

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**ESCUELA DE INGENIERÍA**

**ENSAMBLAJE Y CONTROL DE UN ROBOT HEXÁPODO**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN  
ELECTRÓNICA Y CONTROL**

**ALBERTO RENATO NARVÁEZ SEVILLA  
CÉSAR ENRIQUE PADILLA MUÑOZ**

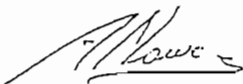
**DIRECTOR: ING. NELSON SOTOMAYOR O.**

**Quito, Agosto 2004**

## DECLARACIÓN

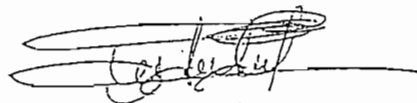
Nosotros, Alberto Narváez Sevilla y César Padilla Muñoz, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.



---

ALBERTO NARVÁEZ SEVILLA



---

CÉSAR PADILLA MUÑOZ

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Alberto Narvárez Sevilla y César Padilla Muñoz, bajo mi supervisión.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Nelson Sotomayor', written over a horizontal line.

**ING. NELSON SOTOMAYOR**  
**DIRECTOR DE PROYECTO**

## DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo en primer lugar a mis padres por su paciencia, apoyo y comprensión en todos mis años de estudio.

A Lore, Paúl, Andre, Juanfer, Danny, Malú y a toda mi familia que de una u otra forma alentaron en mí el deseo de trascender y superarme, brindándome incondicionalmente su amor para lograr mi primer gran sueño.

Alberto Narváez S.

A mis padres, por brindarme todo lo necesario para continuar adelante y poder enfrentar el futuro.

A mis hermanos, por su ayuda permanente en todo sentido.

A todos mis abuelitos, por darme todo su cariño; y a pesar que a unos no los tengo a mi lado, sé que siempre me están cuidando.

César Padilla M.

## CONTENIDO

<b>CONTENIDO</b>	i
<b>RESUMEN</b>	iv
<b>PRESENTACIÓN</b>	v
<b>CAPÍTULO 1: FUNDAMENTOS BÁSICOS</b>	<b>1</b>
1.1 Robótica	2
1.2 Robot	2
1.2.1 Clasificación de los Robots	3
1.3 Robótica Móvil	7
1.3.1 Sistemas de Percepción del Robot	9
1.3.2 Niveles de Procesamiento en un Robot Móvil	10
1.3.3 Clasificación en la Robótica Móvil	12
1.3.4 Robots Hexápodos	17
1.4 Importancia y Aplicaciones de la robótica Móvil	29
1.5 Etapas en la Construcción de un Robot	31
1.6 Planificación del Proyecto	32
<b>CAPÍTULO 2: ENSAMBLAJE DEL ROBOT HEXÁPODO</b>	<b>34</b>
2.1 Introducción	35
2.2 Morfología de los Insectos y Mamíferos	35
2.3 Requerimientos Mecánicos del Robot	36
2.4 Diseño Mecánico del Hexápodo	39
2.4.1 Diseño de la Pata	39
2.4.2 Diseño del Soporte de Servos u Hombros y Barras	42
2.4.3 Diseño de la Barra de Acople	44
2.4.4 Diseño del Chasis	47

2.5	Construcción y Ensamblaje	51
2.5.1	Construcción y Ensamblaje del Sistema de Barras	52
2.5.2	Ensamblaje Servomotores – Hombro	53
2.5.3	Ensamblaje Pata - Hombro	55
2.5.4	Ensamblaje del Chasis	56
2.6	Selección del Material	57
2.6.1	Primera Prueba	57
2.6.2	Segunda Prueba	58
2.6.3	Tercera Prueba	58
2.7	Tracción de las Patas	59
2.8	Sensores Utilizados	59
2.8.1	Sensores de Contacto (Bumpers)	61
2.8.2	Sensores de Proximidad Ópticos y Acondicionamiento	62
2.8.3	Sensores de Ultrasonido y Acondicionamiento	65
2.9	Actuadores y Control	70
2.9.1	Servomotores y su Control	71
2.10	Sistema Microprocesado	73
2.10.1	Microcontroladores PIC	74
2.10.2	Descripción de la Tarjeta del Microcontrolador PIC	77
2.11	Ubicación Física de los Sensores	83
<b>CAPÍTULO 3: CONTROL DEL ROBOT HEXÁPODO</b>		<b>86</b>
3.1	Introducción	87
3.2	Inicialización	91
3.3	Programa Principal	92
3.4	Rutina de Caminata	93
3.4.1	Rutina de la Interrupción del Timer 0 y del Timer 1	96
3.5	Rutinas de Acción del Robot frente a Diversos Obstáculos	102
3.5.1	Rutinas de Retroceso y Giro a la Derecha	102
3.5.2	Rutinas de Retroceso y Giro a la Izquierda	110
3.5.3	Rutina de Ascenso de Obstáculos	117
3.5.4	Rutina de Acción frente a Superficies Altas (Huecos)	123

<b>CAPÍTULO 4: PRUEBAS Y RESULTADOS</b>	126
4.1 Caminata sobre Superficies Lisas	127
4.2 Capacidad de Carga	129
4.3 Caminata sobre Terrenos Irregulares	130
4.4 Caminata sobre Terrenos Inclinados	131
4.5 Comportamiento del Robot frente a Obstáculos Grandes y Huecos	133
4.5.1 Comportamiento frente a Huecos	135
4.5.2 Retroceso y Giro	137
4.5.3 Sobrepasando Obstáculos Pequeños	137
4.6 Lista de Elementos y Costos	140
<b>CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	142
<b>REFERENCIAS</b>	
<b>ANEXOS</b>	

## RESUMEN

Actualmente, las tareas en las cuales la presencia de los seres humanos puede ser evitada están incrementándose considerablemente, tales como: actividades aburridas o rutinarias, trabajos que implican un gran peligro para el operario y actividades en lugares de acceso difícil para el ser humano. Por esta razón es importante la investigación de robots capaces de movilizarse por éste tipo de ambientes, como los robots móviles de patas articuladas que son una excelente alternativa por su versatilidad y agilidad sobre éstos terrenos.

El propósito general del presente trabajo es el ensamblaje de un robot, que utilizando un algoritmo de control adecuado, sea capaz de moverse libremente sobre ambientes no planeados y con obstáculos. Este robot debería ser capaz de esquivar obstáculos difíciles, como paredes y huecos, y subir obstáculos de una altura máxima de 5 cm.

Los objetivos planteados se cumplieron satisfactoriamente mediante la implementación de un robot hexápodo y un algoritmo de control adecuado. Para que la estructura mecánica del robot sea lo más robusta y liviana, y el torque requerido por los servomotores sea el menor posible, se utilizaron materiales livianos como acrílico y aluminio. Además, se implementó un algoritmo de caminata por secuencia de trípodas que se alternan para darle estabilidad a la estructura. El robot es capaz de interactuar con el entorno mediante el uso de sensores de presencia o proximidad para evitar paredes y huecos detectándolos a una distancia máxima de 13 cm, y sensores de contacto o bumpers para detectar los obstáculos que se presentan en su recorrido, pudiendo incluso sobrepasar obstáculos de hasta 6 cm, superiores al objetivo propuesto. Además, es capaz de caminar sobre superficies inclinadas de una pendiente no mayor a 25°.



## PRESENTACIÓN

El propósito principal del presente trabajo es el ensamblaje y control de un robot hexápodo, el cual ha sido desarrollado tomando en cuenta la gran importancia que tienen los robots móviles especialmente cuando son utilizados para realizar tareas en ambientes de alto riesgo para los seres humanos y cuyo terreno presenta irregularidades.

El proyecto ha sido dividido en cinco capítulos: en el capítulo uno se realiza una breve introducción a la robótica móvil y a los diferentes sistemas utilizados para la exploración de ambientes empezando por los sistemas con ruedas, robots sin patas y con patas articuladas, haciendo particular énfasis en los robots móviles con seis patas articuladas que son objeto de este estudio.

La descripción detallada del ensamblaje del robot, las diferentes pruebas de materiales realizadas, así como el acondicionamiento de los sensores y el hardware del microcontrolador se encuentra en el capítulo dos.

En el capítulo tres se describe la estructura del programa de control del robot y los diferentes algoritmos de control implementados para caminar, retroceder, curvar, evadir obstáculos grandes y caminar sobre terrenos con obstáculos pequeños.

Las diferentes pruebas a las que se sometió al robot se presenta en el capítulo cuatro, así como los resultados obtenidos de las mismas y las consecuentes limitaciones.

Finalmente el capítulo quinto contiene las conclusiones y recomendaciones que servirán como aporte para futuras investigaciones.

# CAPÍTULO 1

# CAPÍTULO 1

## FUNDAMENTOS BÁSICOS

En el presente capítulo se tratará de manera general de la Robótica y su clasificación; se describirán los diversos tipos de robots, y con un poco más de detalle se analizará al robot hexápodo.

### 1.1 ROBÓTICA

De forma general, la **robótica** se define como: "El conjunto de conocimientos teóricos y prácticos que permiten concebir, realizar y automatizar sistemas basados en estructuras mecánicas poliarticuladas, dotados de un determinado grado de inteligencia y destinados a la producción industrial, investigativa o a la sustitución del hombre en muy diversas tareas" [1]. 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"[1]. La robótica es esencialmente pluridisciplinaria y se apoya en gran medida en los progresos de la microelectrónica, de la mecánica y de la informática, así como en los de nuevas disciplinas tales como el reconocimiento de patrones y la inteligencia artificial.

### 1.2 ROBOT

Un **robot** se puede definir como un sistema electro-mecánico e informático que interactúa con el medio. Los robots tal y como se los concibe actualmente, necesitan relacionarse con su alrededor para poder llevar a cabo sus actividades [2]. La actividad global de cualquier robot se puede entender como la sucesión de las siguientes cinco fases o actividades:

- Medida
- Modelaje
- Percepción
- Planificación
- Acción

Las tres primeras actividades están encaminadas a que el robot pueda percibir lo que esta pasando en su entorno. La planificación consiste en tomar las decisiones oportunas para desarrollar su actividad a partir de la información percibida,. Por último, la acción consiste en la ejecución de las tareas planificadas en la fase anterior.

### **1.2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS ROBOTS**

Hoy en día la robótica como disciplina ha crecido mucho y existe una gran cantidad de robots, cada uno de un estilo totalmente diferente al otro. Es muy difícil hacer una clasificación general válida para todos ellos. Con la idea de encuadrar el objeto de este proyecto se va a realizar una clasificación, que no es en absoluto rígida y en la que las fronteras no son totalmente nítidas, pero que servirá para centrar las ideas. Esta consta de:

- Robots Industriales
- Androides o robots humaniformes
- Robots Teleoperados
- Robots Móviles
- Robots Médicos

#### **1.2.1.1 Robots Industriales**

Los robots industriales son aquellos que se usan en su mayoría en los procesos de fabricación. Muchos de ellos son máquinas capaces de realizar movimientos

muy simples, originados por impulsos eléctricos y neumáticos, esto se logra porque la Robótica es una tecnología multidisciplinaria, como se definió, que hace uso de todos los recursos de vanguardia de otras ciencias afines. Gracias a estos movimientos se ejecuta una serie de operaciones previamente programadas. Estos se clasifican en:

**Robots Inteligentes:** Son manipuladores o sistemas mecánicos multifuncionales controlados por computadores capaces de relacionarse con su entorno a través de sensores y tomar decisiones en tiempo real. Concepto de “Inteligencia Artificial” [3].

**Robots con control por Computador:** Similares a los anteriores pero carecen de la capacidad de relacionarse con el entorno que les rodea.

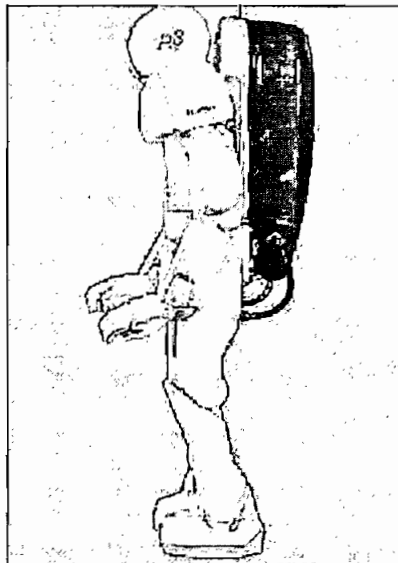
**Robots de Aprendizaje:** Se limitan a repetir una secuencia de movimientos realizada con la intervención de un operador y luego lo memorizan. También se denominan Robots de Macro.

**Robots Manipuladores:** Son sistemas mecánicos multifuncionales cuyo sencillo sistema de control permite gobernar el movimiento de sus elementos de las siguientes formas:

- **Manual:** El operador lo controla directamente.
- **De secuencia fija:** Cuando se repite de forma invariable el proceso de trabajo preparado previamente.
- **De Secuencia Variable:** Es posible alterar algunas de las características de los ciclos de trabajo.

### 1.2.1.2 Androides

Los androides son artilugios que se parecen y actúan como seres humanos. Los robots de hoy en día vienen en todas las formas y tamaños, pero a excepción de los robots que aparecen en las ferias y espectáculos, no se parecen a las personas y por tanto no son androides. En la actualidad, no tienen todavía utilidad comercial, pero son desarrollados por grandes empresas para mostrar su elevada tecnología y conseguir que los medios hablen sobre ellas. En la Figura 1.1 se muestra un ejemplo de este tipo de robot.



