



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

---

---

***ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
UNIDAD ZACATENCO***

**SISTEMA DE EQUILIBRIO PARA UN ROBOT DE  
DOS EXTREMIDADES**

***T E S I S***  
***Que para obtener el grado de:***

***MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA  
ELECTRÓNICA***

***P R E S E N T A:***

**Ing. Miguel Angel Acosta Lira**

***DIRECTOR DE TESIS::***

**Dr. Francisco Javier Gallegos Funes**



México, D. F.

Mayo, 2009



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

SIP-14

*ACTA DE REVISIÓN DE TESIS*

En la Ciudad de            México, D.F.            siendo las            16:00            horas del día            11            del mes de            MAYO            del            2009            se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de            E.S.I.M.E.            para examinar la tesis titulada:

**“SISTEMA DE EQUILIBRIO PARA UN ROBOT DE DOS EXTREMIDADES”**

Presentada por el alumno:

<b>ACOSTA</b>	<b>LIRA</b>	<b>MIGUEL ANGEL</b>
Apellido paterno	Apellido materno	Nombre(s)

Con registro: 

A	0	7	0	1	7	4
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

**Director de tesis**

DR. FRANCISCO JAVIER GALLEGOS FUNES

**PRESIDENTE**

DR. JOSÉ MANUEL DE LA ROSA VÁZQUEZ

**SEGUNDO VOCAL**

DR. HÉCTOR OVIEDO GALDEANO

**TERCER VOCAL**

DR. ALBERTO JORGE ROSALES SILVA

**SECRETARIO**

DR. RAUL PEÑA RIVERO

**SUPLENTE**

M.C. HÉCTOR CALTENCO FRANCA

**EL PRESIDENTE DEL COLEGIO**

DR. JAIME ROBLES GARCÍA





**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

*CARTA CESIÓN DE DERECHOS*

En la Ciudad de México, Distrito Federal el día 11 del mes mayo del año 2009, el (la) que suscribe Miguel Angel Acosta Lira alumno (a) del Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica con número de registro A070174, adscrito a Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME unidad Zacatenco, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de Dr. Francisco Javier Gallegos Funes y cede los derechos del trabajo intitulado Sistema de Equilibrio para un Robot de Dos Extremidades, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección angelmig\_10@yahoo.com.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

  
Miguel Angel Acosta Lira

Nombre y firma

---

## *DEDICATORIA*

*A mis padres Verónica y MiguelAngel por todo el apoyo que me brindaron a lo largo de toda mi carrera y a mis hermanos Norma Lilia Y Oscar por estar con migo en todo momento.*

---

---

## *AGRADECIMIENTOS*

*A mi familia por el apoyo que me brindaron.*

*Al Dr. Francisco Javier Gallegos Funes.*

*A la SEPI y al Instituto Politécnico Nacional por  
brindarme el conocimiento para mi formación como  
Maestro en Ciencias.*

---

## Resumen

En este trabajo se presenta el diseño y construcción de la parte física y la parte de control para un sistema de equilibrio de un robot de dos piernas. La parte física se refiere a la construcción de cada una de las piezas con las cuales está construido el robot y que le permiten tener 5 grados de libertad por pierna con un total de 10 grados de libertad para ambas piernas y un grado de libertad en la pieza que simula la columna vertebral. La parte de control consiste en el monitoreo de la posición actual del robot para la estabilización de su posición evitando con esto que el robot caiga o pierda el equilibrio. El proceso de estabilización se lleva a cabo a través de sensores de inclinación, microcontroladores y servomotores para el movimiento de las articulaciones. Para la construcción del robot solo se considera la parte de la cintura a los pies descartando el cuerpo ya que el objetivo de este trabajo es proporcionar equilibrio al robot y no desarrollar un autómata completo.

## **Abstract**

This work shows the design and construction of the physical part, and the development of the electronic circuits of control for a balancing system of a robot of two legs. The physical part refers to the construction of each one of the pieces which will be built the robot and will allow having 5 grades of freedom for leg with a total of 10 grades of freedom for both legs and a grade of freedom in the piece that simulates the spine. The control part consists in the monitoring of the robot's current position for the stabilization of its position avoiding with this, that the robot falls or lose the balance. The stabilization process it is carried through inclination sensors, microcontrollers and servomotors for the movement of the articulations. The objective of this work is to provide balance to a robot and not to develop a complete automata, the robot consists in two legs for the movement and a spine where it is placed a weight that simulates to the body.

# Índice General

	Página
RESUMEN.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS.....	iii
Figuras.....	iii
Tablas .....	vi
NOMENCLATURA.....	vii
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	
1.1 Introducción.....	2
1.1.1 Bases y antecedentes de la robótica.....	2
1.1.2 Concepto e historia.....	2
1.1.3 Bases de la robótica.....	4
1.2 Objetivo.....	5
1.3 Justificación. ....	5
1.4 Metas.....	6
1.5 Organización de la tesis.....	6
1.6 Referencias.....	6
<b>2. ESTADO DEL ARTE</b>	
2.1 Introducción.....	8
2.2 La Robótica.....	8
2.3 Robots bípedos.....	9
2.3.1 QRIO.....	9
2.3.2 ASIMO.....	10
2.4 Modelo de las articulaciones.....	11
2.5 Cálculo de la articulación.....	14
2.5.1 Centro de masa.....	14
2.5.2 Centro de gravedad.....	15
2.5.3 Torque.....	15
2.5.4 Palanca.....	17
2.5.5 Servomotor.....	18
2.6 Conclusiones.....	18
2.7 Referencias.....	18
<b>3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN</b>	
3.1 Introducción.....	21
3.2 Desarrollo.....	21
3.2.1 Diseño de la parte física.....	21
3.2.2 Centros de masa y límites de torque en los motores.....	27
3.2.2.1 Centro de masa.....	27
3.2.2.2 Ángulos soportados por el servomotor .....	30
3.2.3 Componentes para el control .....	31



---

3.2.3.1 Modulo de control de servomotores.....	31
3.2.3.2 Sensor de inclinación.....	34
3.2.4 Diseño de la parte lógica.....	37
3.2.4.1 Compilador.....	37
3.2.4.2 Control para el equilibrio del robot aun sin caminar.....	38
3.2.4.2.1 Inicialización.....	39
3.2.4.2.2 Función principal.....	39
3.2.4.2.3 Tabla de conversión a grados.....	40
3.2.4.2.4 Selector de inclinación.....	40
3.2.4.2.5 Funciones de corrección de posición.....	41
3.2.4.2.6 Función de corrección de inclinación de los lados derecha e izquierda.....	42
3.2.4.2.7 Función de corrección delante-atrás.....	43
3.2.4.3 Control del robot cuando camina.....	44
3.3 Conclusiones.....	44
3.4 Referencias .....	44
<b>4. RESULTADOS EXPERIMENTALES</b>	
4.1 Introducción.....	48
4.2 Mediciones.....	48
4.3 Conclusiones.....	59
4.4 Referencias.....	59
<b>5. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO</b>	
5.1 Conclusiones.....	61
5.2 Trabajo a futuro.....	61
<b>ANEXOS</b>	
Anexo A Cálculos de los torques en las articulaciones del robot en forma estática.....	64
Anexo B Solución de la ecuación de la respuesta del sensor.....	78
Anexo C Publicaciones y congresos.....	79

## Índice de Figuras y Tablas

### Figuras

	Descripción	Página
Figura 1.1	Fuente del Pavo Real robot de la antigua civilización árabe.....	2
Figura 1.2	El concepto de robot en 1926.....	3
Figura 2.1	Robot QRIO.....	9
Figura 2.2	Robot ASIMO. Vista real y dimensiones.....	10
Figura 2.3	Movimientos en las articulaciones de la cadera.....	12
Figura 2.4	Movimiento de la rodilla.....	13
Figura 2.5	Movimiento del tobillo.....	13
Figura 2.6	Datos a conocer en una articulación.....	14
Figura 2.7	Centros de masa.....	14
Figura 2.8	Centro de masa para N sólidos.....	15
Figura 2.9	Fuerzas aplicadas sobre un cuerpo rígido.....	16
Figura 2.10	Diagrama vectorial.....	16
Figura 2.11	Sentido de rotación.....	17
Figura 2.12	Palanca.....	17
Figura 3.1	Espuma de cloruro de polivinilo.....	21
Figura 3.2	El pie, a) Muestra el diseño computacional de la pieza. b) Muestra la construcción de la pieza final, observando que ya contiene el soporte para la unión con la pieza superior.....	22
Figura 3.3	La tibia, a) Diseño de la tibia. b) Construcción física de la pieza.....	22
Figura 3.4	El fémur. a) Diseño de la tibia, b) Construcción física de la pieza.....	23

Figura 3.5	Pieza que une cada uno de los pies.....	23
Figura 3.6	Pieza similar a una columna vertebral.....	24
Figura 3.7	Servomotor.....	24
Figura 3.8	Balero.....	24
Figura 3.9	Acoplo de baleros y servomotores para soportar el peso en ambos lados de la estructura.....	25
Figura 3.10	Construcción final del robot.....	26
Figura 3.11	Pesos en el pie, a) Posición en la que se encuentran distribuidos los pesos en el pie, b) Dimensiones reales de los lugares en donde se distribuyen los pesos.....	27
Figura 3.12	Pesos en la tibia. a) Posición en la que se encuentran distribuidos los pesos en la tibia, b) Dimensiones reales de los lugares en donde se distribuyen los pesos.....	28
Figura 3.13	Pesos en el fémur. a) Posición en la que se encuentran distribuidos los pesos en el fémur, b) Dimensiones reales de los lugares en donde se distribuyen los pesos.....	29
Figura 3.14	Unión de los pies. a) Posición en la que se encuentran distribuidos los pesos en la unión, b) Dimensiones reales de los lugares en donde se distribuyen los pesos.....	30
Figura 3.15	Tarjeta controladora de servos.....	32
Figura 3.16	Articulaciones que se consideran para la corrección de posición..	33
Figura 3.17	Articulaciones que se consideran al caminar.....	34
Figura 3.18	MEM D2125.....	34
Figura 3.19	Símbolo del sensor.....	35
Figura 3.20	Medición de inclinación en dirección delante-atrás.....	35
Figura 3.21	Salida del sensor PWM.....	36
Figura 3.22	Respuesta del sensor.....	37
Figura 3.23	Compilador MicroCode Studio.....	38

Figura 3.24	Corrección de posición.....	41
Figura 3.25	Secuencia de movimientos al caminar visto de frente.....	45
Figura 3.26	Secuencia de movimientos al caminar visto de lado.....	46
Figura 4.1	Estados de la señal.....	48
Figura 4.2	Ángulos de movimiento y valores digitales.....	49
Figura 4.3	Relación dato digital y señal PWM para el servomotor.....	51
Figura 4.4	Relación de la inclinación general del robot con respecto a los datos de servomotor para la inclinación a la derecha.....	52
Figura 4.5	Relación de la inclinación general del robot con respecto a los datos de servomotor para la inclinación a la izquierda.....	52
Figura 4.6	Movimientos de inclinación.....	53
Figura 4.7	Secuencia de imágenes donde se muestra la corrección de posición en vista frontal.....	54
Figura 4.8	Secuencia de imágenes del video donde se muestra la corrección de posición en vista lateral.....	55
Figura 4.9	Secuencia de imágenes del video donde se muestra la caminata del robot en vista frontal.....	57
Figura 4.10	Secuencia de imágenes del video donde se muestra la caminata del robot en vista lateral.....	58

## Tablas

	Descripción	Página
Tabla 2.1	Datos técnicos de QRIO.....	10
Tabla 2.2	Especificaciones de ASIMO.....	11
Tabla 2.3	Grados de libertad (articulaciones) de ASIMO.....	11
Tabla 3.1	Grados de libertad.....	25
Tabla 3.2	Ángulos soportados por el servomotor .....	31
Tabla 3.3	Relación articulación-servomotor.....	38
Tabla 4.1	Tiempos de duración PWM.....	48
Tabla 4.2	Relación dato digital con ángulo de movimiento.....	50

## Nomenclatura

Símbolo	Descripción
$F$	Fuerza.
$m_n$	Masa de un cuerpo.
$x_{cm}$	Posición del centro de masa en centímetros.
$x_n$	Posición en centímetros en la que se encuentra una masa en el eje x.
$r_{cm}$	Posición en centímetros del centro de masa en un sistema de 2 sólidos.
$r_i$	Posición en centímetros en la que se encuentra una masa en un sistema de N sólidos.
$\tau$	Torque.
$r$	Distancia del origen a un punto en un cuerpo rígido.
$\alpha$	Angulo entre $r$ y $F$ .
$F_{\perp}$	Componente que realiza torque.
$r_{\perp}$	Brazo de palanca de $F$
$L_1$	Longitud del punto de apoyo a una $F_1$ en la palanca
$L_2$	Longitud del punto de apoyo a una $F_2$ en la palanca
$T_2$	Tiempo de calibración del sensor.
$T_1$	Variación del tiempo según la inclinación.

*Capitulo 1*

***INTRODUCCIÓN***

## 1.1 Introducción

### 1.1.1 Bases y antecedentes de la robótica

En 1979, el Instituto de Robótica de América (Robot Institute of America) definía un robot como: 'Un manipulador reprogramable y multifuncional diseñado para trasladar materiales, piezas, herramientas o aparatos específicos a través de una serie de movimientos programados para llevar a cabo una variedad de tareas[1]. Veinte años más tarde, la Encarta de Microsoft da la siguiente definición: 'Maquina controlada por ordenador y programada para moverse, manipular objetos y realizar trabajos a la vez que interacciona con su entorno[2]. Los robots son capaces de realizar tareas repetitivas de forma más rápida, barata y precisa que los seres humanos' [3]. El cambio más sustancial incorporado al concepto en estos veinte años es el hecho de contemplar una interacción del robot con su entorno, que permite comportamientos adaptativos e inteligentes.

A continuación se presenta un breve recorrido a través de la historia del robot.

### 1.1.2 Concepto e historia

El concepto de robot se remonta casi al principio de la civilización, donde los mitos hablan de seres mecánicos dotados de vida. En la civilización griega aparecen figuras que se mueven mediante poleas y bombas hidráulicas y que se usan para propósitos estéticos y artísticos. No obstante, la sociedad griega carecía de dos puntos básicos para un desarrollo satisfactorio de robots: necesidad y tecnología [3].

La civilización árabe cubre el primero de estos puntos al concebir el robot como un elemento para el confort del ser humano. Un ejemplo de este punto de vista es la Fuente del Pavo Real (ver Figura 1.1), que era un sencillo dispositivo que medía el nivel del agua vertida en un recipiente de forma que, al alcanzarse un cierto umbral, aparecía un autómatas portando una pastilla de jabón y transcurrido un cierto tiempo, una toalla.

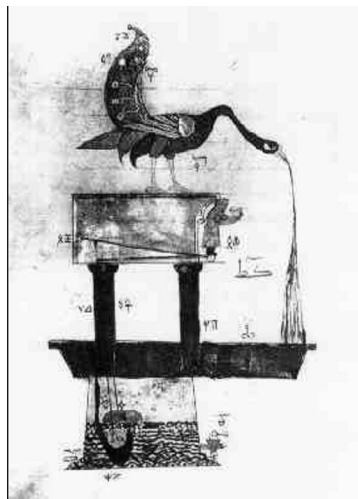


Figura 1.1. Fuente del Pavo Real robot de la antigua civilización árabe.



Durante el Renacimiento, los estudios de Leonardo da Vinci sobre anatomía del cuerpo humano aportaron un valioso conocimiento a la hora de desarrollar la mecánica del robot, principalmente los antropomorfos, permitiendo la construcción de juntas mecánicas mucho mejores e impulsando por tanto el desarrollo modular de máquinas complejas. Como consecuencia, se desarrollaron una gran cantidad de figuras dotadas de partes móviles capaces de llevar a cabo acciones tan complicadas como escribir o tocar ciertos instrumentos musicales.

No fue hasta finales de 1800 que se contempla de forma científica los conceptos de autonomía e inteligencia artificial, cuando Nikola Tesla se propone crear una máquina capaz de tomar sus propias decisiones sin necesidad de un telecontrol. Más adelante, el escritor checo Karel Capek acuñaría el término robot como tal en su obra R.U.R. (Rossum's Universal Robots), que se estrenó en Praga en 1921. El término deriva de la palabra checa robota, que define un trabajo forzado o de carácter feudal y la obra trataba de la deshumanización en una sociedad tecnológica.

Poco después, Fritz Lang tocaría el mismo tema en 1926 con la película *Metrópolis*, Figura 1.2. La robótica como ciencia que estudia el robot y su uso se concebiría más tarde, cuando en 1942 el escritor de origen ruso Isaac Asimov escribió el relato corto *Runaround* y la recopilación posterior "Yo, Robot". Desde entonces, los robots no sólo han acaparado la atención de la ciencia ficción sino también la de un creciente número de investigadores, presentándose como una excelente alternativa para realizar todos aquellos trabajos que por una u otra causa resultan indeseables para el ser humano.

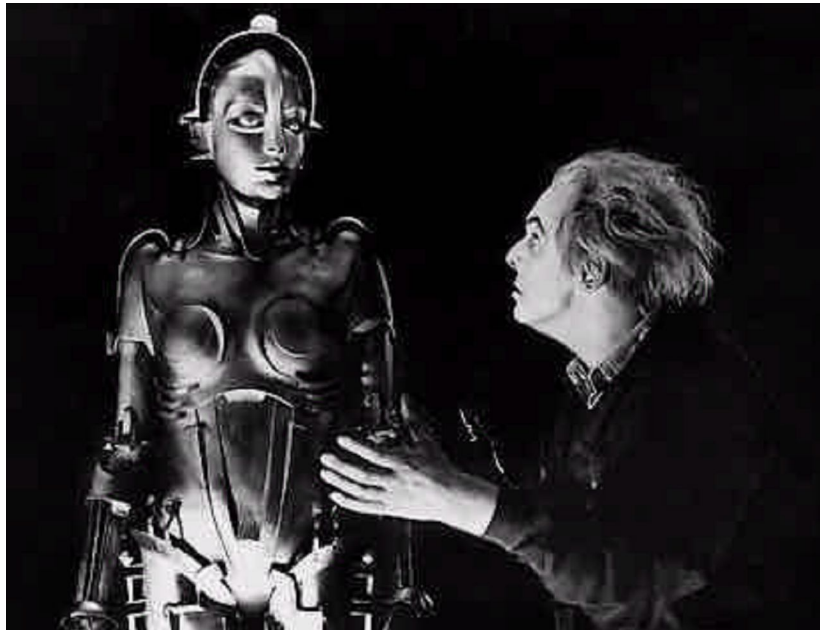


Figura 1.2. El concepto de robot en 1926

### ***1.1.3 Bases de la robótica***

Los robots tal como se conciben hoy en día no necesariamente tratan de asemejarse al ser humano, sino de cubrir las necesidades de éste de la forma más óptima posible [3-6]. El inicio del desarrollo de la robótica actual puede fijarse en la industria textil del siglo XVIII, cuando en 1801 Joseph Jacquard inventa una máquina textil programable mediante tarjetas perforadas denominada Telar Programable y que se produciría en masa. Conforme la Revolución Industrial progresaba, continúa el desarrollo de los agentes mecánicos, aunque el desarrollo de un verdadero robot no fue posible hasta los años cuarenta del siglo XX, con la aparición de la computadora y la cada vez mayor integración de los circuitos. Son de mención los trabajos de Christopher Spencer, inventor de un torno manejado mediante engranajes en 1830, de Seward Babbitt, creador de un brazo motorizado para extraer metales de un horno en 1892 y de Willard Pollard y Harold Roselund, que diseñan en 1938 un mecanismo programable para pintar con spray para la compañía DeVilbiss.

Los primeros robots industriales fueron los Unimates, desarrollados por George Devol y Joe Engleberger. Las primeras patentes aparecen en 1946 y pertenecen a Devol, por sus muy primitivos robots capaces de trasladar maquinaria de un lugar a otro. También en 1946 aparece la primera computadora: J. Presper Eckert y John Maulchy construyen el ENIAC (*Electronic Numerical Integrator And Computer*) en la universidad de Pensilvania y la primera máquina digital de propósito general se desarrolla en el MIT (*Instituto Tecnológico de Massachusetts*). Más tarde, en 1954, Devol diseña el primer robot programable y acuña el término 'autómata universal', que posteriormente recorta a Unimation. Ese sería el nombre de la primera compañía de robótica, fundada por Engleberger, que se considera el padre de la robótica [3].

La comercialización de robots comienza en 1959, cuando la Planet Corporation saca a disposición del público el primer modelo disponible. Un año después, Unimation se traspassa a la Condec Corporation y comienza el desarrollo de los sistemas robóticos Unimate. La AMF Corporation (American Machine and Foundry) comercializa el Versatran, diseñado por Harry Johnson y Veljco Milenkovic [4].

En 1962, la General Motors inculca el primer robot industrial en su cadena de producción en Trenton, New Jersey. En 1964 se abren laboratorios de investigación en inteligencia artificial en el MIT, el SRI (Stanford Research Institute) y en la universidad de Edimburgo. En 1968 el SRI construiría un prototipo experimental llamado SHAKY, que era una unidad independiente capaz de navegar en entornos cerrados estructurados de forma autónoma y dotado de una cámara y un detector táctil. Los japoneses, que hasta entonces habían importado su tecnología robótica de AMF dado que Estados Unidos estaba unos diez años por delante de ellos en dicho campo, se sitúan como pioneros del mercado y la Kawasaki Heavy Industries establece un pacto de cooperación con Unimation [3].

En 1970 se construye un brazo mecánico para propósitos de investigación que se conoce como el Brazo de Stanford. Su inventor, Victor Scheinman, fundaría Vicarm Inc en 1974 para comercializar el prototipo para la industria. La versión comercial iba controlada por un minicomputador parecido al que usaba el T3, construido por Richard Hohn para la Cincinnati Milacron Corporation en 1973 [4].

Anteriormente, Raymond Goentz había diseñado un modelo mucho más primitivo de brazo articulado operado por control remoto para la Comisión de Energía Atómica en 1951. En 1976, tanto la sonda Viking 1 como la 2 incorporaron brazos de robot. En este mismo año Vicarm incorporó microcomputadores a sus diseños. Por la misma época, la NASA inicia un programa en colaboración con el Jet Propulsion Laboratory (JPL) para el desarrollo del MARS-ROVER. En 1977, Unimation adquiere Vicarm y un año más tarde desarrollan el PUMA (Programmable Universal Manipulator for Assembly). Una acción integrada entre IBM y Seiki permitiría la creación del SCARA, con un 85% de las capacidades del PUMA, pero sólo a la mitad de su precio [3]

En el mundo se han realizado robots bípedos, bastante sofisticados como ASIMO de Honda y QRIO de Sony, los cuales son robots bastante avanzados en el campo de la robótica, el primero ASIMO ha sido desarrollado por HONDA desde 1986 por cientos de científicos e investigadores y desde entonces ha sufrido muchas modificaciones ocasionando elevada inversión en su fabricación [4-8]. El segundo es QRIO, este proyecto ha venido creciendo conforme pasa el tiempo ya que SONY antes de introducirse en Robots Humanoides trabajó en prototipos de robots de cuatro patas iniciando así su carrera en el mundo de la robótica y es en el año 2000 cuando esta empresa presenta al mundo su primer robot humanoide el cual empezó a desarrollarse cinco años antes [4]. Es importante hacer énfasis en la experiencia que SONY tenía con robots caminantes ya que debido a esto, se puede observar el trabajo y el tiempo que implica lograr desarrollar un robot bípedo humanoide. Esta tarea no es nada sencilla, ya que grandes empresas con alto financiamiento y un equipo muy poderoso de personas llevan 20 años en el caso de Honda y 11 años en Sony en el desarrollo de robots.

El trabajo desarrollado en esta tesis está enfocado al tipo de robot bípedo estático cuyo sistema de locomoción está basado en dos piernas, y que durante su avance al andar garantice el equilibrio para no caer.

## **1.2 Objetivo**

Desarrollar un robot de dos piernas que sea capaz de mantenerse de pie y pueda desplazarse. La construcción del robot será únicamente la parte inferior de él, esto es, de la cintura hacia abajo simulando con un peso la parte superior de él.

## **1.3 Justificación**

En la mayoría de los robots móviles, el movimiento de éstos es realizado mediante el uso de ruedas u orugas. El desarrollo de los sistemas robóticos que utilizan piernas para caminar es importante debido a la semejanza que existe con el ser humano, de tal manera, que este tipo de robots pueden ser usados en aplicaciones en donde los movimientos y posiciones de las articulaciones de estos robots puedan ser usados por el ser humano en áreas de visión por computadora, por ejemplo, en inspección, seguridad o entretenimiento, en donde servirán de ayuda o soporte en las tareas de los seres humanos.

