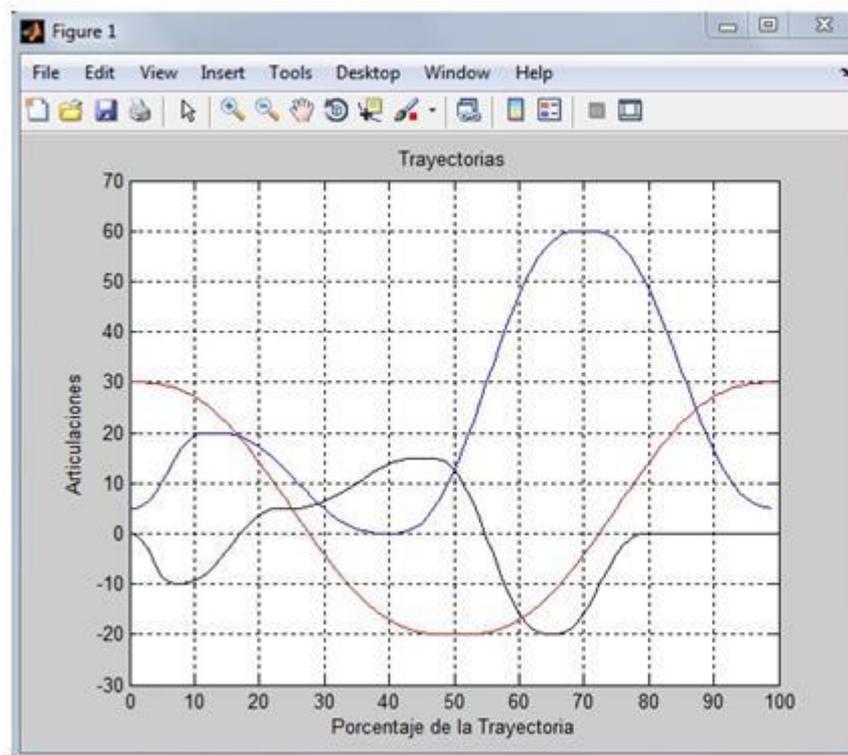


```
TrayectoriaCadera.m x
1 %Trayectoria Cadera
2 - pc1=30; %Tramo 1
3 - pc2=-20;
4 - tc1=(0:1:50); %0a50
5 - dc1=jtraj (pc1,pc2,tc1);
6 - plot (dc1);
7 - pc3=-20; %Tramo 2
8 - pc4=30;
9 - tc2=(0:1:50); %50a100
10 - dc2=jtraj (pc3,pc4,tc2);
11 - plot (dc2);
```



# Trayectorias de movimiento del robot bípido

Graficas de la trayectorias obtenidas en los archivos .mat al ejecutar la función *jtraj*:

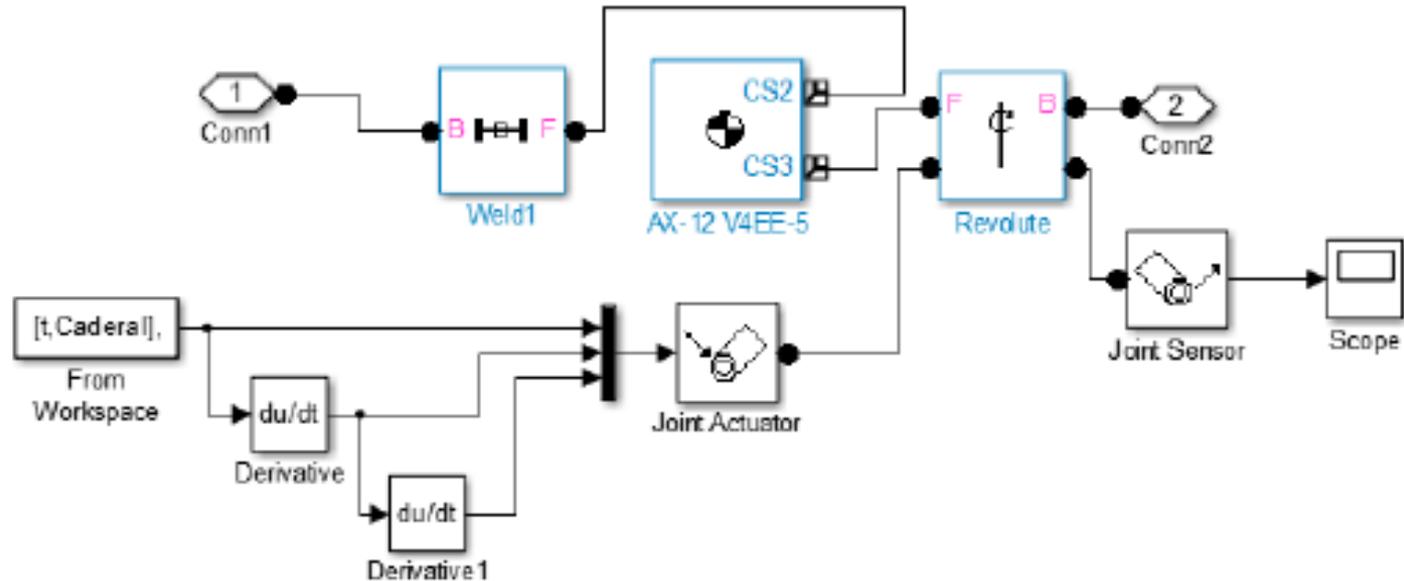


- Trayectoria de la cadera.
- Trayectoria de la rodilla.
- Trayectoria del tobillo.



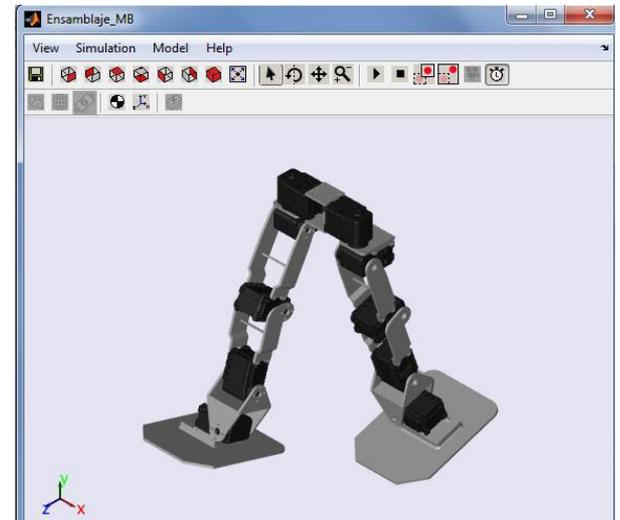
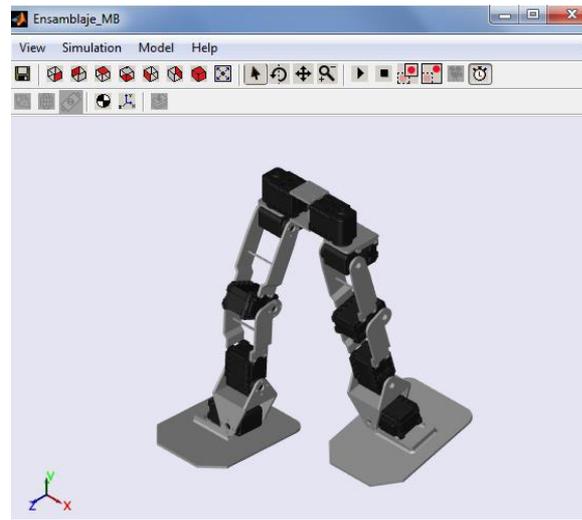
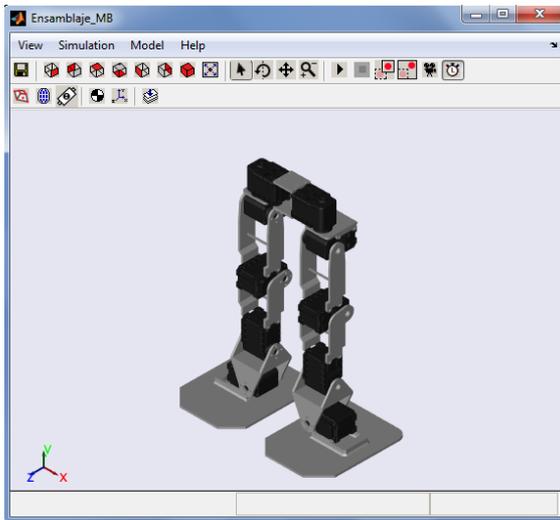
# Trayectorias de movimiento del robot bípido

Implementación del subsistema que otorga el movimiento a las articulaciones con sus respectiva trayectoria:



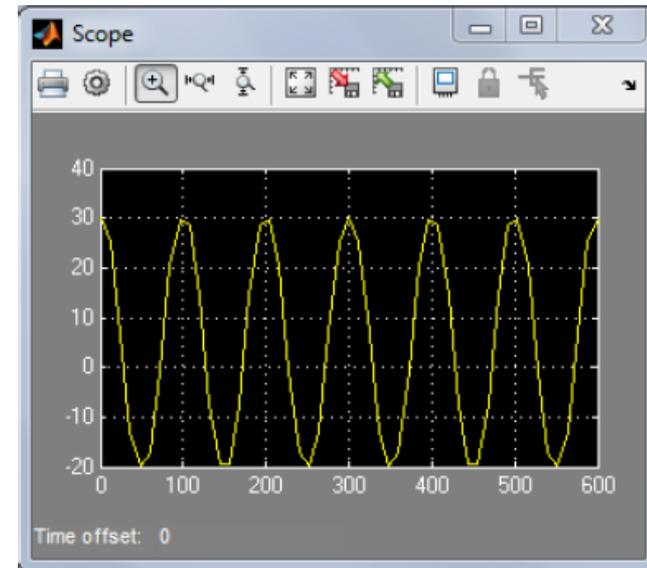
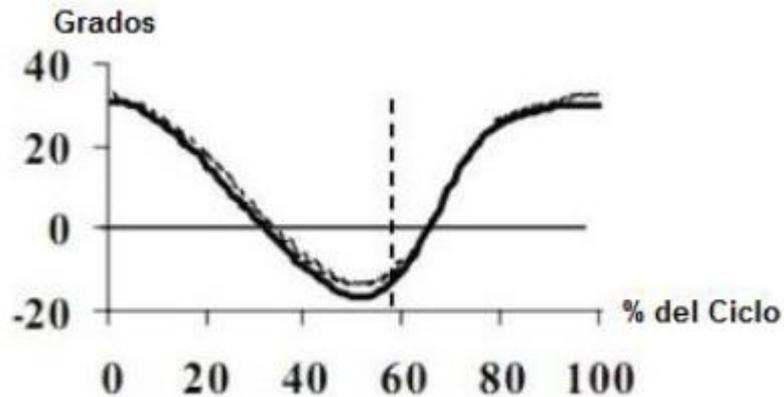
# Trayectorias de movimiento del robot bípido

Simulación del robot bípido con las trayectorias del caminado humano:



# Trayectorias de movimiento del robot bípido

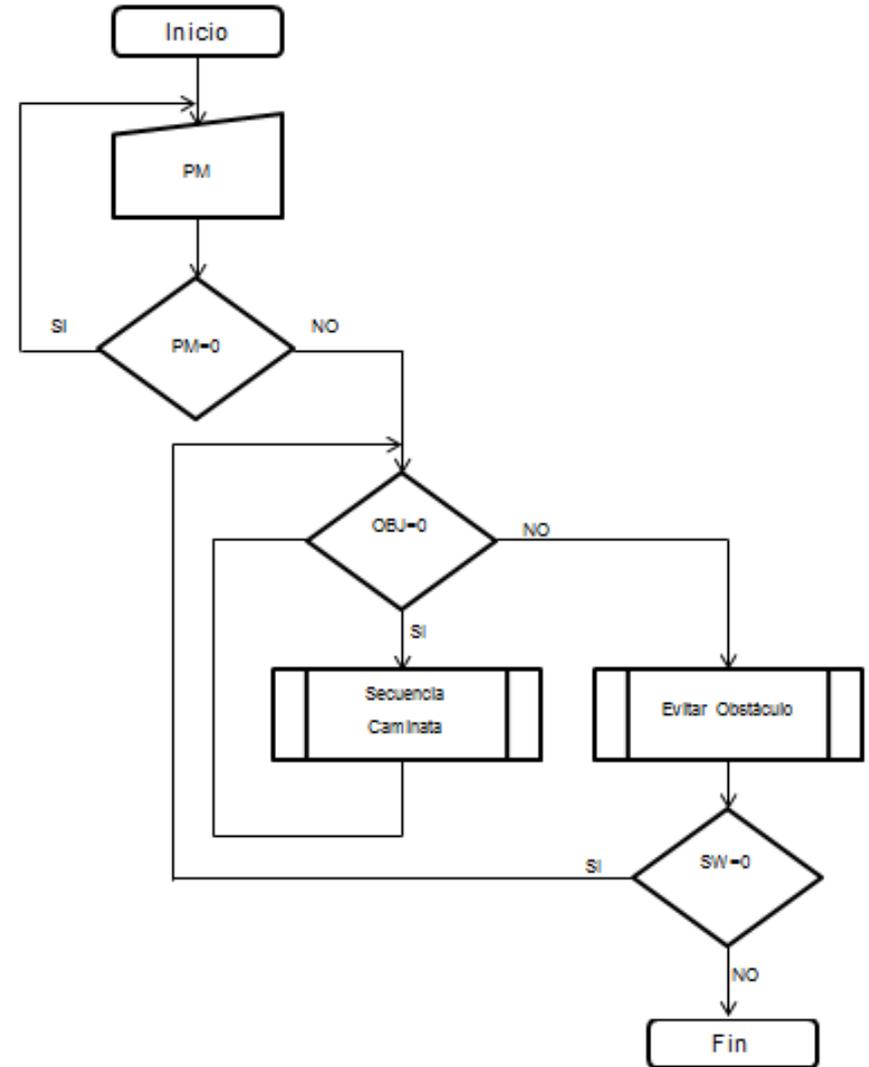
Finalmente se compara una trayectoria ingresada a una articulación con la obtenida al realizar el movimiento.



Y se valida el diseño al observar que no existe ningún error cuando la articulación del robot realiza la trayectoria.

# Técnica de Control

La técnica que se va a aplicar para el sistema de control es el método de la heurística, debido a que se contará con las trayectorias que realizarán cada una de las articulaciones o grados de libertad del robot bípedo.



# Selección de elementos y materiales

- **Selección de elementos electrónicos.**
- **Dispositivos de Comunicación.**
- **Fuente de Energía.**



# Servomotores

	Dynamixel AX-12	Dynamixel MX-28T	Kondo KRS- 788HV	Hitec HS-422
<b>Torque</b>	1.5 [Nm]	2.5 [Nm]	0.98 [Nm]	0.4 [Nm]
<b>Dimensiones</b>	32x50x40 [mm]	35.6x50.6x35.5 [mm]	41x35x21 [mm]	40.6x19.8x36.6 [mm]
<b>Voltaje de Alimentación</b>	12 [V]	12 [V]	9 a 12 [V]	4.8 a 6 [V]
<b>Temperatura de Funcionamiento</b>	-5 a 85 [°C]	-5 a 85 [°C]		-20 a 60 [°C]
<b>Peso</b>	55 [gr]	72 [gr]	47.5 [gr]	45.5 [gr]
<b>Comunicación</b>	TTL Half Duplex Async Serial	TTL Asynchronous Serial	Analog Parallel Network	RS-422
<b>Monitoreo de Variables</b>	Constan de un circuito integrado para monitorear velocidad, posición, temperatura y torque.	Constan de un circuito integrado para monitorear velocidad, posición, temperatura y torque.	No consta de ningún dispositivo para esa función.	No consta de ningún dispositivo para esa función.