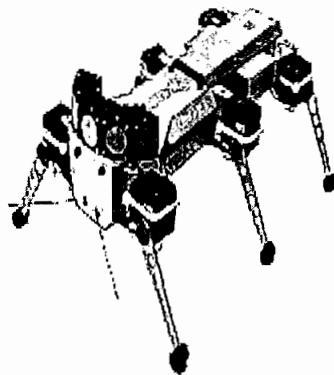
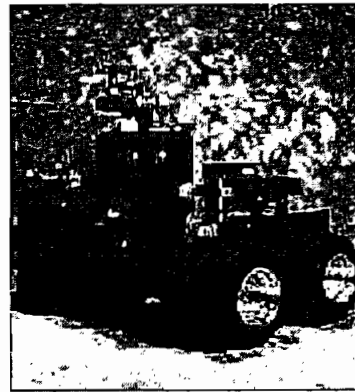
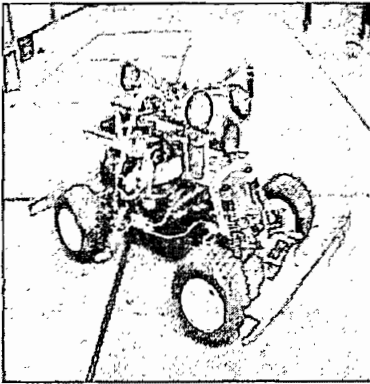
*Figura 1.1 Vista lateral del robot Asimo creado por Honda*

### 1.2.1.3 Robots Teleoperados

Hay muchos "parientes de los robots" que no encajan exactamente en la definición precisa. Un ejemplo son los teleoperadores que son controlados remotamente por un operador humano. Dependiendo de cómo se defina un robot, los teleoperadores pueden o no clasificarse como tales, cuando pueden ser considerados robots se les llama "telerobots". Cualquiera que sea su clase, los teleoperadores son generalmente muy sofisticados y extremadamente útiles en entornos peligrosos tales como residuos químicos y desactivación de bombas.

#### 1.2.1.4 Robots Móviles

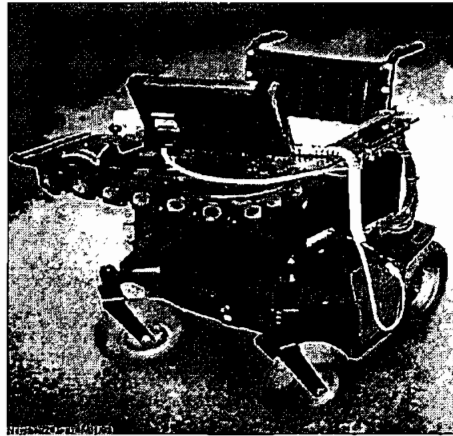
Los robots móviles están provistos de patas, ruedas o carentes de ambas, que los capacitan para desplazarse de acuerdo a su programación, en base a la información que reciben a través de sus propios sistemas de sensores. Se emplean en determinado tipo de instalaciones industriales, sobre todo para el transporte de mercancías en cadenas de producción y almacenes. También se utilizan robots de este tipo para la investigación en lugares de difícil acceso o muy distantes, como es el caso de la exploración espacial y las investigaciones o rescates submarinos. En la Figura 1.2 están presentes algunos robots móviles.



*Figura 1.2 Algunos robots móviles*

### 1.2.1.5 Robots Médicos

Los robots médicos son, fundamentalmente prótesis para disminuidos físicos que se adaptan al cuerpo y están dotados de potentes sistemas de mando. Con ellos se logra igualar con precisión los movimientos y funciones de los órganos o extremidades que suplen.



*Figura 1.3 Robot médico Navchair*

## 1.3 ROBÓTICA MOVIL

La Robótica Móvil estudia el diseño de sistemas con capacidad de movimiento y acción, es decir, se caracterizan principalmente por poseer una base móvil y además pueden tener aptitudes de percepción del entorno y toma de decisiones frente al mismo.

Desde siempre el hombre ha tenido el deseo de poseer el conocimiento del propio ser, de su comportamiento y el de otras especies, a fin de crear agentes con capacidad autónoma con los cuales pueda compartir la inteligencia, para encargarle la realización de tareas que a él le desagradan por ser monótonas, complicadas o peligrosas.



Para el estudio y modelado de estos comportamientos a fin de reproducirlos en un robot, se ha hecho necesario la cooperación de diversas ramas de la ciencia como son la psicología, biología, ingeniería, etc. Con el avance de la ciencia, el desarrollo de nuevas tecnologías y de disciplinas como la electrónica, mecánica y la informática entre otras cosas, se han podido construir robots que facilitan algunas tareas, como aquellas en donde se requiere de gran precisión y de velocidad o en las que se pone en riesgo la integridad de las personas que las realizan.

Los robots móviles tienen rango de aplicaciones, que con frecuencia son de naturaleza no industrial. Un robot móvil puede ser controlado *remotamente* por medio de alambres, cables o radio, o automáticamente por medio de un sistema microprocesado.

Para que los robots móviles tengan independencia de un sistema físico de guiado (como puede ser rieles, cables, medios magnéticos, ópticos, etc.), requieren de un sistema de navegación que les permita en todo momento conocer su posición dentro del ambiente, con la finalidad de poder definir un plan de trayectorias a seguir para poder llegar a su objetivo evitando obstáculos que se puedan presentar en el camino, para esto, el robot debe poseer un sistema sensorial que le permita percibir y representar el mundo que lo rodea.

La navegación de un robot se puede definir como el arte o la ciencia que permite guiar a un robot a su objetivo, teniendo en cuenta el medio que lo rodea [4].

La construcción de robots móviles independientes del entorno, requiere de una gran coordinación y comunicación entre los sistemas de percepción encargados de la correcta interpretación del entorno y los de acción, que son los encargados del control de movimientos del robot, estos problemas son los que se han abordado principalmente en la mayoría de la investigación que sobre robótica móvil se ha realizado.

### 1.3.1 SISTEMAS DE PERCEPCIÓN DEL ROBOT

Uno de los principales problemas en robótica móvil es la determinación de la posición y orientación del robot dentro del ambiente en el que se encuentra. Este problema típicamente se ha resuelto por medio de procesos odométricos, es decir obteniendo la posición del robot por medio de decodificadores incrementales ligados a las ruedas del robot, sin embargo este tipo de control suele fallar cuando las características de las ruedas cambian, como pueden ser el desgaste o deslizamiento de las ruedas por pasar sobre un obstáculo, en estos casos es necesario corregir la posición del robot con la ayuda de sensores externos.

La cualidad de los sistemas de percepción externos es que interaccionan con el entorno, permitiendo actualizar la posición y orientación del robot, actualizar y modelar el entorno, así como proporcionar seguridad evitando la colisión con obstáculos en la trayectoria del robot.

Los principales sensores externos son los infrarrojos, ultrasónico, láser, navegación por satélite, y visión.

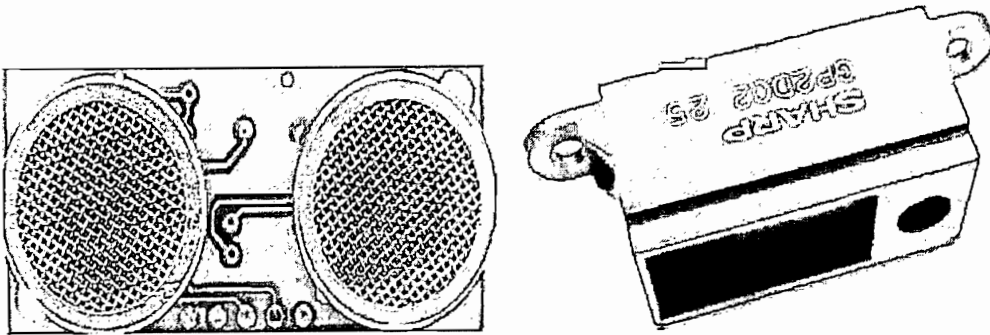


Figura 1.4 Izquierda: Sensor ultrasónico. Derecha: Sensor óptico

Los sistemas de visión robóticos además de corregir la posición del robot, se han utilizado para la construcción de mapas del entorno, estos sistemas se basan en una o más cámaras montadas sobre el robot o dentro de su ambiente [4].

## **1.3.2 NIVELES DE PROCESAMIENTO EN UN ROBOT MÓVIL**

La autonomía de funcionamiento de un robot móvil es proporcional a los diferentes niveles de procesamiento con los que el robot cuente, como son: control del robot, interpretación de sensores, integración de sensores, modelado del entorno, navegación y planificación, en este apartado se revisarán cada uno de estos niveles.

### **1.3.2.1 Control del robot**

El sistema de control del robot entre otras cosas es el encargado del constante monitoreo de los sistemas físicos del robot y de su estado interno, como pueden ser temperatura, energía disponible, entre otras. El sistema de control también es el encargado directo del control de los actuadores y sensores, además de producir acciones que son ejecutadas por el robot, como son las de locomoción, lectura de sensores, etc. El sistema de control depende directamente de la estructura del robot, dicho sistema a su vez permite que otros sistemas de más alto nivel interactúen con el robot sin necesidad de conocer explícitamente su estructura.

### **1.3.2.2 Interpretación de Sensores**

El sistema de interpretación de sensores es el encargado de la adquisición e interpretación de la información de estos y de suministrar esta información a niveles superiores del control del robot.

### **1.3.2.3 Integración de Sensores**

En el sistema de integración de sensores se correlacionan y se abstraen los diferentes tipos de información sensorial, de manera tal que se integren y se

complementen, evitando ambigüedades en la percepción del entorno, por ejemplo la lectura de los sensores de proximidad se pueden complementar con el sistema de visión robótica.

#### **1.3.2.4 Modelación del entorno**

En la medida en que el robot posea autonomía deberá ser capaz de interactuar con el ambiente que lo rodea, para ello requiere, integrar y cotejar la información que percibe de su entorno con la información que tiene previamente almacenada, esto con la finalidad de integrar mapas del ambiente que le servirán posteriormente en la planificación de trayectorias.

#### **1.3.2.5 Navegación**

Este sistema es el encargado de realizar tareas como la planificación de trayectorias, evasión de obstáculos y pilotado del robot, lo cual le permite a éste desplazarse sin problemas en su ambiente de trabajo.

#### **1.3.2.6 Planificación**

Este sistema se encarga de la planificación de tareas, controlando las acciones sensoriales, motrices o de procesamiento del robot, también es el encargado de la replanificación en caso de que suceda algún evento imprevisto, como el encontrarse con un obstáculo en el camino. El enfoque tradicional de la planificación se basa en que las tareas pueden ser determinadas por procesos de razonamiento, operando como modelo simbólico interno, es decir, al robot se le programa con el fin de que actúe adecuadamente según la actividad o lugar de trabajo, como si fuese que tuviera uso de razón para tomar las decisiones.

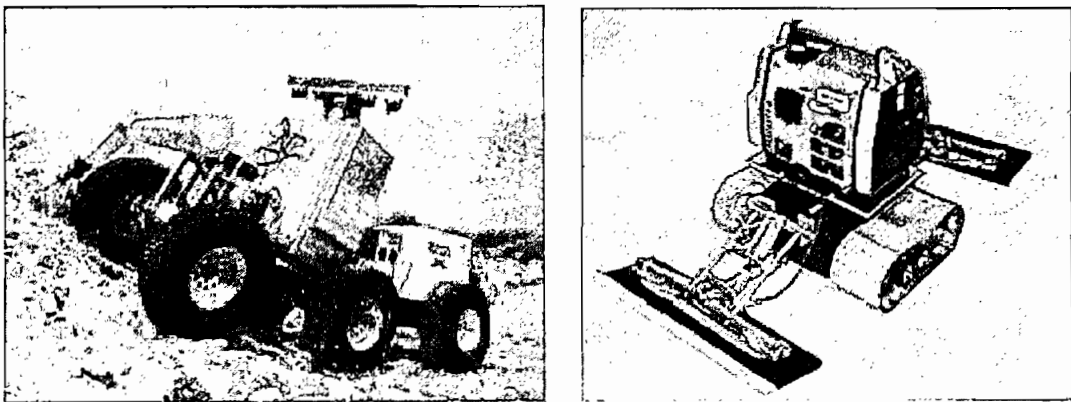
### 1.3.3 CLASIFICACIÓN EN LA ROBÓTICA MÓVIL

Existen diferentes criterios para clasificar a la robótica móvil, sin embargo la más adecuada es la siguiente división:

- Robots de locomoción con ruedas
- Robots sin patas
- Robots con patas

#### 1.3.3.1 Robots de Locomoción con Ruedas

Los vehículos de ruedas son, con mucho, los más populares por varias razones prácticas, son más sencillos y más fáciles de construir, la carga que pueden transportar es mayor que la que pueden soportar otros tipos de robots móviles, relativamente. Tanto los robots basados en cadenas como los basados en patas se pueden considerar más complicados y pesados, comparados con los robots de ruedas para una misma carga útil. A esto se puede añadir el que se pueden utilizar vehículos de ruedas de radio control para usarlos como bases de robots.