## 1.4 Metas

- Desarrollar un sistema que permita la detección de movimiento para la estabilización de un robot de dos piernas logrado con esto que se mantenga en equilibrio y que pueda desplazarse sin caer.
- Desarrollar un sistema de bajo costo.
- Que el sistema sea fácil de instalar, para ser usado como herramienta para proyectos similares a éste o que necesiten un sistema de equilibrio.

## 1.5 Organización de la tesis

A continuación se hace una breve descripción del contenido de los capítulos y anexos contenidos en esta tesis.

- **Capítulo 1. Introducción.**
- **Capítulo 2. Estado del Arte.**  
Se muestran algunas características de los dos robots bípedos más populares así como el modelo de una articulación y las características que necesita un robot bípedo.
- **Capítulo 3. Diseño y Construcción.**  
Se muestra paso a paso el diseño de la parte física, tarjetas de control y lógica del robot.
- **Capítulo 4. Resultados experimentales.**  
Se muestran tablas y gráficas de las señales obtenidas en las mediciones y del manejo de éstas a través del microcontrolador y su interpretación en la programación.
- **Capítulo 5. Conclusión y trabajo a futuro.**  
Se mencionan las conclusiones obtenidas en el trabajo, algunas posibles mejoras del sistema y el trabajo a futuro.

## 1.6 Referencias

- [1] Robotics research group, J.J. Pickle research campus, The University of Texas at Austin [http://www.robotics.utexas.edu/rrg/learn\\_more/history/](http://www.robotics.utexas.edu/rrg/learn_more/history/)
- [2] Microsoft Enciclopedia ENCARTA 1999
- [3] C. Urdiales García, "Introducción a la Robótica", Universidad de Málaga, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, Departamento de tecnología y electrónica, 1999.
- [4] Robotics, <http://www.roboticspot.com>
- [5] J. Billingsley, "Essentials of Mechatronics", John Wiley & Sons, New Jersey, 2006.
- [6] J. L. Pons, "Wearable Robots, Biomechatronic Exoskeletons", John Wiley & Sons, New Jersey, 2008.
- [7] Y. Bar-Cohen, C. L. Breazeal, "Biologically inspired intelligent robots", SPIE PRESS, Vol. PM122, 2003.
- [8] ASIMO, <http://world.honda.com/ASIMO>.

*Capítulo 2*

***ESTADO DEL ARTE***

## 2.1 Introducción

En este capítulo se presenta una introducción a la robótica haciendo énfasis en los robots bípedos. Posteriormente, se muestra el modelo para una articulación y las articulaciones y grados de libertad necesarios para permitir a un robot bípedo el movimiento. Finalmente, se presentan los conceptos físicos necesarios para efectuar el cálculo para cada una de las articulaciones del robot propuesto.

## 2.2 La Robótica

En forma general, la robótica se define como el conjunto de conocimientos teóricos y prácticos que permiten diseñar, realizar y automatizar sistemas basados en estructuras mecánicas poliarticuladas, dotadas de un determinado grado de inteligencia y destinados a la producción industrial o a la sustitución del hombre en muy diversas tareas [1,2]. Un sistema robótico puede describirse, como "Aquel que es capaz de recibir información, de comprender su entorno a través del empleo de modelos, de formular y de ejecutar planes, y de controlar o supervisar su operación" [3]. La robótica es esencialmente pluridisciplinaria y se apoya en gran medida en los progresos de la microelectrónica y de la informática, así como en las nuevas disciplinas tales como el reconocimiento de patrones y la inteligencia artificial.

La Robótica, en nuestros días, es una nueva tecnología, que podemos contemplar como una ciencia que a pesar de tener grandes avances todavía ofrece un amplio campo para el desarrollo y la innovación y es precisamente este aspecto el que motiva a muchos investigadores a seguir adelante planteando cada vez robots más evolucionados [2,3].

La Robótica es una tecnología multidisciplinaria, ya que en el proceso de diseño y construcción de un robot intervienen muchos campos pertenecientes a otras ramas de la ciencia, como por ejemplo [4]:

Mecánica	Electrónica
Informática	Matemática

Los robots son utilizados en una diversidad de aplicaciones, desde robots soldadores en la industria automotriz, hasta brazos teleoperados en el trasbordador espacial. Cada robot lleva consigo su problemática propia y sus soluciones afines; no obstante mucha gente considera que la automatización de procesos a través de robots está en sus inicios, pero es innegable que la introducción de la tecnología robótica en la industria, ya ha causado un gran impacto. En este sentido la industria automotriz desempeña un papel preponderante.

## 2.3 Robots bípedos

Los robots bípedos solo cuentan con dos puntos de contacto con el suelo y al realizar el paseo, carrera o salto (en el contexto del movimiento), tiene que ser planeado acerca de la estabilidad dinámica de su cuerpo entero. Ésta no es una tarea fácil, sobre todo porque el cuerpo superior del robot (el torso) tiene una mayor masa e inercia que las piernas que se supone que apoyan y mueven el robot.

Un acercamiento para resolver este problema consiste usando el tronco para indicar la posición y estabilizar la postura del robot. Sin embargo, algunos nuevos métodos de la planificación están desarrollándose para definir las trayectorias de los eslabones de las piernas de tal manera que el torso del robot se dirija naturalmente para reducir el torque del tobillo necesitando con esto compensar su movimiento.

Como se menciona en el capítulo 1, el objetivo de este trabajo es desarrollar únicamente el sistema de equilibrio y no un autómata completo, por tal motivo, se muestran algunos de los robots que presentan un sistema de equilibrio similar al que se propone en este trabajo.

### 2.3.1 QRIO

QRIO es un robot humanoide desarrollado por SONY [9]. Antiguamente se denominó "SDR" y pasó por numerosas versiones: SDR-3X, SDR-4X, después SDR-4XII y finalmente fue rebautizado a mediados del 2003 como QRIO (un nombre más apropiado de cara al mercado). "QRIO" es una abreviatura para "Quest for curiosity", que en español significa "Búsqueda de la curiosidad". El robot QRIO se presenta en la Figura 2.1. La Tabla 2.1 presenta los datos técnicos de QRIO, que corresponde a una de las numerosas versiones presentadas por SONY.



Figura 2.1 Robot QRIO.

Tabla 2.1 Datos técnicos de QRIO.

Altura		60 cm.
Procesador		Procesador RISC de 64 Bits (2 unidades)
Dispositivo de Almacenamiento principal		64MB DRAM (2 unidades)
Sistema Operativo		Aperios (S.O. tiempo real de Sony)
Arquitectura de control del robot		OPEN-R
Memoria de programa		Tarjeta de memoria de 16MB
Grados de libertad		Cuello: 4 grados de libertad, Cuerpo: 2 g.d.l., Brazos: 5 g.d.l. (x2), Piernas: 6 g.d.l. (x2); total 28 g.d.l. + 5 dedos en cada mano.
Sensores internos	Distancia	Infrarrojos: cabeza x1, manos x2, total 3
	Aceleración	Tronco: X, Y, Z/3 ejes, Piernas: X, Y/2 ejes
	Inclinación	Tronco: X, Y, Z/3 ejes
	Planta del pie	Sensor de presión (cada pierna: 4 x 2 = total 8)
	Térmico	Externo (x4), Interno (x2)
Sensor de contacto	Cabeza	Goma sensible a la presión
	Amarre	Interruptor protegido de contacto
	Manos	Interruptor protegido de contacto (x2)
	Shoulders	Interruptor de tacto (x2)
	Imagen de entrada	Cámara color CCD , 110,000 pixeles de 1/5 de pulgada (x2)

### 2.3.2 ASIMO

El robot ASIMO diseñado por Honda, cuenta con un sistema llamado Advanced Step in Innovative, mide 1.2m de alto, 0.45m de ancho y 0.44m de profundidad (ver Figura 2.2). Las especificaciones y grados de libertad se muestran en las Tablas 2.2 y 2.3, respectivamente [7].

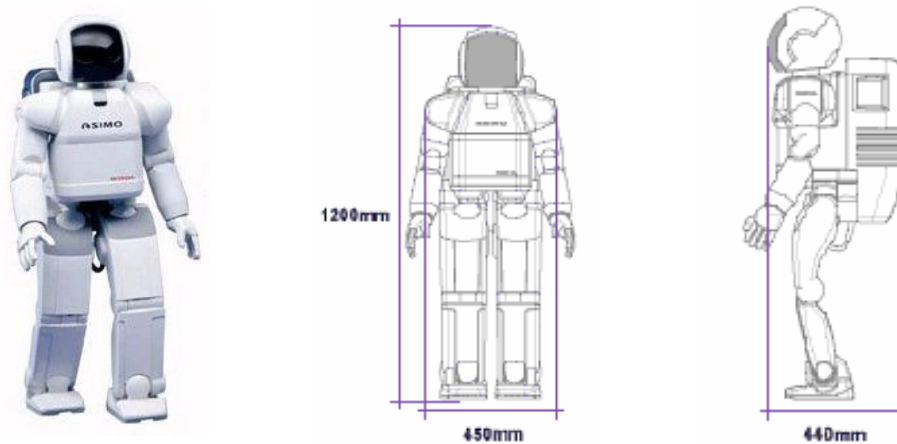


Figura 2.2. Robot ASIMO, vista real y dimensiones.



Tabla 2.2 Especificaciones de ASIMO

Peso	52kg
Velocidad al caminar	0-1.6Km/h
Tamaño del paso	ajustable
Fuerza al agarrar	0.5Kg/mano (5 dedos por mano)
Motores	Servomotores
Control unitario	Camina/un control de operación Un transmisor inalámbrico
Sensores	Eje del pie, sensores en toda el área del pie Torso giroscopio y un sensor de aceleración
Batería	38.4V/10AH(Ni-MH)

Tabla 2.3 Grados de libertad (articulaciones) de ASIMO

Cabeza	Cuello (U/D, RT) *	2 grados de libertad
Brazo	Articulación en el hombro(F/B, U/D, RT).	3 grados de libertad
	Articulación del codo (F/B).	1 grado de libertad
	Articulación en la muñeca (RT).	1 grado de libertad
Mano	5 dedos	1 grado de libertad 1 grado de libertad X 2 manos =2 grados de libertad
pierna	Articulación en la cadera (F/B,L/R,RT).	3 grados de libertad
	Articulación en la rodilla(F/B).	1 grado de libertad
	Tobillo (F/B,L/R)	2 grados de libertad
		Total 6 grados de libertad X 2 piernas = 12 grados de libertad.
* F/B: Forward/Backward ( Adelante/ Atrás) U/D: UP/Down (Arriba/Abajo) L/R:Left/Right (Izquierdo/Derecho) RT: Rotation (Rotación)		

## 2.4 Modelo de las articulaciones

Una articulación es el punto de contacto que hace la unión entre dos piezas próximas. La función de una articulación es la construcción del punto de unión que permite la existencia de movimiento mecánico [6]. Las articulaciones y grados de libertad necesarios en las piernas se describen a continuación:

### *Articulación en la cadera*

La cadera representa una articulación que puede ser considerada como una de las más estables, debido a su estructura. En esta articulación se necesitan dos grados de libertad, dando lugar a cuatro movimientos distintos como delante, atrás, derecha e

izquierda [6]. Los movimientos en las articulaciones de la cadera se presentan en la Figura 2.3.

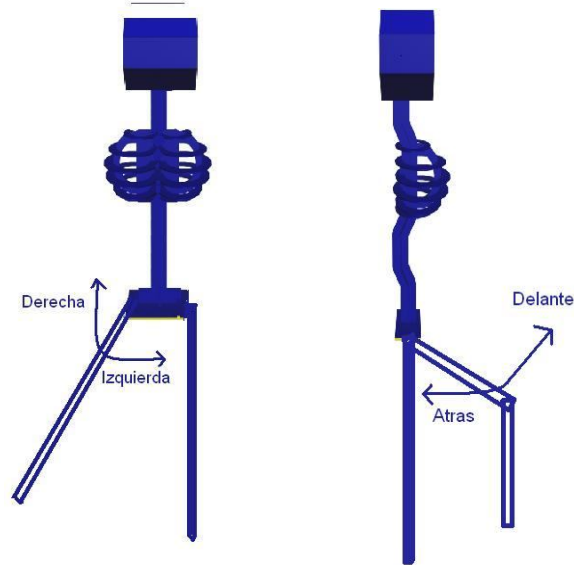


Figura 2.3 Movimientos en las articulaciones de la cadera

#### *Articulación en la rodilla*

Su mecánica articular resulta muy compleja, ya que por un lado debe de poseer una gran estabilidad en extensión completa para soportar el peso corporal sobre un área relativamente pequeña, pero al mismo tiempo, debe estar dotada de la movilidad necesaria para la marcha, la carrera y para orientar eficazmente al pie en relación con las irregularidades del terreno [6]. En la articulación de la rodilla solo se necesita un grado de libertad, dando movimiento hacia delante y atrás como se muestra en la Figura 2.4.

#### *Articulación en el tobillo*

El tobillo presenta dos movimientos que le permiten tener dos grados de libertad como se muestra en la Figura 2.5 [6].



Figura 2.4. Movimiento de la rodilla.

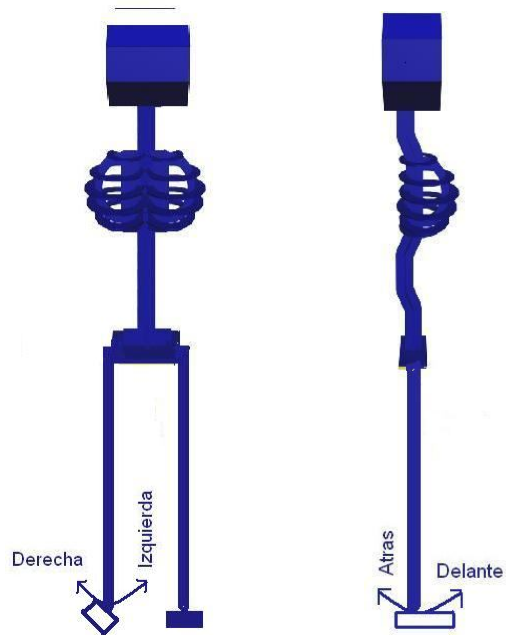


Figura 2.5 Movimiento del tobillo

## 2.5 Cálculo de la articulación

Los datos que se necesitan para realizar los cálculos en una articulación se muestran en la Figura 2.6 [8].

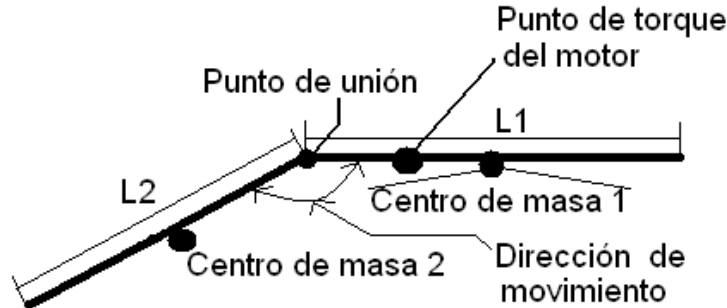


Figura 2.6. Datos a conocer en una articulación: L1, L2, centro de masa 1, centro de masa 2 y torque del motor.

Como consecuencia de las leyes de la mecánica, una partícula en equilibrio no sufre aceleración lineal ni de rotación. Para el caso del desarrollo de este trabajo, un sólido está en equilibrio cuando la suma de todas las fuerzas que actúan sobre el cuerpo es cero [5].

$$\sum_{i=1}^n \vec{F} = 0 \dots\dots\dots(2.1)$$

### 2.5.1 Centro de masa.

En la Figura 2.7, tenemos dos sólidos de masas  $m_1$  y  $m_2$ , como  $m_1$  es mayor que  $m_2$ , la posición del centro de masas del sistema de dos sólidos estará cerca de la masa mayor de acuerdo a [8],

$$x_{cm} = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2}{m_1 + m_2} \dots\dots\dots(2.2)$$

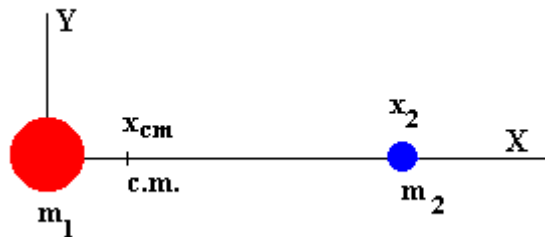


Figura 2.7 Centro de masa. Donde  $X_{cm}$  es la distancia del origen a ese punto en el eje x con unidades en cm y c.m. es el centro de masa.

En general, la posición  $r_{cm}$  del centro de masa de un sistema de  $N$  sólidos se muestra en la Figura 2.8 y su ecuación esta dada por [8],

$$r_{cm} = \frac{\sum_1^N m_i r_i}{\sum_1^N m_i} \dots\dots\dots(2.3)$$

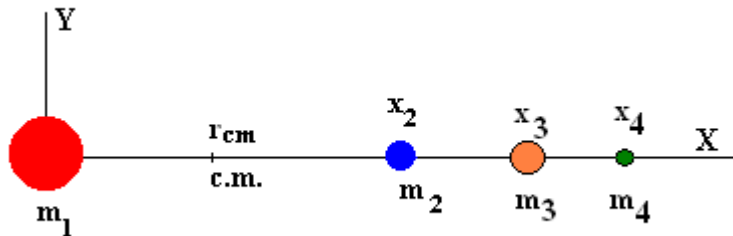


Figura 2.8 Centro de masa para N sólidos. donde  $r_{cm}$  es la distancia del origen a ese punto en el eje x con unidades en cm y c.m. es el centro de masa.

El centro de masa de un sistema de sólidos se mueve como si fuera un sólido de masa igual a la masa total del sistema bajo la acción de la fuerza externa aplicada al sistema.

### 2.5.2 Centro de gravedad

Debido a que un cuerpo es una distribución continua de masa, en cada una de sus partes actúa la fuerza de gravedad. El centro de gravedad es la posición donde la fuerza de gravedad neta esta actuando, es el punto ubicado en la posición promedio donde se concentra el peso total del cuerpo [15]. Para un objeto simétrico homogéneo, el centro de gravedad se encuentra en el centro geométrico.

### 2.5.3 Torque

Cuando se aplica una fuerza en algún punto de un cuerpo rígido, el cuerpo tiende a realizar un movimiento de rotación en torno a algún eje. La propiedad de la fuerza para hacer girar al cuerpo se mide con una magnitud física llamada torque [15].

Analizando el efecto de rotación que una fuerza puede producir sobre un cuerpo rígido, por ejemplo, una regla rígida fija en un punto  $O$  ubicado en un extremo de la regla, como se muestra en la Figura 2.9, sobre el cual pueda tener una rotación. La fuerza  $F_1$  aplicada en el punto  $a$  produce en torno a  $O$  una rotación en sentido antihorario, la fuerza  $F_2$  aplicada en el punto  $b$  produce una rotación horaria y con mayor rapidez de rotación que en  $a$ , la fuerza  $F_3$  aplicada en  $b$ , pero en la dirección de la línea de acción que pasa por  $O$ , no produce rotación (se puede decir que  $F_3$  ‘empuja’ a la regla sobre  $O$ , pero no la mueve),  $F_4$  que actúa inclinada en el punto  $b$  produce una rotación horaria, pero con menor rapidez de rotación que la que produce  $F_2$ ;  $F_5$  y  $F_6$  aplicadas perpendicularmente a la regla, saliendo y entrando en el plano de la figura respectivamente, no producen rotación. Por lo tanto, existe una cantidad que produce la

rotación del cuerpo rígido relacionada con la fuerza, que es lo que definimos como el torque de la fuerza.

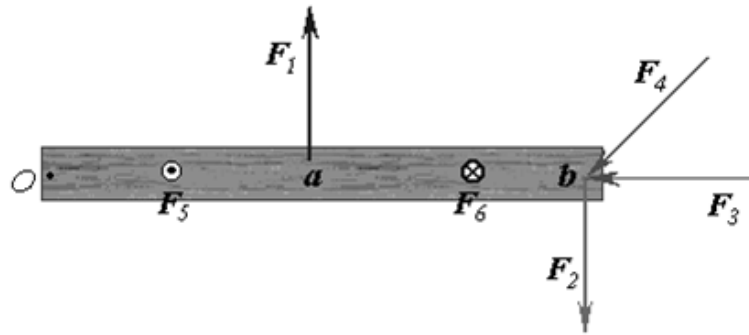


Figura 2.9 Fuerzas aplicadas sobre un cuerpo rígido.

Se define el torque  $\tau$  de una fuerza  $F$  que actúa sobre algún punto del cuerpo rígido, en una posición  $r$  respecto de cualquier origen  $O$ , por el que puede pasar un eje sobre el cual se produce la rotación del cuerpo rígido, al producto vectorial entre la posición  $r$  y la fuerza aplicada  $F$ , como se muestra en la ecuación (2.4)

$$\tau = r \times F \quad (2.4)$$

El torque es una magnitud vectorial, si  $\alpha$  es el ángulo entre  $r$  y  $F$ , su valor numérico, por definición del producto vectorial es,

$$\tau = r(F \sin \alpha) \quad (2.5)$$

su dirección es siempre perpendicular al plano de los vectores  $r$  y  $F$ , cuyo diagrama vectorial se muestra en la Figura 2.10, su sentido esta dado por la regla de la mano derecha [8]. En la regla de la mano derecha los cuatro dedos de la mano derecha apuntan a lo largo de  $r$  y luego se giran hacia  $F$  a través del ángulo  $\alpha$ , la dirección del pulgar derecho estirado da la dirección del torque y en general de cualquier producto vectorial.

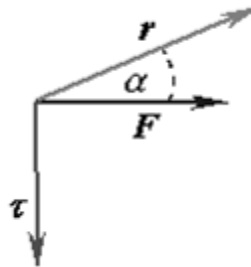


Figura 2.10 Diagrama vectorial.

Por convención se considera el torque positivo si la rotación que produce la fuerza es en sentido antihorario como se muestra en la Figura 2.11. La unidad de medida del torque en el SI es el  $Nm$ .

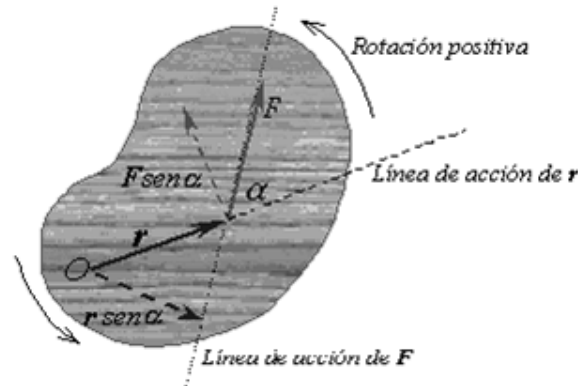


Figura 2.11 Sentido de rotación.

El torque de una fuerza depende de la magnitud y dirección de  $F$  y de su punto de aplicación respecto a un origen  $O$ . Si la fuerza  $F$  pasa por  $O$ ,  $r = 0$  y el torque es cero. Si  $\alpha = 0$  o  $180^\circ$ , es decir,  $F$  está sobre la línea de acción de  $r$ ,  $F \text{ sen } \alpha = 0$  y el torque es cero.  $F \text{ sen } \alpha$  es la componente de  $F$  perpendicular a  $r$ , sólo esta componente realiza torque, y se le puede llamar  $F_{\perp}$ . De la Figura 2.11 también se ve que  $r_{\perp} = r \text{ sen } \alpha$  es la distancia perpendicular desde el eje de rotación a la línea de acción de la fuerza. A  $r_{\perp}$  se le llama *brazo de palanca* de  $F$ . Entonces, la magnitud del torque se puede escribir como:

$$\tau = r(F \text{ sen } \alpha) = F(r \text{ sen } \alpha) = rF_{\perp} = r_{\perp} F \quad (2.6)$$

### 2.5.4 Palanca

La palanca es una maquina simple que tiene como función transmitir una fuerza [15]. Una palanca está compuesta por una barra rígida que puede girar libremente alrededor de un punto de apoyo y puede utilizarse para amplificar la fuerza mecánica que se aplica a un objeto. La ecuación que describe físicamente la palanca esta dada por,

$$F_1 L_1 = F_2 L_2 \dots\dots\dots(2.7)$$

donde  $F_1$  es la fuerza aplicada a un lado del punto de apoyo,  $L_1$  es la longitud del punto de apoyo a  $F_1$ ,  $F_2$  es la fuerza aplicada al otro lado del punto de apoyo, y  $L_2$  es la longitud del punto de apoyo a  $F_2$ , tal como se muestra en la Figura 2.12.