# Servomotores Dynamixel AX-12A



Especificaciones Dynamixel AX-12A	
Voltaje de operación	12 [V]
Torque Máximo	1.53 [Nm]
Velocidad sin carga	59 [rpm]
Peso	55 [gr]
Resolución	0.29°
Corriente Máxima	900 [mA]
Protocolo	TTL Half Duplex Async Serial
Temperatura de Operación	-5 a 85 [°C]



# Sensor

	<b>Parallax PING (Sensor de Ultrasonido)</b>	<b>SRF04 (Sensor de Ultrasonido)</b>	<b>SHARP GP2Y0A02 (Sensor Infrarrojo)</b>
<b>Dimensiones</b>	22x46x16 [mm]	20x43x17 [mm]	19X40X22 [mm]
<b>Peso</b>	9 [gr]	10 [gr]	5 [gr]
<b>Voltaje de alimentación</b>	5 [V]	5 [V]	5.5 [V]
<b>Consumo de Corriente</b>	35 [mA]	50 [mA]	50 [mA]
<b>Distancia de Sensado</b>	De 2 [cm] a 3 [m]	De 3 [cm] a 3 [m]	De 20 [cm] a 1.5 [m]
<b>Tipo de comunicación</b>	Bidireccional TTL	Bidireccional TTL	I2C
<b>Circuito de acondicionamiento</b>	No necesita de acondicionamiento.	Necesita de un circuito de acondicionamiento.	Necesita de un circuito de acondicionamiento.



# Sensor Parallax PING



## Especificaciones Parallax PING

Rango de medición	De 2 [cm] hasta los 3 [m]
Suministro de voltaje	5 [V] $\pm$ 10%
Suministro de Corriente	30 [mA] típica, 35 [mA] máxima
Tamaño	22 [mm] de alto x 46 [mm] ancho x 16 [mm] espesor
Entrada de disparador	Pulso TTL positivo, 2 [ $\mu$ s min], 5 [ $\mu$ s] típica.
Echo Pulse	Pulso TTL positivo, 115 [ $\mu$ s] a 18,5 [ $\mu$ s]
Echo Hold	750 [ $\mu$ s] de caída del pulso de disparo
Burst Frequency	40 [kHz] para 200 [ $\mu$ s]



# Tarjeta Electrónica

	Arduino Uno SMD	Arduino Mega	ArbotiX-M Robocontroller
<b>Recursos</b>	<p>1 puerto serie UART TTL (5 [V]).</p> <p>1 puerto virtual para comunicación serial con el computador.</p> <p>Soporta la comunicación I2C (TWI) y SPI.</p> <p>Permite el control de hasta 10 servomotores PWM.</p>	<p>4 puertos serie UART TTL (5 [V]).</p> <p>Soporta la comunicación I2C (TWI) y SPI.</p> <p>Permite el control de hasta 10 servomotores PWM.</p>	<p>2 puertos seriales, 1 dedicado para el control de los servomotores Dynamixel y el otro dedicado para XBee o a su vez FTDI.</p> <p>Comunicación I2C y SPI.</p> <p>Permite el control de hasta 18 servomotores seriales.</p>
<b>Voltaje de alimentación</b>	7 – 12 [V]	7 – 12 [V]	6 – 16 [V]
<b>Voltaje de Operación</b>	5 [V]	5 [V]	5 [V]
<b>Velocidad de procesamiento</b>	16 [MHz]	16 [MHz]	16 [MHz]
<b>Campo de aplicaciones</b>	Utilizada para el desarrollo de proyectos de todo tipo exceptuando la industria.	Utilizada para el desarrollo de proyectos grandes de todo tipo exceptuando la industria.	Orientada al control de robot (legos y prototipos).
<b>Método de programación</b>	Arduino IDE	Arduino IDE	Arduino IDE
<b>Flexibilidad</b>	Permite la integración de una fuente externa.	Permite la integración de una fuente externa.	Permite la integración de dos fuente externa.
<b>Entradas y Salidas</b>	14 entradas o salidas digitales de las cuales 6	54 entradas o salidas digitales de las cuales 14	28 entradas o salidas digitales de las cuales 8 pueden funcionar como



# Tarjeta Arbotix-M Robocontroller



Especificaciones Arbotix-M	
Dimensiones	61 [mm] X 61 [mm]
Voltaje de alimentación	11 – 12 [V]
E / S digitales	28
Servomotores Permitidos	Hasta 18 servomotores con conectores de 3 pines (GND, $V_{CC}$ , de la señal).
Puertos Serie	2, 1 dedicado al servo controlador y el otro a la programación XBEE/FTDI
Microcontrolador	AVR ATMEGA844p – 16MHz
Comunicación	I2C presente en los pines D16=SCL D17=SDA



# Dispositivos de comunicación

	<b>Cable USB FTDI</b>	<b>XBee Explorer USB</b>	<b>UartSBee V4 (USB-Xbee-TTL Interface)</b>
<b>Descripción</b>	El cable FTDI es un conversor Serie-USB (TTL) que permite conectar dispositivos TTL por USB. El cable viene configurado para funcionar a 5 [V].	El XBee explorer USB permite conectar y utilizar cualquier módulo XBee directamente mediante un puerto USB conectado al computador admitiendo así la comunicación inalámbrica. Esta unidad funciona con todos los módulos XBee incluyendo la Serie S1 y la Serie 2.5, versión estándar y Pro.	UartSBee V4 es un dispositivo compacto con entrada USB que sirve como adaptador serial y viene equipado con un zocalo para XBee. Con FT232 integrado IC, que puede ser utilizado para la programación o la comunicación con las aplicaciones MCU.
<b>Como se da la Comunicación</b>	Este dispositivo se conecta al puerto USB del computador y el otro extremo se conecta hacia la tarjeta de acuerdo con los colores que son establecidos para la comunicación y alimentación.	Este dispositivo se conecta mediante un cable mini USB al PC y de esa forma se tiene acceso a los pines TX/RX del XBee y con lo cual está listo para comunicarse con el Xbee de la tarjeta.	Este dispositivo se conecta al computador mediante un cable mini USB, con lo cual permite su alimentación y posterior funcionamiento. Quedando a libre disposición del usuario la comunicación a utilizar por medio de un selector, ya sea mediante el



# Dispositivos de comunicación

UartSBee V4



Especificaciones UartSBee V4	
Voltaje de alimentación	5 [V]
Doble Salida de Potencia	3,3 y 5 [V]
Protocolo	USB 2.0
Botón de Reset	para módulo XBee

Xbee S1



Especificaciones Xbee S1	
Voltaje de Alimentación	3.3 [V]
Suministro de Corriente	50 [mA]
Potencia de Salida	1 [mW]
Rango de Comunicación	3100 [m]
Pines de entrada ADC	6 de 10 [bit]
Pines de entrada/salida	8 digital
Encriptación	128 [bit]
Comando para establecer o setear	AT o API

# Dispositivos de comunicación



Cable FTDI (comunica el UartSBee  
Con la tarjeta)



Cable Mini USB (comunica La PC  
con el UartSBee)



# Fuente de energía

**Consumo de los servomotores:**

$$M = 0,224 [N \cdot m]$$

$$\theta = 67^\circ \cdot \frac{\pi}{180^\circ} = 1,17 [rad]$$

$$\omega = \frac{\theta}{t} = \frac{1,17 [rad]}{0,169 [s]} = 6,923 \left[ \frac{rad}{s} \right]$$

$$P = M \cdot \omega = 0,224 [N \cdot m] \cdot 6,923 \left[ \frac{rad}{s} \right] = 1,55 [W]$$

$$I = \frac{P}{V} = \frac{1,55 [W]}{12 [V]} = 0,129 [A]$$

Al ser 12 servomotores el consumo es de 1.55 [A] a esto se debe sumar el consumo del sensor que es de 35[mA] y el de la tarjeta que es de 55[mA]; con lo cual se tendría un consumo total de 1.64[A] requerido para el funcionamiento del robot.



# Fuente de energía

	Pack de baterías de Litio de Shenzhen Apollo	Pack de baterías NiMH Tenenergy	Pack de baterías Li-Po Shenzhen UFO
<b>Voltaje Suministrado</b>	12 [V]	12 [V]	12 [V]
<b>Corriente Suministrada</b>	5000 [mAh]	2000 [mAh]	4500 [mAh]
<b>Tiempo de Duración</b>	Depende de la carga a la que va a suministrar el voltaje y corriente.	Depende de la carga a la que va a suministrar el voltaje y corriente	Depende de la carga a la que va a suministrar el voltaje y corriente
<b>Peso</b>	275 [gr]	283,5 [gr]	50 [gr]
<b>Dimensiones</b>	38x55x68 [mm]	50x29x72 [mm]	66x135x35 [mm]
<b>Precio</b>	20 US Dólares	17.49 US Dólares	37 US Dólares



# Baterías Tenergy con su cargador



## Especificaciones Baterías Tenergy

Voltaje suministrado	12 [V]
Corriente suministrada	2000 [mAh]
Dimensiones	50 [mm] ancho; 29 [mm] altura; 72 [mm] espesor
Constituido	10 células AA de NiMH

## Especificaciones Cargador universal inteligente Tenergy

Voltaje de Alimentación	120 – 240 [V]
Selector de Corriente	0.9 y 1.8 [A]
Fusible de Protección	para sobre corriente, cortocircuito y protección de polaridad inversa
Tiempo de Carga	1 a 2 Horas



# *Capítulo III*

# *Construcción e*

# *Implementación.*

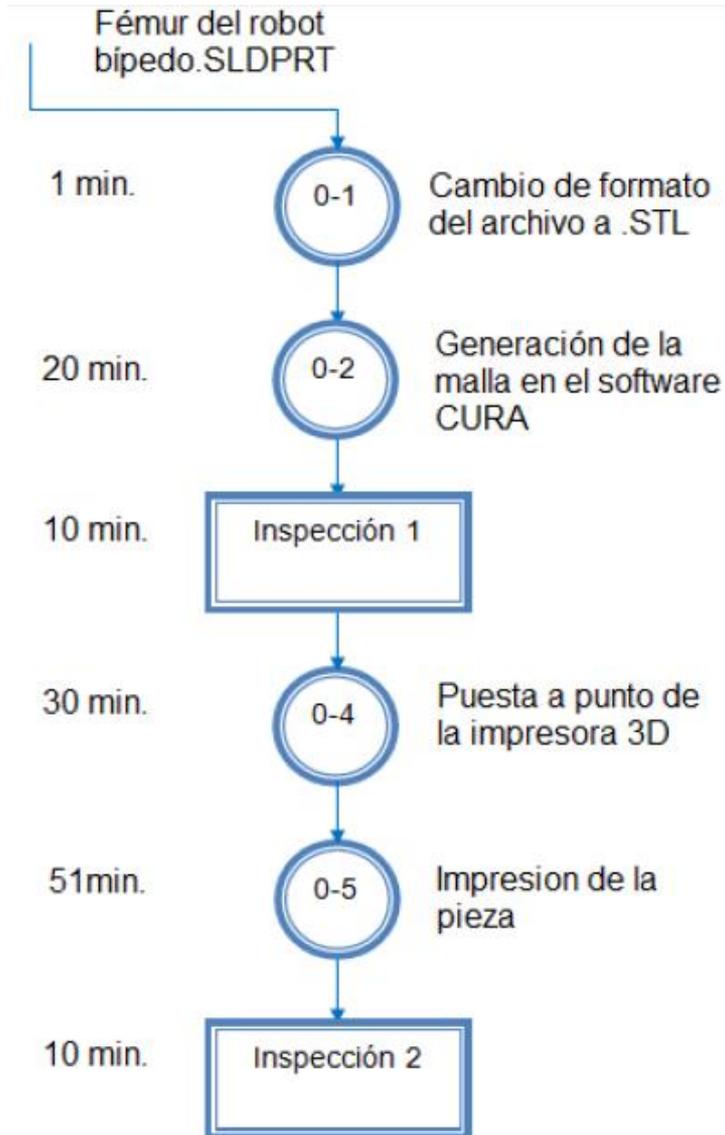


# Construcción e Implementación

- **Montaje del sistema mecánico.**
- **Montaje del sistema electrónico.**
- **Implementación del sistema de control.**
- **Integración de sistemas.**



# Construcción e Implementación



Las piezas de la estructura del robot bípido son maquinadas en la impresora 3D Ultimaker, debido a que es el método más sencillo para trabajar con ABS.



# Ensamblaje del robot bípedo.

Servomotor 1 y 2



Servomotor 3

Servomotor 4

Servomotor 5

Servomotor 6



# Ensamblaje del robot bípedo.

Servomotor 7 y 8



Servomotor 9



Servomotor 10

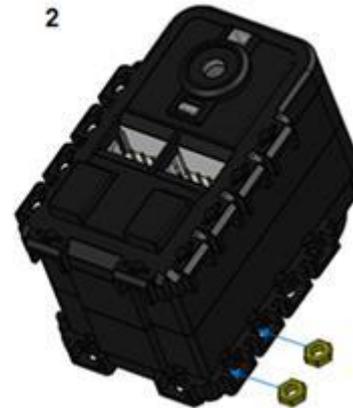


Servomotor 11 y 12

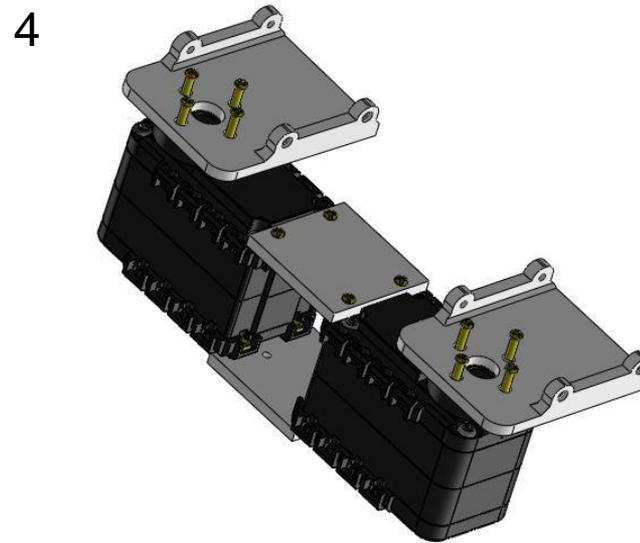
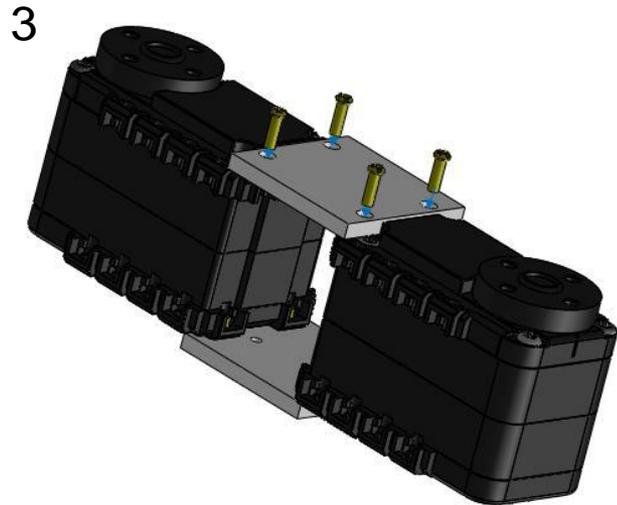
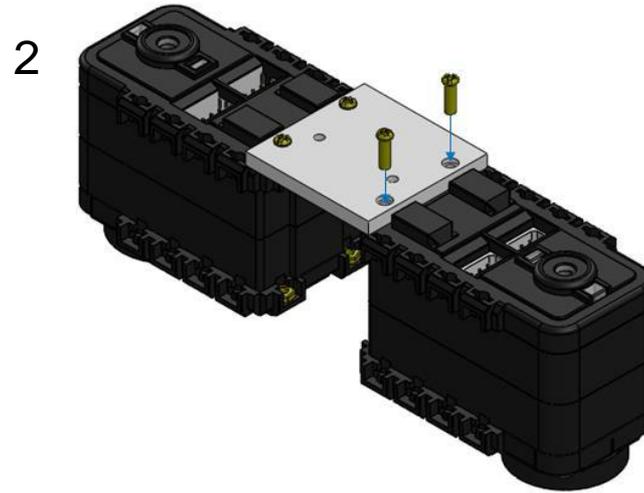
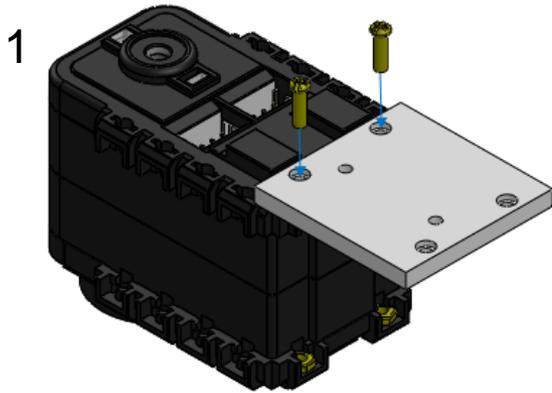
1