*Figura 1.5 Robots con ruedas*

La principal desventaja de las ruedas es su empleo en terreno irregular, en el que se comportan bastante mal. Normalmente un vehículo de ruedas podrá sobrepasar un obstáculo que tenga una altura no superior al radio de sus ruedas, entonces una solución es utilizar ruedas mayores que los posibles obstáculos a

superar; sin embargo, esta solución, a veces, puede no ser práctica ya que es posible que se tengan problemas de velocidad por lo pesadas y grandes, y por otro lado, son más susceptibles de dañarse por el ambiente de trabajo, como piedras o arena.

Para robots que vayan a funcionar en un entorno natural las cadenas son una opción muy buena porque ellas permiten al robot superar obstáculos relativamente mayores y son menos susceptibles que las ruedas de sufrir daños por el entorno. El principal inconveniente de las cadenas es su ineficacia, puesto que se produce deslizamiento sobre el terreno al avanzar y al girar. Si la navegación se basa en el conocimiento del punto en que se encuentra el robot y el cálculo de posiciones futuras sin error, entonces las cadenas acumulan tal cantidad de error que hace inviable la navegación por este sistema. En mayor o menor medida cualquiera de los sistemas de locomoción contemplados aquí adolece de este problema [5].

#### 1.3.3.2 Robots sin Patas

Los robots sin patas son conocidos como robots gusanos o robots serpientes (snake robots). Estos no son tan veloces ni tan ágiles como los que tienen patas, pero tienen una serie de ventajas que justifican su investigación. Al tener una forma alargada, pueden penetrar por sitios a los que otro tipo de robot no tiene acceso, como por ejemplo una tubería, pueden adoptar la forma de la superficie por la que se desplazan, de manera que pueden hacerlo por sitios muy tortuosos. Están compuestos por segmentos iguales, que se enganchan unos a otros, pudiendo conseguirse robots de cualquier longitud. En la Figura 1.6 se muestra uno de estos "bichos", diseñado por la NASA, en el que se puede apreciar claramente los diferentes segmentos idénticos que la componen, también se puede ver la facilidad que tienen para adoptar cualquier forma [6].

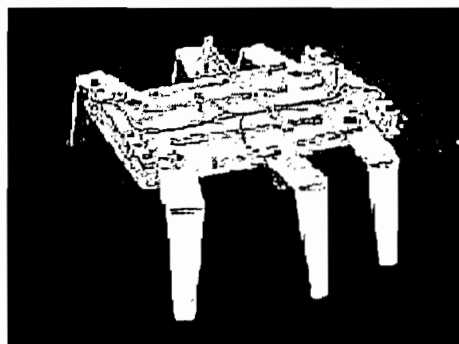
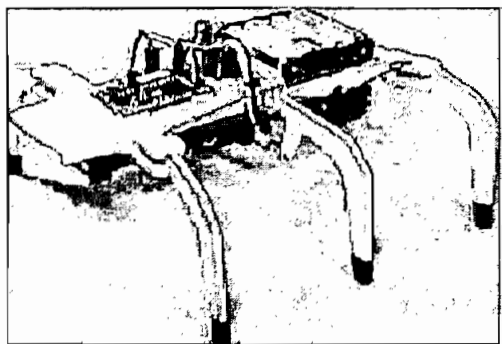
Los desplazamientos pueden superponerse entre ellos. Las serpientes por ejemplo no sólo hacen el movimiento de serpentina sino que también realizan

contracciones y expansiones, lo mismo les sucede a los gusanos de seda con las ondas longitudinales y las transversales perpendiculares.

### 1.3.3.3 Robots con Patas

Potencialmente los robots con patas pueden superar, con mayor facilidad que los otros, los problemas de los terrenos irregulares. A pesar de que hay un gran interés en diseñar este tipo de robots, su construcción plantea numerosos retos que se originan principalmente en el gran número de grados de libertad que requieren los sistemas con patas. Cada pata necesita como mínimo un par de motores lo que produce un mayor coste, así como una mayor complejidad y menor fiabilidad. Es más los algoritmos de control se vuelven mucho más complicados por el gran número de movimientos a coordinar, por lo que los sistemas de patas son un área de investigación muy activo.

La ventaja de estos tipos de robots es que son versátiles para diferentes tipos de terrenos, escalando los obstáculos con menor complejidad que un robot con ruedas. Los robots con patas intentan heredar las características de sus animales replicados, al tener patas son rápidos, aunque no tanto como los vehículos, ágiles, pueden moverse por terrenos complicados y tienen la capacidad de poderse impulsar para dar pequeños saltos. Esto es en teoría lo que podrían llegar a hacer. En la práctica son lentos y bastante torpes, como si fuesen crías recién nacidas. Conseguir movimiento con patas no es una tarea trivial, la coordinación entre las diferentes articulaciones es un problema que todavía no está resuelto de una forma elegante. En la Figura 1.7 se presentan dos robots hexápodos (con seis patas). Se puede ver que su estructura es muy simple y dan la impresión de ser lentos y poco ágiles. Distan mucho todavía de moverse como una hormiga real.



*Figura 1.7 Robots hexápodos simples*

Según el número de patas del robot, se pueden denominar cuadrúpedos, hexápodos, octápodos. Existen también diferentes variaciones de diseños de patas.

Los **cuadrúpedos** tienen “personalidad propia” y difieren mucho del resto; este tipo de robots tienen mucho parecido con las mascotas que los humanos emplean (gatos, perros, etc.) por lo que son muy “amigables” y tienen mucha aceptación entre el público en general.

La mascota que más sorprende es AIBO, desarrollada por SONY, que se puede ver en la Figura 1.8. Sorprende el acabado final de su estructura y la coordinación tan buena que tiene. Otro caso es el Puchobot, que se puede ver en la Figura 1.9, el cual está dotado de doce articulaciones controladas por microcontroladores; el perro es autónomo, puede avanzar, girar, sentarse, dar la pata, etc. Las secuencias de movimiento se programan desde el PC y luego se envían a Puchobot para que las reproduzca. El entorno de desarrollo es excelente y pone de manifiesto lo compleja que es la coordinación de todas las articulaciones para conseguir el movimiento.



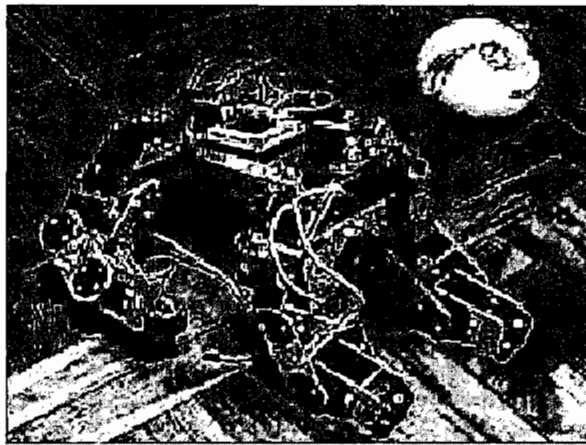
*Figura 1.8 AIBO, el “Perro” robot de Sony*







*Figura 1.8 AIBO, el "Perro" robot de Sony*



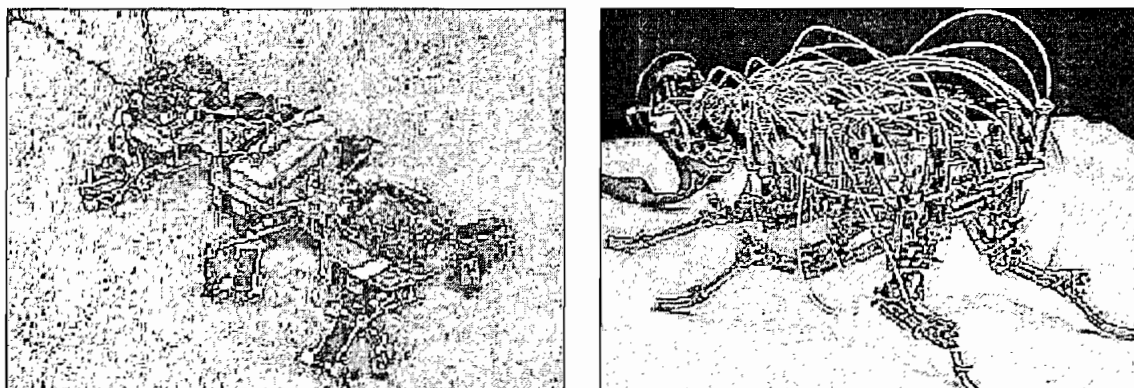
*Figura 1.9 PUCHOBOT descansando*

La desventaja de los robots cuadrúpedos es que al tener solo cuatro patas tienen menor estabilidad sobre todo cuando quiere escalar un obstáculo, es por eso que se necesita un sensor de equilibrio para ascender sin volcarse.

#### **1.3.4 ROBOTS HEXÁPODOS**

A pesar que los sistemas de locomoción con patas ofrecen mayor versatilidad que su contraparte a ruedas, el desarrollo de este tipo de sistema de locomoción se vio obstaculizado en un principio por la complejidad inherente a la coordinación de las patas ya sea para mantener el equilibrio de la plataforma o para desplazarse, esta complejidad demanda una alta capacidad de cálculo aplicando

técnicas de control clásico; sin embargo, con el avance de la microelectrónica se ha hecho posible acceder a recursos computacionales que hacen viable la implementación de este tipo de sistema. En la Figura 1.10 se aprecian dos hexápodos comunes.



*Figura 1.10. Una hormiga y una cucaracha*

En el desarrollo de un robot con patas deben tenerse en cuenta aspectos tales como robustez, mantenimiento del equilibrio, coordinación de movimientos entre otros, un sistema que ataque todos los aspectos resulta de difícil implementación por lo cual la investigación se ha realizado atacando problemas puntuales, como lo son: diseño de la plataforma mecánica, diseño de pasos, estudio de sistemas hexápodos animales, planteamiento de arquitectura de hardware, entre otros.

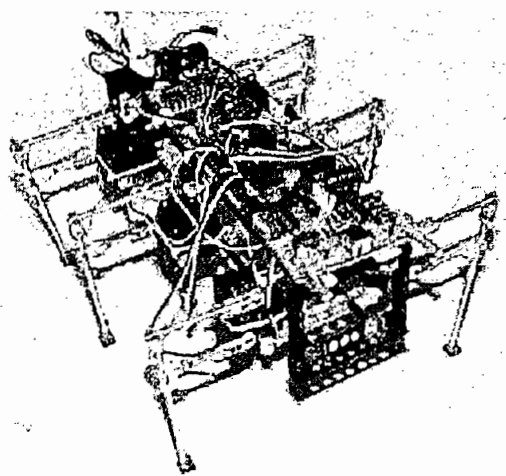
Los robots hexápodos tienen sólo dos patas más que los cuadrúpedos pero son radicalmente opuestos a estos; para empezar, si la coordinación de cuatro patas es compleja, la de seis lo es mucho más. Normalmente los prototipos tienen seis patas pero no son independientes, sino que bien mecánicamente o por software la patas se juntan de manera que cuando una avanza la otra retrocede o cuando una se levanta la otra baja, con lo que es como si sólo hubiese tres patas libres [6]. Por tener mayor número de patas son mucho más estables, esta es una propiedad muy interesante y que los hace especialmente útiles, puesto que si pierden una pata, por ejemplo si se estropea la electrónica o el servo, el robot puede seguir desplazándose, peor que al principio, pero lo puede hacer.

### 1.3.4.1 Características de los Robots Hexápodos

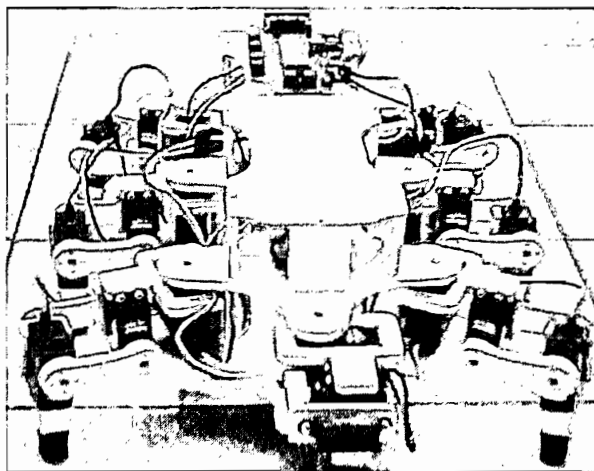
Los robots hexápodos y en general los robots con patas tienen cierta similitud con los brazos robots en cuanto los dos generalmente poseen articulaciones, por lo que se deben tomar ciertas características como son:

#### 1.3.4.1.1 Grados de libertad

Son los parámetros que se precisan para determinar la posición y la orientación del elemento terminal. Los grados de libertad se refieren a los posibles movimientos independientes del robot (giratorios y de desplazamiento). El número de articulaciones es igual al número de grados de libertad. Así, un robot cuya pata tiene 2 articulaciones (Figura 1.11a), posee dos grados de libertad y tiene la facilidad de moverse en dos dimensiones. En la Figura 1.11b el robot posee tres grados de libertad [7].



a. Dos grados de libertad



b. Tres grados de libertad

Figura 1.11. Hexápodos con distintos grados de libertad

#### 1.3.4.1.2 Zonas de trabajo y dimensiones del manipulado

Las dimensiones de las patas, junto a los grados de libertad, definen la zona de trabajo del robot. Esta se subdivide en áreas diferenciadas entre sí, por la accesibilidad específica del elemento terminal (punto de contacto con el suelo).

También queda restringida la zona de trabajo por los límites de giro y desplazamiento que existen en las articulaciones.