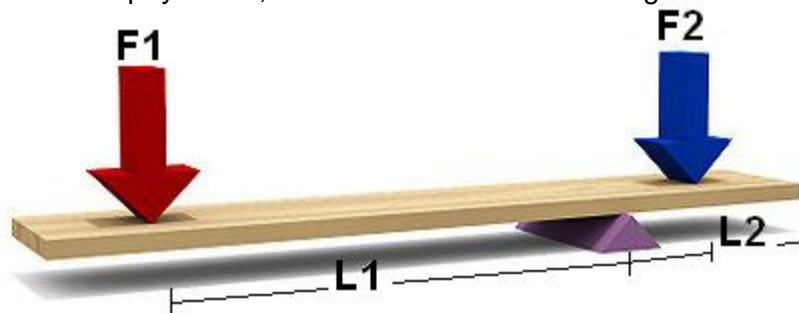


Figura 2.12 Palanca

### 2.5.5 Servomotor

Un Servomotor es un dispositivo pequeño que tiene un eje de rendimiento controlado. Este puede ser llevado a posiciones angulares específicas al enviar una señal PWM [16].

Con una señal de PWM que exista en la línea de entrada, el servo mantendrá la posición angular del engranaje. Cuando la señal de PWM cambia, la posición angular de los engranes también cambia. Los servomotores requieren impulsos de entre 3 – 5v y una duración de 0.9 hasta 2.1ms , la posición neutral se encuentra en 1.5ms y la frecuencia de repetición es de 20ms.

## 2.6 Conclusiones

En este capítulo se presento el concepto de robótica y el modelo matemático para una articulación, y las articulaciones y grados de libertad necesarios para dotar de movimiento al robot bípedo propuesto. Cabe mencionar que el objetivo de este trabajo es desarrollar únicamente el sistema de equilibrio y no un autómata completo ni otras funciones adicionales. La extensión de este trabajo es bastante amplia para ser desarrollada en el lapso que comprende los estudios de maestría, por lo que se considera que en trabajos a futuro se realice la caracterización completa del robot, es decir que se realice la justificación de las fuerzas de inercia y cinética en el robot completo y en cada una de sus articulaciones.

## 2.7 Referencias

- [1] M. A. Acosta Lira, M. Muciño, J. Rebull, "Trabajo terminal 838: Robot Bípedo Caminante REATIN", IPN ESCOM, 2006.
- [2] J. Billingsley, "Essentials of Mechatronics", John Wiley & Sons, New Jersey, 2006.
- [3] J. L. Pons, "Wearable Robots, Biomechatronic Exoskeletons", John Wiley & Sons, New Jersey, 2008.
- [4] Y. Bar-Cohen, C. L. Breazeal, "Biologically inspired intelligent robots", SPIE PRESS, Vol. PM122, 2003.
- [5] H. Cho. "Intelligent Mobile Robots: The state of art and perspectives", Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology. Daejeon Korea, 2004.
- [6] M. Trew, T. Everett, "*Fundamentos del movimiento humano*". 5ª edición. 2006.
- [7] ASIMO  
<http://world.honda.com/ASIMO>
- [8] Dinámica de un sistema de partículas  
[http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/dinamica/con\\_mlineal/dinamica/dinamica.htm](http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/dinamica/con_mlineal/dinamica/dinamica.htm)
- [9] QRIO el robot de sony  
<http://www.roboticspot.com/spot/artic.shtml?todo=&block=1&newspage=robots>
- [10] Física Estática: Equilibrio y reposo,  
[http://es.wikibooks.org/wiki/F%C3%ADsica/Est%C3%A1tica/Equilibrio\\_y\\_reposo](http://es.wikibooks.org/wiki/F%C3%ADsica/Est%C3%A1tica/Equilibrio_y_reposo)
- [11] Newton y las leyes de la mecánica  
[http://www.portalplanetasedna.com.ar/leyes\\_mecanica.htm](http://www.portalplanetasedna.com.ar/leyes_mecanica.htm)
- [12] Historia de la robótica  
<http://www.ovaliente.com.ar/perso/robot/definamo.htm>



- [13] Actualidad y perspectivas de la robótica  
[http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibVirtual/Publicaciones/indata/v04\\_n1/actualidad.htm](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibVirtual/Publicaciones/indata/v04_n1/actualidad.htm)
- [14] Articulación de la rodilla y su mecánica articular  
[http://www.bvs.sld.cu/revistas/san/vol7\\_2\\_03/san13203.htm](http://www.bvs.sld.cu/revistas/san/vol7_2_03/san13203.htm)
- [15] *J. Inzunza B., "Física: Introducción a la mecánica", 2002.*
- [16] Servomotores  
<http://www.hitecrd.com/>

*Capítulo 3*

***DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN***

### 3.1 Introducción

En este capítulo se presenta la construcción de la parte física, los elementos de control y la parte lógica del sistema. La parte física se refiere a la construcción de cada una de las piezas mecánicas con las cuales estará construido el robot y que le permitirán tener 5 grados de libertad por pierna con un total de 10 grados de libertad por ambas piernas y un grado de libertad en una pieza que simula el movimiento del cuerpo. La parte de control consiste en el monitoreo de la posición actual del robot para la estabilización de su posición evitando con esto que el robot caiga o pierda el equilibrio. La parte lógica consiste en el programa del microcontrolador que se encarga de leer la posición actual del robot realizar las operaciones de corrección y mandar las posiciones a cada uno de los motores. El proceso de estabilización se llevara a cabo a través de sensores de inclinación, microcontroladores y servomotores para el movimiento de las articulaciones, considerando que para la construcción del robot solo se presenta la mitad de él, es decir, solo se considera la parte de la cintura a los pies descartando el cuerpo ya que el objetivo de este trabajo es proporcionar equilibrio a un robot y no desarrollar un autómata completo, dejando en claro que no se pretende igualar en cuanto a funciones a los pocos robots ya conocidos que tienen esta capacidad [1,2].

### 3.2 Desarrollo.

#### 3.2.1 Diseño de la parte física

La construcción física del robot parte con en el diseño de cada uno de los componentes que conforman al robot considerando para cada uno de ellos, los pesos y los centros de masa.

El material con que fue construido el robot es sintra (ver Figura 3.1). Este material es un panel de espuma de cloruro de polivinilo (PVC) de células cerradas, con las características de ser ligero, rígido, durable, resistente a golpes y fácilmente transformado por medio de calor en casi cualquier forma [3].



Figura 3.1. Espuma de cloruro de polivinilo.

A continuación se muestran imágenes de las piezas que conforman al robot en forma en 3D y en su forma real [4,5].

La Figura 3.2 muestra la pieza correspondiente al pie con un peso de 194g y sus dimensiones se observan en la Figura 3.2 (a).

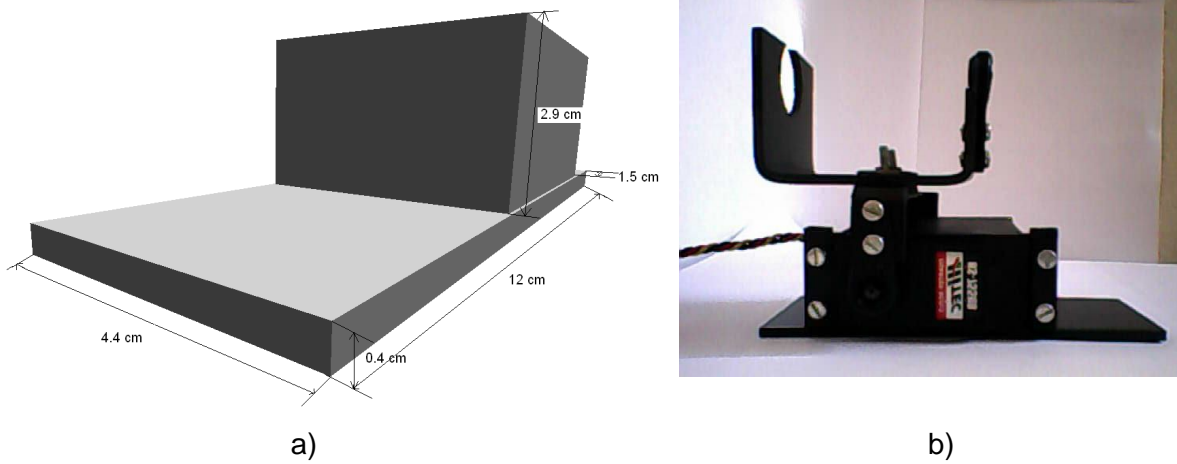


Figura 3.2. El pie, a) Muestra el diseño computacional de la pieza. b) Muestra la construcción de la pieza final, observando que ya contiene el soporte para la unión con la pieza superior.

En la Figura 3.3 se muestra la forma que presenta la tibia del robot con un peso de 276g, esta pieza está conformada por dos motores que le permiten la movilidad del tobillo y la rodilla.

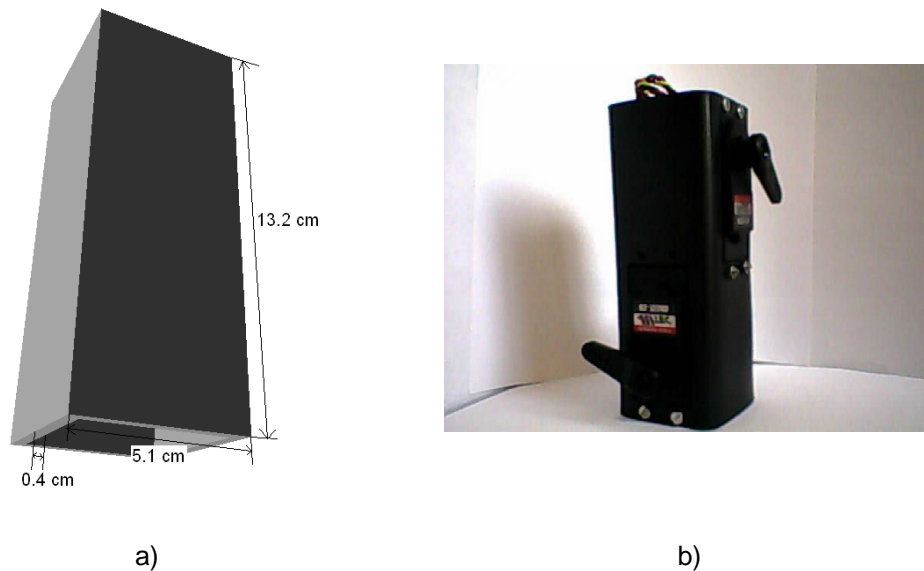


Figura 3.3 La tibia, a) Diseño de la tibia. b) Construcción física de la pieza.

Para la construcción del fémur se consideran las mismas dimensiones de la tibia, la única diferencia que presenta es la cantidad de motores ya que la tibia cuenta con dos

motores, mientras que el fémur tiene solo uno que le permite la movilidad de la cadera además de contener una parte de las baterías ya que se encuentran divididas en los dos fémur con un peso total individual de 260g (ver Figura 3.4).



Figura 3.4. El fémur. a) Diseño de la tibia, b) Construcción física de la pieza.

La pieza que une a los dos pies se muestra en la Figura 3.5, esta pieza además de unirlos está conformada por dos motores que le permiten abrir y cerrar los pies en forma independiente uno de otro con un peso total de 389g. En la parte posterior de esta pieza exactamente a la mitad de ella, se coloca una pieza parecida a una columna vertebral con una longitud de 18.5cm, y con un peso en su extremo superior de 150g para simular el movimiento y peso del cuerpo además de mantener la estabilidad del robot al presentarse movimientos al caminar (ver Figura 3.6).

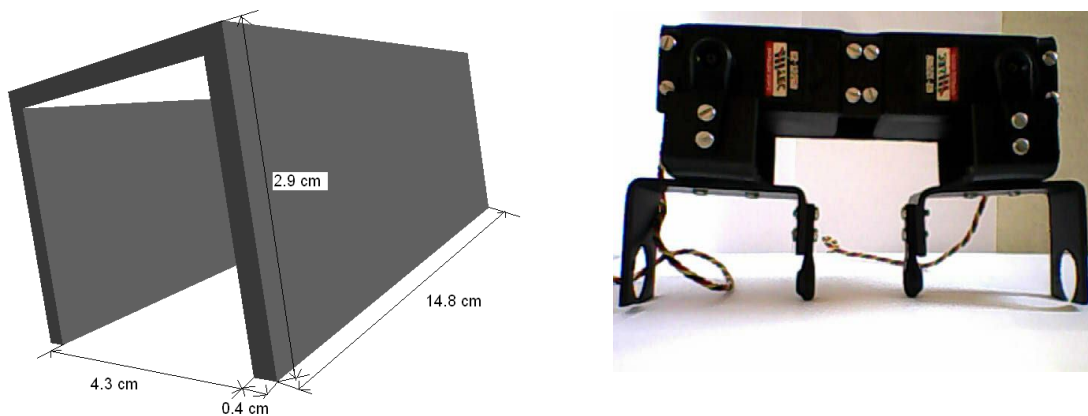


Figura 3.5. Pieza que une cada uno de los pies.

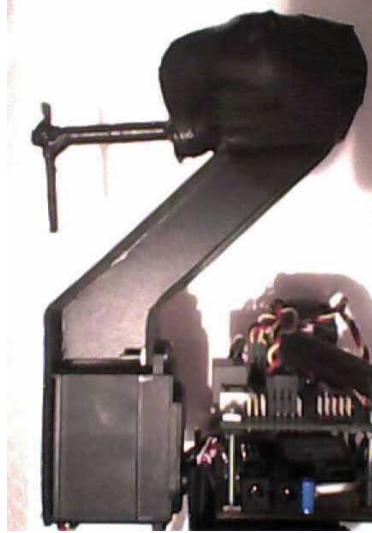


Figura 3.6. Pieza similar a una columna vertebral con peso de 150g en la parte superior.

Los motores que se emplearon para realizar los movimientos de las articulaciones son servomotores Hitec HS-755HB como el que se presenta en la Figura 3.7 [6]. Estos motores cuentan con movimiento alrededor de un eje por lo que en la parte posterior se realizó un acople con baleros para poder soportar el peso en la parte posterior, el cual se encuentra perfectamente alineado al eje del motor. Dichos baleros (ver Figura 3.8) tienen la parte central más grande, logrando con esto que embone en la estructura del robot, mientras que la parte superior del balero es colocado el soporte que une las dos piezas, esto se observa en la Figura 3.9.



Figura 3.7. Servomotor de un peso de 110g.



Figura 3.8. Balero, peso 14g.

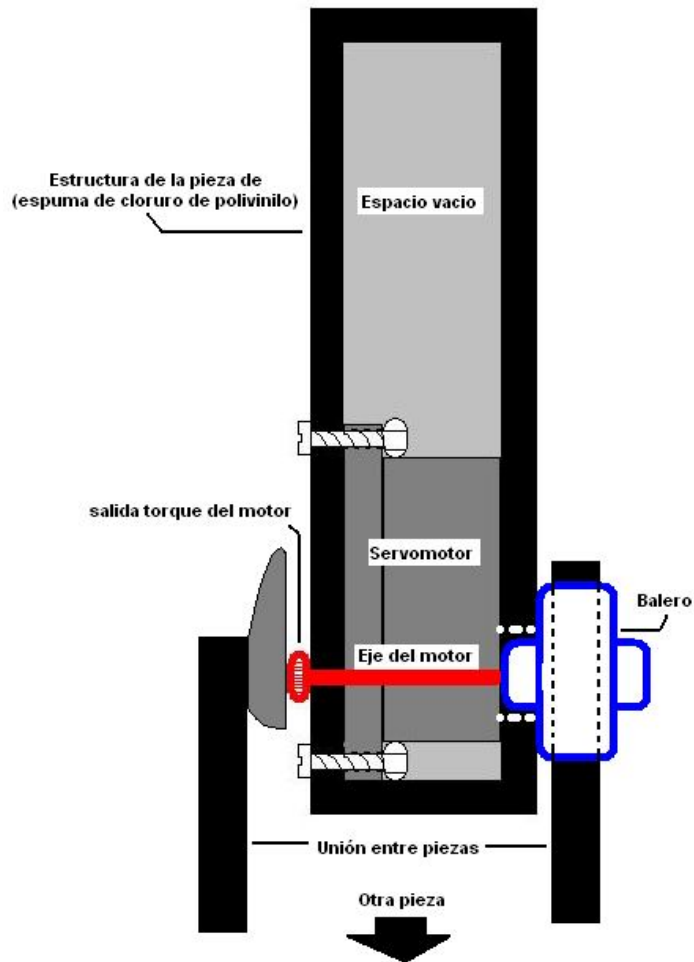
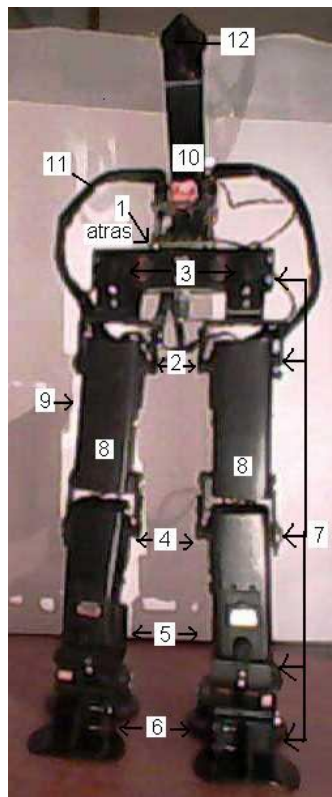
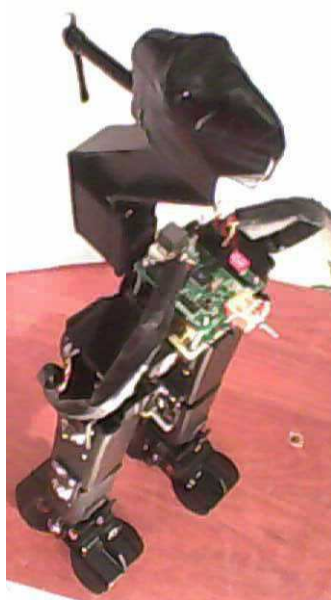


Figura 3.9. Acoplo de baleros y servomotores para soportar el peso en ambos lados de la estructura.

Finalmente, el ensamblado completo de todas las piezas descritas anteriormente se muestran en la Figura 3.10, con un peso total de 2195g y una altura de 59cm. Los grados totales de libertad con los que cuenta el robot son 11, de los cuales 5 corresponden a cada uno de las extremidades tal como se describe en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Grados de libertad

Grados por pie y columna	
Cadera	2
Rodilla	1
Tobillo	2
Columna	1



1,2,3,4,5,6 – Posición de los Servomotores para dar movilidad a las articulaciones.
7 – Balero. Todos los baleros se encuentran en la posición contraria al eje del servomotor.
8 – En la parte interna de esta pieza se encuentran las baterías.
9 – Estructura de espuma de cloruro de polivinilo.
10 – Posición en la que se encuentra el sensor de inclinación y los circuitos de control.
11 – Manguera que contiene cable para la conexión a los motores.
12 – Contrapeso para generar el movimiento.

Figura 3.10. Construcción final del robot.



### 3.2.2 Centros de masa y límites de torque en los motores

#### 3.2.2.1 Centro de masa

De la sección 2.5 podemos encontrar el centro de masa de las piezas que conforman al robot en forma separada, considerando solo los pesos más significativos para los cálculos. En la Figura 3.11 se observan flechas que indican los puntos en los que existe un peso para el pie. Colocándolo en un sistema de referencia se tiene lo siguiente:

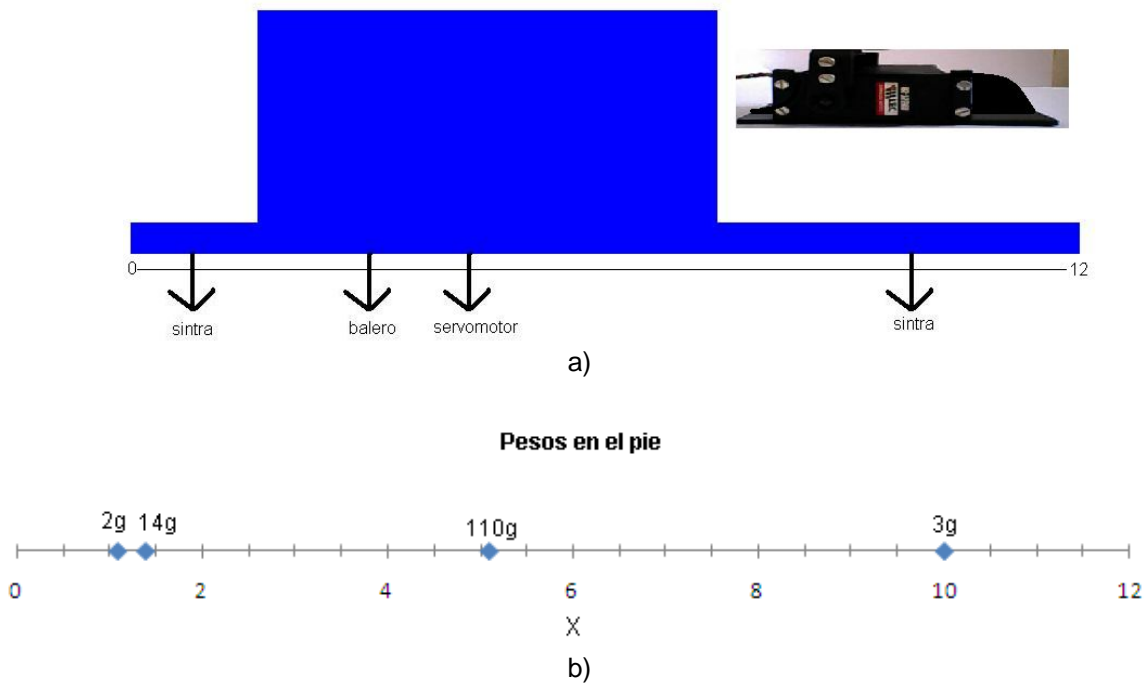


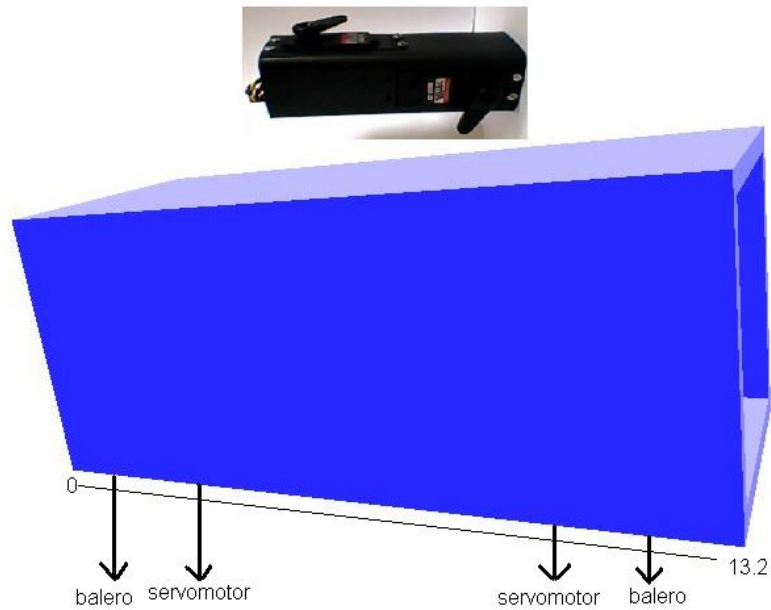
Figura 3.11. Pesos en el pie, a) Posición en la que se encuentran distribuidos los pesos en el pie, b) Dimensiones reales de los lugares en donde se distribuyen los pesos.

Por lo que el centro de masa se encuentra a una distancia de :

$$X_{cm} = \frac{(1.1)(2) + (1.4)(14) + (5.15)(110) + (10)(3)}{2 + 14 + 110 + 3} = 4.79cm \quad (3.1)$$

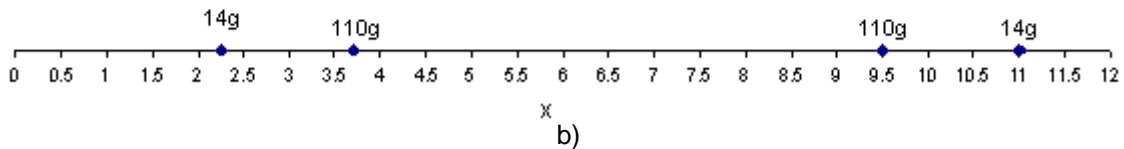
con respecto al extremo izquierdo de la figura.