2

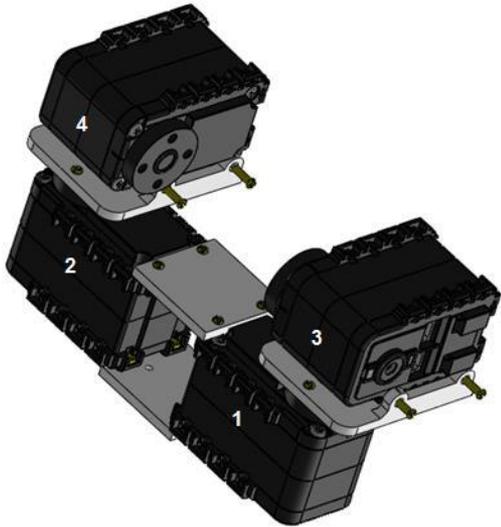


# Ensamblaje del robot bípedo.

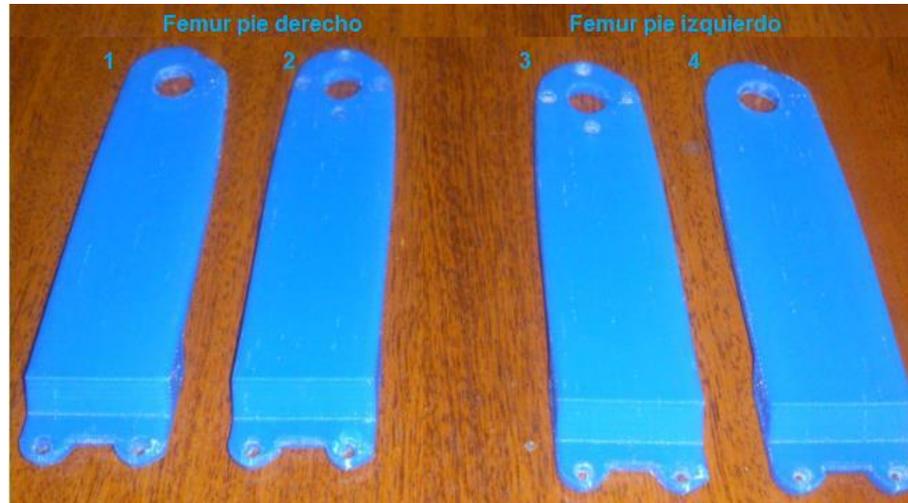
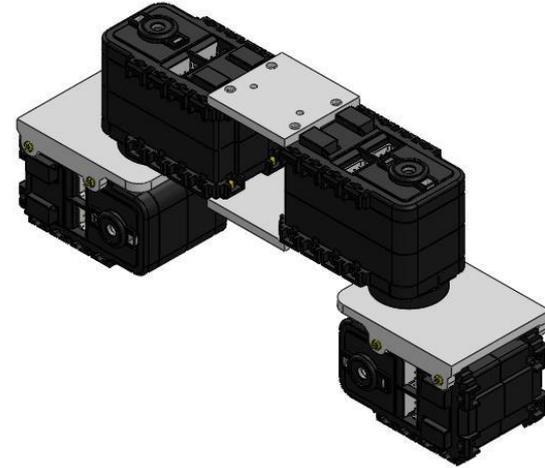


# Ensamblaje del robot bípedo.

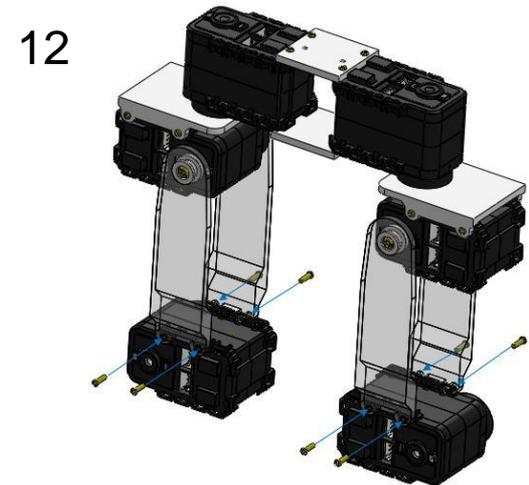
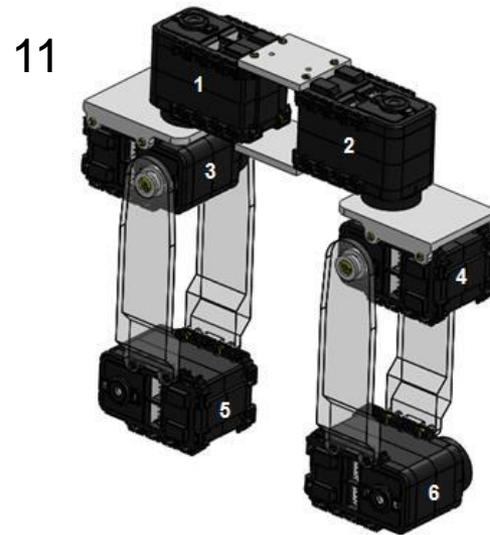
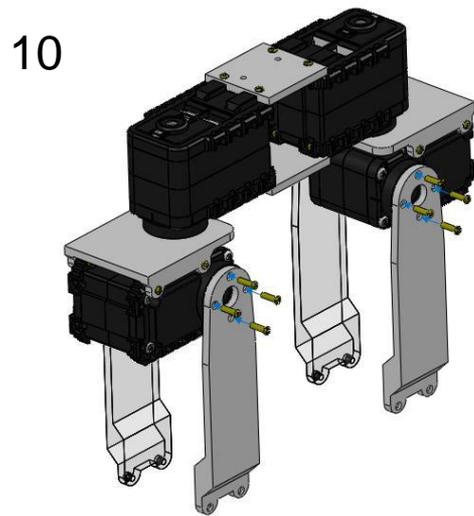
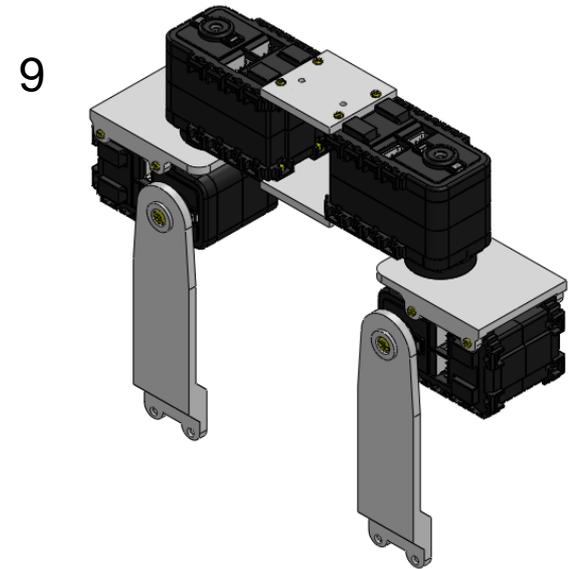
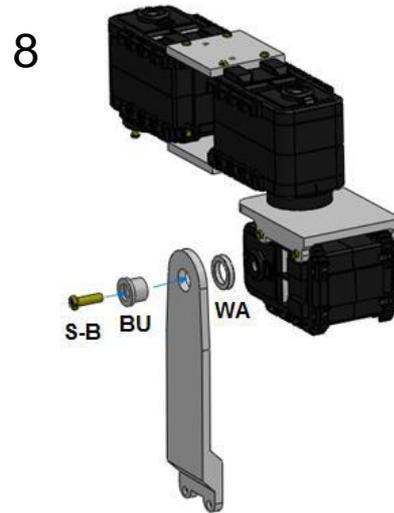
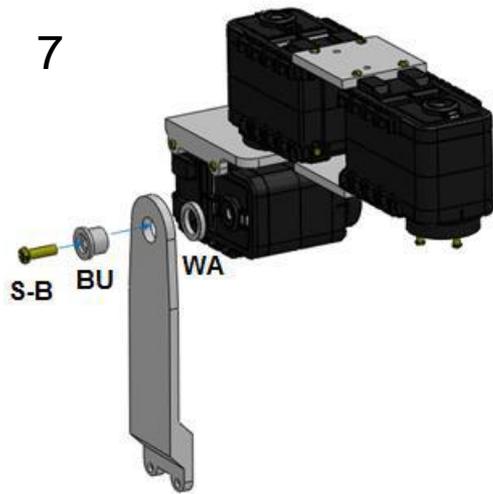
5



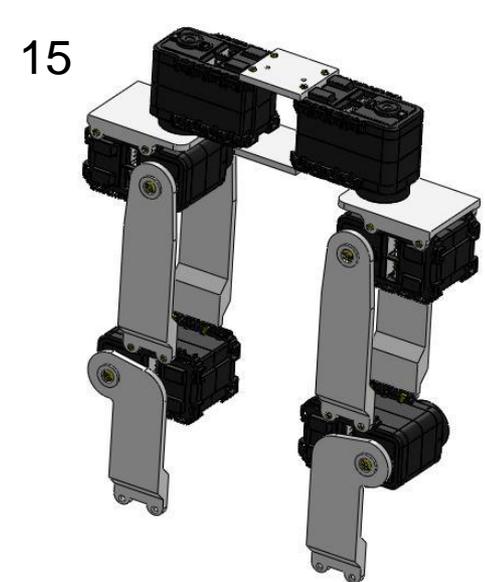
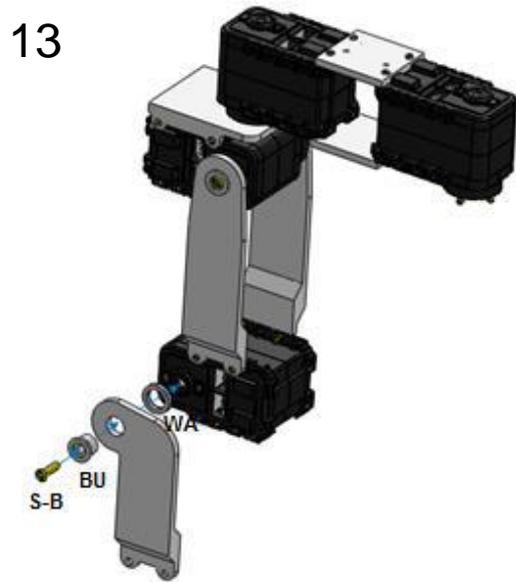
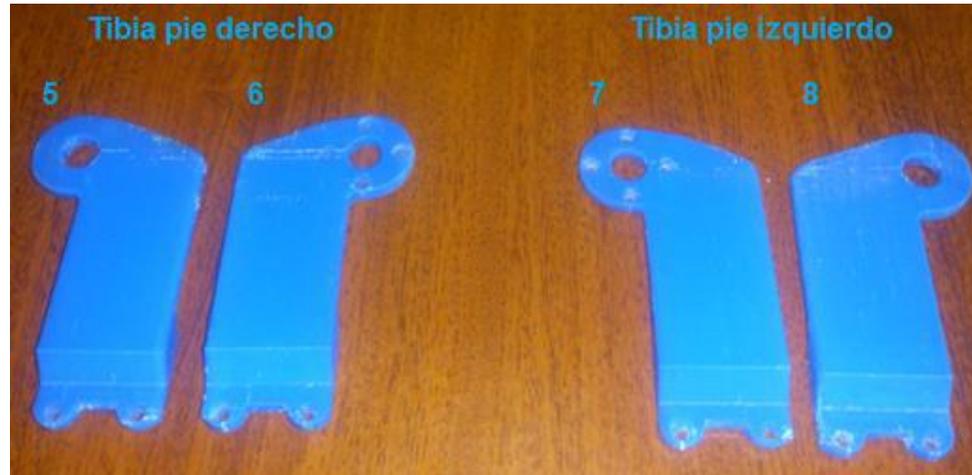
6



# Ensamblaje del robot bípedo.

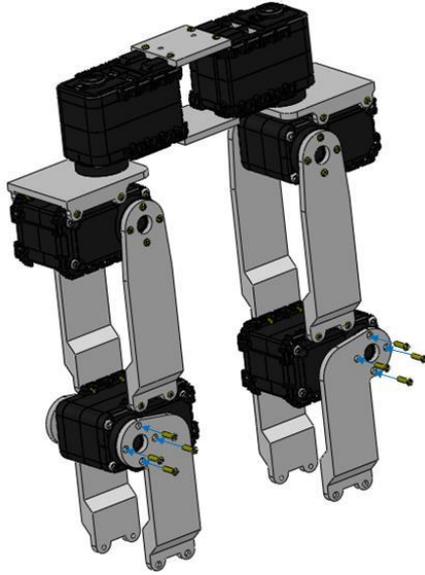


# Ensamblaje del robot bípedo.

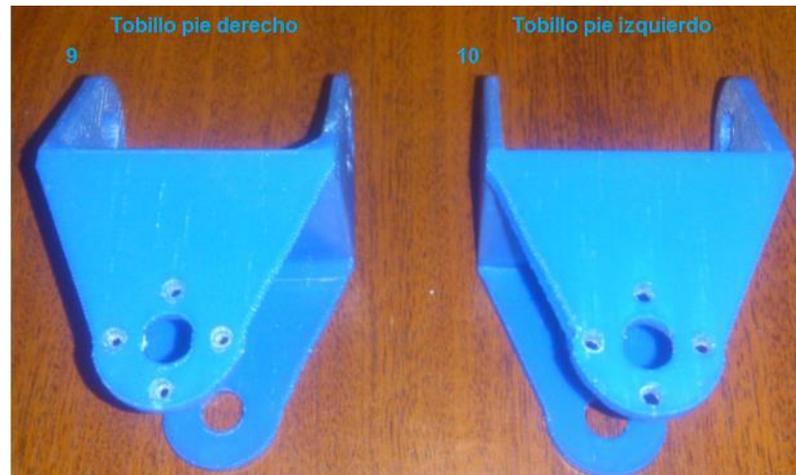
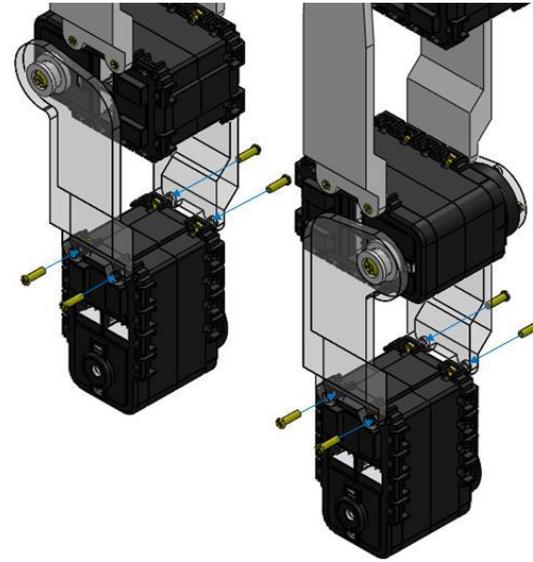