#### *1.3.4.1.3 Capacidad de carga*

El peso que puede soportar el robot, y en sí, las patas articuladas que lo conforman recibe el nombre de capacidad de carga. Este dato depende mucho de la fabricación de las partes del robot y del torque del mecanismo que posee el autómatas. A veces, este dato lo proporcionan los fabricantes, incluyendo el peso del propio robot. La capacidad de carga es una de las características que más se tienen en cuenta en la selección de un robot, según la tarea a la que se destine.

#### *1.3.4.1.4 Velocidad*

El robot articulado debe moverse según la tarea a la que se le ha destinado. La velocidad del hexápodo dependerá de la estabilidad del mismo.

#### *1.3.4.1.5 Coordenadas de los movimientos*

Fundamentalmente el movimiento de las patas articuladas se relacionan con los correspondientes modelos de coordenadas en el espacio que pueden ser: cartesianas, cilíndricas, polares o angulares. Este modelo depende de la forma de trabajo de los elementos que se usan para su movimiento.

#### *1.3.4.1.6 Programabilidad*

En general los robots admiten la programación manual o mediante un módulo de programación para que actúe en forma autónoma. Se toma en cuenta:

- Control de la velocidad
- Saltos de programa condicionales
- Temporizaciones y pausas
- Edición, modificación, depuración y ampliación de programas

- Funciones de seguridad

#### 1.3.4.1.7 Factores Mecánicos

Tiene que ver con la elección de los motores a usar para que soporte la robusteza del robot en sus acciones de caminar. Además, si el robot debe escalar obstáculos, la selección de correctos motores lograrán soportar el peso del autómatas cuando ascienda dichos objetos. Cada motor en este caso debe lograr levantar la pata. Normalmente se utiliza los servomotores estándares puesto que éstos son fácilmente controlables y relativamente baratos, pero han limitado el esfuerzo de torsión. Se puede comprar servomotores de gran esfuerzo de torsión pero estos cuestan mucho más comparados con los otros.

Los servos de esfuerzo de torsión limitado complican el diseño mecánico ya que reducen las robustezas de las cargas. Para la estabilidad y compartir las cargas uniformemente en cada pata, el centro de gravedad debe estar tan cerca como sea posible al centro de la figura geométrica del robot.

El otro factor mecánico es la opción del diseño de la pata. Las patas de una articulación son las más simples hacer, pero acoplamientos más complicados ayudan la estabilidad al subir y descender obstáculos.

La construcción de un robot hexápodo se basa principalmente en el diseño de las patas las mismas que dependiendo de su forma de construcción proveerán al robot :

- Distintos sentidos de movimientos tanto de las patas como del robot
- Versatilidad de desplazamiento en diversos terrenos.
- Flexibilidad para escalar obstáculos.
- Equilibrio

Es por eso que generalmente existen dos tipos de hexápodos según el movimiento de sus patas:

El algoritmo de locomoción de este hexápodo se basa en el movimiento de dos parejas de trípode las cuales actúan alternadamente dándole estabilidad mecánica al sistema.

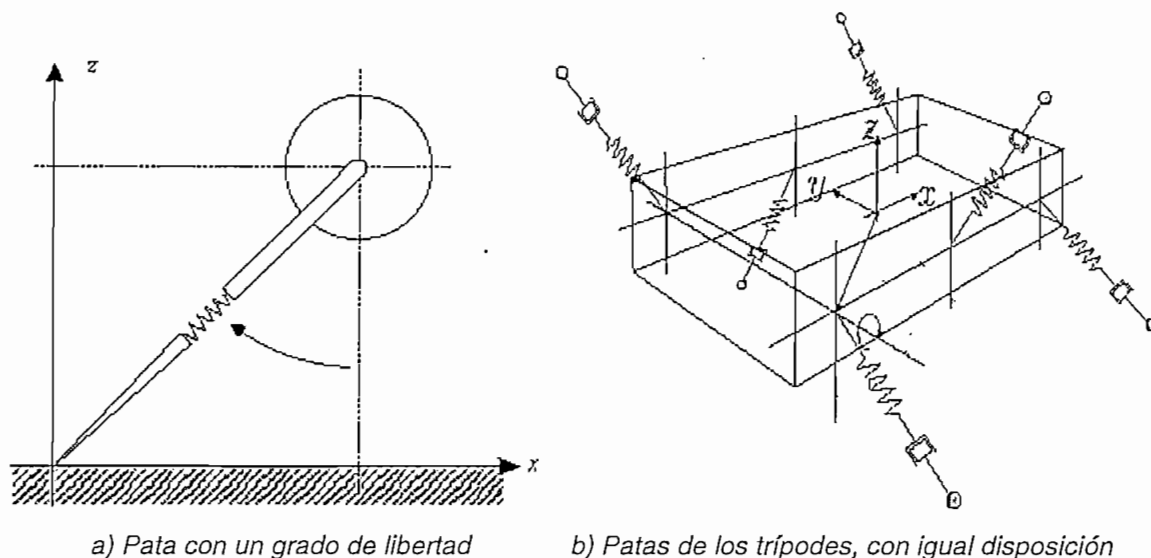


Figura 1.13. Trayectoria del movimiento de las patas

En la Figura 1.13a se muestra la trayectoria circular (un grado de libertad) de cada una de las patas de estos robots hexápodos, mientras que la Figura 1.13b indica las patas de los trípodes que actúan juntas tienen la misma disposición.

### 1.3.4.3 Hexápodos con Articulaciones

#### 1.3.4.3.1 Descripción

Las extremidades se encuentran distribuidas en dos grupos de tres, situados uno a cada costado del robot (Figura 1.14). Estas patas deben ser capaces de sostener de forma estable al robot, y además, deben poder desplazarlo a través de una superficie regular.

### 1.3.4.3.2 Movimiento del Robot

El movimiento de las patas de los hexápodo articulados se los puede realizar comúnmente de las siguientes formas:

**a. Por secuencia dividiéndoles en trípodes que se alternan:** Cada trípode consta de las patas delantera y trasera del un lado y la pata intermedia del otro costado. Con esto se logra la estabilidad del robot ya que puede mantener con sus patas una base triangular en el terreno que pisan, lo que los hace útiles para atravesar terrenos disparejos con un mínimo de balanceos. La secuencia para caminar del robot para que tengan sincronización los trípodes es la siguiente:

- **Primero:** Se levanta el trípode 1
- **Segundo:** Se mueven hacia delante las patas del trípode 1 y las patas del trípode 2 hacia atrás al mismo tiempo.
- **Tercero:** Descienden las patas del trípode 1

Luego se realizan los mismos pasos con el trípode 2 [8]. Los movimientos del robot se ven como los presentados en la Figura 1.15.

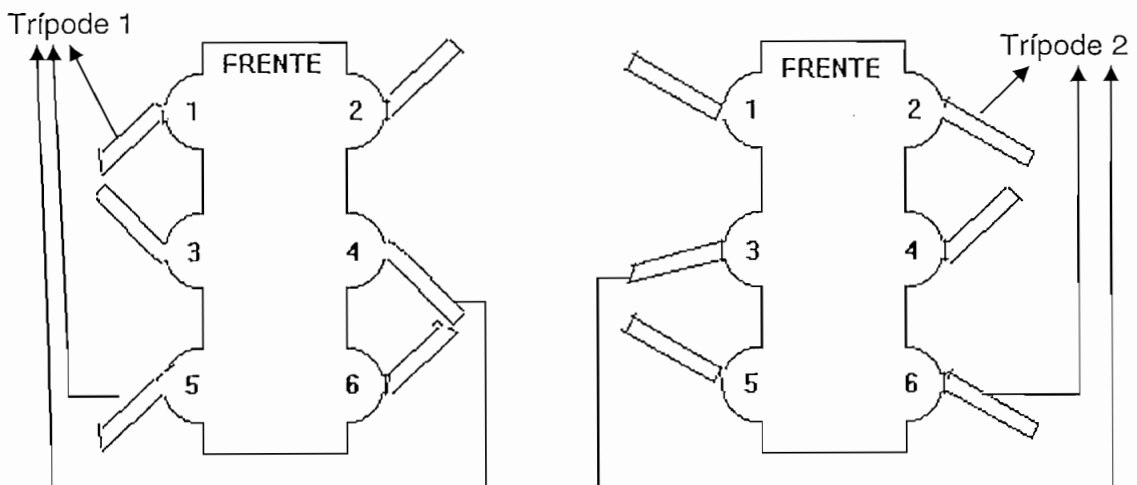


Figura 1.15. Movimiento del hexápodo por secuencia dividiéndoles en trípodes que se alternan

**b. Paso de la Onda:** Una opción más estable pero lenta es *el paso de la onda* donde solamente una pata se levanta a la vez. Comenzando con una de las patas traseras, se levanta y se mueve adelante, el resto de patas se quedan en contacto con tierra. La pata levantada entonces baja y el proceso se repite para la pata siguiente del mismo lado. Una vez que se haya movido la pata delantera, el procedimiento se repite para el otro lado. La atracción de este método de movimiento es que hay siempre por lo menos cinco patas que apoyan el peso de la robueteza, pero la velocidad delantera es solamente un sexto del paso del trípode que se alterna [9]. En la Figura 1.16 se muestra el orden de cada pata que se controla para que se mueva.

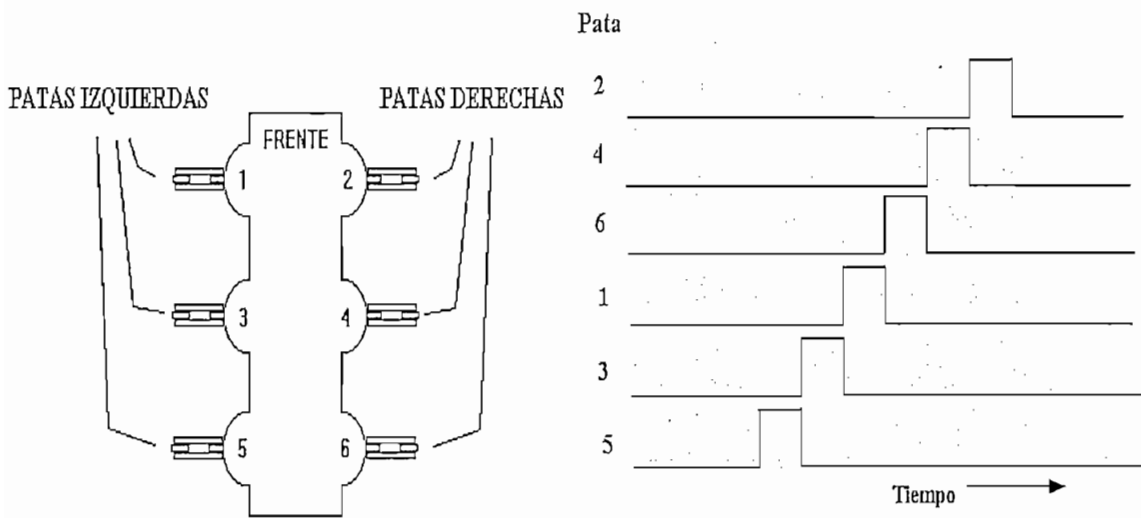
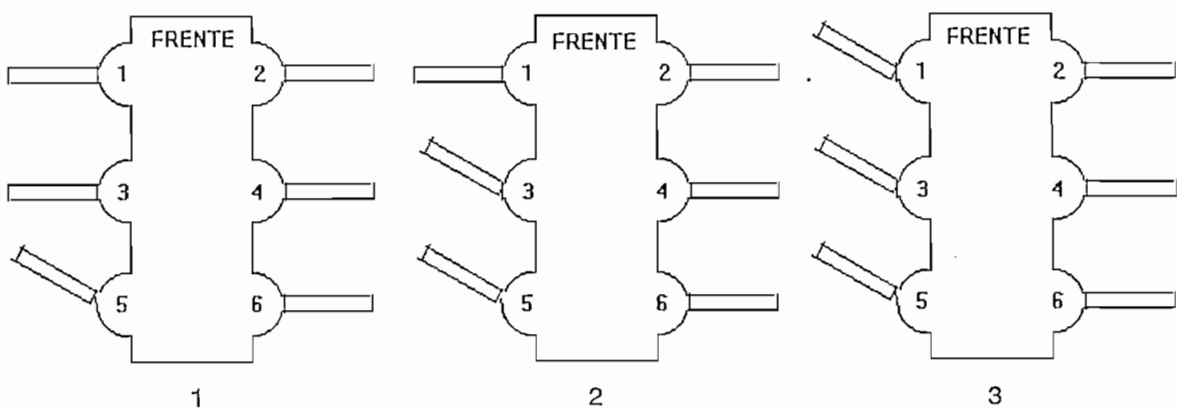


Figura 1.16 Orden de cada pata que se controla para el movimiento del hexápodo

Los movimientos que realiza el robot se pueden observar en la Figura 1.17.