Para la tibia se tienen los siguientes datos,



a)

**Pesos en la tibia**



b)

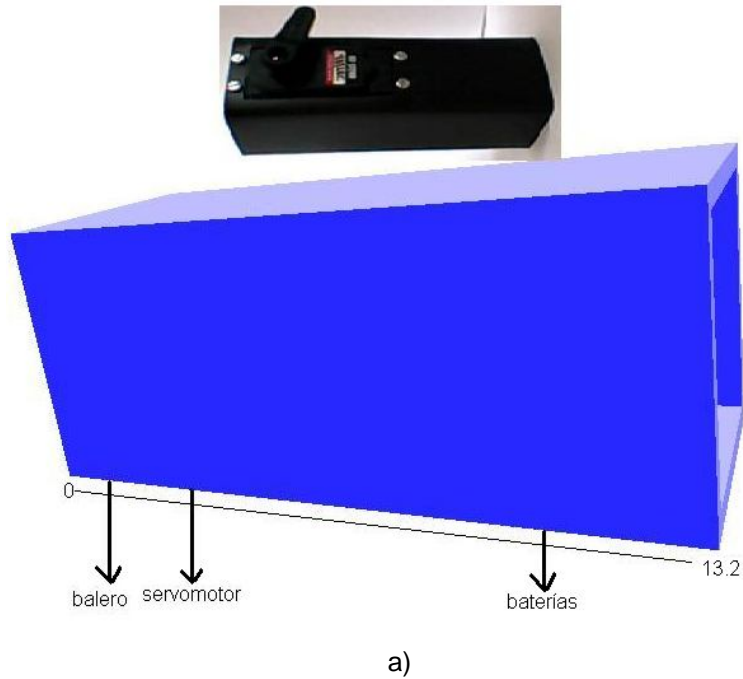
Figura 3.12. Pesos en la tibia. a) Posición en la que se encuentran distribuidos los pesos en la tibia, b) Dimensiones reales de los lugares en donde se distribuyen los pesos.

Obteniendo el siguiente centro de masa para la tibia

$$X_{cm} = \frac{2.25(14) + 3.7(110) + 9.5(110) + 11(14)}{14 + 110 + 110 + 14} = 6.6cm. \quad (3.2)$$

Con respecto al extremo izquierdo

En el fémur se tienen los siguientes datos



**Pesos en el fémur**

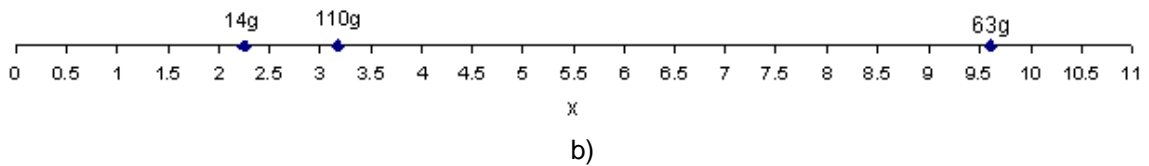


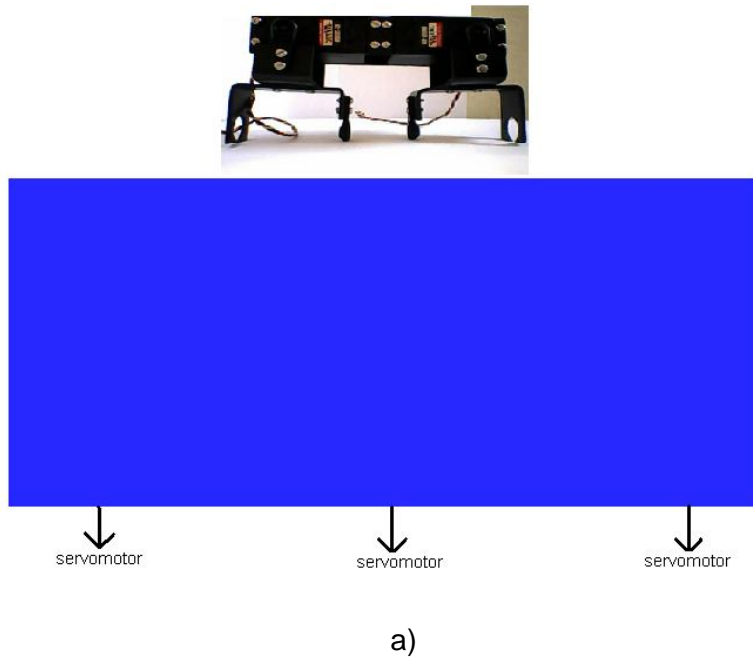
Figura 3.13. Pesos en el fémur. a) Posición en la que se encuentran distribuidos los pesos en el fémur, b) Dimensiones reales de los lugares en donde se distribuyen los pesos.

Por lo que el centro de masa para el fémur se encuentra ubicado a:

$$X_{cm} = \frac{2.25(14) + 3.71(110) + 9.65(63)}{14 + 110 + 63} = 5.59cm \quad (3.3)$$

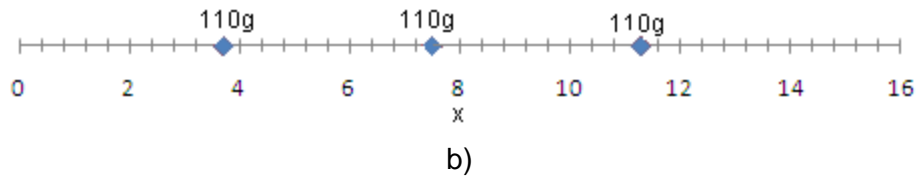
Partiendo del extremo izquierdo

La pieza que une los pies



a)

**Unión de los pies**



b)

Figura 3.14. Unión de los pies. a) Posición en la que se encuentran distribuidos los pesos en la unión , b) Dimensiones reales de los lugares en donde se distribuyen los pesos.

Obteniendo el siguiente centro de masa para la unión de los pies

$$X_{cm} = \frac{3.7(110) + 7.5(110) + 11.3(110)}{110 + 110 + 110} = 7.5cm.....(3.4)$$

Partiendo del extremo izquierdo.

**3.2.2.2 Ángulos soportados por el servomotor**

Una vez obtenidos los centros de masa se puede encontrar los torques necesarios para el movimiento de las articulaciones, estos movimientos dependerán de la situación en la que se encuentre el robot. En la posición de paro cuando el robot no está caminando se utilizan todas las articulaciones excepto la de la columna para mantener el equilibrio del robot al presentarse movimiento de él o inclinaciones en la superficie.

Para el caso en el que el robot está caminando se utilizan las articulaciones de la rodilla, cadera, columna y tobillo, este último para movimiento a los lados.

En la Tabla 3.2 se muestran los ángulos máximos de inclinación que el servomotor es capaz de mover en cada una de las articulaciones que unen las piezas del robot. Estos valores pueden consultarse en el Anexo A [7,8].

Tabla 3.2. Ángulos soportados por el servomotor

Articulación	Ángulos máximos de movimiento que soporta el servomotor
Columna	0° - 180°
Cadera para abrir y cerrar el pie	64.5°
Cadera para mover el pie hacia delante y atrás	0-90°
Rodilla	10.6°
Tobillo para movimiento hacia los lados	48.72°
Tobillo para movimiento hacia delante y atrás	60°

### 3.2.3 Componentes para el control

Esta parte consiste en el control de cada uno de los motores, el sensado de la posición actual del robot y de sus posibles variaciones, así como la corrección para la estabilización del robot. Los parámetros que se obtienen del sensado son captados por un microcontrolador PIC16f88 [9], el cual es el encargado de procesarlos y mandar una señal a la tarjeta JMSSC16 [10] para posicionar a cada uno de los motores en forma independiente uno de otro de tal manera que el robot no caiga.

#### 3.2.3.1 Modulo de control de servomotores

El modulo empleado para el control de los motores se realiza a través de una tarjeta JM-SSC16 (ver Figura 3.15) la cual es capaz de controlar 16 motores, suficientes para lo que se requiera ya que el robot solo cuenta con 11 motores.

La tarjeta JM-SSC16 cuenta con un microcontrolador ATMEL AVR-AT90S8535 [11] encargado del posicionamiento de los motores a través de su puerto de entrada de comunicación serial RS-232 a 9600 baudios.

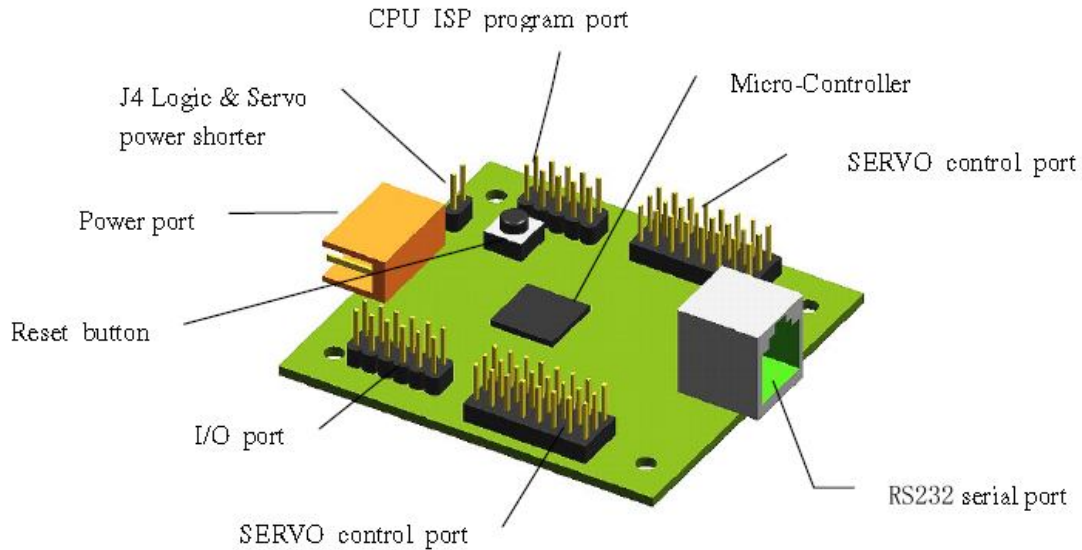


Figura 3.15. Tarjeta controladora de servos

El protocolo de comunicación que se realiza entre los microcontroladores PIC16F88 y AT90S8535 se muestra a continuación.

*Para la posición de inicialización:*

Se envía varias veces el paquete de información siguiente:

Decimal	Hexadecimal
126	7E
85	55
1	1
212	D4

es decir (126,85,1,212), con una pausa de 100ms entre paquete y paquete, con esto se toma el control de la tarjeta.

Para la posición de paro o sin movimiento se envían los datos anteriores solo una vez y con una pausa de 100ms. Para la comunicación con la que se está trabajando este paso puede omitirse.

Para mover un servomotor se envían los siguientes datos en un solo paquete de información

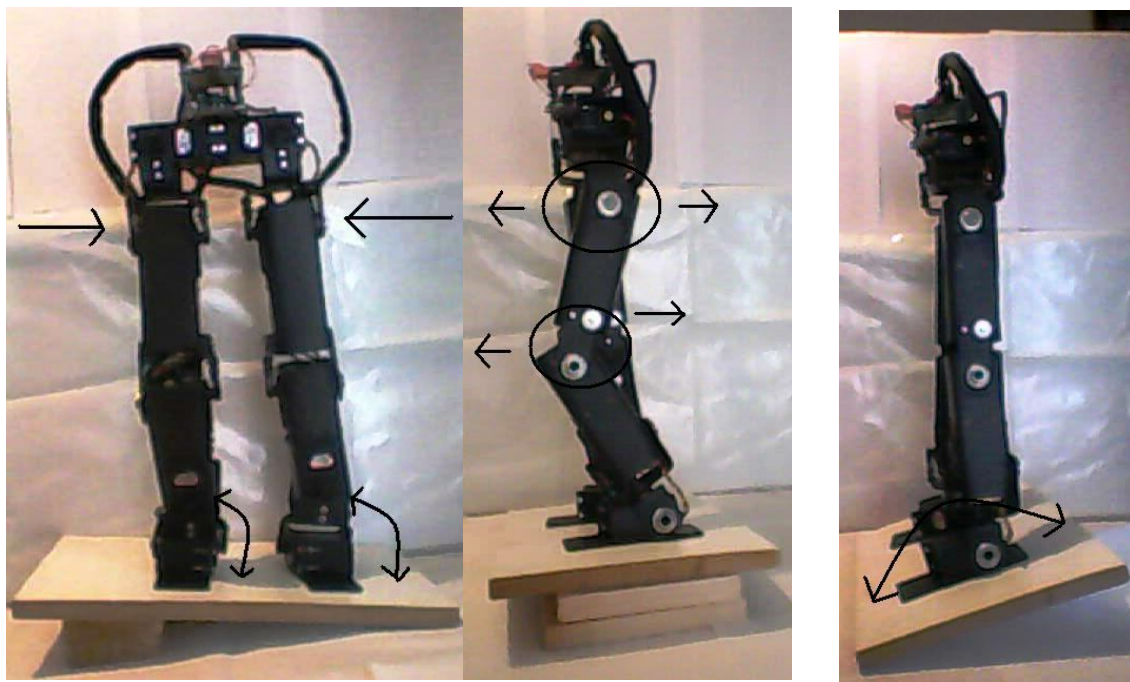
Decimal	Hexadecimal
255	FF
# SERVO	# SERVO
POSICION	POSICIÓN

Con una pausa de 100ms entre paquetes. Los servomotores se identifican de la siguiente manera,

#SERVO	DEC	HEX
0	0	0
1	1	1
2	2	2
.	.	.
10	10	A
11	11	B
.	.	.
15	15	F

las variaciones en el dato correspondiente a “posición” son de 0 a 255.

Las articulaciones que se consideran para la corrección de la posición del robot se muestran en la Figura 3.16. Se puede observar en (a) que para corregir la posición al presentarse inclinaciones a los lados, se corrige: tobillos, cadera y rodillas, mientras que en (b) para la corrección de la posición en inclinaciones adelante-atrás, solo se necesita corregir el movimiento de los tobillos.



a)

b)

Figura 3.16. Articulaciones que se consideran para la corrección de posición.

Cuando el robot se encuentra caminando las articulaciones que se controlan son: cadera, columna, rodilla y tobillo para movimiento hacia los lados (ver Figura 3.17).

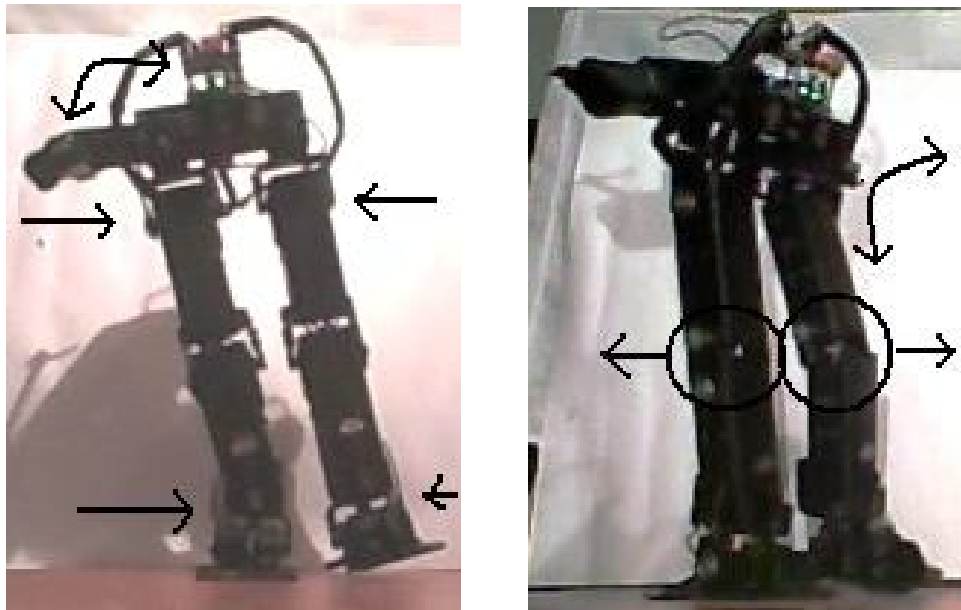


Figura 3.17. Articulaciones que se consideran al caminar.

### 3.2.3.2 Sensor de inclinación

El sensor que se utiliza para medir la inclinación es un MEM D2125 [12] (ver Figura 3.18), el cual es colocado en la parte superior de la cadera. Con esto se logra, medir las inclinaciones ocasionadas por variaciones en el piso o por alguna fuerza aplicada al robot (midiendo la dirección y que tanto es la inclinación). Esto se observa en la Figura 3.19.

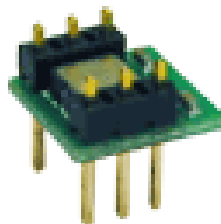


Figura 3.18. MEM D2125 (capaz de medir dos ejes de inclinación)



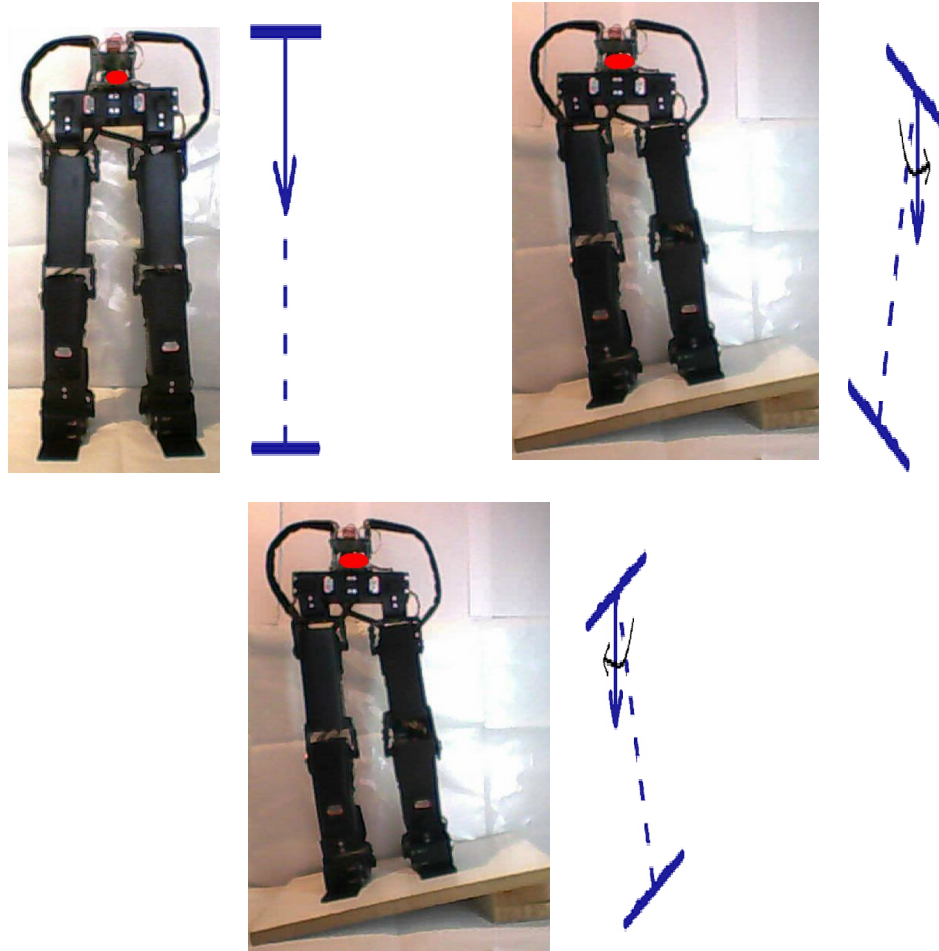


Figura 3.19. El punto rojo simboliza el sensor.

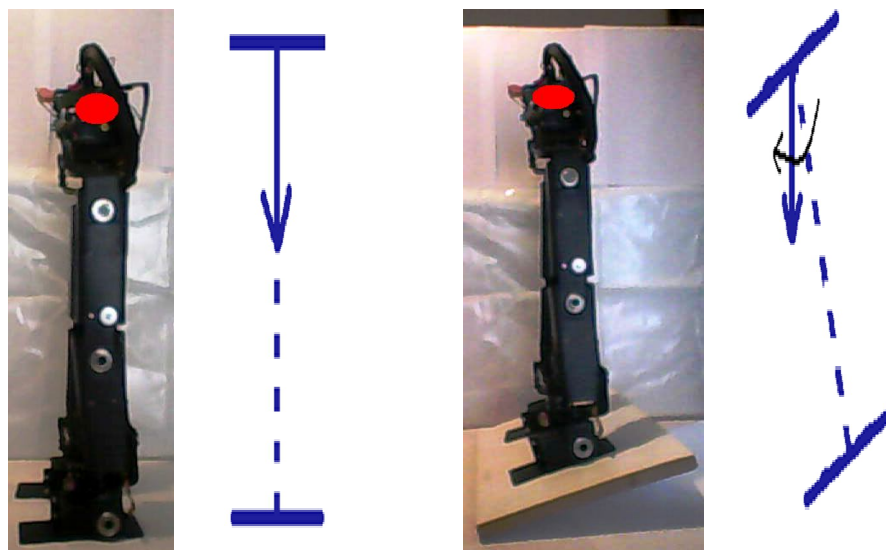


Figura 3.20. Medición de inclinación en dirección delante-atrás.

En las Figuras 3.19 y 3.20 se observa el punto rojo que nos indica el lugar en el que se encuentra el sensor. La imagen que contiene una flecha y una línea punteada representan la gravedad como flecha y la referencia del robot como línea punteada.

Cuando hay un movimiento propio del robot o una inclinación en la superficie la flecha pasa de un lado o de otro dependiendo del sentido, que nos indica precisamente hacia donde se está inclinando. Como se puede observar, mientras mayor sea la inclinación mayor será la separación de la línea de referencia con respecto a la flecha. Esta separación se mide y nos indica que tanto es la inclinación para poderle corregir adecuadamente.

La señal de salida del sensor es de la forma PWM como se muestra en la Figura 3.21. Esta señal presenta las siguientes características proporcionadas por el fabricante. Ciclo de trabajo del 50%, T2 esta calibrado a 10ms y T1 es la parte que cambia según la inclinación.

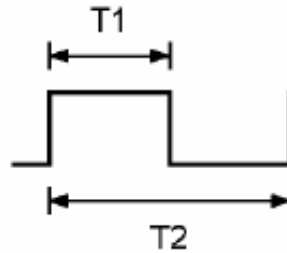


Figura 3.21. Salida del sensor PWM.

El microcontrolador PIC16F88 detecta el flanco de subida de la señal y comienza con un conteo del tiempo que tarda la señal en estar en un nivel alto, los incrementos de tiempo son de 10us.

Para una posición horizontal del robot, es decir, sin ninguna inclinación, se tiene que el dato obtenido por el microcontrolador es de 500 ya que,

$$\frac{\frac{T2}{2}}{\text{incrementos} - \text{en} - \text{el} - \text{tiempo}} = \frac{5 \times 10^{-3}}{10 \times 10^{-6}} = 500. \quad (3.5)$$

Indicándonos con esto que el resultado de (3.5) equivale a 0° de inclinación. Sin embargo, la respuesta del sensor no es lineal y la ecuación (3.5) solo es para el punto estable. La Figura 3.22 muestra la grafica de la respuesta del sensor.

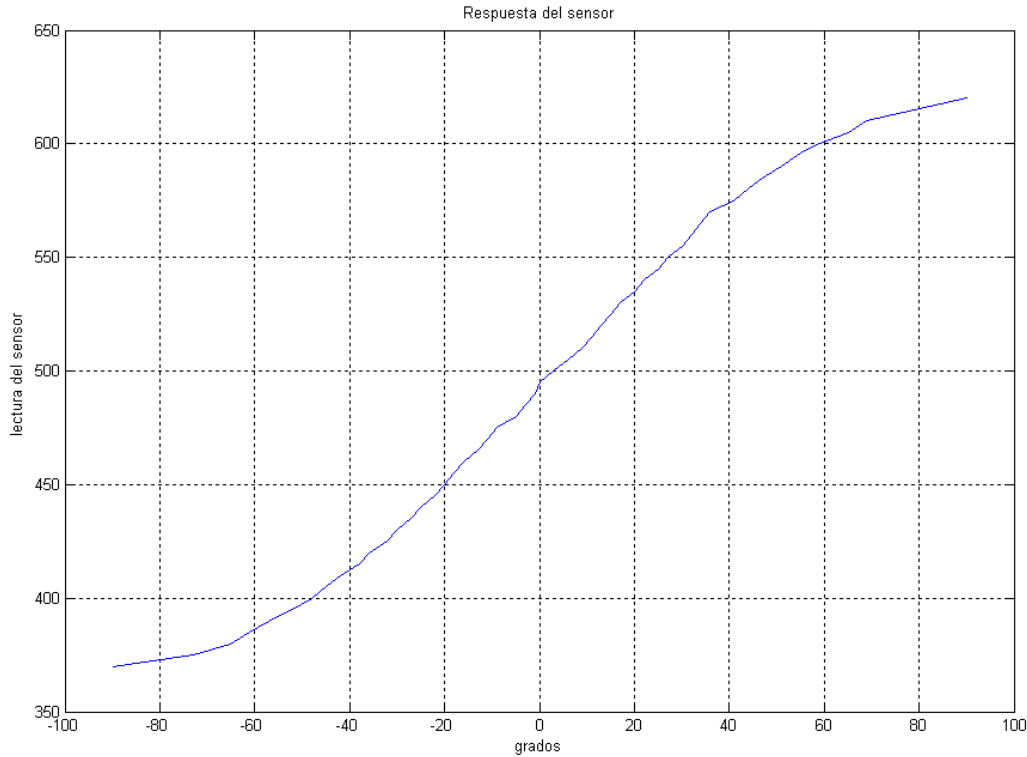


Figura 3.22. Respuesta del sensor

Por lo que, la ecuación que corresponde a la respuesta del sensor es,

$$grados = \arcsen\left(\frac{lectura\_del\_sensor - 497}{119}\right) \quad (3.6)$$

A partir de (3.6) se puede saber cuantos grados de inclinación presenta el robot y el sentido de inclinación, esto puede verse en el Anexo B.