# Ensamblaje del robot bípedo.

16

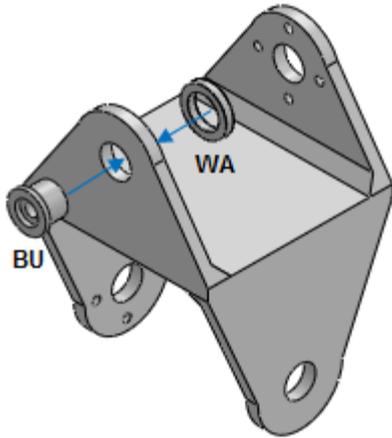


17

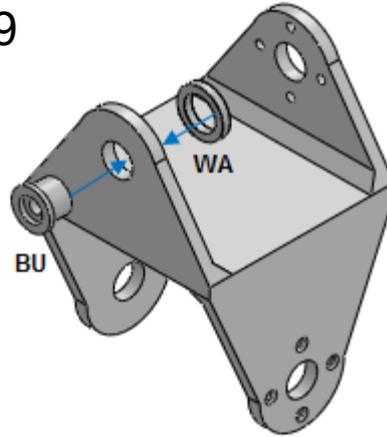


# Ensamblaje del robot bípedo.

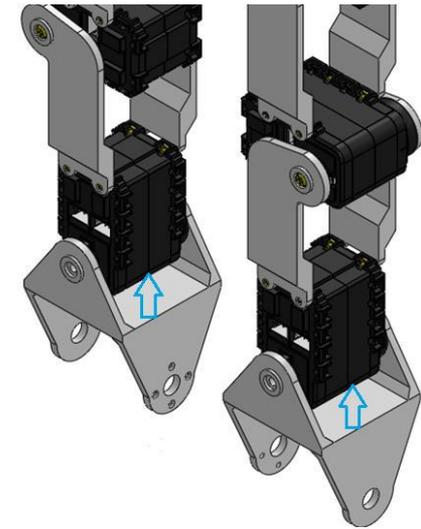
18



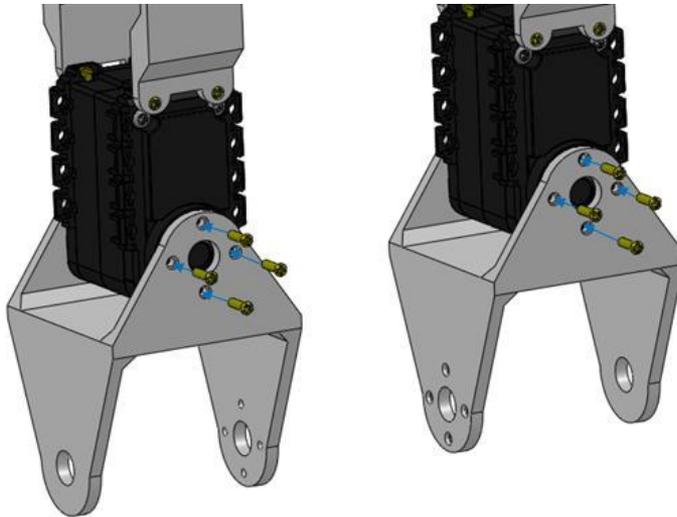
19



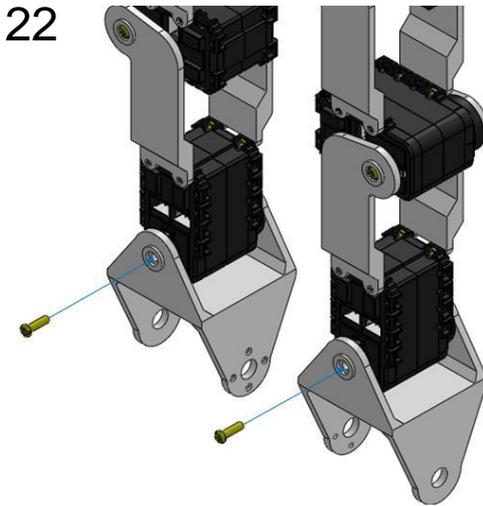
20



21

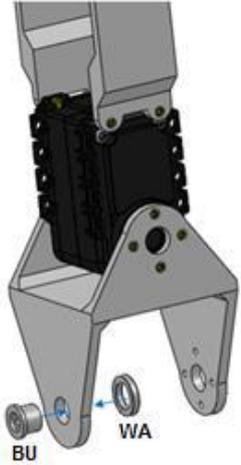


22

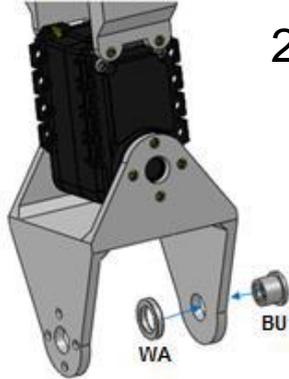


# Ensamblaje del robot bípedo.

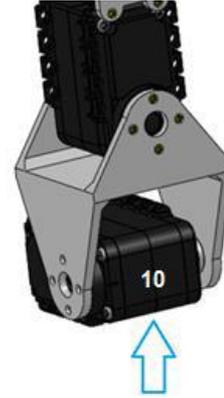
23



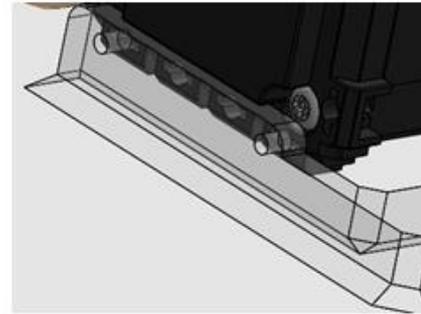
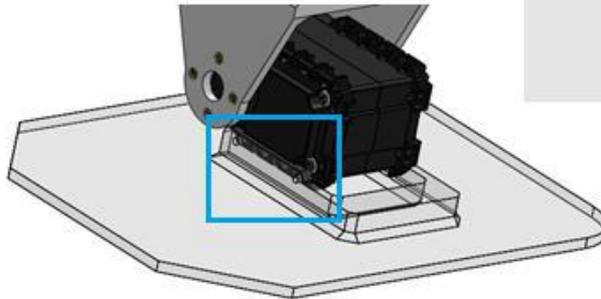
24



25

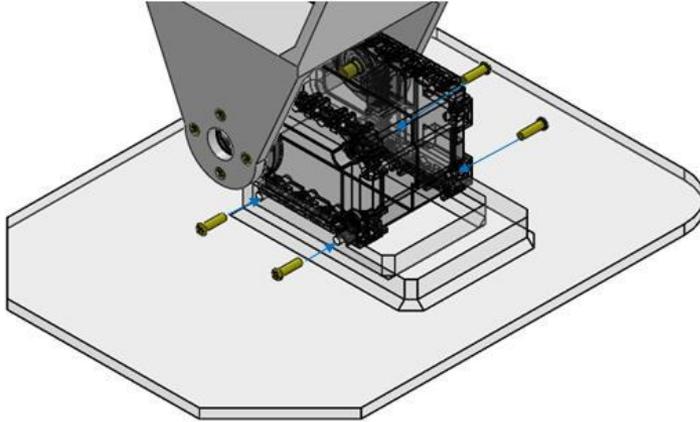


26

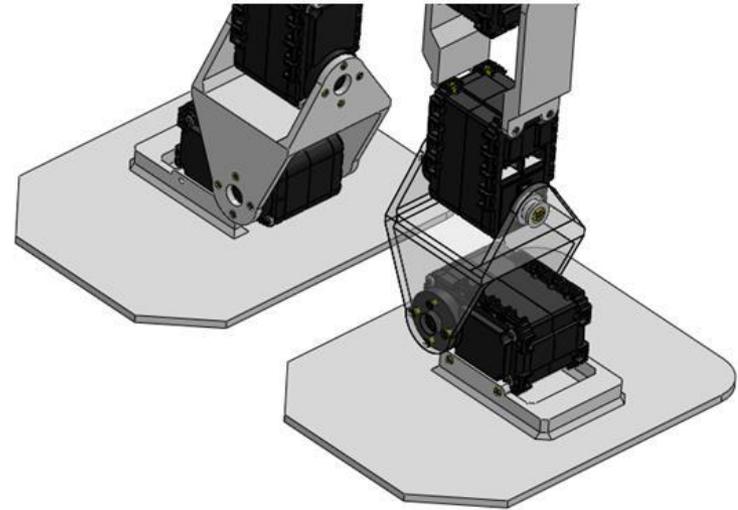


# Ensamblaje del robot bípedo.

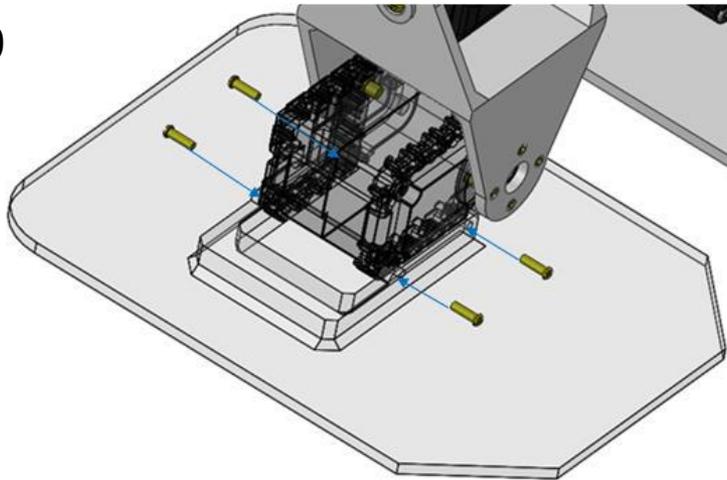
27



28

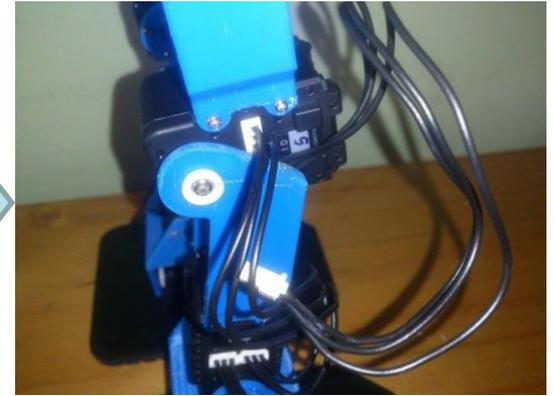


29



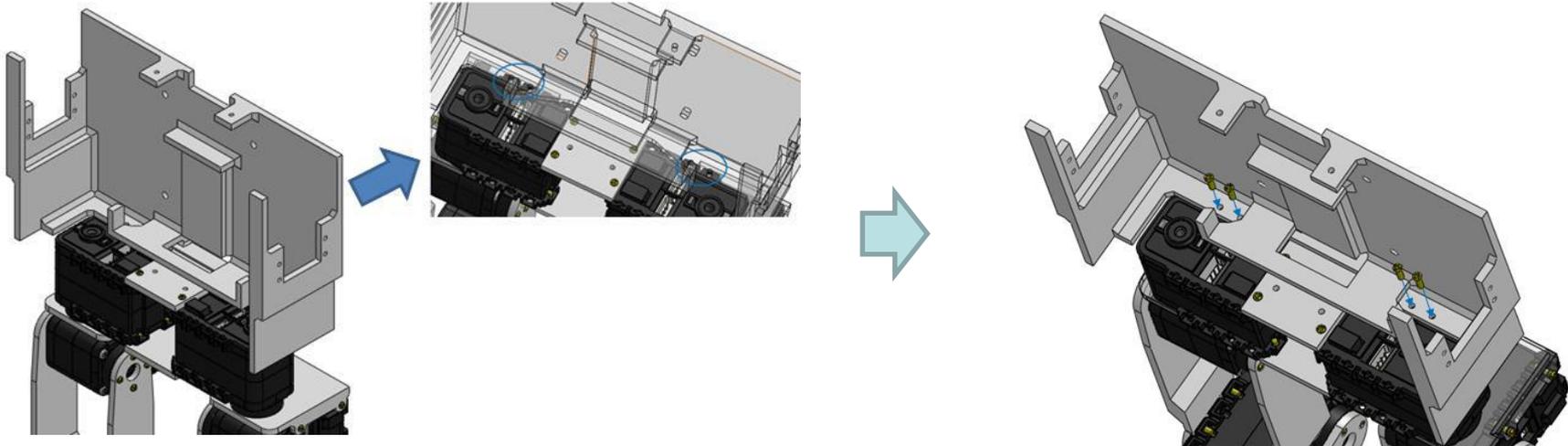
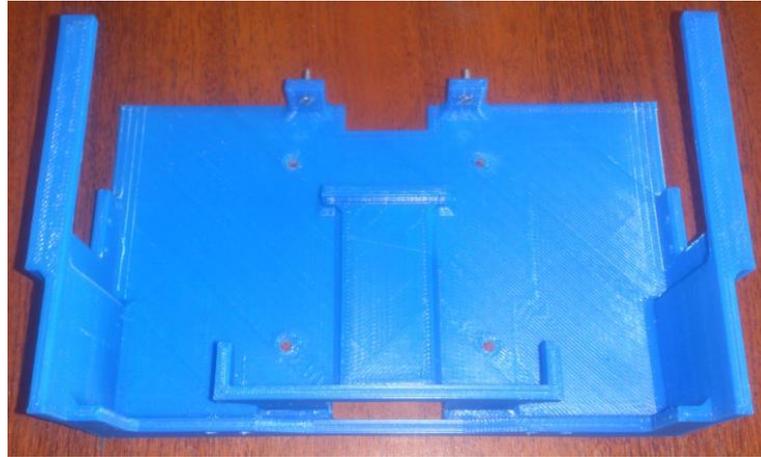
# Ensamblaje del robot bípedo.