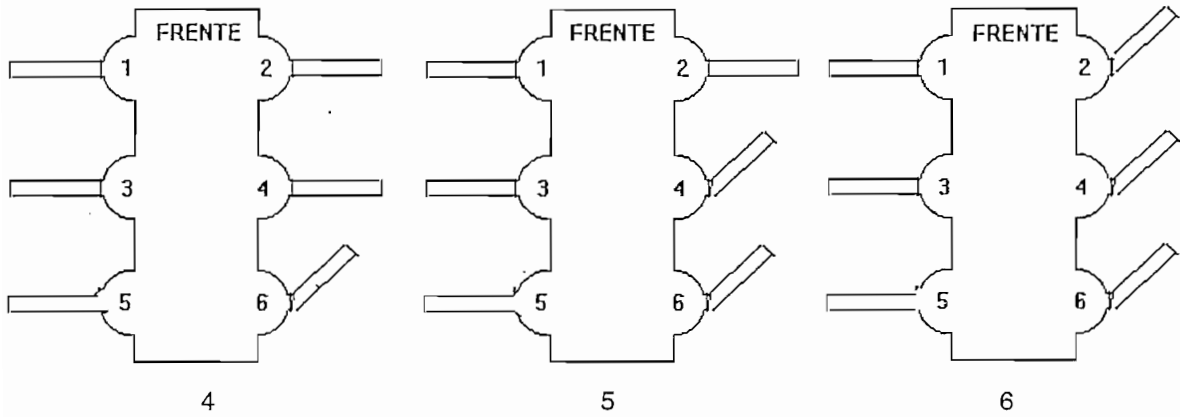


Figura 1.17 Movimientos del robot hexápodo por paso de la onda

**c. Paso de la ondulación:** Este algoritmo de movimiento es más rápido que el paso de la onda pero más lento que la secuencia por trípode. Para el movimiento del hexápodo, se alzan siempre dos patas las cuales se dirigen hacia delante mientras que las otras cuatro se mantienen en el piso. Al tener cuatro patas en contacto con el suelo es beneficioso para la estabilidad del robot. En la Figura 1.18 se observa el orden de las patas que se controla para que se mueva.

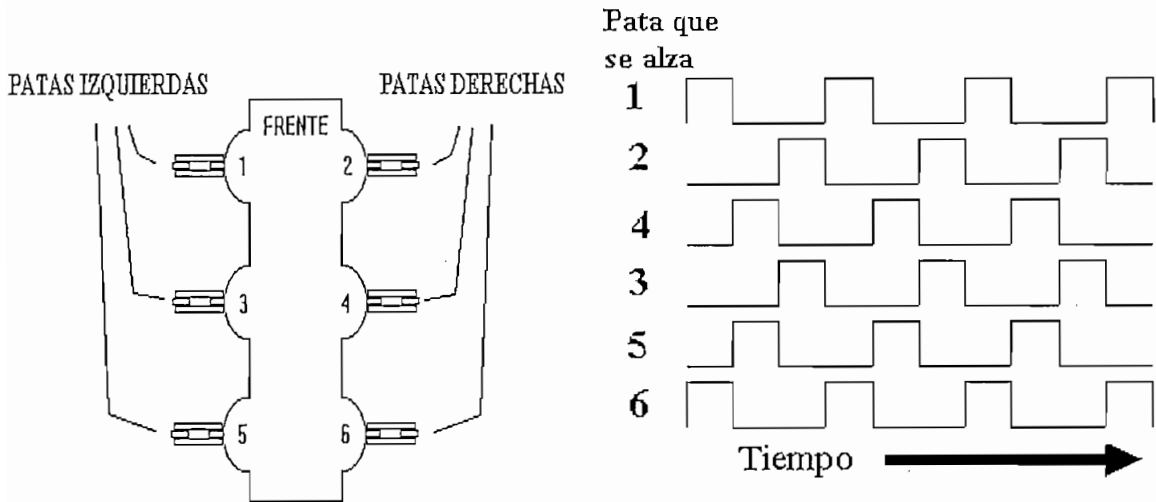


Figura 1.18. Orden de cada pata que se alza para el movimiento del hexápodo

La secuencia para la sincronización de las patas es la siguiente:

- **Primero:** Se alza las patas 1 y 6 que están hacia atrás; las patas 2 y 3 que están hacia delante se mantienen en el suelo al igual que las patas 4 y 5 que están en posición central.
- **Segundo:** Se mueven las patas 1 y 6 hacia delante (alzadas); las patas 2 y tres se mueven en el piso hacia la posición media mientras que las patas 4 y 5 se ubican hacia atrás.
- **Tercero:** Descienden las patas 1 y 6 y las demás se mantienen en su posición anterior.
- **Cuarto:** Se alzan las patas 4 y 5.
- **Quinto:** Se mueven las patas 4 y 5 hacia el frente; las patas 1 y seis se arrastran hacia su posición central y las patas 2 y 3 se deslizan hacia atrás.
- **Sexto:** Bajan las patas 4 y 5.
- **Séptimo:** Ascenden las patas 2 y 3.
- **Octavo:** Se dirigen hacia delante las patas 2 y 3; las patas 1 y 6 van hacia atrás tocando el suelo, y las patas 4 y 5 se sitúan en el centro también en contacto con la superficie.
- **Noveno:** Descienden las patas 2 y 3 manteniéndose las otras en su misma posición [9].

Los movimientos que se observan luego de cada tres de los nueve pasos que debe realiza el robot se pueden ver en la Figura 1.19.

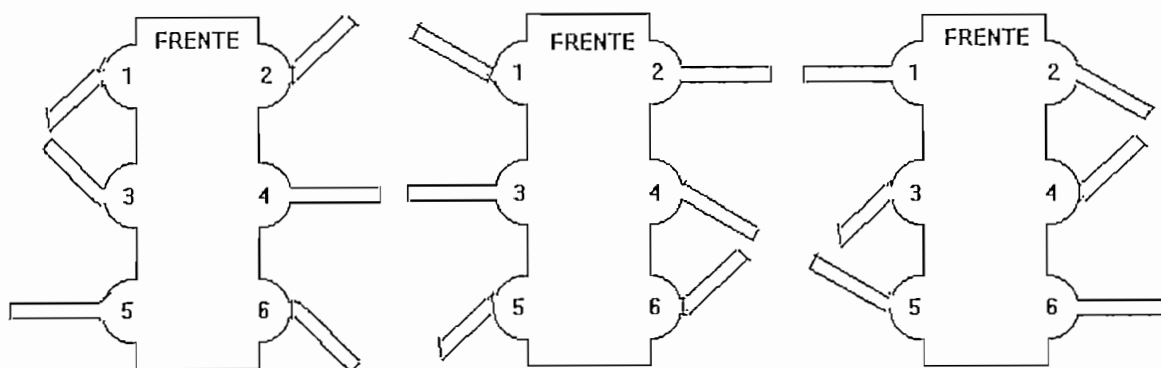


Figura 1.19. Movimientos del robot hexápodo por paso de la ondulación

Debido a que el movimiento de las extremidades es por secuencias, las patas se ubican en diferentes posiciones en cada paso, es por este motivo que los

dispositivos más recomendables y que comúnmente se usan en los robots articulados son los servomotores. Estos son motores de posicionamiento que sirven para situar la pata en la posición deseada. Tienen un giro de hasta 180° y se los controla por pulsos. Más adelante se describe detalladamente las características y modo de funcionamiento de estos motores.

## **1.4 IMPORTANCIA Y APLICACIONES DE LA ROBÓTICA MÓVIL**

Con el avance de la ciencia, el desarrollo de nuevas tecnologías y de disciplinas como la electrónica, mecánica y la informática entre otras cosas, se han podido construir robots que facilitan algunas tareas, como aquellas en donde se requiere de gran precisión y de velocidad o en las que se pone en riesgo la integridad de las personas que las realizan, entre muchas otras tareas más.

Los robots móviles tienen rango de aplicaciones, que con frecuencia son de naturaleza no industrial, se utilizan en situaciones peligrosas o ambientes hostiles como: debajo del agua, en zonas contaminadas radioactivamente, biológicamente o en el espacio.

Se ha encontrado que los dispositivos con seis patas se prefieren por su estabilidad ya que pueden mantener con sus patas una base triangular en el terreno que pisan, lo que los hace útiles para atravesar terrenos dispares con un mínimo de balanceos, maniobrar en espacios pequeños, esquivar obstáculos, subir escaleras y transportar cargas pesadas sobre terrenos irregulares.

El robot hexápodo es una maravilla del diseño y de la alta tecnología y es posible que sea de gran utilidad para la exploración del terreno de otros planetas. Permitirá, además, acceder a cuerpos más pequeños, tales como cometas, asteroides o la Luna.

La araña robot puede también ayudar en el mantenimiento y las reparaciones de la Estación Espacial Internacional (ISS). En la Tierra, puede ser de gran utilidad para los seres humanos que investigan zonas peligrosas, como volcanes o terremotos.

El diseño articulado, con el aspecto y movilidad de una araña o un insecto, le da una ventaja sobre los móviles tradicionales de exploración, que avanzan sobre ruedas u orugas, ya que a pesar de que ellos son eficaces, hay zonas donde es necesario acceder andando, algo que sólo puede hacer un robot con patas.

En la Nasa han realizado un robot hexápodo y diversas pruebas en un suelo marciano simulado han tenido notable éxito. El robot realizó varias tareas y envió los resultados por radio. Los investigadores prevén que estas arañas podrían tejer una auténtica red de comunicaciones en suelo marciano sin necesidad de una infraestructura existente, tal como un satélite. Cada araña recogería datos del ambiente y transmitiría continuamente las distancias que se ha movido y sus observaciones de una araña robot a la siguiente, hasta llegar la información al centro de control [10].

Los investigadores del JPL (Jet Propulsion Laboratory) de la NASA piensan que para explorar planetas lo mejor es mandar muchos robots. Hogg y Marzwell (Neville Marzwell, gerente de Conceptos Avanzados e Innovaciones de Tecnología del JPL) creen que en un principio las arañas robot se usarán como puente para la información. Los robots se desparramarán y luego se irán transmitiendo la información hasta que éste llegue a una central, que la transmitirá a la Tierra. Según Hogg, un sistema similar se podría usar en nuestro mundo durante desastres urbanos. Se pueden enviar cien arañas robot para determinar, por ejemplo, de dónde proviene una contaminación química. Nunca será un gran problema perder dos o tres de estos robots, ya que son baratos y pequeños [10].

Las características de los robots móviles de ser autónomos, fiables y versátiles han permitido evolucionar a la robótica móvil, creando servicios que proporcionan muchas funciones de utilidad tanto para la educación como para fines de

bienestar personal y social. Este crecimiento revolucionario en el empleo de robots como dispositivos prácticos es un indicador de que los robots desempeñarán un importante papel en el futuro.

## 1.5 ETAPAS EN LA CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT

En el desarrollo de cualquier proyecto siempre hay que tener un orden de actuación determinado, es decir una buena planificación. En este caso, se ha recurrido a una herramienta útil que divide en diferentes niveles o etapas la fabricación de robots. El nivel inferior *Nivel Físico* representa el primer paso y el superior *Nivel de Cooperación* el último [11]. Realmente no es necesario llegar hasta el último nivel, dependerá de la aplicación en concreto. Lo que sí es importante es empezar por el primer nivel para evaluar las necesidades y tener un cierto orden de prioridades. También es evidente que, a medida que se avanza, se puede retroceder para ajustar detalles que hayan quedado pospuestos en niveles anteriores. El significado de cada nivel es el siguiente :

*Nivel Físico:* Comprende la estructura física, las unidades motoras y las etapas de potencia. Es posible encontrar desde sistemas muy sencillos basados en un único motor, hasta estructuras sumamente complejas que buscan emular las capacidades mecánicas de algunos insectos.

*Nivel de Reacción:* Está formado por el conjunto de sensores y sus circuitos de polarización. Estos transductores cubren un amplio margen de posibilidades, tal que se puede encontrar desde simples topes de fin de carrera, hasta micro cámaras digitales con sistemas de reconocimiento de imágenes. Un robot que haya superado en cuanto a su construcción tanto el nivel físico como el de reacción, se denomina microbot reactivo. Este tipo de unidades trabajan cumpliendo la premisa, acción o reacción. En estos casos, los sensores son los propios controladores de las unidades motoras, sin ningún tipo de control intermedio.

*Nivel de control:* Incluye los circuitos más básicos que relacionan las salidas de los sensores con las restantes unidades. Partiendo de una simple lógica digital hasta potentes microcontroladores, se busca dotar al robot de la capacidad para procesar la información obtenida por los sensores, así como actuar de una manera controlada sobre las unidades motoras.

*Nivel de Inteligencia:* Abarca el planificador a largo plazo; en este nivel, se introducen los objetivos del robot que tienen relativa independencia de los sensores. Éste es el más alto nivel de inteligencia que puede alcanzar un robot como una unidad individual.

*Nivel de Comunidad:* Se trata de la puesta en funcionamiento de más de un robot, dentro de un mismo entorno, de forma simultánea y sin que ninguno de ellos tenga conocimientos explícitos de la existencia de otros en su mismo entorno.

*Nivel de Cooperación:* Comprende los sistemas donde a partir de un nivel de comunidad, se planifican o programan los robots para que tengan conocimiento de la existencia de otros, tal que posean la capacidad de cooperar para el buen desarrollo de una tarea.

## **1.6 PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO**

El objetivo principal es desarrollar robot móvil articulado. En concreto se pensó en una estructura que se apoye en seis extremidades, como lo hacen las hormigas o cierto tipo de arañas.

1. Con el primer nivel, o *nivel físico* es necesario una estructura ligera, fácilmente obtenible, lo más económico posible y articulada para permitir que el robot pueda realizar movimientos variados. Los motores a utilizar deben ser lo más pequeños y ligeros posibles, deben dar el suficiente torque para que entre todos sean

capaces de soportar el peso de la estructura y la puedan mover, además, como el movimiento de las patas es por secuencias, los motores a escoger deben ser de posicionamiento y no de revolución completa. Por último en este nivel se han de detallar etapas de potencia adecuadas a los motores seleccionados. En resumen, primero se realiza una búsqueda a través de diferentes estructuras previamente utilizadas en robots hexápodos, así como los motores empleados y sus mecanismos de control.