El sensor MEM D2125 es capaz de medir dos ejes de inclinación por lo que las ecuaciones (3.5) y (3.6) son iguales para ambos ejes, correspondientes a inclinaciones hacia los lados y delante-atrás.

### 3.2.4 Diseño de la parte lógica

#### 3.2.4.1 Compilador

El compilador empleado para la programación del PIC16F88 es el MicroCode Studio (ver Figura 3.23) [13], este compilador emplea una sintaxis parecida al lenguaje de programación C permitiendo una mayor comprensión de códigos largos en comparación con el lenguaje de programación ensamblador.

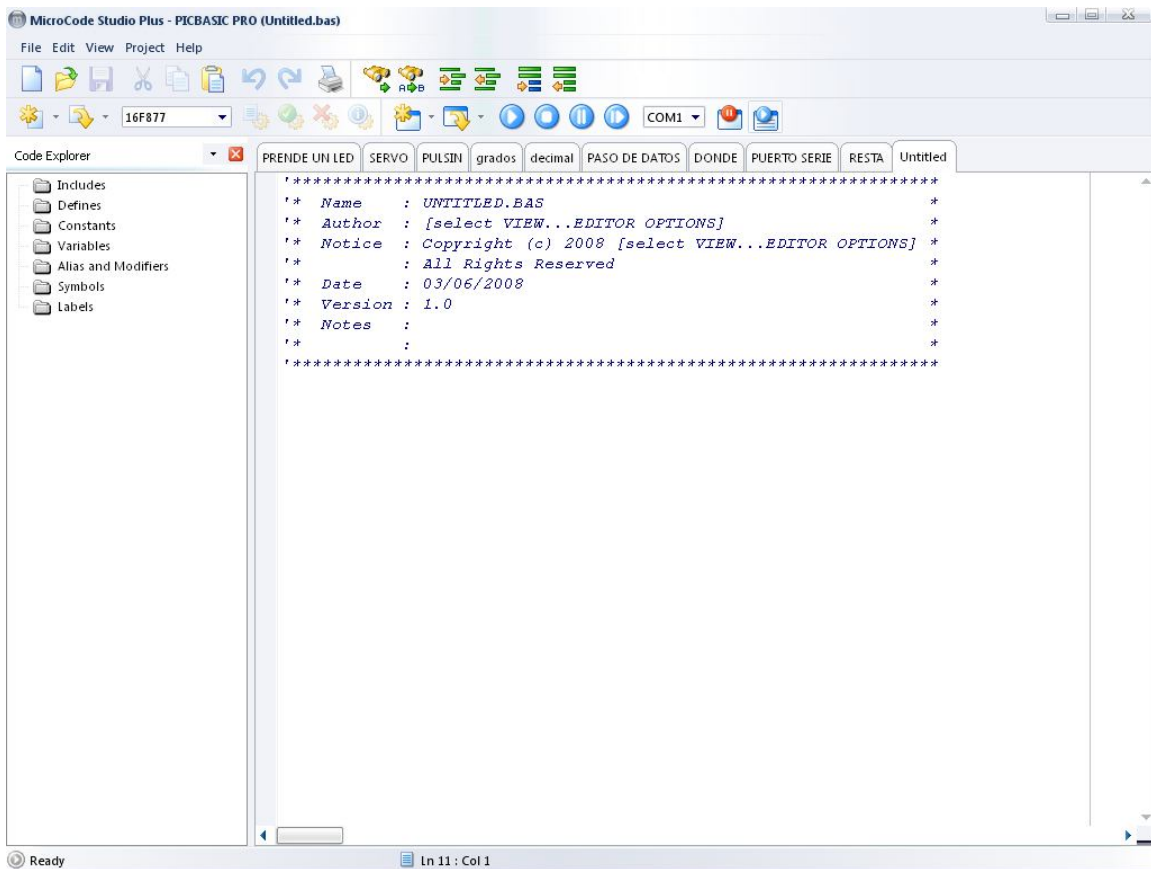


Figura 3.23. Compilador MicroCode Studio.

### 3.2.4.2 Control para el equilibrio del robot aun sin caminar

La Tabla 3.3 muestra la relación de articulación-servomotor y la nomenclatura correspondiente.

Tabla 3.3. Relación articulación-servomotor

Pie izquierdo (i)		Pie derecho (d)	
Servo 0	Pie i. Tobillo delante atrás izquierda (TDAI)	Servo 8	Pie d. Tobillo delante atrás derecha (TDAD)
Servo1	Tobillo i. Tobillo abre y cierra izquierda (TACI)	Servo 9	Tobillo d. Tobillo abre y cierra derecha (TACD)
Servo 2	Rodilla i. (RI)	Servo 10	Rodilla (RD)
Servo 3	Cadera delante /atrás i. (CAI)	Servo 11	Cadera delante / atrás d (CDAD)
Servo 4	Cadera izquierda /derecha (CIDI)	Servo 12	Cadera izquierda/derecha (CIDD)
Servo 5	Columna (CO)	Servo 13	
Servo 6		Servo 14	
Servo 7		Servo 15	

### 3.2.4.2.1 Inicialización

Para inicializar la tarjeta controladora de servos es necesario manda 80 veces el siguiente paquete,

```
for B5=0 to 80
    B0=126
    B1=85
    B2=1
    B3=212
    SEROUT salida,N9600,[B0,B1,B2,B3]
    PAUSE 100
next B5
```

ya que de esta forma se obtiene una buena sincronización en el envío de los datos de los datos. Donde SEROUT es la función que manda en forma serial la información por el puerto B pin cero y las B0,B1,...,B5 son variables que toma un valor para esa función.

Posteriormente se inicializan los motores en su posición neutral a través de otro for para los motores de tobillos y cadera

```
posicion=127
FOR servo=0 TO 8
    SEROUT salida,N9600,[B0,servo,posicion]
    PAUSE 100
NEXT SERVO
```

Para las rodillas solo se ponen los motores en su posición limite, rodilla izquierda "0" y rodilla derecha "255". Finalmente se guarda en cuatro localidades de memoria la posición de referencia (127) que se van a utilizar más adelante en el programa.

### 3.2.4.2.2 Función principal

Por medio de la función PULSIN se obtienen los datos correspondientes a "lectura del sensor" posteriormente se hace una comparación para saber si la inclinación es en dirección derecha o izquierda habilitando una bandera y brincando al modulo de conversión a grados.

```
Inicio:
PULSIN PORTB.1,1,W4
    IF (W4>498)AND (W4<488) THEN
        GOTO Chec_del_atra
    ENDIF
    IF W4>493 THEN
        B0=5          'BANDERA  B0=5
        GOTO Incl_Derech_Atras
    ENDIF

    IF W4<493 THEN
```

```

B0=5      `BANDERA  B0=5
GOTO InclI_Izq_Delant
ENDIF

```

Después de corregir la inclinación se hace otra lectura del sensor para la inclinación delante-atrás. De la misma forma que el proceso anterior, se hace una comparación del dato para saber si se está cayendo hacia delante o hacia atrás y se brinca para la conversión a grados con su correspondiente bandera y por supuesto para la corrección de posición,

```

Chec_del_atra:
PULSIN PORTB.2,1,W4
IF (W4>498)AND (W4<488) THEN
    goto inicio
ENDIF
IF W4>493 THEN
    B0=10      `BANDERA B0=10
    GOTO InclI_Derech_Atras
ENDIF
IF W4<493 THEN
    B0=10      `BANDERA B0=10
    GOTO InclI_Izq_Delant
ENDIF

```

Después de realizar los pasos anteriores se regresa al inicio de este modulo para continuar corrigiendo la posición. Notando que en el caso que no haya ninguna inclinación en ningún sentido no se realizará ninguna comparación solo se brincar a la etiqueta inicio y permanecerá así hasta que se presente alguna inclinación.

### 3.2.4.2.3 Tabla de conversión a grados

Para realizar la conversión a grados se utiliza la ecuación (3.6), sin embargo para programar una función *arcsen* en un microcontrolador es bastante complicado y laborioso, por lo que se realizo una tabla de valores entre los limites máximo y mínimo (371 a 618) y se almaceno en la memoria del microcontrolador PIC16F88 tomando en cuenta que estos valores funcionan para ambos ejes del sensor.

### 3.2.4.2.4 Selector de inclinación

Esta parte del programa se encarga de detectar y brincar a la función correspondiente para la corrección de posición dependiendo de la bandera. El código se muestra a continuación.

Selector de inclinación derecha o atrás

```

Se_DerOatr:
IF B0==05 THEN

```

```

GOTO Con_Der
ENDIF
IF B0==10 THEN
GOTO Con_Atras
ENDIF

```

Selector de inclinación izquierda o delante

```

Se_IzqOAdel:
IF B0==5 THEN
GOTO Con_izQ
ENDIF
IF B0==10 THEN
GOTO Con_Delant
ENDIF

```

Las banderas B0=5 para inclinación del tipo izquierda derecha y B0=10 para inclinación del tipo delante-atrás.

### 3.2.4.2.5 Funciones de corrección de posición

Cada inclinación cuenta con su propia función de corrección sin perderse una de otra de la inclinación presente en ese momento. Para eso se utilizan las posiciones de referencia. Al presentarse una inclinación la posición del robot se corregirá y el microcontrolador pensara que la superficie es plana ya que el sensor manda la señal de 500 equivalente a 0°, ocasionando que se vuelva a corregir la posición y el robot caiga, esto se ve mas claro en la Figura 3.24.

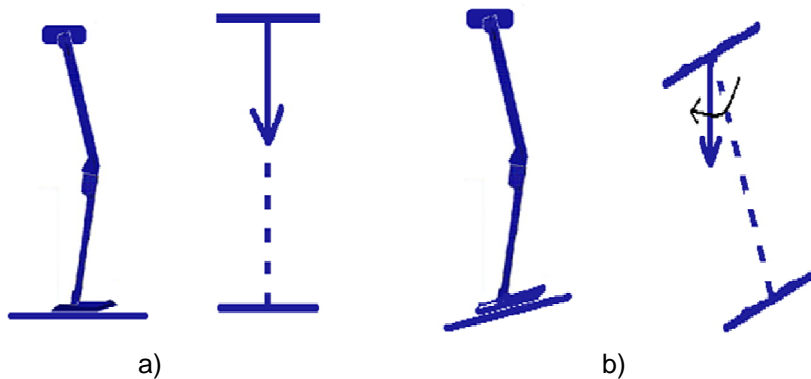


Figura 3.24. Corrección de posición.

En la Figura 3.24 (a) se observa que la superficie es plana al igual que la cadera (lugar donde se encuentra el sensor). En la Figura 3.24 (b) se observa que al existir una inclinación en la superficie, el microcontrolador PIC16F88 corrige la posición ocasionando que el sensor vuelva a la posición de estabilidad enviando una señal de 500. Ya que la cadera vuelve a la posición horizontal el algoritmo de estas funciones es capaz de saber que aun se encuentra la inclinación y que solo corrigió la posición.

### 3.2.4.2.6 Función de corrección de inclinación de los lados derecha e izquierda

Primeramente se realiza una conversión de grados a datos para el servomotor en un intervalo de 0 a 255 para poder moverlo adecuadamente mediante,

$$dato\_para\_servo = \frac{grados * 14}{10} \quad (3.7)$$

este valor se almacena en `posicion`

```
W4=B5*14
W4=W4/10
posicion=W4
```

Después, se lee de la memoria el valor de referencia y es sumado con el valor de posición para posteriormente ser enviado a la tarjeta controladora de servos con el número de servo correspondiente a esa articulación de la siguiente manera,

```
SEROUT salida,N9600,[B0,servo,posicion]
```

Finalmente se realizan dos operaciones,

1. Pausa de 800ms para dar tiempo a que el robot tome su nueva posición.
2. Guarda en memoria el nuevo valor de posición sustituyendo al antiguo valor de referencia para ser usado por otra o por la misma función.

El código completo para esta función se muestra a continuación:

```
Con_Der:
  W4=B5*14
  W4=W4/10
  posicion=W4
  B2=W4
  READ 0,B5
  B0=255
  servo=TACD
  posicion=B5+posicion
  SEROUT salida,N9600,[B0,servo,posicion]
  PAUSE 100
  servo=TACI
  posicion=W4
  posicion=B5-posicion
  SEROUT salida,N9600,[B0,servo,posicion]
  PAUSE 100
  WRITE 0,posicion
  PAUSE 800
```



GOTO Chec\_del\_atra

Para la corrección del lado izquierdo se utiliza el mismo método cambiando únicamente las siguientes líneas de código,

Para TACD : posicion=B5-posicion

Para TACI : posicion=B5+posicion

### 3.2.4.2.7 Función de corrección delante-atrás

Estas funciones son parecidas a las del punto anterior con la diferencia que necesita dos valores de referencia, ya que los motores del pie derecho están completamente invertidos en comparación con los del pie izquierdo, el código se muestra a continuación.

Código para función de corrección de inclinación hacia atrás,

```

Con_Atras:
  W4=B5*14
  W4=W4/10
  posicion=W4
  READ 2,B5
  B0=255
  servo=TDAD
  posicion=B5+posicion
  SEROUT salida,N9600,[B0,servo,posicion]
  PAUSE 100
  WRITE 2,posicion
  servo=TDAI
  posicion=W4
  READ 4,B5
  posiscion=B5-posicion
  SEROUT salida,N9600,[B0,servo,posicion]
  PAUSE 100
  WRITE 4,posicion
  PAUSE 800
  GOTO inicio
    
```

observando que se hacen dos llamadas a memoria y dos almacenamientos a memoria.

Para la corrección de inclinación hacia delante solo se cambia lo siguiente del código

Para TDAD : posicion=B5-posicion

Para TDAI : posicion=B5+posicion

### 3.2.4.3 Control del robot cuando camina

Para que el robot pueda desplazarse emplea distintos movimientos como se describe a continuación. El primer movimiento que realiza es un desplazamiento a la derecha que le permitirá poder levantar el pie izquierdo para dar el paso. Las funciones que se utilizan son,

```
posicion=-----
servo=-----
SEROUT salida,N9600,[B0,servo,posicion]
PAUSE -----
```

En la función `posicion` se coloca el valor que corresponda para el movimiento del servomotor, `servo` es la articulación a mover, `SEROUT` para mandar los datos al modulo de servomotores y `PAUSE` para esperar a que el motor llegue al punto deseado antes de comenzar con la corrección de la siguiente articulación.

La segunda parte del movimiento es dar el primer paso con el pie izquierdo, posteriormente se regresa al punto central y se realizan las operaciones opuestas, es decir, ahora la inclinación será a la izquierda y dará el paso con el pie derecho. Esta secuencia se observa mejor en las Figuras 3.25 y 3.26.

## 3.3 Conclusiones

La propuesta que se planteo para la solución del problema de equilibrio fue satisfecha ya que se consiguió que el robot mantuviera el equilibrio además de permitirle caminar logrando con esto que el objetivo se cumpliera. Algunos de los movimientos pueden modificarse para verse más naturales con la ayuda de servomotores que posean mayor torque.

## 3.4 Referencias

- [1] ASIMO  
<http://world.honda.com/ASIMO>
- [2] Robotics  
<http://www.roboticspot.com>
- [3] Material PVC Sintra  
[www.alcancompositesesp.com](http://www.alcancompositesesp.com)
- [4] J. Hamm, "Dibujando la cabeza y el cuerpo humano", Ed. Lagusa, 1989
- [5] W. Stadler, "Analytical Robotics and Mechatronics", 1995.
- [6] Datasheet servomotor  
<http://www.hitecrd.com/>
- [7] E. Kreyszig, "Matemáticas Avanzadas para Ingeniería", Noriega Limusa Wiley, Tercera edición 2003.
- [8] D. G. Zill, "Ecuaciones diferenciales con aplicaciones de modelado", Thomson Learning Septima edicion 2002
- [9] Datasheet microcontrolador  
[www.microchip.com](http://www.microchip.com)
- [10] MCII Robot tarjeta de control de servomotores  
<http://www.mciirobot.com/product/detail/SCBV001.htm>

- [11] Microcontrolador ATMEL  
[http://www.datasheetcatalog.net/es/datasheets\\_pdf/A/T/9/0/AT90S8535-8JC.shtml](http://www.datasheetcatalog.net/es/datasheets_pdf/A/T/9/0/AT90S8535-8JC.shtml)
- [12] Sensor MEMSIC  
<http://search.alkon.net/cgi-bin/pdf.pl?pdfname=memsic/mxd2125gl.pdf>
- [13] Compilador de Pic <http://www.mecanique.co.uk/code-studio/>

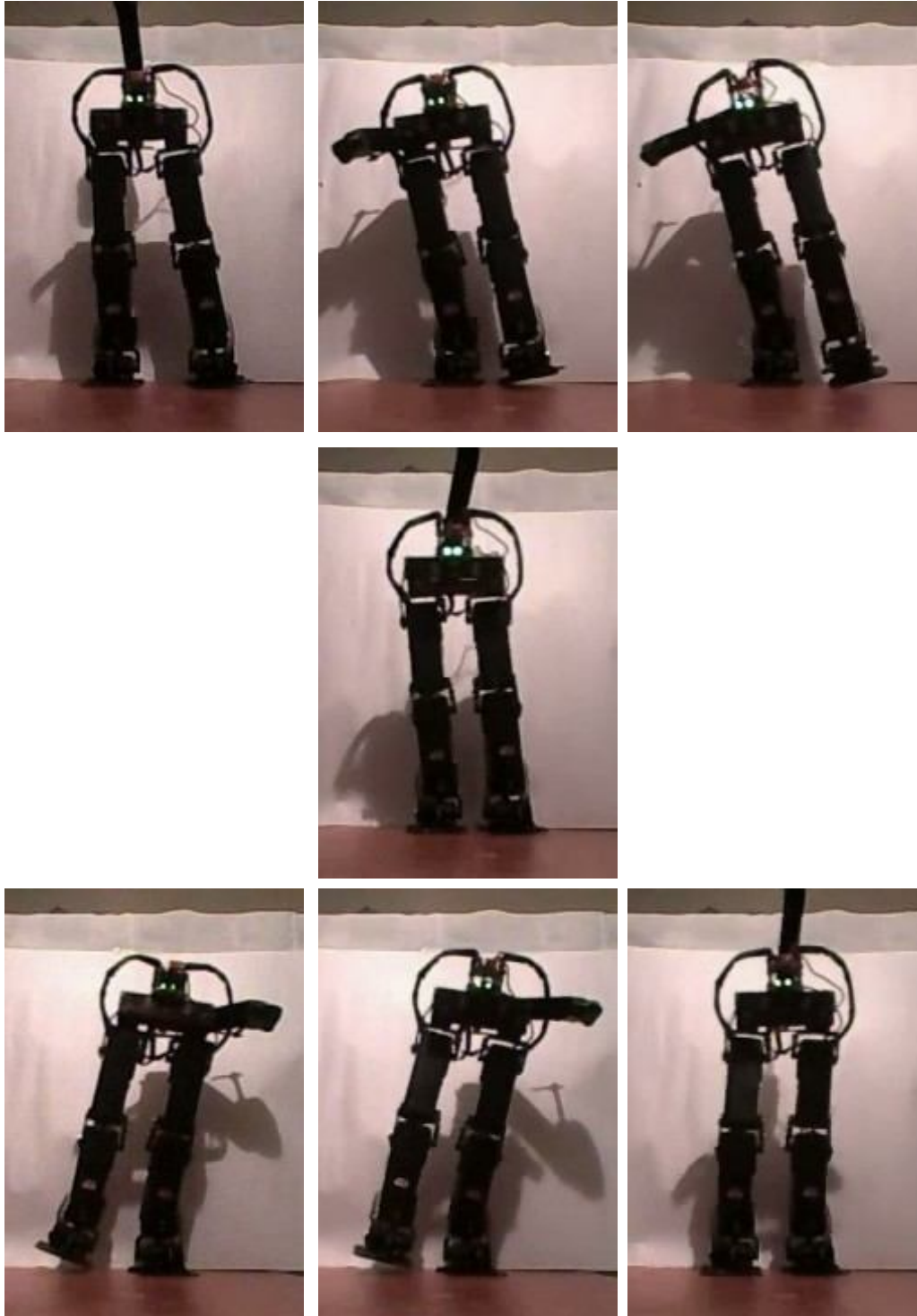


Figura 3.25. Secuencia de movimientos al caminar visto de frente.

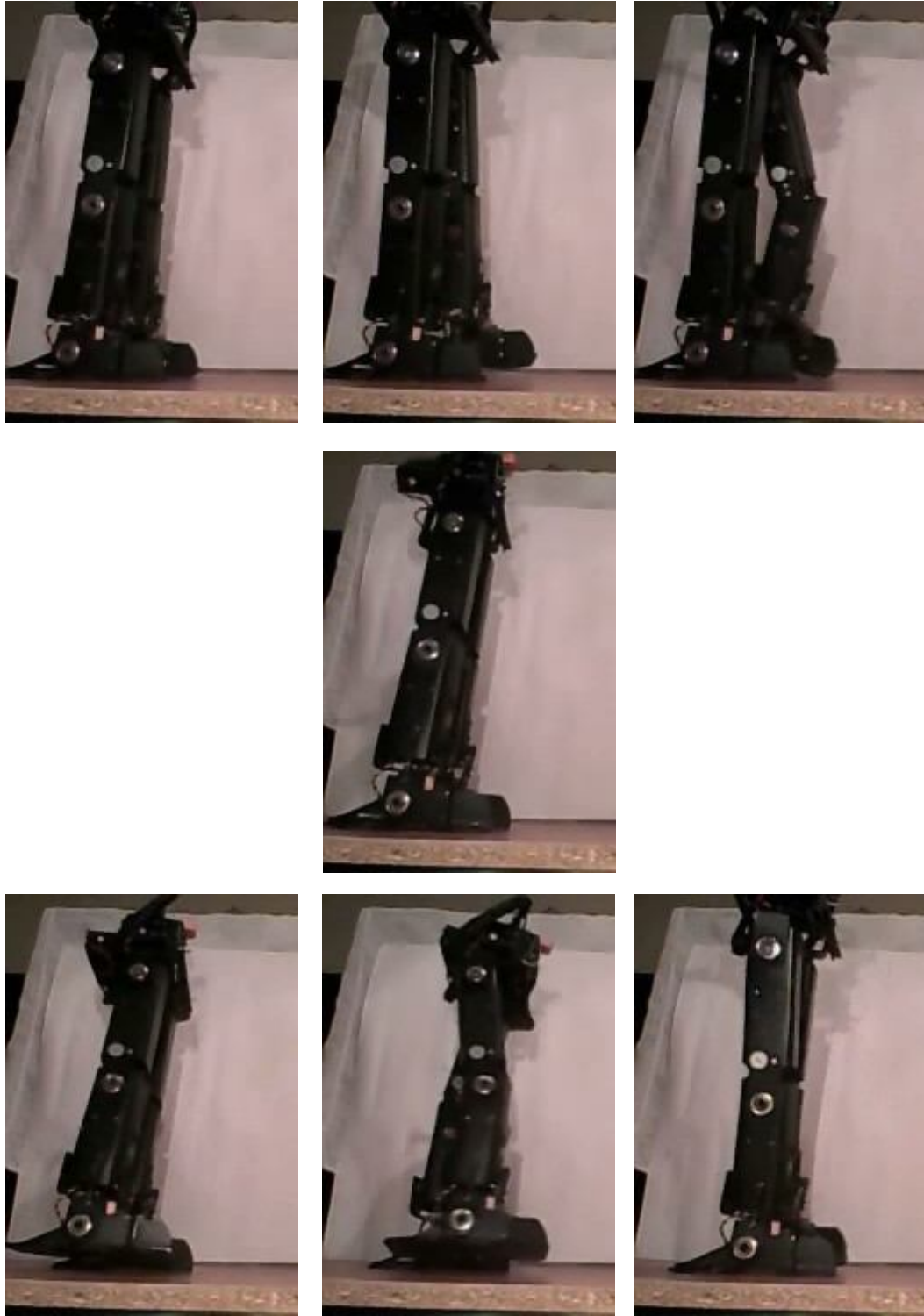


Figura 3.26. Secuencia de movimientos al caminar visto de lado.

*Capítulo 4*

***RESULTADOS EXPERIMENTALES***

## 4.1 Introducción

En este capítulo se muestran los resultados experimentales obtenidos de las señales que se manejan en la programación del microcontrolador y en de la parte de control. Para el sistema de equilibrio propuesto en este trabajo.