Cableado parte Inferior:

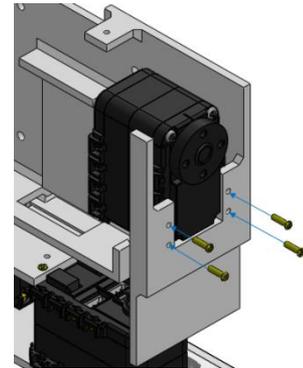
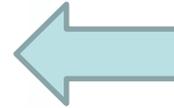
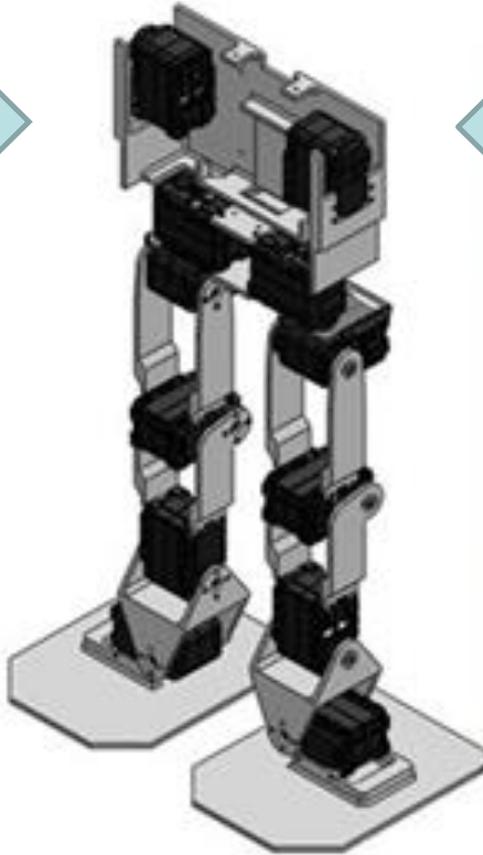
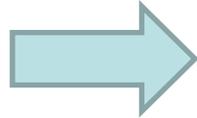
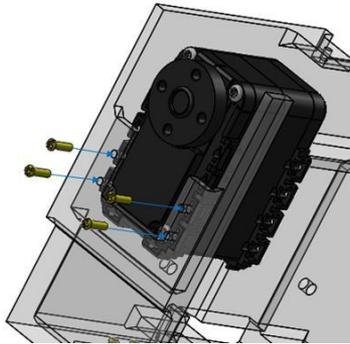


# Ensamblaje del robot bípedo.

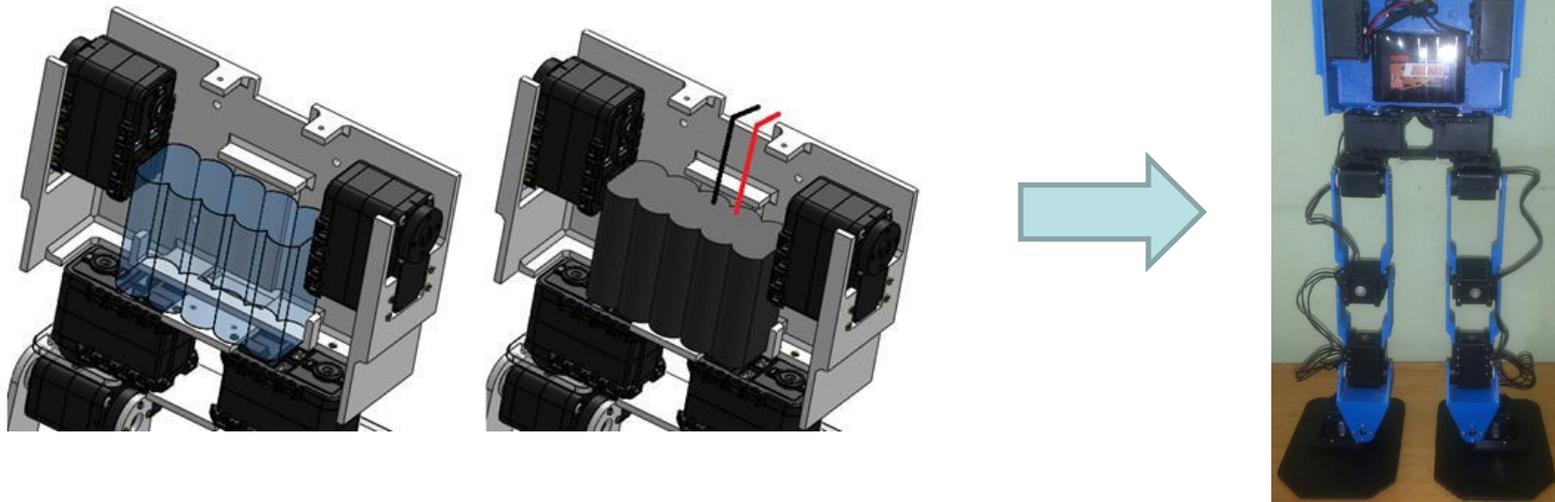
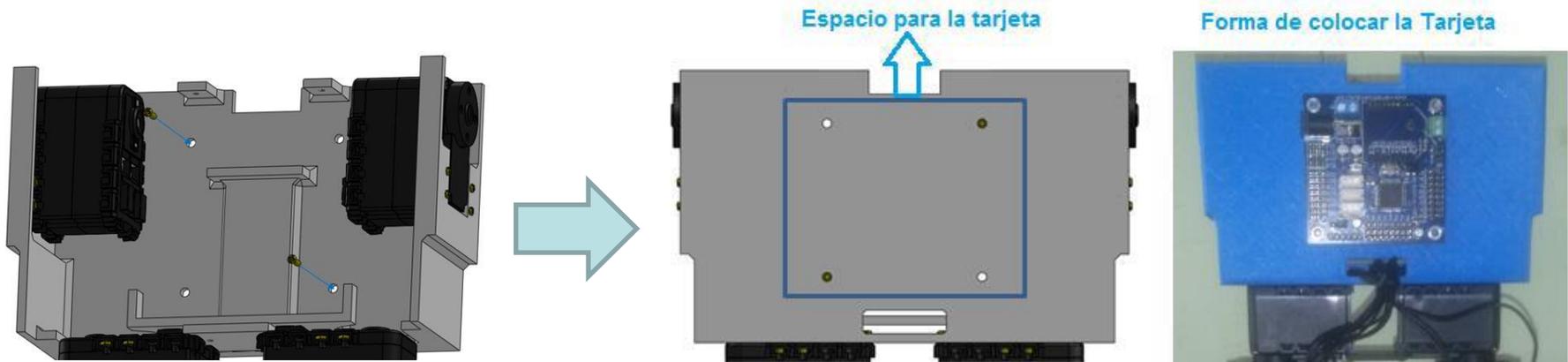
Ensamblaje parte superior:



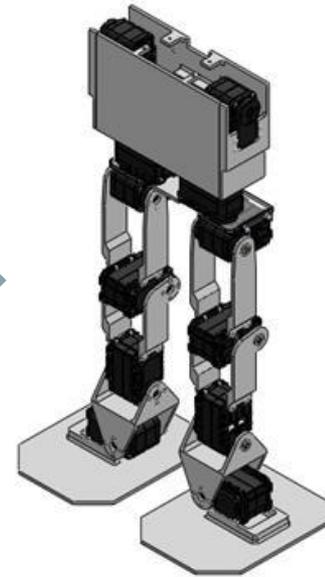
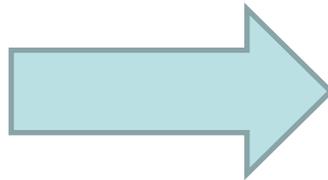
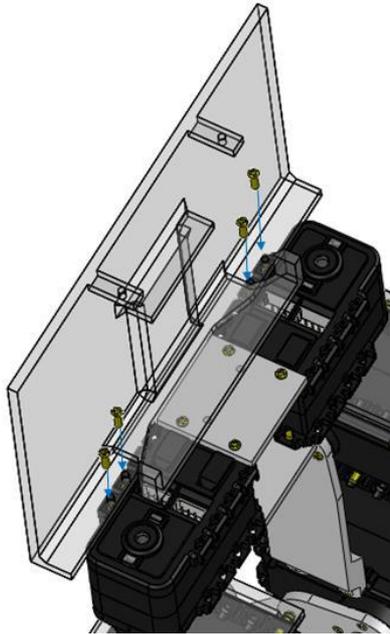
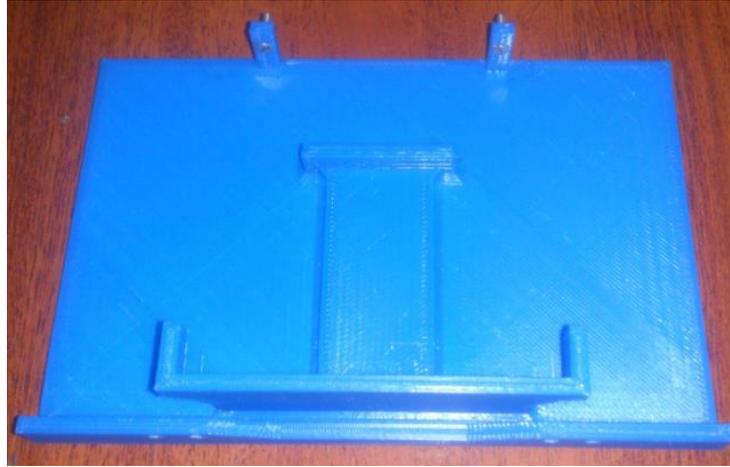
# Ensamblaje del robot bípedo.



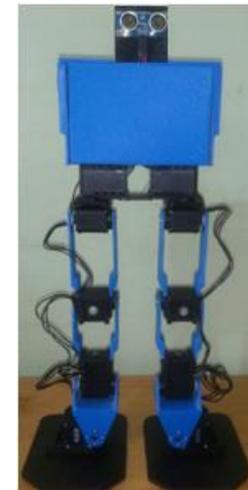
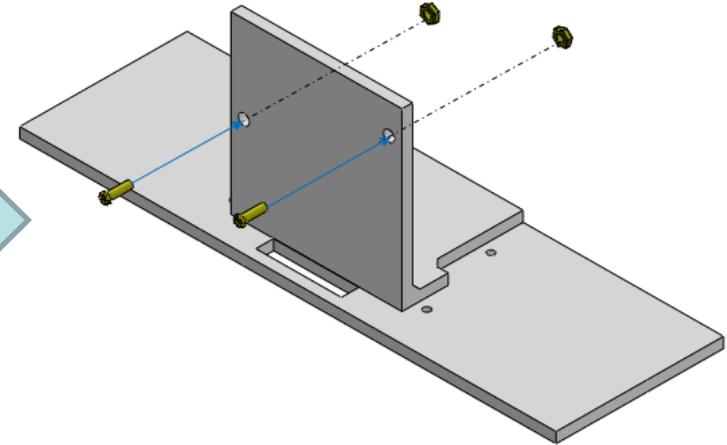
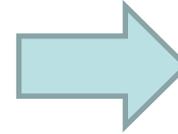
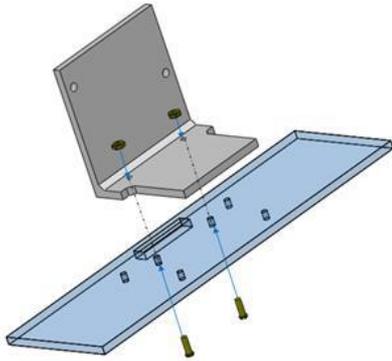
# Ensamblaje del robot bípedo.



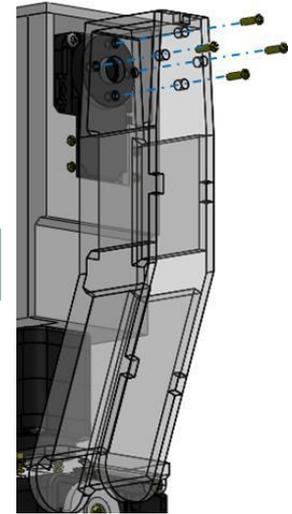
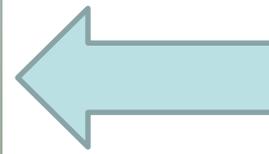
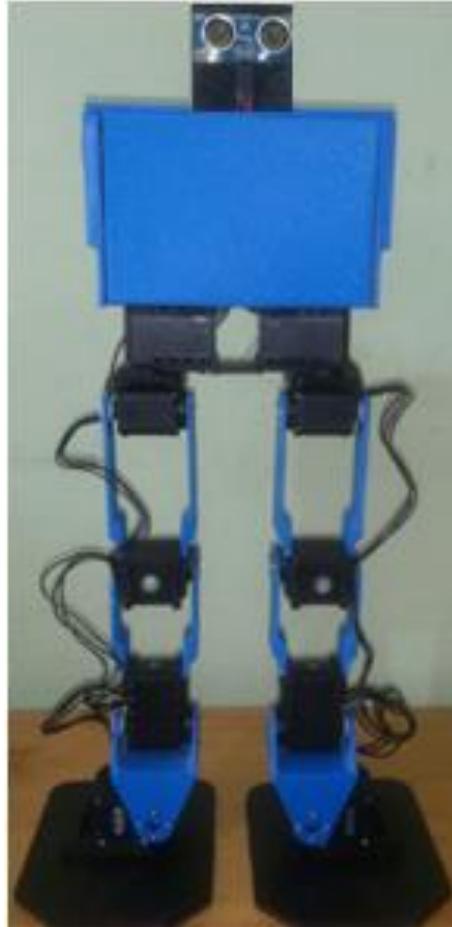
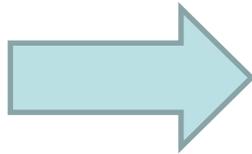
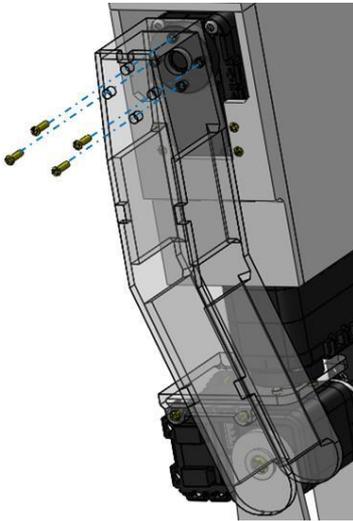
# Ensamblaje del robot bípedo.



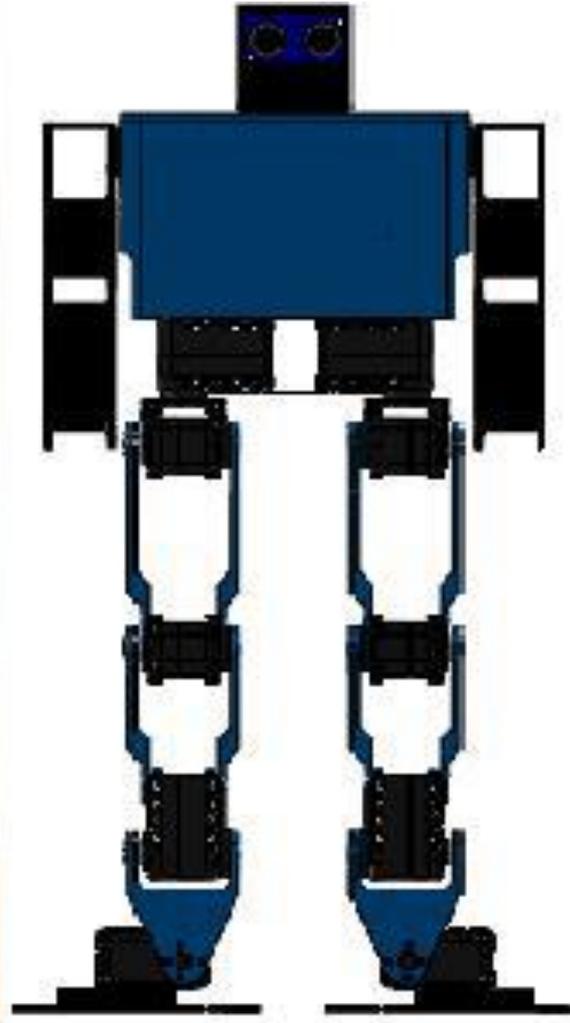
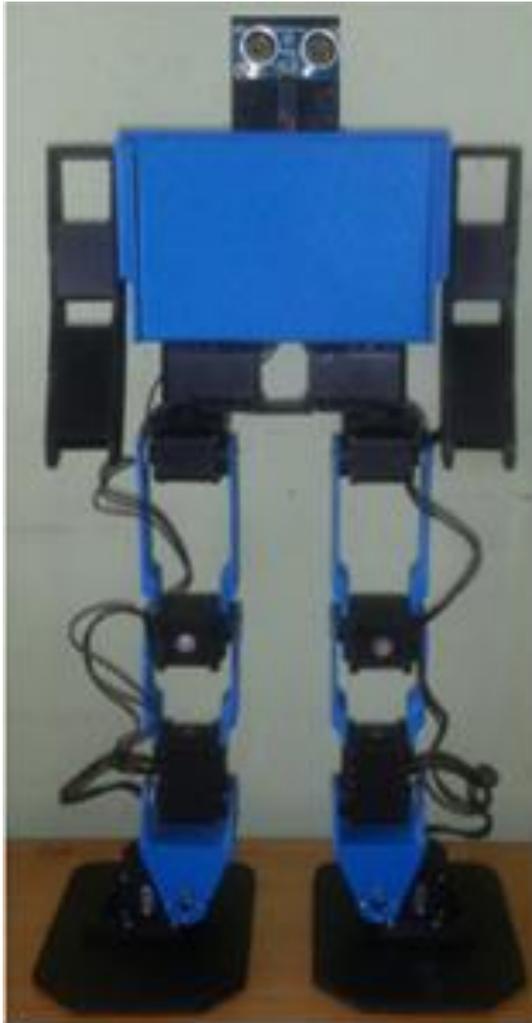
# Ensamblaje del robot bípedo.