2. *Segundo nivel o nivel de reacción:* En este proyecto se usarán sensores necesarios para detectar los obstáculos que debe evadir el robot así como para poder escalar objetos de altura moderada.

3. *Nivel de control:* Este es uno de los niveles más importantes del proyecto. Consiste en realizar un sistema de control flexible que permita añadir sensores de detección de obstáculos. De esta manera primero se colocarán los sensores delanteros y si es necesario se colocarán en los extremos del robot. También el circuito de control permitirá conectarse a los actuadores que controlarán las articulaciones de las patas.

Los siguientes niveles no forman parte de los objetivos de este proyecto. Los niveles de comunidad y cooperación, no entrarán a formar parte del proyecto por la necesidad de disponer de más de una estructura.

Luego de revisar los fundamentos básicos de la Robótica Móvil y especialmente de los robots hexápodos, en el siguiente capítulo se trata sobre el ensamblaje del robot, los sensores y su acondicionamiento usados para interactuar con el ambiente, los actuadores que se deben implementar en estos robots articulados y el sistema microprocesado que se empleó para su control.

## CAPÍTULO 2



## **CAPÍTULO 2**

### **ENSAMBLAJE DEL ROBOT HEXAPODO**

#### **2.1 INTRODUCCIÓN**

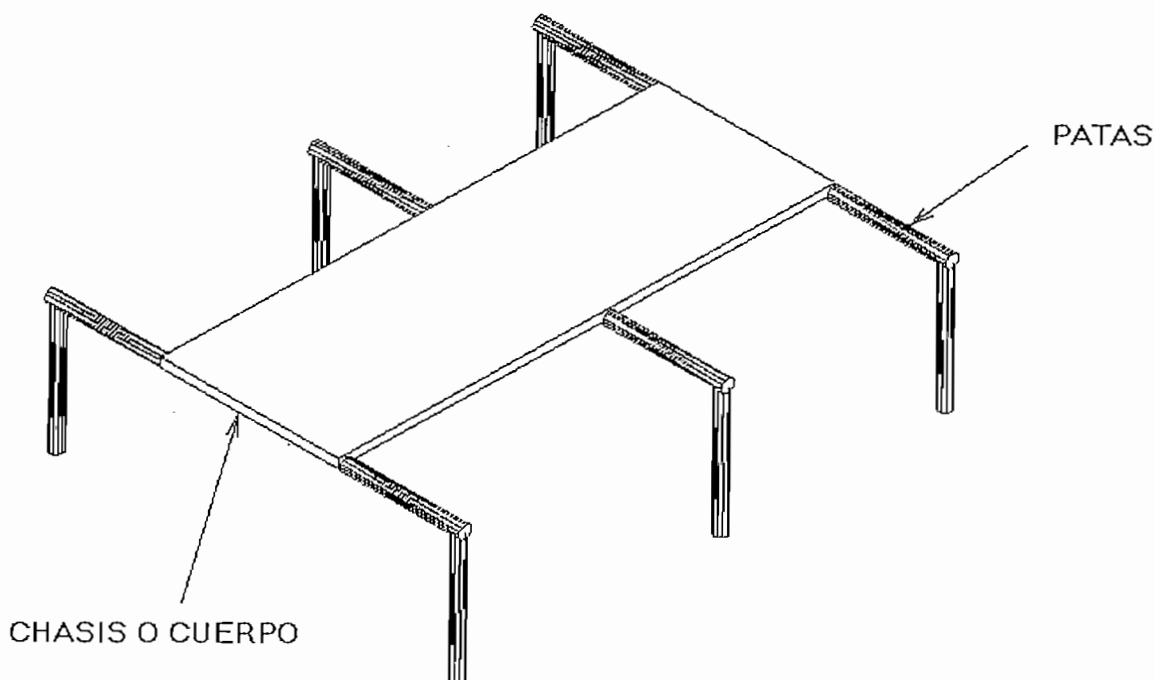
Como se explicó en el Capítulo 1, las ventajas del empleo de patas articuladas en robots móviles, respecto a otros sistemas móviles tradicionales de exploración que avanzan sobre ruedas u orugas, es bastante reconocido, ya que a pesar de que éstos son eficaces, hay zonas donde es necesario acceder andando, algo que sólo puede hacer el robot con patas articuladas.

La complejidad mecánica de los sistemas de locomoción con patas es una de las características que hace que su estudio sea tanto difícil como interesante.

En general, los sistemas en robótica móvil son mecanismos capaces de ser analizados de acuerdo a la mecánica clásica. Además, un estudio cinemático y dinámico es necesario para analizar el movimiento en términos de desplazamiento, velocidad, aceleración, fuerzas y torques, generadas y transmitidas. Esto permite la determinación de las situaciones más críticas y consecuentemente, el diseño de sus componentes.

#### **2.2 MORFOLOGÍA DE LOS INSECTOS Y MAMÍFEROS**

Puesto que la inspiración de mucho de los robots articulados se halla en la naturaleza, antes de nada se van a describir las principales características de los insectos desde un punto de vista morfológico y desde su estructura anatómica.



*Figura 2.1 Bosquejo de las partes principales de un robot hexápodo*

En la Figura 2.1, se puede observar que el robot tiene dos partes principales que son las patas y el cuerpo del mismo, donde van sujetas las seis extremidades.

El problema principal del robot hexápodo es diseñar la pata para lo cual se tiene que considerar aspectos fundamentales como los presentados a continuación:

- a) Cada pata debe tener la posibilidad de controlar su movimiento de manera independiente y además el control de cada pata debe realizarse independientemente tanto horizontal como verticalmente. Esto con el objetivo de tener todas las condiciones mecánicas favorables para que el robot cumpla con sus objetivos. En otras palabras el robot deberá gozar de un amplio grado de libertad.

pequeños. Para el presente proyecto se decidió por un obstáculo máximo de 5 cm. Cabe recalcar que este valor es proporcional al tamaño del robot, lo que implica que a mayor capacidad de subir obstáculos grandes, mayor es el tamaño de la pata y por ende del robot.

## 2.4 DISEÑO MECÁNICO DEL HEXÁPODO

### 2.4.1 DISEÑO DE LA PATA

Para cumplir con los objetivos planteados con anterioridad, se escogió un diseño de pata articulada usando el sistema de barras paralelas; específicamente un sistema de cuatro barras (Figura 3.3) que es uno de los mecanismos más utilizados y de una relativa facilidad de diseño y en especial de construcción ya que el campo de la mecánica no es de total dominio en la ingeniería en Electrónica y Control.

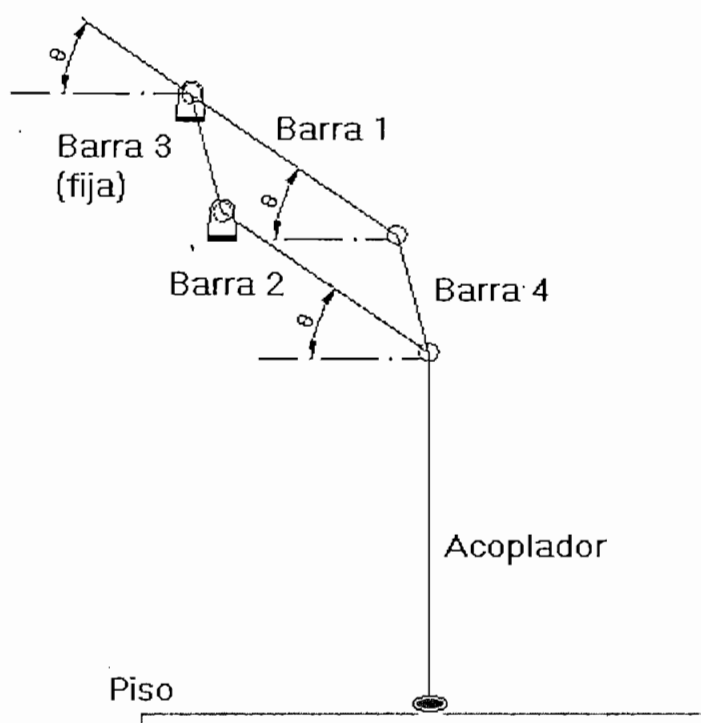


Figura. 2.3 Mecanismo de cuatro barras paralelas y acoplador.

En el gráfico de la Figura 2.3 se observa el sistema de 4 barras paralelas más un acoplador que es la extensión de la barra cuatro con un ángulo diferente por motivos estéticos y de estabilidad. Para cualquier eslabonamiento de un grado de libertad, como éste de cuatro barras, solo se necesita un parámetro que defina

por completo las posiciones de todos los eslabones o barras. El parámetro que se elige es el ángulo del eslabón de entrada (barra1), que se indica en la Figura 2.3 como  $\theta$ , para toda variación de este ángulo las barras 1 con la 2 y 3 con la 4 se mantienen paralelas respectivamente con lo que se logra mantener al acoplador perpendicular en todo momento al piso para lograr la estabilidad y agarre adecuados.

#### 2.4.1.1 Modelado Geométrico

Para el diseño correcto de la pata es necesario determinar las dimensiones adecuadas de los eslabones que permitan cumplir las condiciones mecánicas planteadas con anterioridad. Sin embargo, las expresiones resultantes de este tipo de análisis de las características del movimiento resultan bastante extensas y algo complejas, por tanto, los paquetes computacionales relacionados a los sistemas mecánicos en general vienen a ser una poderosa alternativa de diseño. El uso de computadoras en el diseño mecánico es hoy en día bastante común, no sólo en el análisis de la cinemática de los sistemas, sino también para simular la dinámica de las cargas que actúan sobre cada parte del sistema.

Para el modelado geométrico se usó el paquete computacional AUTOCAD, el cual permite realizar la proyección del movimiento desde una posición inicial hasta una final. En la Figura 2.4 se observa que para una variación de  $70^\circ$  del ángulo  $\theta$ , la pata se mantiene perpendicular al piso en todo instante.

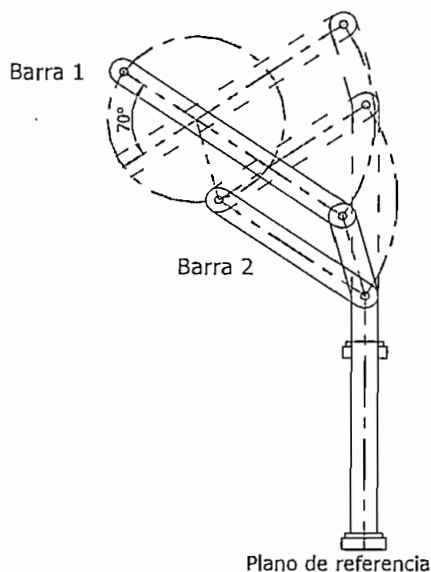


Figura 2.4 Modelado geométrico del sistema de barras

#### 2.4.1.2 Justificación Dimensional

Una vez cumplido con el objetivo de mantener la pata perpendicular al piso en todo momento es necesario encontrar las dimensiones adecuadas de los eslabones para que la pata pueda elevarse al menos 5 centímetros del suelo. Para determinar las dimensiones finales se tomó en cuenta una altura de diseño de 65 mm y un ángulo de giro de  $70^\circ$ , con la finalidad que la pata no tenga problemas al pasar los obstáculos (Figura 2.5). Para llegar al objetivo final se realizaron varias iteraciones variando la longitud de las barras, distancia entre éstas, ángulo de giro de la barra 1, logrando determinar las dimensiones adecuadas. Todas las dimensiones de los eslabones están en el ANEXO A.

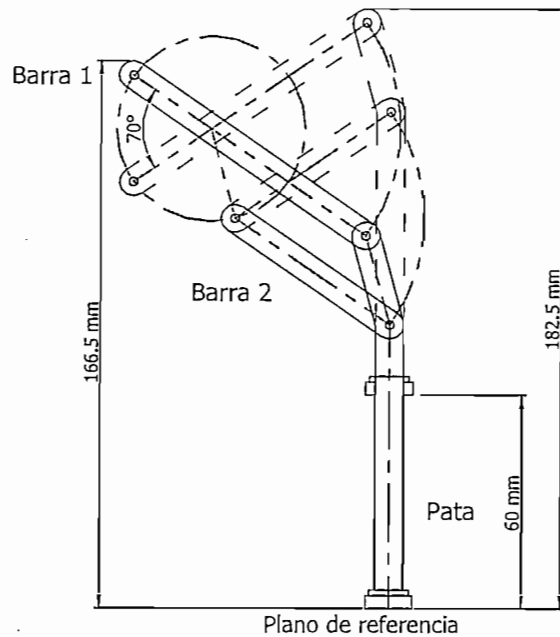


Figura 2.5 Justificación dimensional del sistema de barras

#### 2.4.2 DISEÑO DEL SOPORTE DE SERVOS U HOMBRO Y BARRAS

Como ya se mencionó, cada pata tiene un movimiento independiente. Para cumplir con este objetivo es necesario que los servomotores vayan montados en una estructura firme y que ésta sirva de soporte también para las barras, dicha estructura se diseñó de acuerdo al tamaño y forma de los servos y a la geometría del sistema de barras, facilitando el movimiento de los eslabones con respecto al cuerpo o chasis.