## 4.2 Mediciones

El sensor MEM D2125 empleado para medir las inclinaciones proporciona una señal de PWM (ver Figura 4.1) [1]. Todos los voltajes que se manejan son de 0V para un estado bajo y 5V en un estado alto. Esta señal tiene cierta duración dependiendo de los ángulos de inclinación que presente, estos datos se muestran en la Tabla 4.1 (ver sección 3.2.3.2).



Figura 4.1. Estados de la señal

Tabla 4.1. Tiempos de duración PWM

Angulo de inclinación	Tiempo que dura la señal en estar en estado alto	Tiempo que dura la señal en estar en un estado bajo
90°	6.18ms	3.82 ms
79°	6.13 ms	3.87 ms
69°	6.08 ms	3.92 ms
65°	6.03 ms	3.97 ms
59°	5.98 ms	4.02 ms
55°	5.93 ms	4.07 ms
51°	5.88 ms	4.12 ms
47°	5.83 ms	4.17 ms
44°	5.78 ms	4.22 ms
41°	5.73 ms	4.27 ms
36°	5.68 ms	4.32 ms
34°	5.63 ms	4.37 ms
32°	5.58 ms	4.42 ms
30°	5.53 ms	4.47 ms
27°	5.48 ms	4.52 ms
25°	5.43 ms	4.57 ms
22°	5.38 ms	4.62 ms
20°	5.33 ms	4.67 ms
17°	5.28 ms	4.72 ms
15°	5.23 ms	4.77 ms
13°	5.18 ms	4.82 ms
11°	5.13 ms	4.87 ms
9°	5.08 ms	4.92 ms

6°	5.03 ms	4.97 ms
3°	5.01 ms	4.99 ms
0°	5.00 ms	5.00 ms
-1°	5.01 ms	4.99 ms
-3°	5.01 ms	4.99 ms
-5°	4.78 ms	5.22 ms
-9°	4.73 ms	5.27 ms
-11°	4.68 ms	5.32 ms
-13°	4.63 ms	5.37 ms
-16°	4.58 ms	5.42 ms
-18°	4.53 ms	5.47 ms
-20°	4.48 ms	5.52 ms
-22°	4.43 ms	5.57 ms
-25°	4.38 ms	5.62 ms
-27°	4.33 ms	5.67 ms
-30°	4.28 ms	5.72 ms
-32°	4.23 ms	5.77 ms
-36°	4.18 ms	5.82 ms
-38°	4.13 ms	5.87 ms
-42°	4.08 ms	5.92 ms
-45°	4.03 ms	5.97 ms
-48°	3.98 ms	6.02 ms
-52°	3.93 ms	6.07 ms
-57°	3.88 ms	6.12 ms
-61°	3.83 ms	6.17 ms
-65°	3.78 ms	6.22 ms
-73°	3.73 ms	6.27 ms
-90°	3.68 ms	6.32 ms

En la Figura 4.2 se describe la dirección del movimiento que se considero para los ángulos del servomotor Hitec HS-755HB [2]. Los servomotores trabajan con una señal de PWM que se describe en forma digital con los valores de 0 a 255, para poder trabajar con estos valores en el microcontrolador y establecer el ángulo en el que se deben de posicionar se tienen los datos de la Tabla 4.2. Para un ángulo de movimiento de 0° su valor digital toma el valor de 0 y para una máximo de 180° toma un valor de 255.

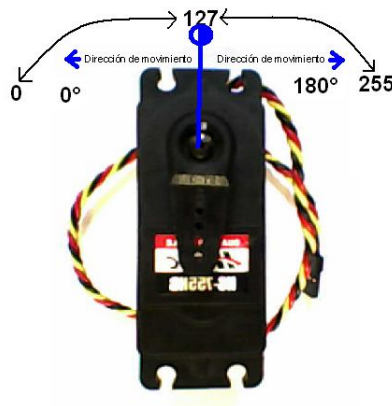


Figura 4.2. Ángulos de movimiento y valores digitales

Tabla 4.2 . Relación dato digital con ángulo de movimiento

Ángulo de movimiento	Valor digital para servo	Ángulo de movimiento	Valor digital para servo	Ángulo de movimiento	Valor digital para servo
1°	1	61	85	121°	169
2°	3	62	87	122°	171
3°	4	63	88	123°	172
4°	6	64	90	124°	174
5°	7	65	91	125°	175
6°	8	66	92	126°	176
7°	10	67	94	127°	178
8°	11	68	95	128°	179
9°	13	69	97	129°	181
10°	14	70	98	130°	182
11°	15	71	99	131°	183
12°	17	72	101	132°	185
13°	18	73	102	133°	186
14°	20	74	104	134°	188
15°	21	75	105	135°	189
16°	22	76°	106	136°	190
17°	24	77°	108	137°	192
18°	25	78°	109	138°	193
19°	27	79°	111	139°	195
20°	28	80°	112	140°	196
21°	29	81°	113	141°	197
22°	31	82°	115	142°	199
23°	32	83°	116	143°	200
24°	34	84°	118	144°	202
25°	35	85°	119	145	203
26°	36	86°	120	146°	204
27°	38	87°	122	147°	206
28°	39	88°	123	148°	207
29°	41	89°	125	149°	209
30°	42	90°	126	150°	210
31°	43	91°	127	151°	211
32°	45	92°	129	152°	213
33°	46	93°	130	153°	214
34°	48	94°	132	154°	216
35°	49	95°	133	155°	217
36°	50	96°	134	156°	218
37°	52	97°	136	157°	220
38°	53	98°	137	158°	221
39°	55	99°	139	159°	223
40°	56	100°	140	160°	224
41°	57	101°	141	161°	225
42°	59	102°	143	162°	227
43°	60	103°	144	163°	228
44°	62	104°	146	164°	230
45°	63	105°	147	165°	231
46°	64	106°	148	166°	232



47°	66	107°	150	167°	234
48°	67	108°	151	168°	235
49	69	109°	153	169°	237
50	70	110°	154	170°	238
51	71	111°	155	171°	239
52	73	112°	157	172°	241
53	74	113°	158	173°	242
54	76	114°	160	174°	244
55	77	115°	161	175°	245
56	78	116°	162	176°	246
57	80	117°	164	177°	248
58	81	118°	165	178°	249
59	83	119°	167	179°	251
60	84	120°	168	180°	252

En la Figura 4.3 se muestra la relación que existe entre el dato digital y el tiempo de duración de la señal PWM para un servomotor. Las Figuras 4.4 y 4.5 muestran la grafica de los desplazamientos que van tomando los servomótores según los movimientos de la posición de equilibrio de la Figura 4.6.

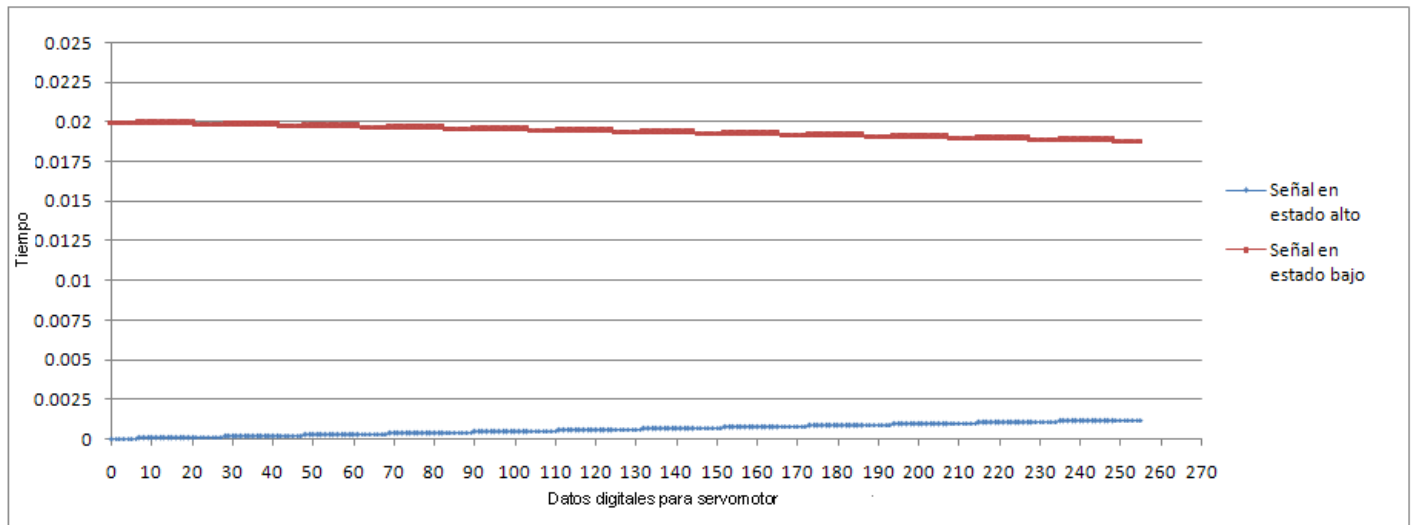


Figura 4.3 . Relación dato digital y señal PWM para el servomotor

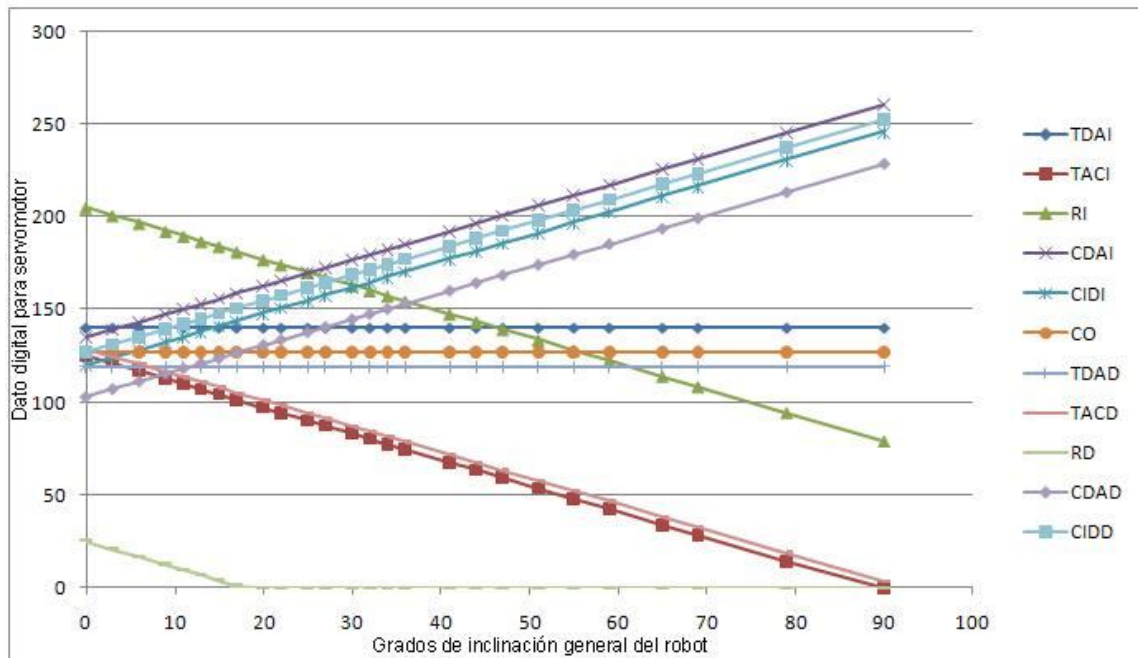


Figura 4.4. Relación de la inclinación general del robot con respecto a los datos de servomotor para la inclinación a la derecha, donde TDAI: Tobillo delante atrás izquierdo, TACI: Tobillo abre y cierra izquierdo, RI: Rodilla izquierda, CDAI: Cadera delante atrás izquierda, CIDI: Cadera derecha izquierda izquierda, CO: Columna, TDAD: Tobillo delante atrás derecho, TACD: Tobillo abre y cierra derecho, RD: Rodilla derecha, CDAD: Cadera delante atrás derecha y CIDD: Cadera izquierda derecha derecha.

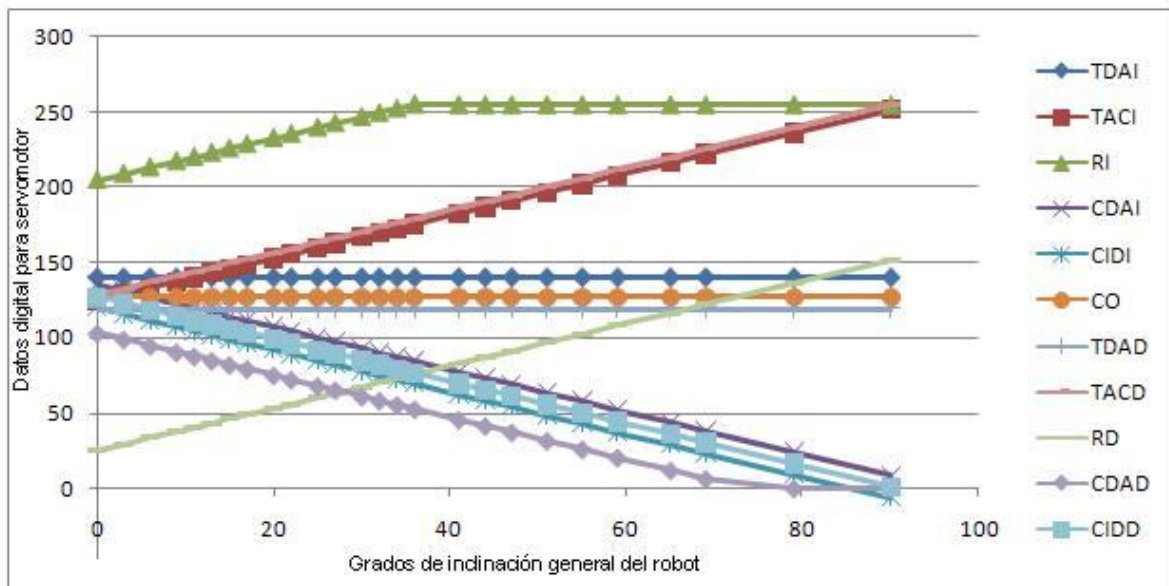


Figura 4.5. Relación de la inclinación general del robot con respecto a los datos de servomotor para la inclinación a la izquierda.

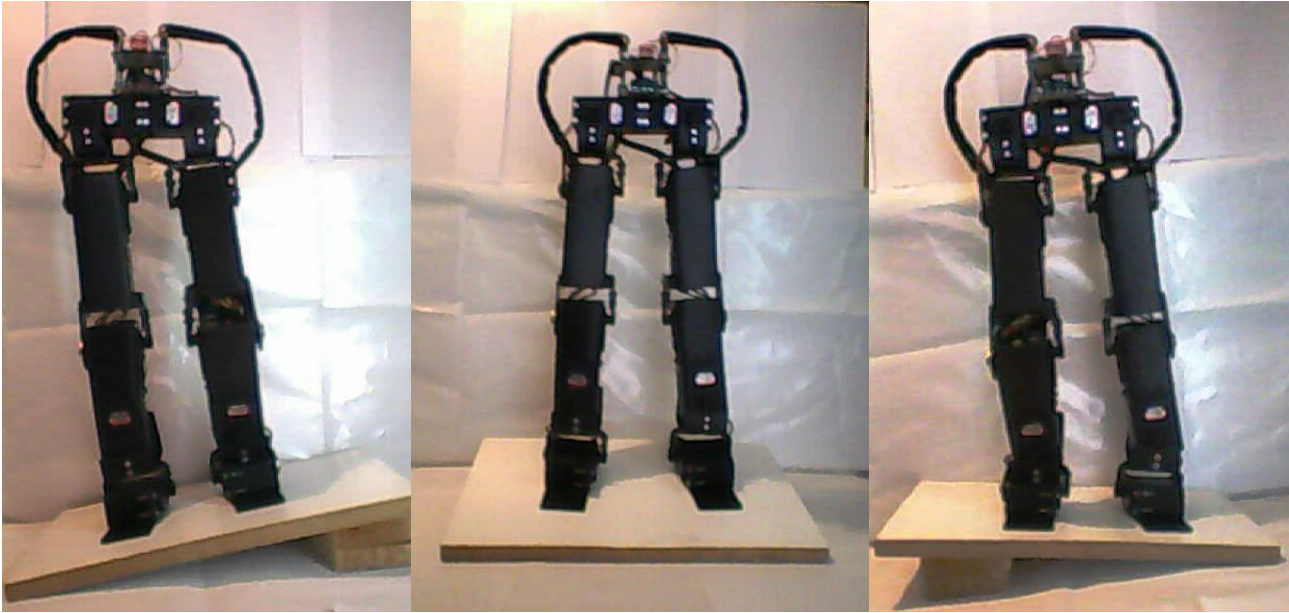
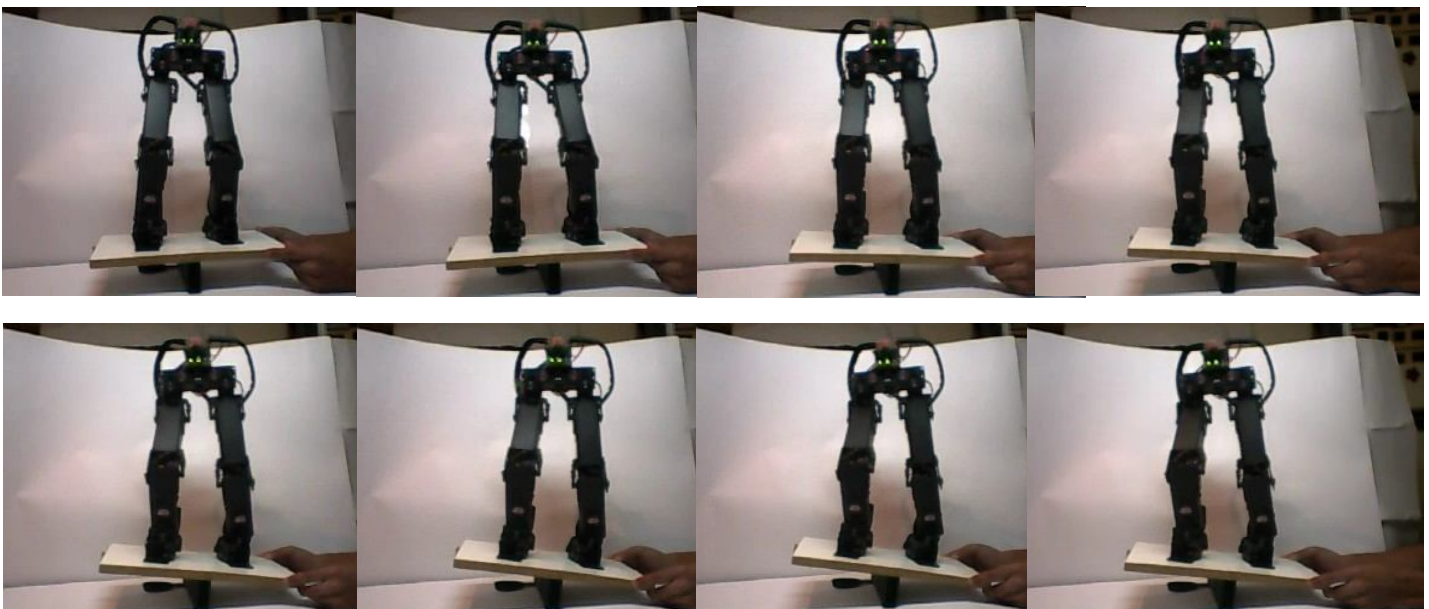


Figura 4.6. Movimientos de inclinación.

Las Figuras 4.7 y 4.8 muestran una secuencia de video de la corrección de posición del robot, donde se puede observar que el proceso consiste en colocarlo sobre una superficie plana con un soporte central que le permite una movilidad de inclinación hacia la derecha e izquierda. Al colocar el robot en esta superficie con una posición central que se refiere a ninguna inclinación, el robot se mantendrá en equilibrio, al comenzar la inclinación el robot es capaz de detectar estos movimiento y corregir su posición controlando cada una de sus articulaciones para evitar que caiga. En forma general en esta secuencia de video se observa que se realizan inclinaciones en ambos sentidos, derecha e izquierda y finalmente se regresa al punto central. En la Figura 4.8 se observa exactamente el mismo proceso pero con una vista lateral.



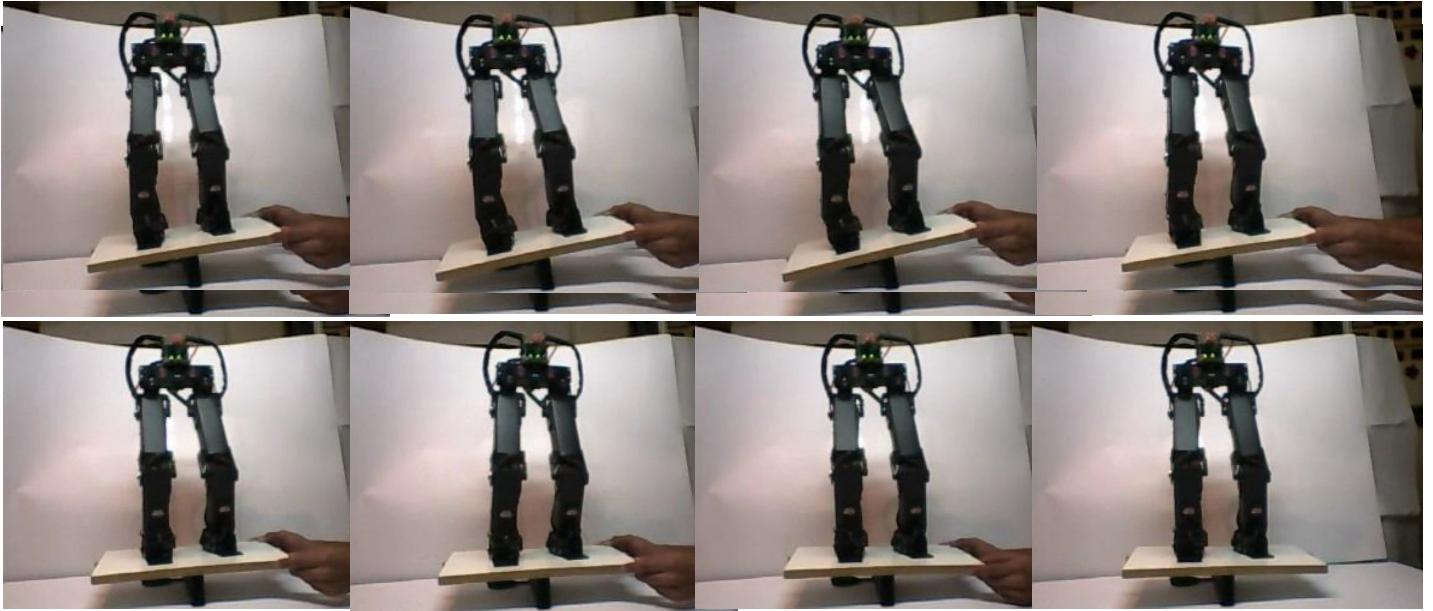


Figura 4.7. Secuencia de imágenes donde se muestra la corrección de posición en vista frontal