# Ensamblaje del robot bípedo.

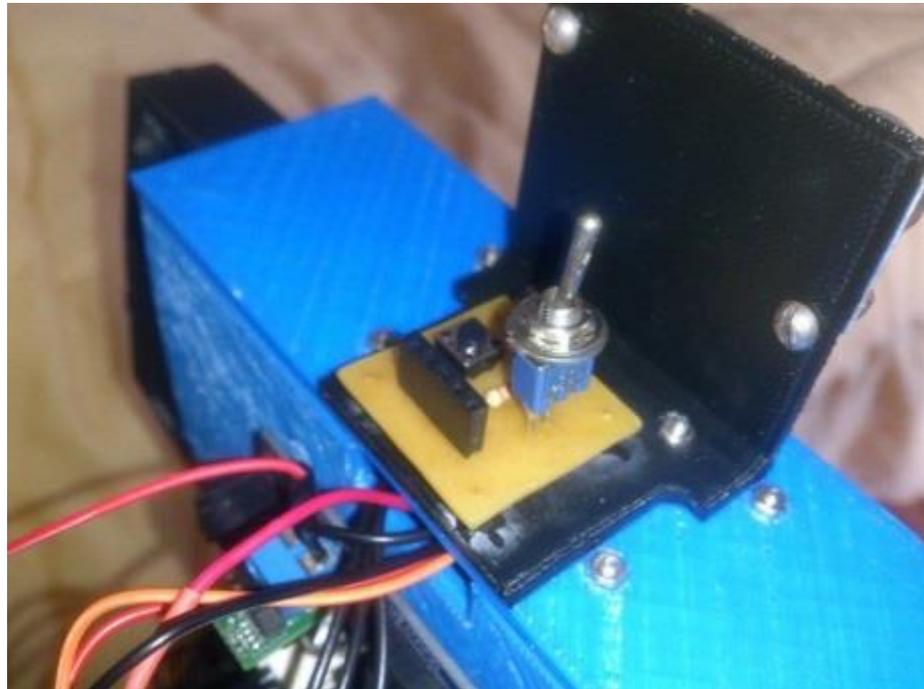


# Ensamblaje del robot bípedo.



# Ensamblaje del robot bípedo.

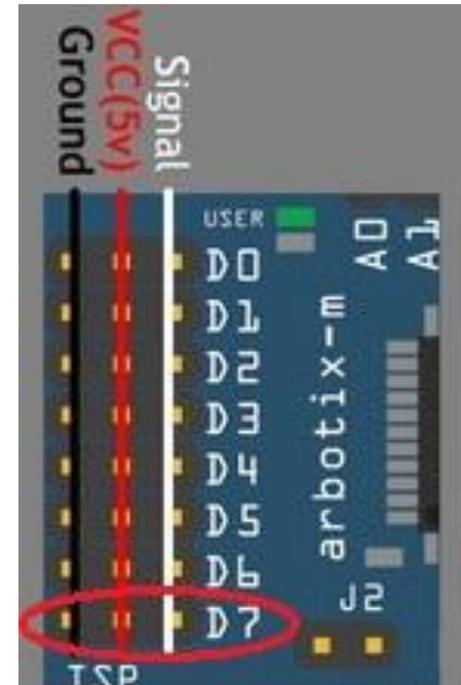
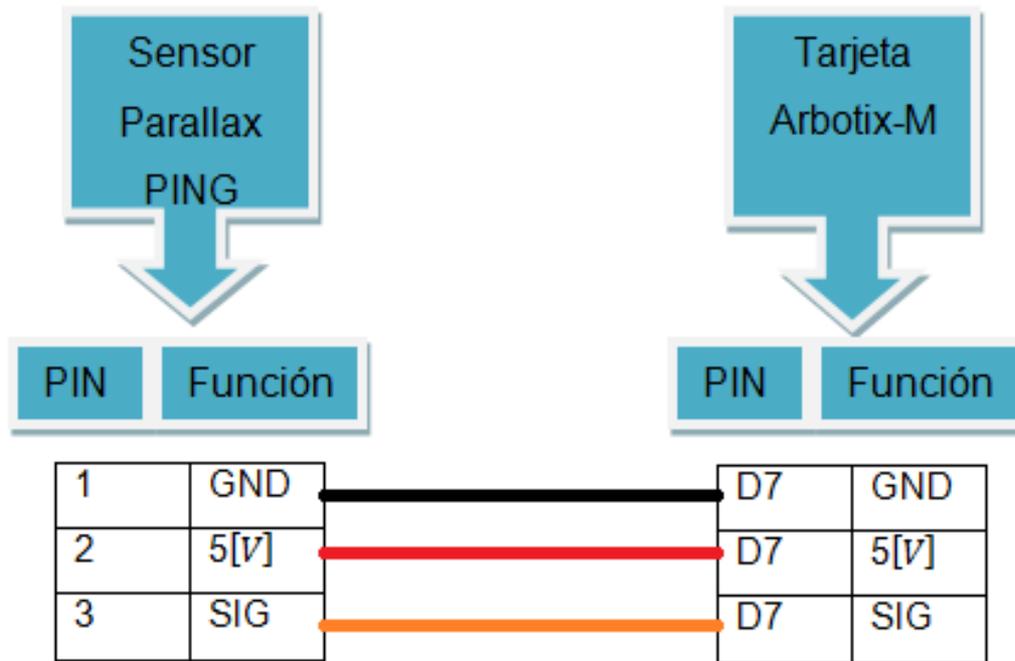
Montaje del sistema eléctrico



**ESPE**  
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO  
CAMINO A LA EXCELENCIA

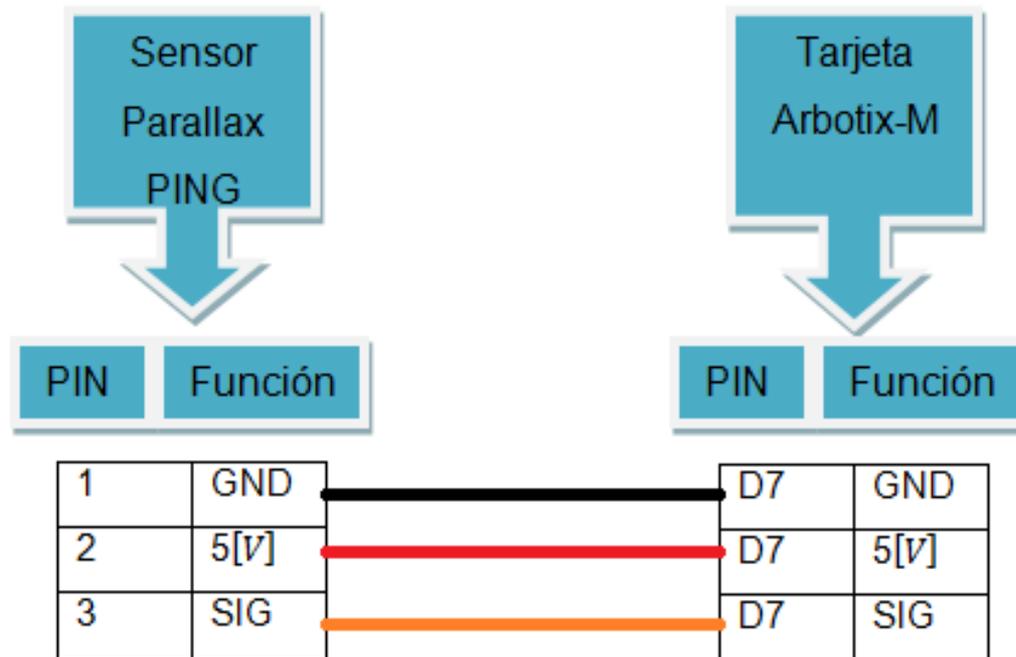
# Ensamblaje del robot bípedo.

Conexión del sistema de instrumentación:



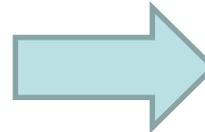
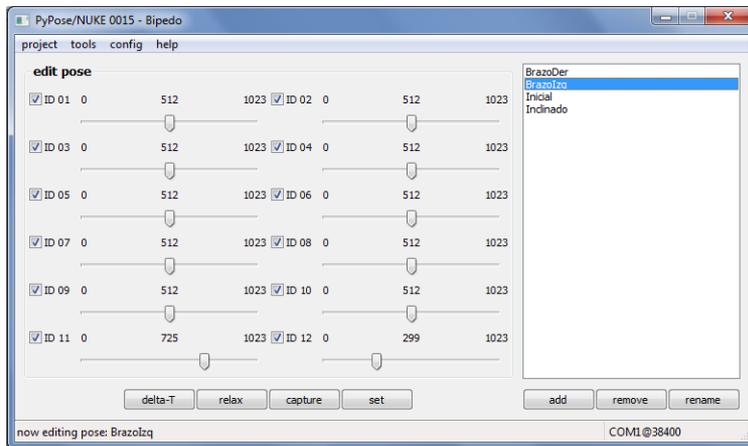
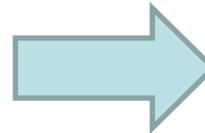
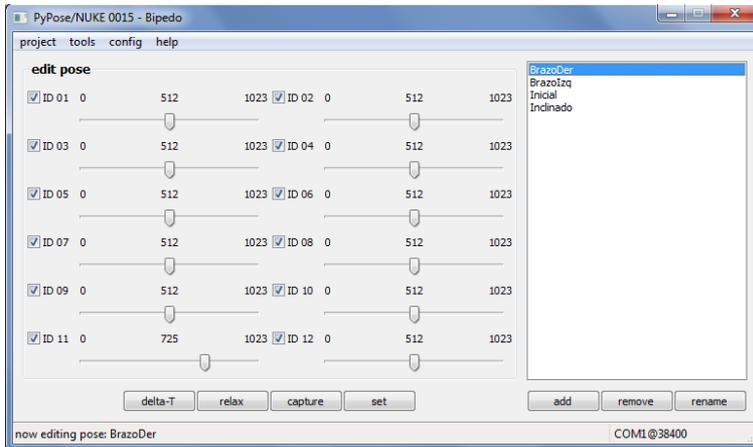
# Ensamblaje del robot bípedo.

Conexión del circuito de accionamiento:



# Integración de todos los Sistemas.

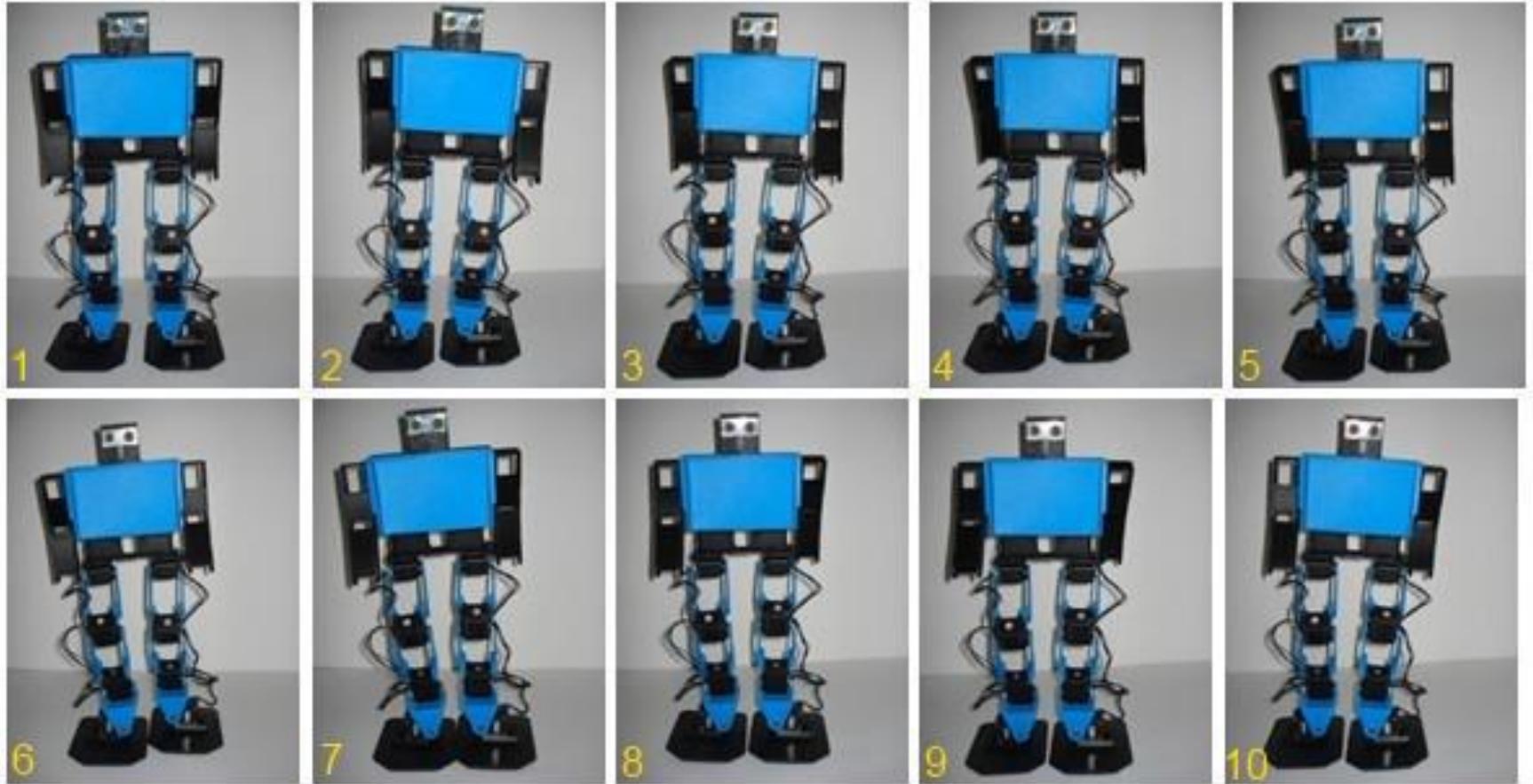
Se realizará un ejemplo práctico:



# Obtención de las trayectoria del robot bípido.

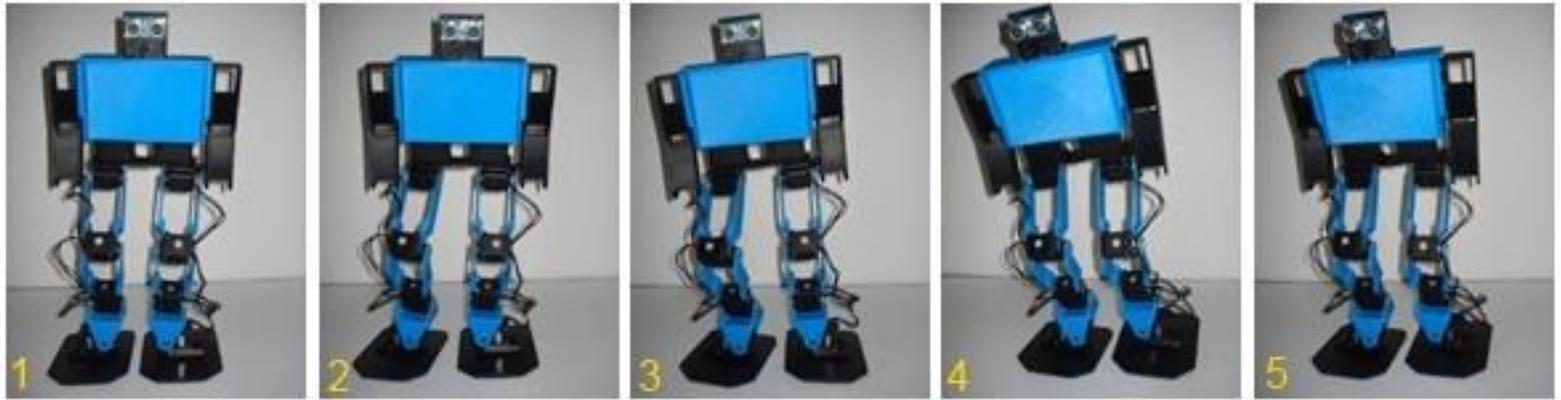


# Obtención de las trayectoria del robot bípido.

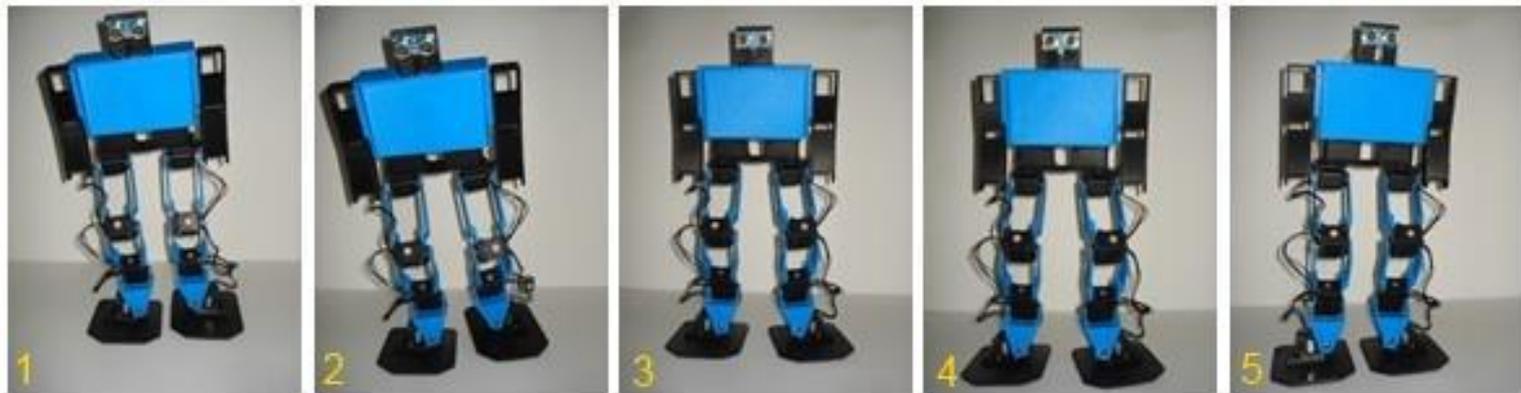


# Obtención de las trayectoria del robot bípido.

Giro a la derecha



Giro a la izquierda



# Algoritmo de Control

```
#include <ax12.h>
#include <BioloidController.h>
#include "poses1.h"

BioloidController bioloid = BioloidController(1000000);

int botonON = 2;
int leerON =0;
int datosensor =0;
int paro = 0;
int arranque = 0;
int caso = 0;
int numero = 0;
//sensor
const int pingPin = 7;
long duracion = 0;
long cm = 0;
```



# Algoritmo de Control

```
void setup(){
pinMode(botonON, INPUT);

delay(100);
bioloid.loadPose(Inicial);
bioloid.readPose();
bioloid.interpolateSetup(500);
while(bioloid.interpolating > 0){
bioloid.interpolateStep();
delay(3);}
}
```

```
void loop(){
leerON = digitalRead(botonON);
datosensor = sensor();
delay(5);
if(leerON == HIGH){
arranque = 1;}
if(arranque == 1 && datosensor > 40){
avanzar();}
if(arranque == 1 && datosensor <= 40){
caso = secuencias();
switch(caso){
case 1:
for(int i=0; i <= 6; i++){
girar();}
break;
case 2:
for(int i=0; i <= 10; i++){
girarl();}
break;
case 3:
for(int i=0; i <= 4; i++){
girarl();}
break;
}
}
}
```



# Algoritmo de Control(Subprogramas)

```
void avanzar(){
numero = 0;
bioloid.playSeq(a);
do{
bioloid.play();
}
while(bioloid.playing);
}
```

```
int sensor(){
pinMode(pingPin, OUTPUT);
digitalWrite(pingPin, LOW);
delayMicroseconds(2);
digitalWrite(pingPin, HIGH);
delayMicroseconds(5);
digitalWrite(pingPin, LOW);

pinMode(pingPin, INPUT);
duracion = pulseIn(pingPin, HIGH);

cm = duracion/29/2; //convierte tiempo a distancia
return cm;
}
```

```
void girar(){
bioloid.playSeq(giro);
do{
bioloid.play();
}
while(bioloid.playing);
}
```

```
void girarl(){
bioloid.playSeq(giroizq);
do{
bioloid.play();
}
while(bioloid.playing);
}
```

```
int secuencias(){
numero = numero + 1;
return numero;
}
```



# *Capítulo IV*

# *Pruebas y*

# *Resultados.*



# Pruebas del funcionamiento mecánico

## • Prueba de resistencia del material ABS:

### Parámetros del 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

- $\sigma$ : 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] (página 71) con lo cual se concluye que la estructura no corre riesgo de ruptura.



# Pruebas del funcionamiento mecánico

- **Posición donde se necesita mas torque:**



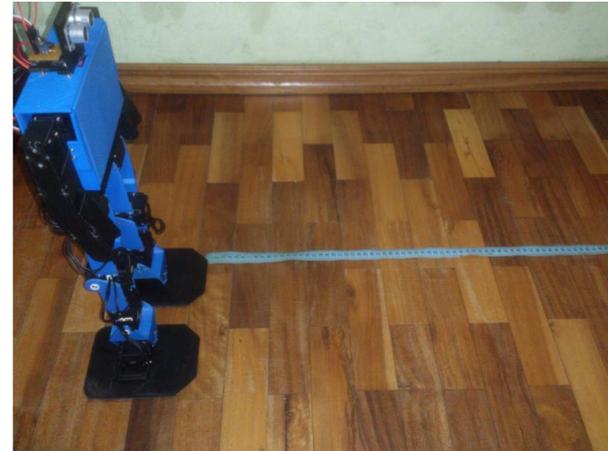
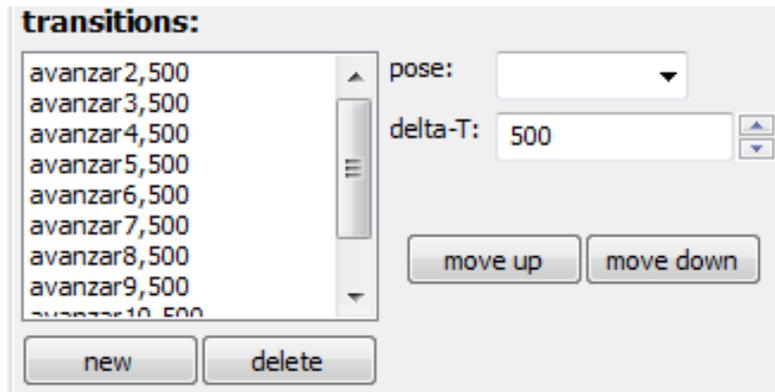
Torque max.= 0.2892 [N·m]



**ESPE**  
ESCUOLA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO  
CAMINO A LA EXCELENCIA

# Pruebas del funcionamiento mecánico

- **Velocidad de desplazamiento del robot bípedo:**



## **Prueba.**

Tiempo en el PyPose = 500 [ms] (Dato que varia)

Tiempo de la prueba = 30 [s]

Espacio recorrido = 23.5 [cm] (Dato que se obtiene)

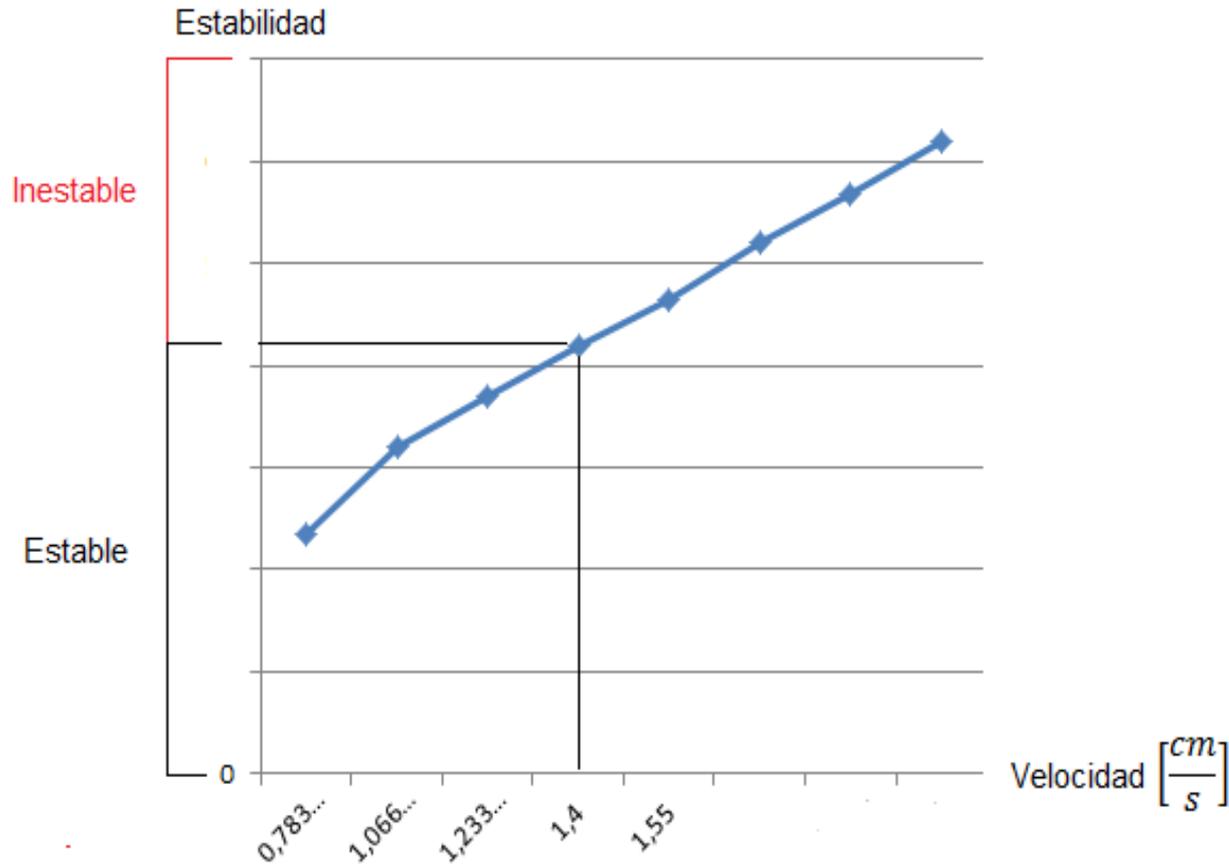
$$v_1 = \frac{e}{t} = \frac{23.5 [cm]}{30[s]} = 0.78 \left[ \frac{cm}{s} \right] \text{ (Valor calculado)}$$

Estable Velocidades menores a  $1.4 \left[ \frac{cm}{s} \right]$



# Pruebas del funcionamiento mecánico

- **Velocidad de desplazamiento del robot bípedo:**



# Pruebas del funcionamiento mecánico

- **Velocidad de desplazamiento promedio:**

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

Velocidad

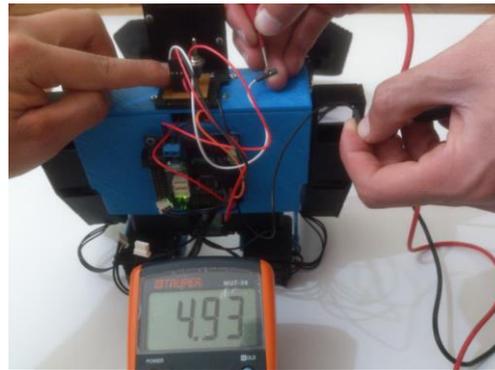
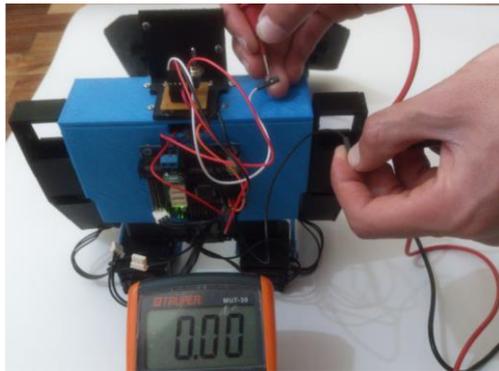
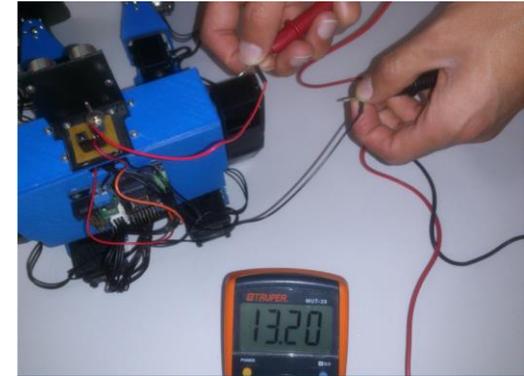
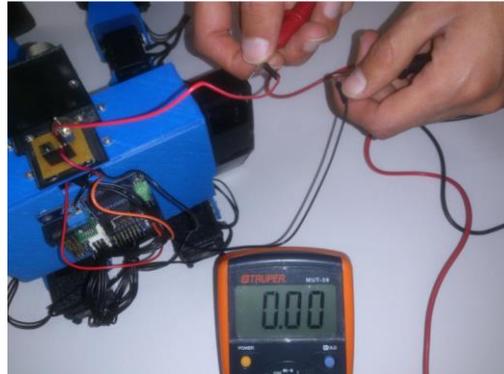
$$\text{promedio} = \frac{(0.78+0.79+0.80+0.78+0.77)}{5} \left[\frac{cm}{s}\right]$$

$$\text{Velocidad promedio} = 0.78 \left[\frac{cm}{s}\right]$$



# Pruebas del funcionamiento del sistema electrónico

- **Comprobación de voltajes:**



# Pruebas del funcionamiento del sistema electrónico

- **Duración de la batería:**

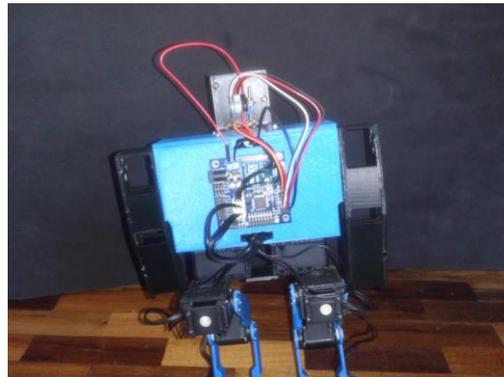
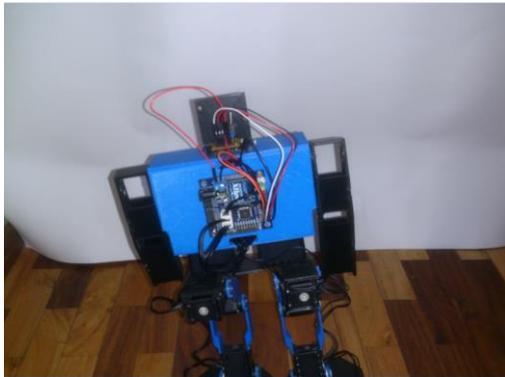
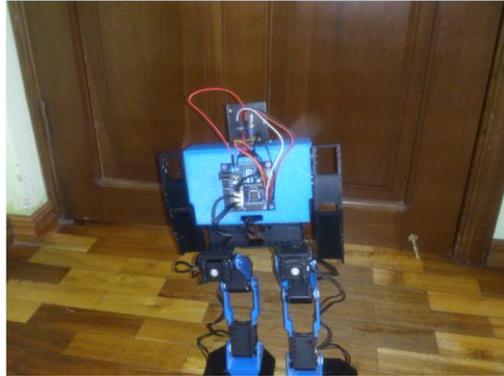
Tiempo	Voltaje Medido	Funciona el Robot	Porcentaje de descarga
10 [min]	12.3 [V]	Si	100%
20 [min]	11.8 [V]	Si	98.33%
30 [min]	10.4 [V]	Si	86.67%
40 [min]	9.1 [V]	Si	75.83%
50 [min]	8.6 [V]	Si	71.67%
60 [min]	7.5 [V]	No	62.5%

El tiempo obtenido mediante cálculos es de 73.2 [min] y el obtenido cuando el robot bípedo está funcionando es de 60 [min], con lo cual la diferencia de tiempo es de 13.2 [min].