La disposición de los servomotores se observa en la Figura 2.6, donde el servo colocado en la parte superior es el encargado del movimiento de adelante y atrás y el servo ubicado en la parte inferior, se encarga del movimiento de arriba hacia abajo.

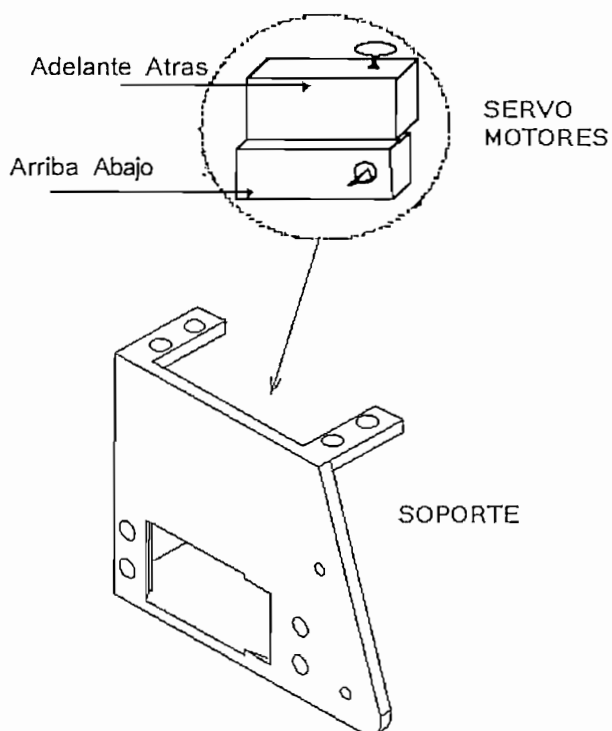


Figura 2.6 Disposición de servomotores

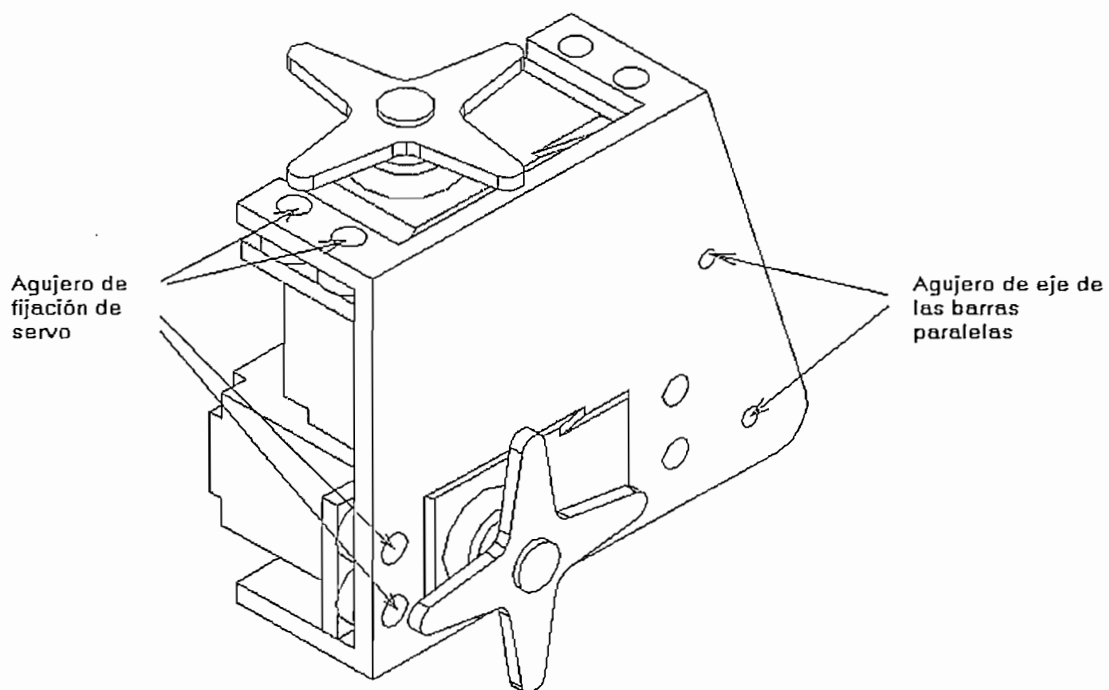


Figura 2.7 Servomotores acoplados al soporte

En la Figura 2.7 se observa los servomotores colocados en el soporte. El uno para el movimiento horizontal y el otro para el vertical. El soporte posee agujeros en su parte frontal para fijar los servomotores mediante pernos al soporte y agujeros donde se colocan los pasadores que sirven de pivot para las barras paralelas. Las barras finalmente se montan en los agujeros antes mencionados, de tal forma que hagan pivot en los mismos y mantengan el paralelaje entre ellos (Figura 2.8).

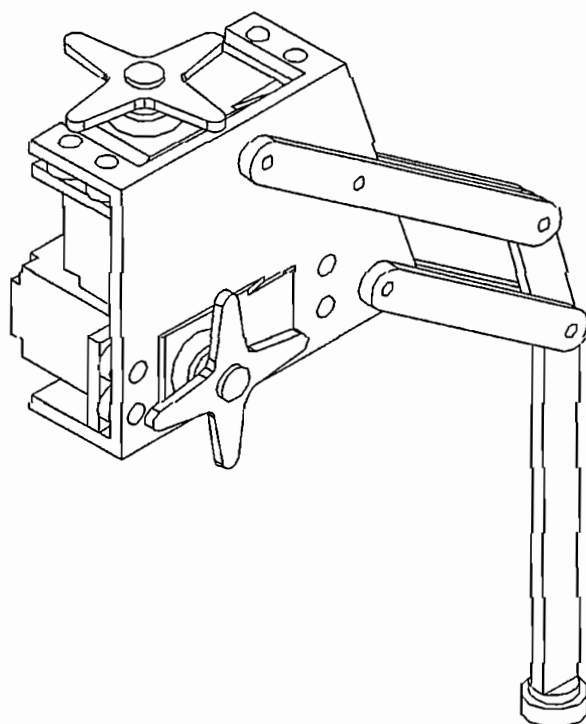


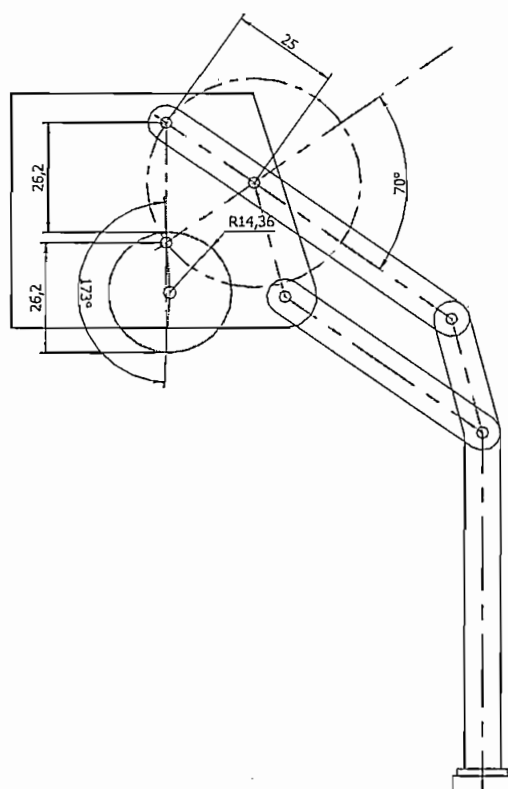
Figura 2.8 Conjunto hombro - barras

### 2.4.3 DISEÑO DE LA BARRA DE ACOPLE

Por la disposición de los servos en el soporte u hombro del robot, se hace necesario conectar de alguna forma la hélice del servo con la barra 1. Para ello se usó una pequeña articulación o barra de acople de tal manera que una variación grande en el ángulo del servomotor se traduce en una variación angular diferente y menor de la barra paralela, haciendo elevar la pata.

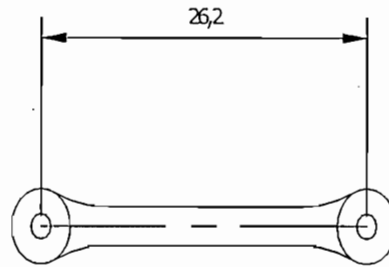


El diseño se lo realizó en AUTOCAD, haciendo algunas proyecciones de tal manera que considerando una estructura de hombro preestablecida, así como la disposición de los servomotores, se buscó el tamaño adecuado de la barra de acople para elevar la pata al menos 65 mm, cuidando de no sobrepasar el ángulo máximo de funcionamiento de  $180^\circ$  del servomotor. La Figura 2.9 muestra la proyección antes mencionada, logrando que para un ángulo de variación del servo de  $173^\circ$  se cumpla tal requerimiento.



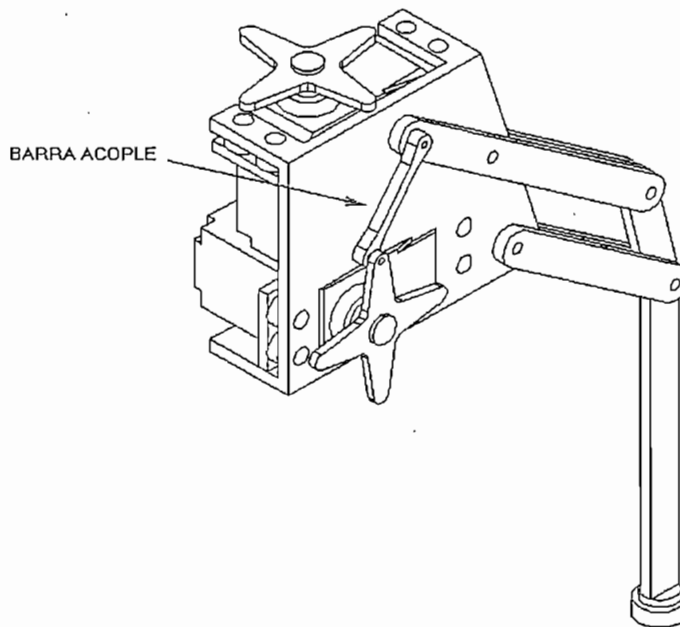
*Figura 2.9 Simulación de movimiento de barras paralelas*

Del análisis geométrico hecho anteriormente, se logró determinar una barra de acople de 26.2 mm (Figura 2.10).



*Figura 2.10 Barra de acople*

Finalmente se obtiene una estructura donde van acoplados tanto los servomotores como las barras, pudiendo de esta forma mover la articulación principal (barra 4), proporcional al ángulo de giro del motor (Figura 2.11a y 2.11b).



*Figura 2.11a Pata en posición inicial*

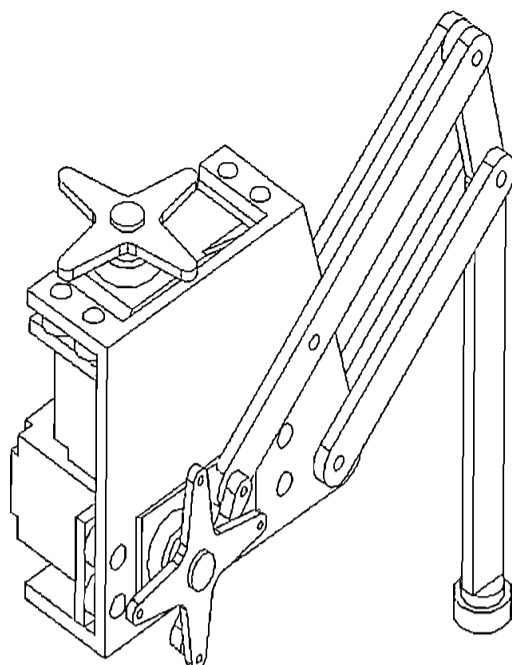


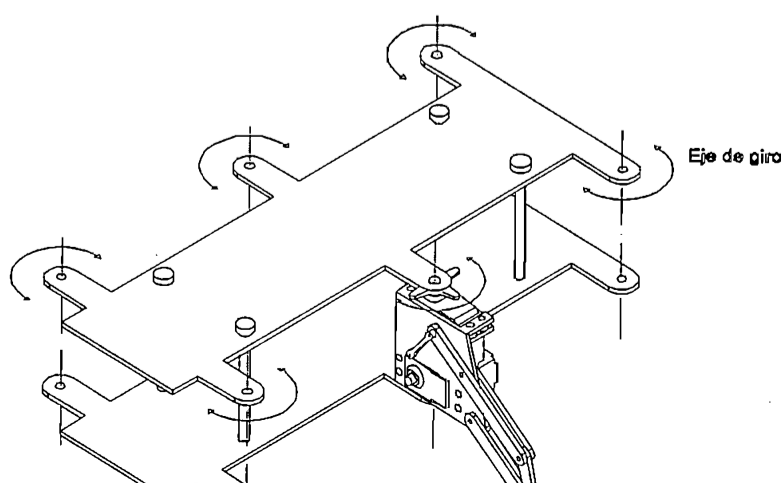
Figura 2.11b Pata en posición final

#### 2.4.4 DISEÑO DEL CHASIS

El chasis o cuerpo del robot es la estructura donde va acoplado todo el conjunto pata-hombro. Está debe combinar varias características como ligereza, rigidez y un diseño sencillo que facilite la manufactura, montaje y desmontaje del robot.