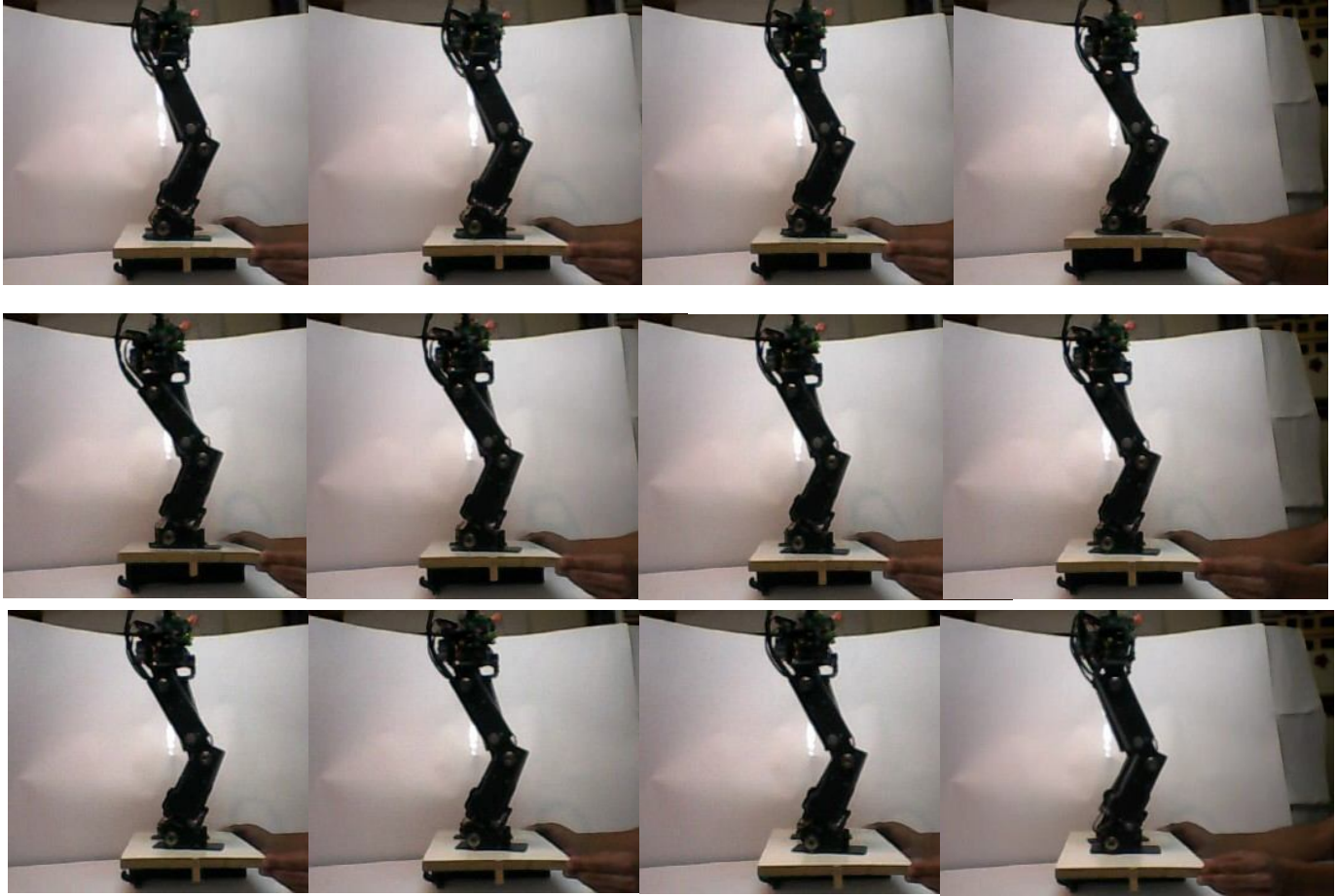
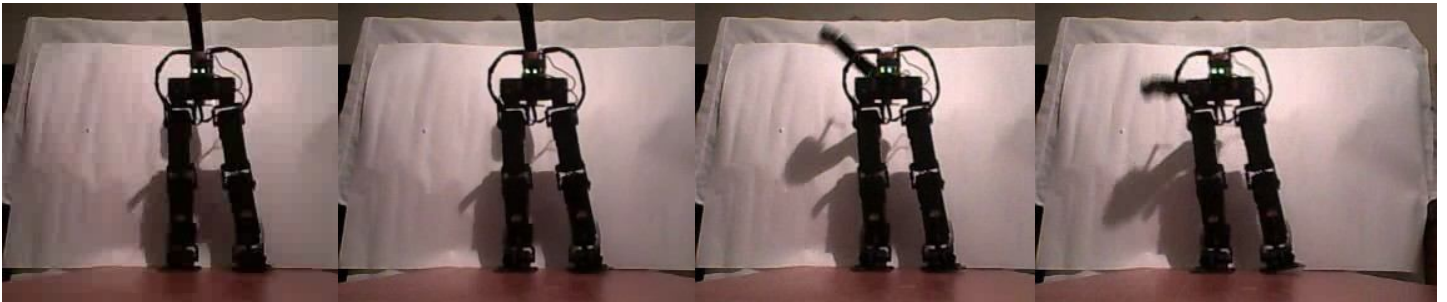
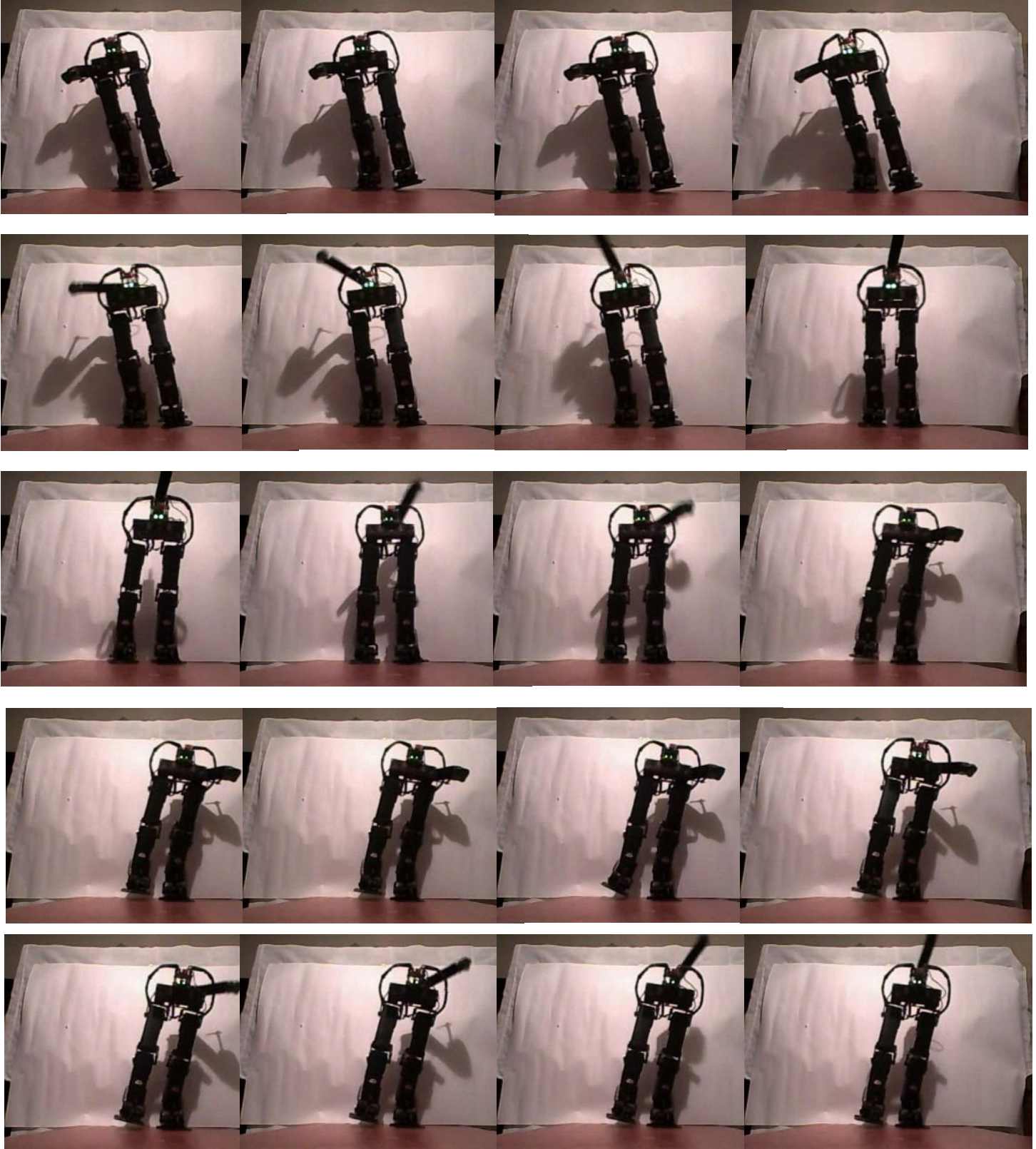


Figura 4.8. Secuencia de imágenes del video donde se muestra la corrección de posición en vista lateral

En la Figura 4.9 y 4.10 se muestra una secuencia de video del robot cuando se encuentra caminando, donde se puede observar que el proceso consiste en partir del punto inicial en el cual solo se mantiene de pie, posteriormente el peso de la columna pasa a uno de los lados y se realiza una leve inclinación general en el mismo sentido logrando con esto que el robot pueda levantar un pie de la superficie, posteriormente se realiza el movimiento del pie que se encuentra levantado para dar el primer paso y finalmente colocarlo en la superficie de nuevo pero unos centímetros adelante, regresando la columna a su punto central y realizar exactamente el mismo proceso pero en sentido opuesto. En la Figura 4.10 se muestra la vista lateral del mismo proceso de caminata.





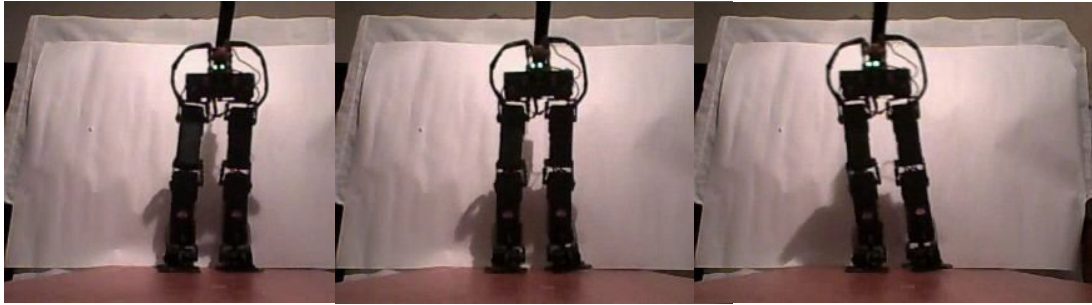
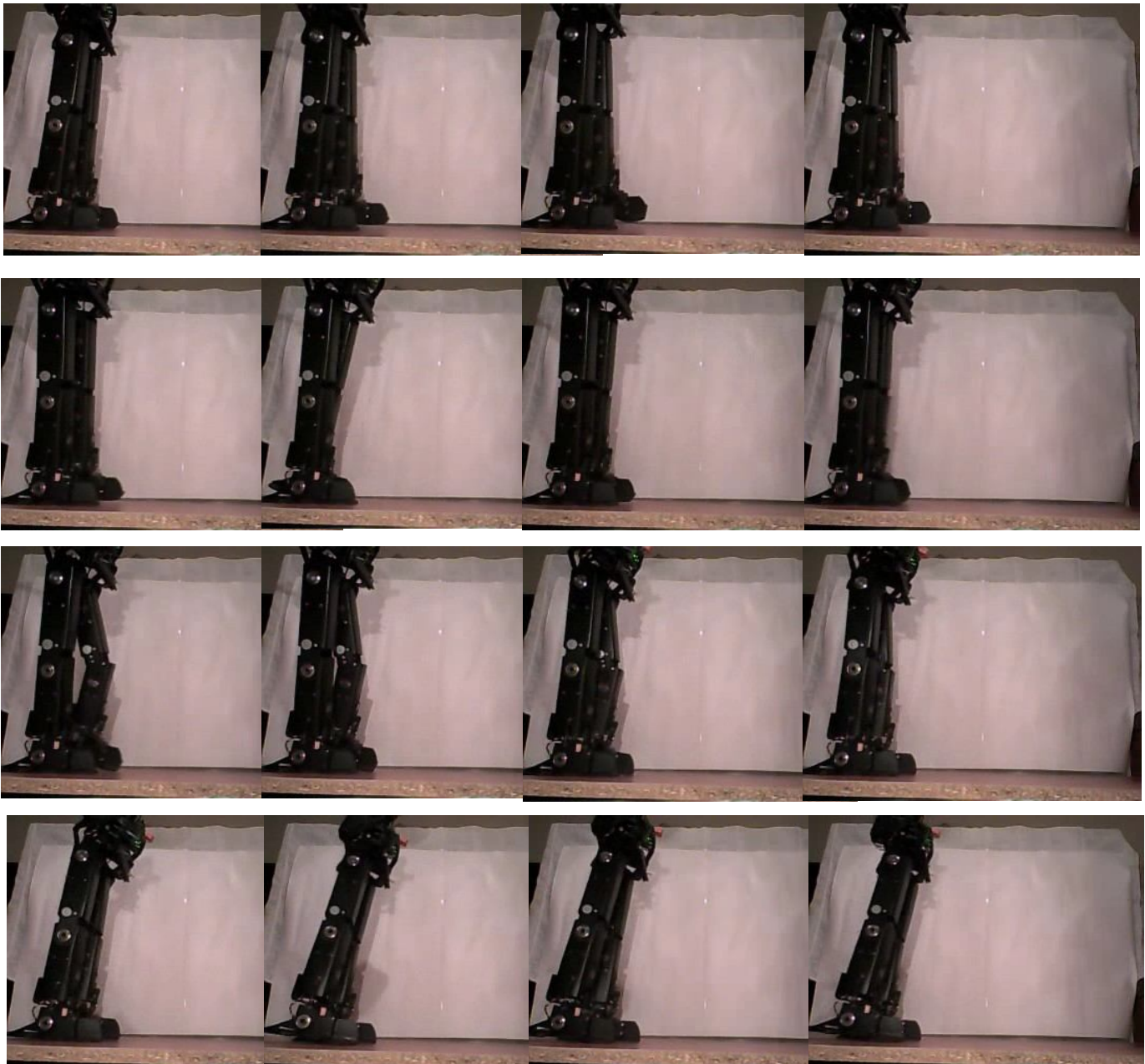


Figura 4.9. Secuencia de imágenes del video donde se muestra la caminata del robot en vista frontal.



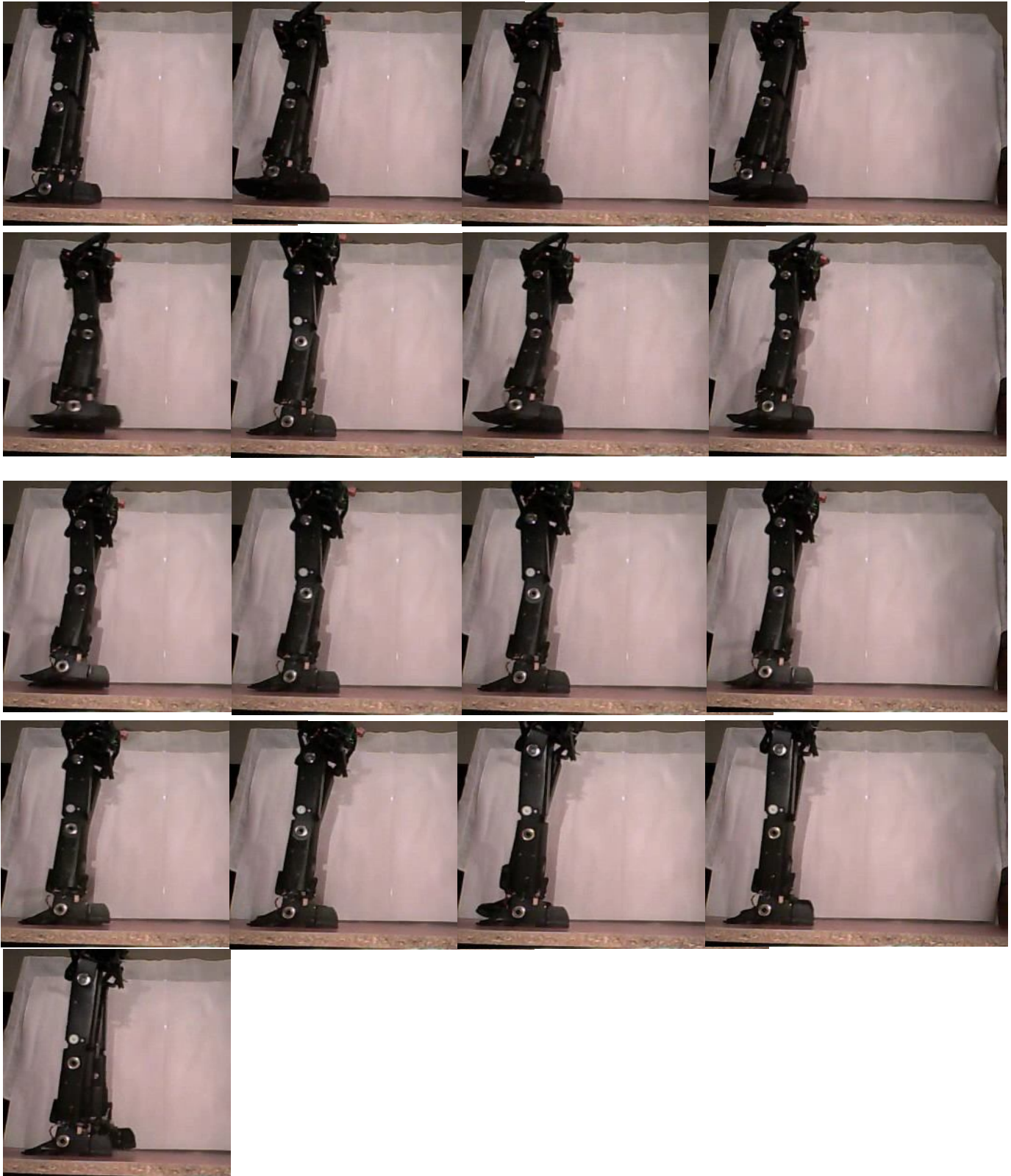


Figura 4.10. Secuencia de imágenes del video donde se muestra la caminata del robot en vista lateral.



### **4.3 Conclusiones**

A lo largo de este trabajo se presenta la construcción de todos los elementos que conforman al robot y que le permiten equilibrarse, así como permitirle desplazarse sin caer. Motivando con hechos que el trabajo a futuro sea la justificación de las fuerzas como ya se menciono en capítulos anteriores.

### **4.4 Referencias**

- [1] Sensor MEMSIC  
<http://search.alkon.net/cgi-bin/pdf.pl?pdfname=memsic/mxd2125gl.pdf>.
- [2] Servomotores  
<http://www.hitecrd.com/>

*Capítulo 5*

***CONCLUSIONES Y TRABAJO A  
FUTURO***

## 5.1 Conclusiones

- La aparición de la computadora y la integración de los circuitos permite desarrollar mejores y más precisos robots dotados de una gran cantidad de funciones.
- La fabricación de robots sobretodo bípedos no es sencilla, por lo que grandes empresas con alto financiamiento y un equipo muy poderoso de personas llevan muchos años de investigación y desarrollo.
- Una problemática que se puede tener en el desarrollo e investigación de la robótica en instituciones educativas es el elevado costo que se requiere para la fabricación de los prototipos ya que además de la fabricación de circuitos también se requiere de la fabricación de piezas mecánicas para su funcionamiento. Solo algunas instituciones cuentan con la herramienta y maquinaria necesaria para su fabricación.
- La fabricación y construcción del robot en este proyecto fue fabricada por el estudiante en el Instituto, es decir, ninguna pieza mostrada en esta tesis fue comprada o mandada hacer en el exterior a excepción de los componentes como circuitos integrados (microcontroladores), tarjetas de circuito impreso, sensor de inclinación, resistencias, capacitores, servomotores, espuma de cloruro de polivinilo y baleros.
- La solución planteada a lo largo de este trabajo fue satisfactoria ya que se consiguió que el robot mantuviera el equilibrio soportando un máximo de 25° de inclinación en la superficie además de lograr que se desplazara de forma autónoma.
- El tiempo de respuesta del sensor de inclinación es de 10ms, el tiempo que el robot tarda en corregir la inclinación para no caer es de 1.5s y el tiempo que tarda en dar un paso al camina es de 10s.
- Debido a la limitación económica existieron algunas limitaciones en cuanto a velocidad y movimiento del robot dando como resultado movimientos lentos y robotizados pero que no afectan en gran medida el cumplimiento del objetivo. Algunos de estos movimientos pueden modificarse para verse más naturales con la ayuda de servomotores que posean mayor torque.

## 5.2 Trabajo a futuro

- La extensión de este trabajo es bastante amplia para ser desarrollada en un periodo que comprende los estudios de maestría de un estudiante por lo que se considera que en trabajos a futuro se realice la caracterización completa del robot, es decir que se realice la justificación de las fuerzas de inercia y cinética en el robot completo y en cada una de sus articulaciones.

- Por otro lado, la utilización de servomotores de mejor rendimiento a los utilizados en este trabajo, permitirán movimientos mas naturales y con mayor velocidad.

# ANEXOS

*A. Cálculos de los torques en las articulaciones del robot en forma estática.*

*B. Solución de la ecuación de la respuesta del sensor*

*C. Publicaciones y congresos*

### A. Cálculos de los torques en las articulaciones del robot en forma estática.

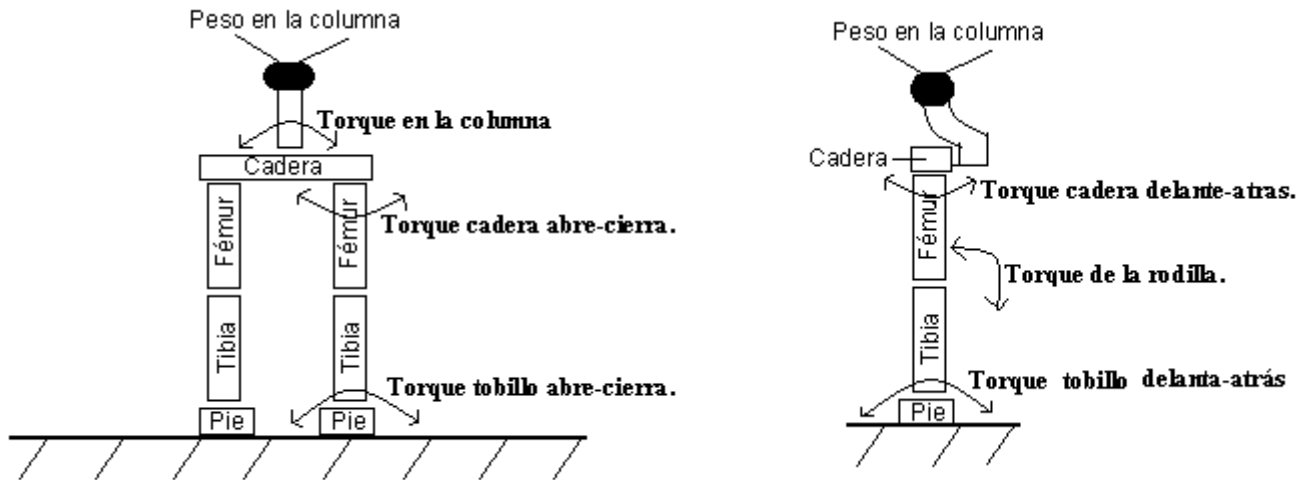


Figura 1. Muestra la dirección de movimiento en cada articulación y la relación del nombre que se maneja en este trabajo para referirse al torque.

### Torque del tobillo para movimientos delante-atrás.

Para el cálculo de los torques se desarrollaron varios pasos como se explica a continuación, considerando que el torque del servomotor es 13.2Kg cm.

#### Paso 1.

En la Figura 2 se observa la distribución de las fuerzas en forma horizontal desde el punto de apoyo del robot hasta el punto más alto del robot a lo largo del todo el pie.

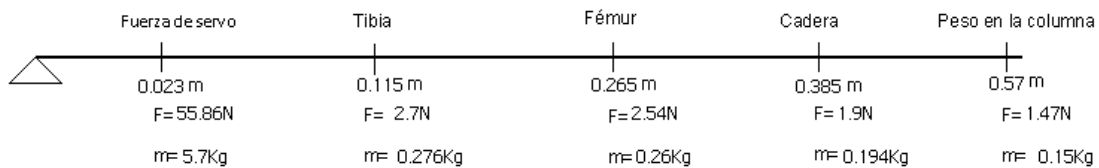


Figura 2. Distribución de distancias y fuerzas del pie para el cálculo del tobillo para movimientos delante atrás.

**Paso 2.**

Para simplificar los cálculos se recorren las distancias para encontrar el centro de masa de todos los componentes como se observa en la Figura 3.

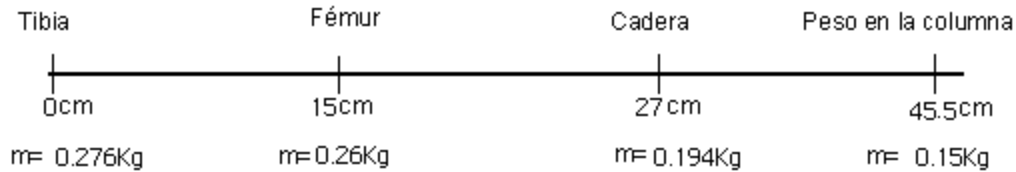


Figura 3. Se recorren las masas a cero para encontrar el centro de masa general.

$$X_{cm} = \frac{0(0.276) + 15(0.260) + 27(0.194) + 45.5(0.15)}{0.276 + 0.260 + 0.194 + 0.15} = 18.14 \text{ cm}$$

**Paso 3.**

Ya que se tiene el centro de masa general se regresa a las medidas originales como en la Figura 4

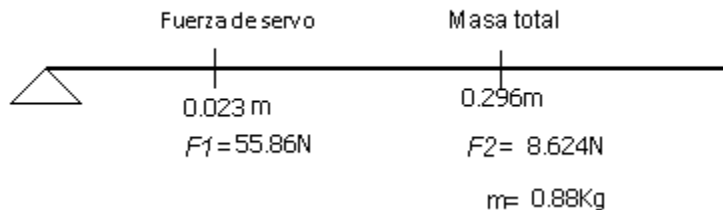


Figura 4. Distribución de las fuerzas y masa total.