# Pruebas del funcionamiento del sistema electrónico

- **Detección de Obstáculos:**



# Pruebas del funcionamiento del sistema electrónico

- **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	



# Pruebas del funcionamiento del sistema electrónico

- **Distancia de sensado:**



Número de Prueba	Distancia Establecida [cm]	Distancia Medida [cm]
1	40	38
2	40	39
3	40	38.5
4	40	39,3
5	40	38,8



# Pruebas del funcionamiento del sistema de control

- Errores del algoritmo de control:

Error

```
void avanzar(){
numero = 0;
bioloid.playSeq(a);
do{
bioloid.play();
}
while(paro == 1);
}
```

Corrección

```
void avanzar(){
numero = 0;
bioloid.playSeq(a);
do{
bioloid.play();
}
while(bioloid.playing);
}
```

Error

```
case 1:
for(int i=0; i <= 4; i++){
girar();}
break;
```

Corrección

```
case 1:
for(int i=0; i <= 6; i++){
girar();}
break;
```

Error

```
case 2:
for(int i=0; i <= 5; i++){
girarl();}
break;
```

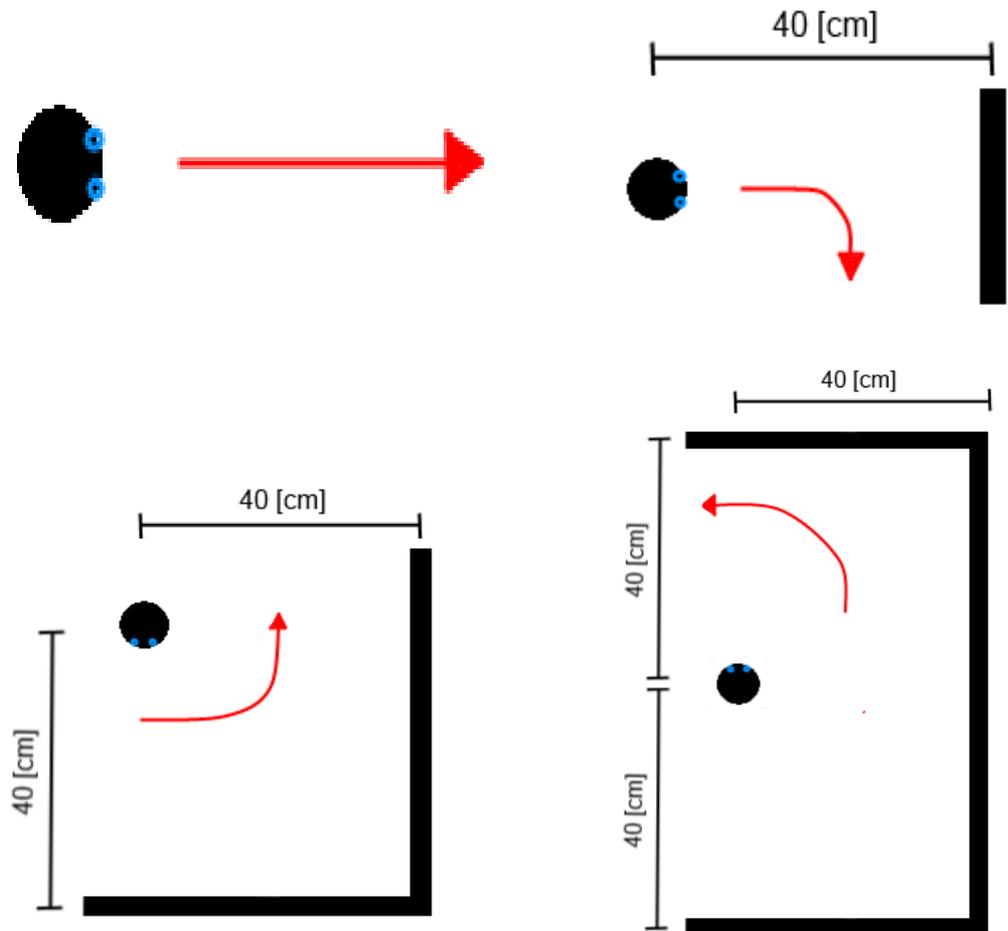
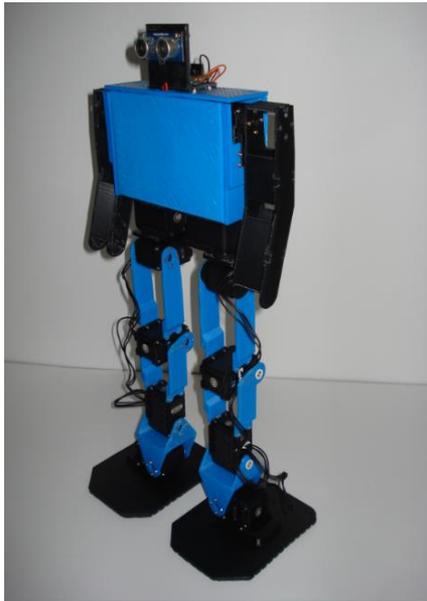
Corrección

```
case 2:
for(int i=0; i <= 10; i++){
girarl();}
break;
```



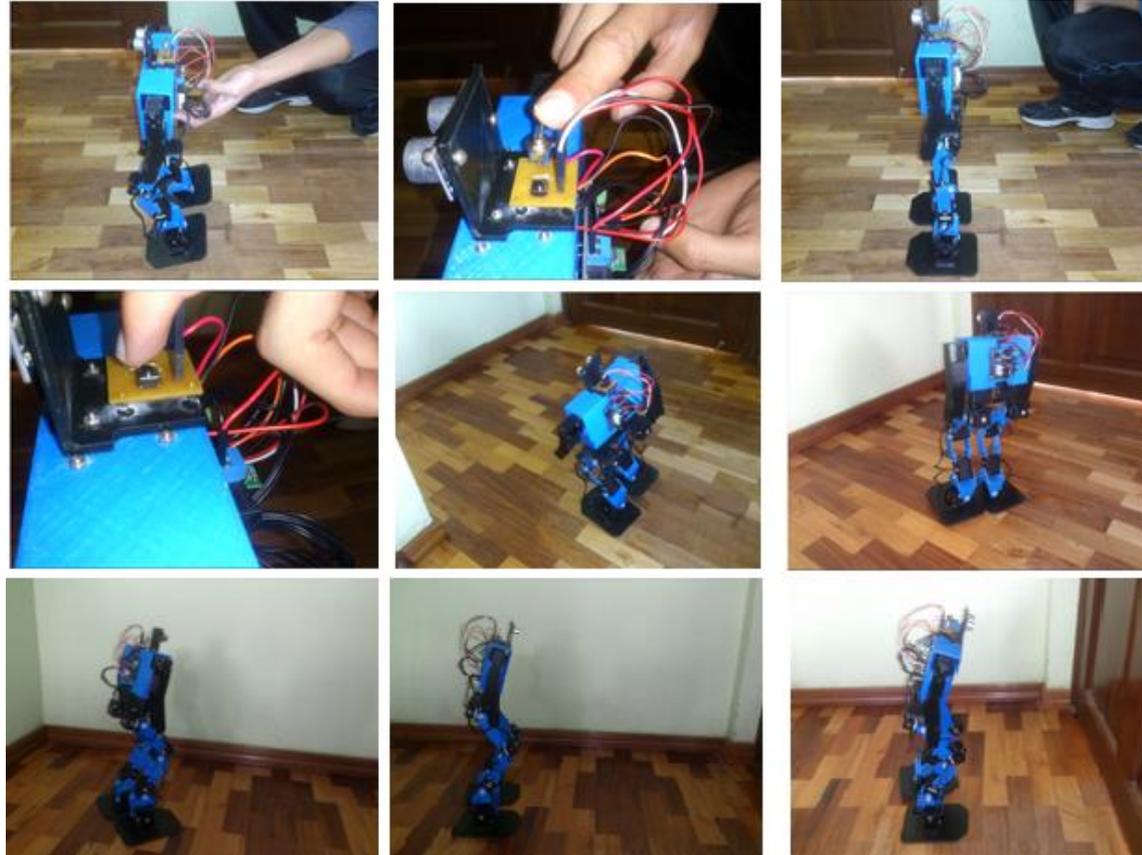
# Pruebas del funcionamiento del sistema de control

- Acciones del sistema de control:



# Pruebas generales de funcionamiento

- Encendido - Puesta en marcha - Giro:



# Pruebas generales de funcionamiento

- **Giro 180° a la izquierda:**



# Pruebas generales de funcionamiento

- **Giro 90° a la izquierda:**



# Validación de la Hipótesis

- La hipótesis planteada para el presente proyecto fue:

¿El diseño y la construcción del prototipo de robot bípedo autónomo con desplazamiento dinámico permitirán que éste sea capaz de caminar manteniendo el equilibrio y detectar los obstáculos presentes en su trayectoria?



# Validación de la Hipótesis

- **Equilibrio:**

*H0*: 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.

*H1*: El robot tiende a perder equilibrio durante todas las acciones. El nivel significativo para el cual se va a trabajar es del 95%.

## Datos observados para el equilibrio.

Mantiene 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



# Validación de la Hipótesis

- Equilibrio:**

	O	E	O-E	$(O - E)^2$	$\frac{(O - E)^2}{E}$
Durante la Caminata. SI	85	84,411	0,588	0,346	0,004
Durante la Caminata. NO	72	67,529	4,470	19,986	0,295
Durante el giro a la derecha. SI	50	50,647	0,647	0,418	0,008
Durante el giro a la derecha. NO	80	84,411	-4,411	19,463	0,23
Durante el giro a la izquierda 90°. SI	15	15,588	-0,588	0,346	0,022
Durante el giro a la izquierda 90°. NO	8	12,470	-4,470	19,986	1,602
Durante el giro a la izquierda 180°. SI	10	9,352	0,647	0,418	0,0447
Durante el giro a la izquierda 180°. NO	20	15,588	4,411	19,463	1,248
				$\chi^2$	3,45714724



# Validación de la Hipótesis

- **Equilibrio:**

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

Chi-cuadrado, 12,8381 para  $\lambda^2$ .

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 o se dice que el robot mantiene el equilibrio de la misma manera en todas las acciones.



# Validación de la Hipótesis

- **Sensado:**

$H_0$ : No existe fallo en la detección de obstáculos por parte del robot en su trayectoria.

$H_1$ : El robot falla en la detección de obstáculos en su trayectoria.

El nivel significativo para el cual se va a trabajar será del 95%.

Detecta el obstáculo	Durante la Caminata	Después de girar 90 ° a la derecha.	Después de girar 90 ° a la izquierda.	Después de girar 180 ° a la izquierda.	TOTAL
SI	85	72	50	80	287
NO	15	8	10	20	53
TOTAL	100	80	60	100	340



# Validación de la Hipótesis

- Sensado:**

	O	E	O-E	$(O - E)^2$	$\frac{(O - E)^2}{E}$
Durante la Caminata SI	85	84,411	0,588	0,346	0,004
Durante la Caminata NO	72	67,529	4,470	19,986	0,295
Después de girar 90 ° a la derecha. SI	50	50,647	0,647	0,418	0,008
Después de girar 90 ° a la derecha. NO	80	84,411	-4,411	19,463	0,23
Después de girar 90 ° a la izquierda. SI	15	15,588	-0,588	0,346	0,022
Después de girar 90 ° a la izquierda. NO	8	12,470	-4,470	19,986	1,602
Después de girar 180 ° a la derecha. SI	10	9,352	0,647	0,418	0,0447
Después de girar 180 ° a la derecha. NO	20	15,588	4,411	19,463	1,248
				$\lambda^2$	3,457



# Validación de la Hipótesis

- **Sensado:**

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

Chi-cuadrado, 12,8381 para  $\lambda^2$ .

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 no existe fallo en la detección de obstáculos por parte del robot bípedo en su trayectoria.



# Validación de la Hipótesis

- Mediante los resultados obtenidos por medio de la prueba de chi-cuadrado referente al equilibrio y a la detección de obstáculos los cuales confirman que el robot funciona de manera correcta, se dice, 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.



# *Capítulo V*

# *Conclusiones y*

# *Recomendaciones.*



# Conclusiones

- Se diseñó y construyó un prototipo de robot bípedo autónomo con desplazamiento dinámico.
- Se concluye que mediante los cálculos realizados en conjunto con el software Matlab, se diseñó y simuló el modelado matemático del robot bípedo.
- Se diseñó e implementó el sistema mecánico y electrónico del robot bípedo con sus respectivos elementos y materiales para que emulen el movimiento del caminado humano, además que cuenta con la capacidad de detectar obstáculos y realizar una acción frente a ellos.
- Se concluye que el uso del material ABS permite el ahorro de tiempo en la construcción de la estructura del robot bípedo, pues permite el prototipado rápido de sus piezas, ya sea que estas tengan formas simples o complejas.



# Conclusiones

- Se cumplió con los valores del tamaño y el peso del robot bípedo, los cuales están dentro de los rangos que se dieron en los parámetros de diseño.
- La selección de elementos fue la correcta, ya que con estos componentes electrónicos se obtuvieron los resultados esperados de funcionamiento del robot bípedo.
- La concepción 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.



# Conclusiones

- Los motores utilizados tiene un excelente desempeño para realización de proyectos del tipo robótico.
- Pasado la velocidad de  $1.4 \left[ \frac{cm}{s} \right]$  el robot comienza a disminuir su estabilidad.
- La tarjeta electrónica usada cumple de forma correcta con todo lo establecido para las acciones de control y de almacenamiento de datos utilizados para el proyecto.
- El diseño del pie mediante la teoría del ZMP, fue el correcto pues como se observó el robot mantiene el equilibrio mientras el punto de momento cero se encuentren dentro del polígono formando por los pies.



# Recomendaciones

- Al momento de realizar el ensamblaje del prototipo de robot bípedo se recomienda verificar que los servomotores estén en la posición inicial para evitar errores al momento que se ejecuten las trayectorias.
- Se recomienda verificar todas las conexiones de los distintos componentes electrónicos antes de encender el robot bípedo.
- La implementación de las trayectorias para el robot bípedo como las que realiza el ser humano necesitan de mayores implicaciones investigativas debido a que el ser humano cuenta con músculos y mayor número de grados de libertad, los mismo que son limitantes en un prototipo, se recomienda continuar con la investigación en este tema.



# Recomendaciones

- En base a la investigación realizada en este proyecto se recomienda continuar con el desarrollo de prototipos de robots ya sean bípedos, humanoides, etc.
- Comprar textos que ayuden en el aprendizaje de temas sobre la dinámica y cinemática de los robots.
- Extender los conocimientos acerca de las prácticas sobre la dinámica y cinemática que se pueden realizar en Matlab con respecto a brazos robóticos para facilitar su aprendizaje.
- Para mejorar los prototipos de robots bípedos se recomienda realizar investigaciones previas como la construcción de un transporte personal con auto-balance (segway), este proyecto ayudaría a conocer de mejor manera como funciona un giroscopio y como implementarlo para después aplicarlo en un robot bípedo.



# Recomendaciones

- Se recomienda realizar la captura de movimientos mediante cámaras de la trayectoria que realiza el ser humano en el plano sagital al momento de caminar, esto permitirá contar con una base de datos para la futura implementación de las trayectorias en otros prototipos no solamente del tipo robótico sino también servirían para prótesis inteligentes, con lo que se facilitará el desarrollo de prototipos más avanzados y complejos.
- Se recomienda el uso de un número mayor de sensores para la detección de los obstáculos para que el robot bípedo tenga un campo de visión más amplio y un mejor desenvolvimiento en diferentes entornos.



# GRACIAS POR SU ATENCIÓN



**ESPE**  
ESCUOLA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO  
CAMINO A LA EXCELENCIA