**Paso 4.**

El robot visto de perfil puede moverse por la estructura de sus pies hasta un ángulo de  $68^\circ$  como se muestra en la Figura 5.

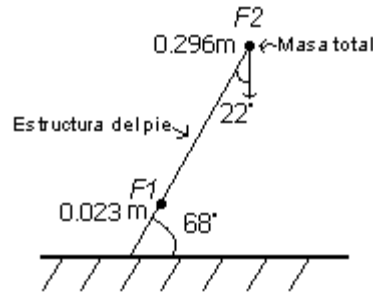


Figura 5.

Para ver de una manera más clara el diagrama de la Figura 5 se acomoda como se muestra en la Figura 6.

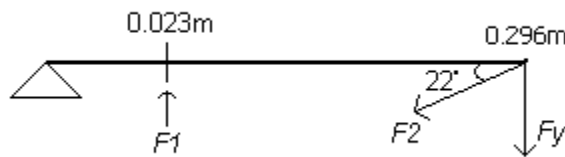


Figura 6.

Donde :

$F_y$  es la componente en y de la fuerza  $F_2$ .

**Paso 5.**

Partiendo de la Figura 6 ya se pueden realizar los cálculos.

$$\text{sen } \theta = \frac{F_y}{F_2} \dots\dots\dots(1)$$

$$F_y = F_2 \text{sen } \theta \dots\dots\dots(2)$$

$$F_1 d_1 = F_y d_2 \dots\dots\dots(3)$$

Donde:

$F_{y1}$  = es la fuerza que se necesita para equilibrar el sistema.

$$F_{y1} = \frac{F_1 d_1}{d_2} \dots\dots\dots(4)$$

Para encontrar el ángulo máximo que puede soportar el servo



$$\theta = \arcsen \frac{Fy1}{F2} \dots\dots\dots(5)$$

De las ecuaciones anteriores se obtiene

$$Fy = (8.624)sen(22^\circ) = 3.23N$$

$$Fy1 = \frac{(55.86)(0.023)}{0.296} = 4.3N$$

Se puede observar que la fuerza que nos brinda el motor es suficiente

$$\theta = \arcsen\left(\frac{4.3}{8.624}\right) = 29.9^\circ$$

que llevándolo a la manera de la Figura 5 se tiene la Figura 7.

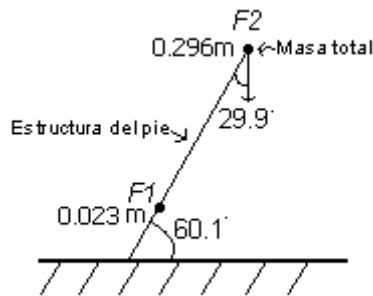


Figura 7. Ángulo máximo de inclinación soportado por el servomotor 60.1° .

**Torque de la rodilla.**

Siguiendo los pasos que se llevaron a cabo en el cálculo del torque anterior se tiene.

**Paso 1.**

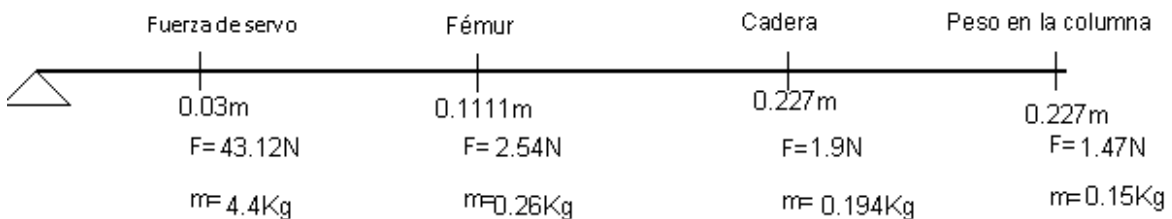


Figura 8. Distribución de distancias y fuerzas del pie para el cálculo de la rodilla.

**Paso 2.**

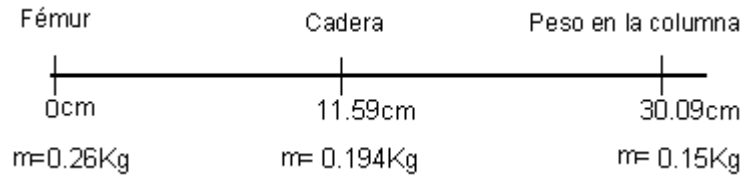


Figura 9. Se recorren las masas a cero para encontrar el centro de masa general.

$$X_{cm} = \frac{0(0.26) + 11.59(0.194) + 30.09(0.15)}{0.26 + 0.194 + 0.15} = 11.19cm$$

**Paso 3.**

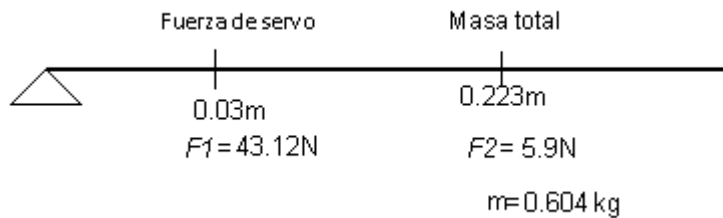


Figura 10. Distribución de las fuerzas y masa total.

**Paso 4.**

Angulo de movimiento que realiza el robot

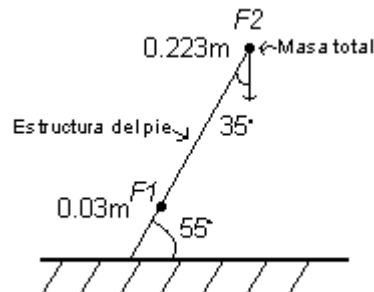


Figura 11. Ángulo de inclinación que el robot realiza

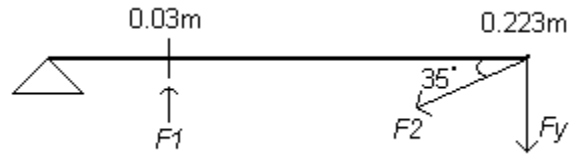


Figura 12.

**Paso 5.**

$$F_y = (5.9)\text{sen}(35^\circ) = 3.38\text{N}$$

$$F_{y1} = \frac{(43.12)(0.03)}{0.223} = 5.8\text{N}$$

Se puede observar que la fuerza que nos brinda el motor es suficiente

$$\theta = \text{arcsen}\left(\frac{4.3}{8.624}\right) = 29.9^\circ$$

que llevándolo a la manera de la Figura 11 se tiene la Figura 13.

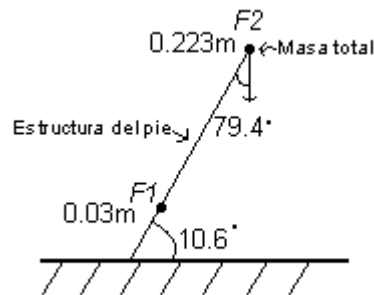


Figura 13. Ángulo máximo de inclinación que soporta el servomotor

## Torque de la cadera para movimiento delante-atrás.

### Paso 1.

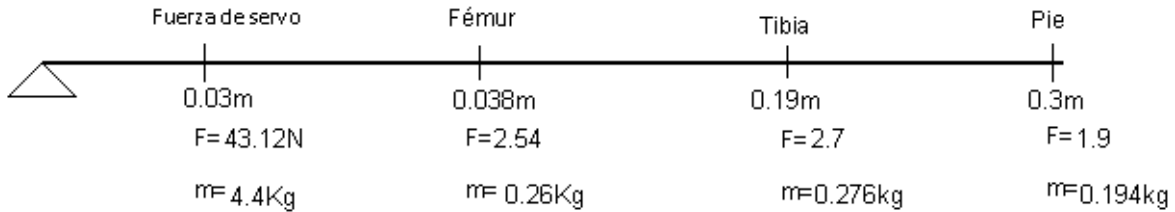


Figura 14. Distribución de distancias y fuerzas del pie para el cálculo de la cadera para movimiento delante-atrás.

### Paso 2.

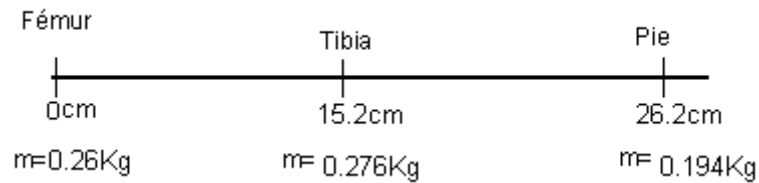


Figura 15. Se recorren las masas a cero para encontrar el centro de masa general.

$$X_{cm} = \frac{0(0.26) + 15.2(0.276) + 26.2(0.194)}{0.26 + 0.276 + 0.194} = 12.7 \text{ cm}$$

### Paso 3.

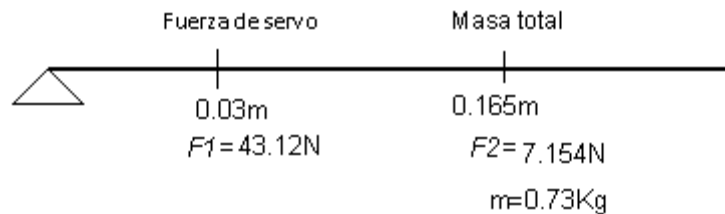


Figura 16. Distribución de las fuerzas y masa total.

**Paso 4.**

Angulo de movimiento que realiza el robot.

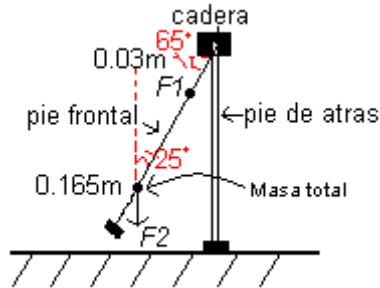


Figura 17. Ángulo de inclinación que el robot realiza.

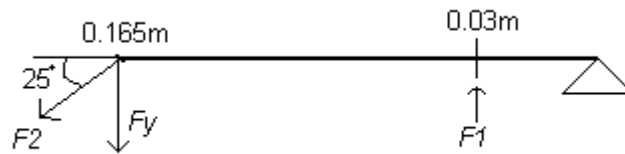


Figura 18.

**Paso 5.**

$$F_y = (7.154)\text{sen}(25^\circ) = 3.02\text{ N}$$

$$F_{y1} = \frac{(43.12)(0.03)}{0.165} = 7.84\text{ N}$$

Con un ángulo de  $90^\circ$  la fuerza del motor aun es suficiente ya que  $F_{y2} < F_y$

$$F_{y2} = (7.154)\text{sen}(90^\circ) = 7.154\text{ N}$$

## Torque de la cadera para movimiento abre-cierra.

### Paso 1.

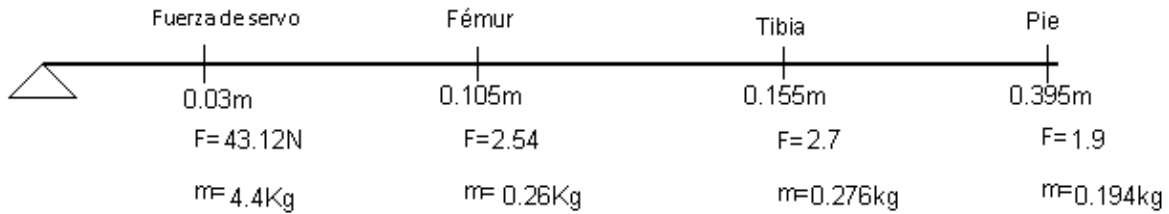


Figura 19. Distribución de distancias y fuerzas del pie para el cálculo de la cadera para movimiento abre-cierra.

### Paso 2.

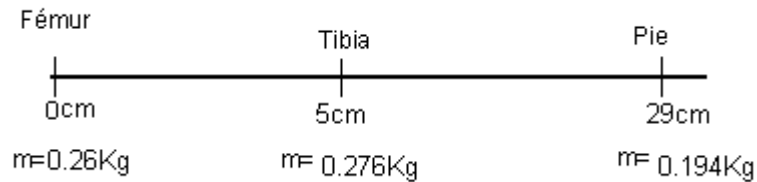


Figura 20. Se recorren las masas a cero para encontrar el centro de masa general.

$$X_{cm} = \frac{0(0.26) + 5(0.276) + 29(0.194)}{0.26 + 0.276 + 0.194} = 9.59 \text{ cm}$$

### Paso 3.

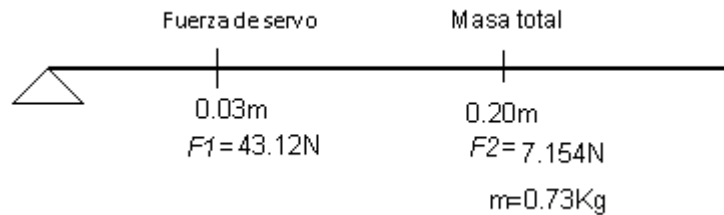


Figura 21. Distribución de las fuerzas y masa total.

**Paso 4 y 5.**

Para un máximo movimiento de  $90^\circ$  es decir que levanta el pie completamente se tiene

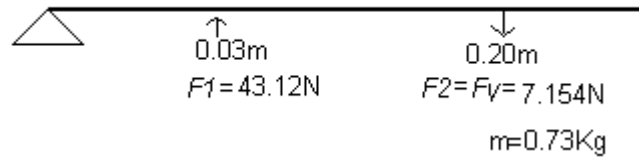


Figura 22.

$$F_{y1} = \frac{(43.12)(0.03)}{0.2} = 6.46$$

Se observa que  $F_{y1} < F_y$  por lo que el máximo ángulo que puede levantar es

$$\theta = \arcsen\left(\frac{6.46}{7.154}\right) = 64.5^\circ$$

esto se observa en la Figura 23.

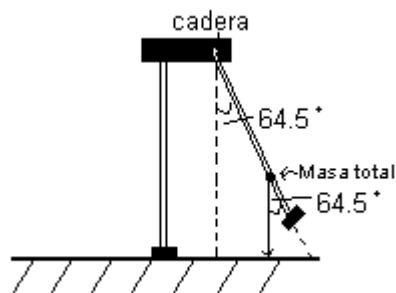


Figura 23. Máximo ángulo que el servomotor puede soportar.

## Torque del tobillo para movimiento abre-cierra.

### Paso 1.

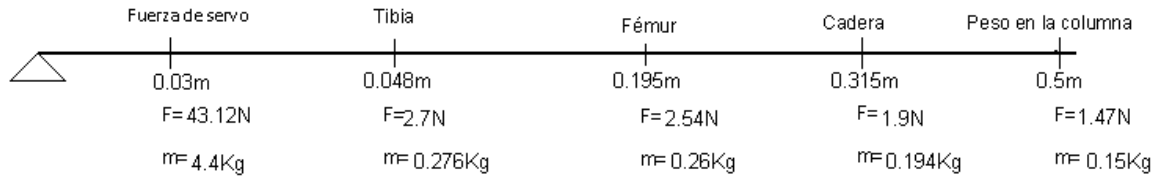


Figura 24. Distribución de distancias y fuerzas del pie para el cálculo de tobillo para movimiento abre-cierra.

### Paso 2.

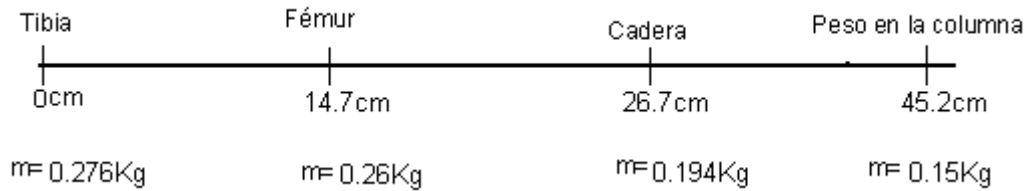


Figura 25. Se recorren las masas a cero para encontrar el centro de masa general.

$$X_{cm} = \frac{0(0.276) + 14.7(0.26) + 26.7(0.194) + 45.2(0.15)}{0.276 + 0.260 + 0.194 + 0.15} = 17.93cm$$



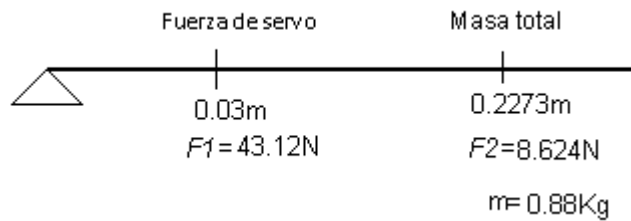
**Paso 3.**

Figura 26. Distribución de las fuerzas y masa total.

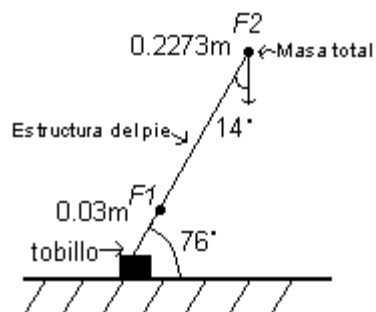
**Paso 4.**

Figura 27. Ángulo de inclinación que el robot realiza.

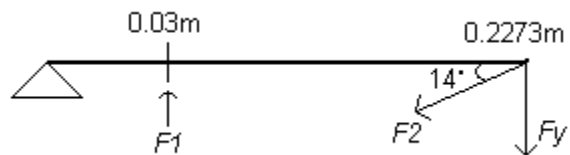


Figura 28.

**Paso 5.**

$$F_y = (8.624) \text{sen}(14^\circ) = 2.08N$$

$$F_{y1} = \frac{(43.12)(0.03)}{0.2273} = 5.69N$$

Se puede observar que la fuerza que nos brinda el motor es suficiente

$$\theta = \arcsen\left(\frac{5.69}{8.624}\right) = 41.28^\circ$$

que llevándolo a la manera de la Figura 27 se tiene la Figura 29.

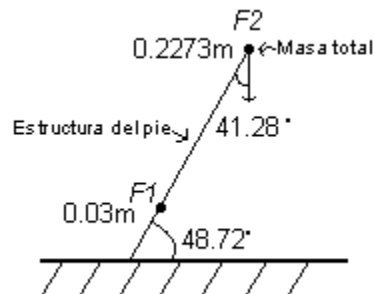


Figura 29. Ángulo máximo de inclinación que soporta el servomotor

## Torque de la columna

Para una inclinación completa del peso de la columna se tiene

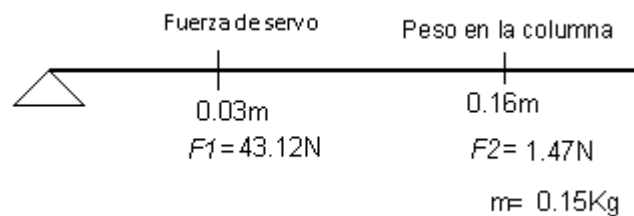


Figura 30. Distribución de fuerzas y masas para el peso que tiene la columna con una inclinación máxima es decir completamente a la derecha o a la izquierda.

$$F1 = 43.12N$$

$$F2 = ma = (0.15)(9.8) = 1.47N$$

$$Fy1 = \frac{(43.12)(0.03)}{0.16} = 8.08N$$

se puede observar que  $Fy1$  es mayor a  $F2$  por lo que el motor lo soporta sin ningún problema.

## B. Solución de la ecuación de la respuesta del sensor (ec. 3.6)

De la Figura 3.22 se puede observar que su respuesta es cosenoidal,

$$\therefore \frac{dy}{dx} = a \cos x$$

Donde :

x=grados

y= datos de lectura del sensor

$$dy = a \cos(x)dx$$

$$\int dy = a \int \cos(x)dx$$

$$y = a \operatorname{sen}(x) + c$$

Para x=0 tenemos que y=497

$$c = 497$$

Para x=60 tenemos y=600

$$600 = a \operatorname{sen}(60) + 497$$

$$\frac{600 - 497}{\operatorname{sen}(60)} = a$$

$$a = 119$$

$$\therefore y = 119 \operatorname{sen}(x) + 497$$

Y

$$x = \operatorname{arsen}\left(\frac{y - 497}{119}\right)$$

## C. Publicaciones y congresos



Xalapa, Veracruz  
1 al 3 de octubre de 2008  
Museo de Antropología

# SOMXXIII

CONGRESO DE INSTRUMENTACIÓN

LA SOCIEDAD MEXICANA DE INSTRUMENTACIÓN

Otorga la presente

## CONSTANCIA

a:

Miguel Angel Acosta Lira, Francisco Javier Gallegos Funes,  
Ramón Parada Alfonso, David Montes Sánchez

Por haber presentado en el Congreso de Instrumentación SOMI XXIII su trabajo:

Sistema de equilibrio para un robot bípedo

Dr. José Manuel Saniger Blesa  
PRESIDENTE

Dr. Gabriel Ascanio Gasca  
SECRETARIO EJECUTIVO

Constancia de participación en el XXIII Congreso de Instrumentación 2008, con la ponencia "SISTEMA DE EQUILIBRIO PARA UN ROBOT BIPEDO". Xalapa, Veracruz.



OTORGA EL PRESENTE

# RECONOCIMIENTO

AL

*Ing. Miguel Ángel Acosta Lira*

POR SU AMABLE PARTICIPACION EN LA

**DECIMOCTAVA REUNION DE OTOÑO DE COMUNICACIONES,  
COMPUTACION, ELECTRONICA Y EXPOSICION INDUSTRIAL**

25 AL 30 DE NOVIEMBRE 2007, HYATT REGENCY ACAPULCO



**TRIPLE - PLAY  
CONVERGENCIA DE SERVICIOS**



CON LA PONENCIA

**ESTADO DEL ARTE DEL SISTEMA DE EQUILIBRIO  
DE UN ROBOT DE DOS PIERNAS**

**ING. NESTOR F. MORENO DÍAZ**  
PRESIDENTE IEEE SECCIÓN MÉXICO

---

**THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC.**

Constancia de participación en la XVIII REUNIÓN DE COMUNICACIONES, COMPUTACIÓN, ELECTRÓNICA Y EXPOSICIÓN INDUSTRIAL ROC&C 2007, con la ponencia "ESTADO DEL ARTE DEL SISTEMA DE EQUILIBRIO DE UN ROBOT DE DOS PIERNAS". IEEE Sección México. Hotel Hyatt. Acapulco, Gro.



OTORGA EL PRESENTE

# RECONOCIMIENTO

AL

*Ing. Miguel Angel Acosta Lira*

POR SU AMABLE PARTICIPACION EN LA

**DECIMONOVENA REUNION DE OTOÑO DE COMUNICACIONES,  
COMPUTACION, ELECTRONICA Y EXPOSICION INDUSTRIAL**

**HOTEL: HYATT REGENCY ACAPULCO  
30 DE NOVIEMBRE AL 6 DE DICIEMBRE DE 2008**



**SOCIAL NETWORKING  
& E-COMMERCE**



CON LA PONENCIA

**SISTEMA DE CONTROL DE INCLINACION  
PARA UN ROBOT DE DOS EXTREMIDADES**

**ING. NESTOR F. MORENO DÍAZ**  
PRESIDENTE IEEE SECCIÓN MÉXICO

---

**THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC.**

Constancia de participación en la XX REUNIÓN DE COMUNICACIONES, COMPUTACIÓN, ELECTRÓNICA Y EXPOSICIÓN INDUSTRIAL ROC&C 2008, con la ponencia "SISTEMA DE CONTROL DE INCLINACION PARA UN ROBOT DE DOS EXTREMIDADES". IEEE Sección México. Hotel Hyatt. Acapulco, Gro.



Constancia de participación en el III Congreso Internacional Ingenieros en Comunicaciones y Electrónica 2008, con la ponencia “DISEÑO DEL SISTEMA DE EQUILIBRIO PARA UN ROBOT DE DOS EXTREMIDADES”. México, D.F.





**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

**ESCUELA SUPERIOR DE CÓMPUTO**



**2º CISCE2008**  
Segundo Congreso  
Internacional de  
Sistemas  
Computacionales y  
Electrónicos  
del 2 al 5 de septiembre de 2008

Otorga la presente

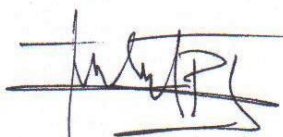
# CONSTANCIA

**A Miguel Angel Acosta Lira**

Por su participación con la Ponencia  
**“Sistema de equilibrio para un robot de dos piernas”**  
para el 2º Congreso Internacional de Sistemas Computacionales y Electrónicos 2008  
México, D. F. a 3 de septiembre de 2008

**“LA TÉCNICA AL SERVICIO DE LA PATRIA”**



  
**Dr. Jesús Yaljá Montiel Pérez**  
Jefe del Depto. de Posgrado

  
**Ing. Apolinar F. Cruz Lázaro**



  
**M. en C. Rodolfo Romero Herrera**  
Presidente del CISCE 2008

Constancia de participación en el 2º Congreso Internacional de Sistemas Computacionales y Electrónicos 2008, con la ponencia “SISTEMA DE EQUILIBRIO PARA UN ROBOT DE DOS PIERNAS”. México, D.F.