##### 2.4.4.1 Primer prototipo

El chasis mostrado en la Figura 2.12a, consta de dos placas con unas extensiones u orejas que van a albergar el conjunto pata-hombro, de tal manera que éste gire sobre un eje, que coincide con el eje del servo superior (Figura 2.12b). Para dotarle de mayor rigidez al robot se usaron cuatro varillas que sirvieron de columnas separadoras y de soporte de la estructura, que además



facilitan el desmontaje del robot. La distancia de separación entre ambas placas depende de la altura del soporte u hombro.

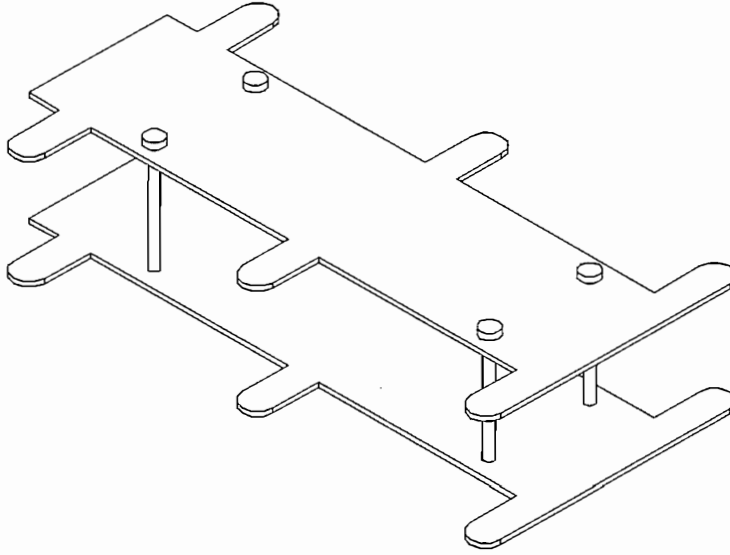


Figura 2.12a Primer diseño de chasis

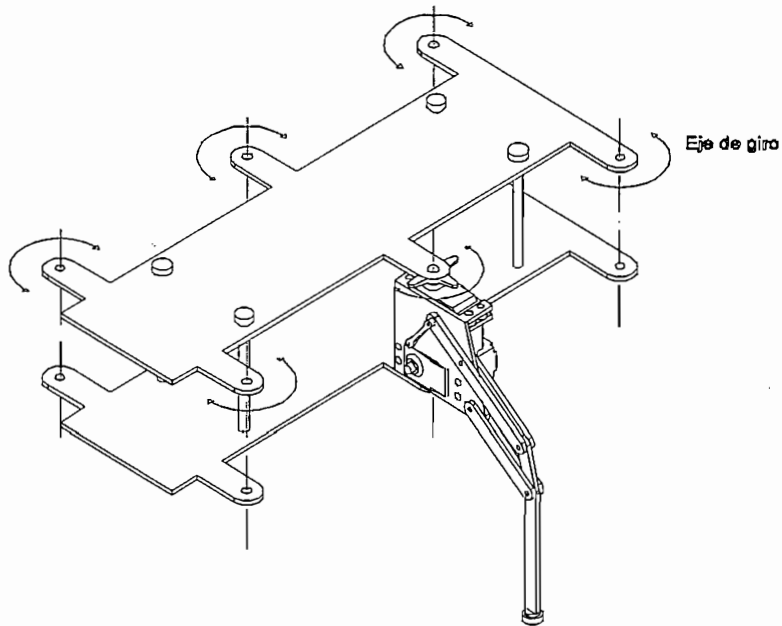


Figura 2.12b Pata acoplada al chasis

Para la separación entre las patas, se consideró que éstas tengan la posibilidad de girar  $45^\circ$  hacia delante y hacia atrás sin toparse unas con otras (Figura 2.13).

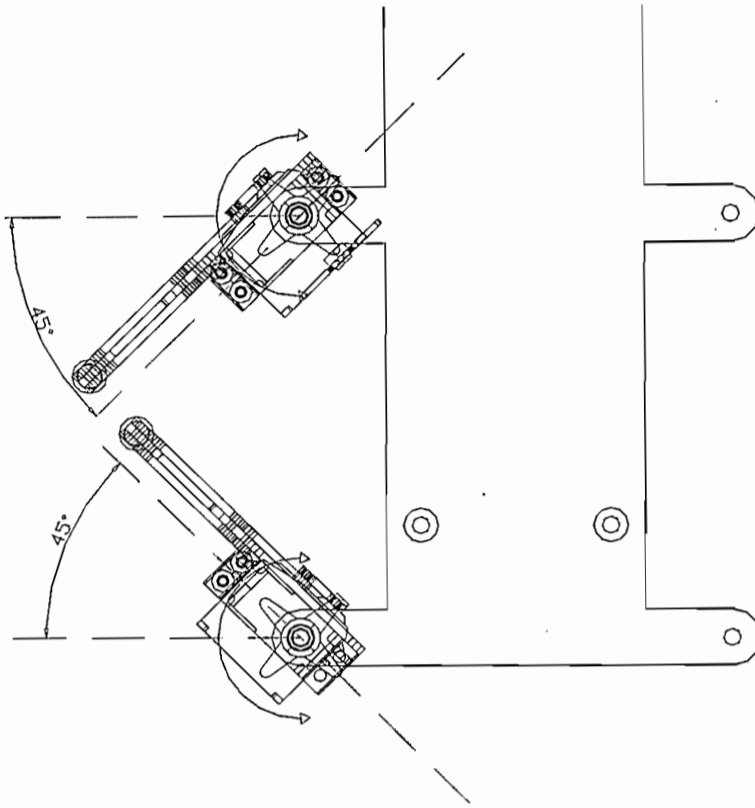


Figura 2.13 Ángulo máximo de movimiento de la pata

#### 2.4.4.2 Prototipo Final del Chasis

Después de realizar las pruebas de caminata del robot con el chasis diseñado anteriormente, se pudo observar que debido a los torques necesarios para mover las patas de adelante hacia atrás o viceversa, las extensiones del chasis u orejas tienden a quebrarse en la unión con el resto del chasis (Figura 2.14).

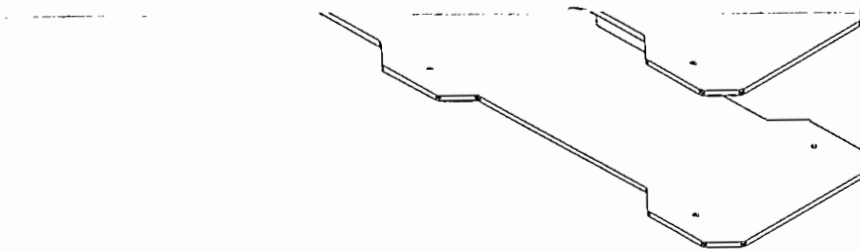


Figura 2.15 Diseño final del chasis

## 2.5 CONSTRUCCIÓN Y ENSAMBLAJE

De la etapa de diseño se observa que la geometría de todas las partes que constituyen la estructura mecánica del robot presenta una relativa facilidad para su manufactura y ensamblaje; sin embargo, uno de los elementos mecánicos que más dificultades tiene en su fabricación es el soporte u hombro, ya que es una estructura tridimensional que además debe tener una rigidez aceptable, y como se explicó es el apoyo de todo el mecanismo de la pata. Por otro lado para evitar errores en la manufactura de los diferentes componentes del robot se usó el paquete computacional Working Model, el cual permite realizar simulaciones tridimensionales a escala tomando en cuenta la dinámica del sistema (ver Figura 2.16). Los modelos y las simulaciones realizadas en este programa se encuentran en el ANEXO B.

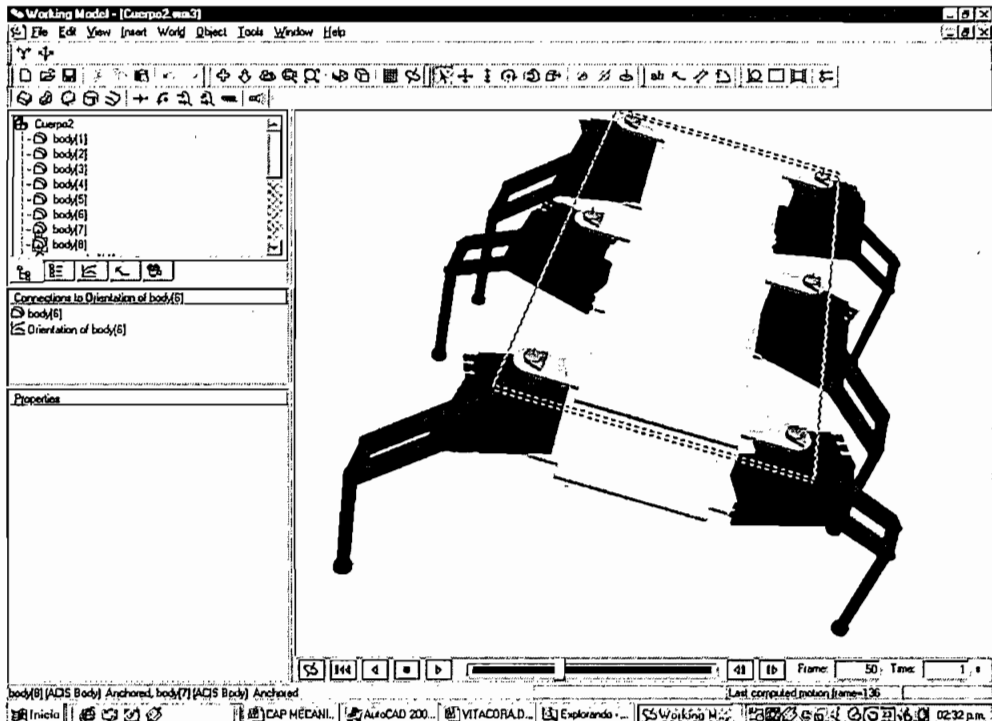


Figura 2.16 Programa de simulación Working Model 4D

## 2.5.1 CONSTRUCCIÓN Y ENSAMBLAJE DEL SISTEMA DE BARRAS

Por su geometría y tamaño, las barras son las partes que más facilidad presentan para su construcción, ya que no son más que láminas con agujeros en sus extremos, donde se alojan los pasadores que sirven de eje al sistema. Para su construcción se valió de tecnología muy sencilla como un equipo de corte manual, taladro, brocas, y lijas apropiadas para el material a usarse.

### 2.5.1.1 Ensamblaje de la pata

Como se puede observar en la Figura 2.17, el ensamblaje de las barras es muy sencillo. Las barras A y B; y las barras C y D se unen mediante pasadores (pernos de 1x1/8 ") que sirven de eje para facilitar el movimiento relativo entre sí, a cada lado de la barra principal P. Para evitar la holgura entre las barras, se aseguran estos pasadores con tuercas en su extremo final. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que las tuercas deben facilitar el movimiento de las barras, ya que a mayor dificultad del mismo el torque ejercido por el servomotor es mayor.

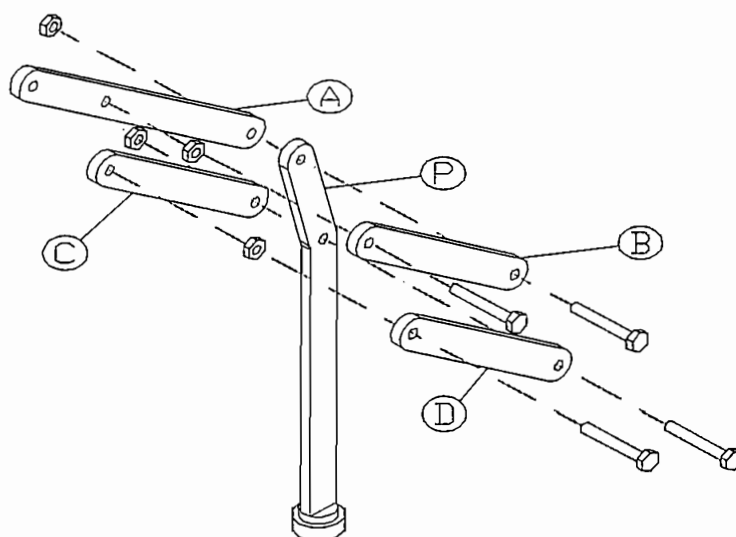
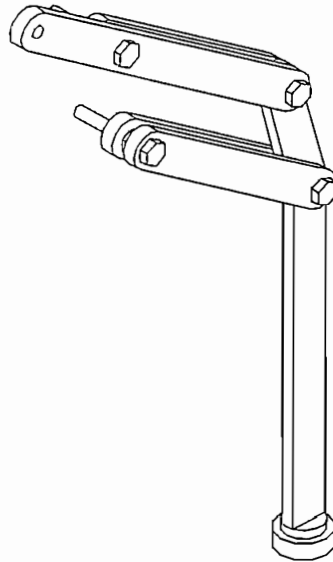


Figura 2.17 Esquema de ensamblaje de las barras

Después de seguir los pasos anteriores, las barras quedan ensambladas como lo muestra la Figura 2.18.



*Figura 2.18 Barras ensambladas*

### **2.5.2 ENSAMBLAJE SERVOMOTORES - HOMBRO**

Para el ensamblaje de los servomotores se debe considerar que los mismos deben quedar perfectamente asegurados al soporte, para lo cual se usa pernos y tuercas (cuatro para cada servo). Una vez asegurados los mismos se procede a colocar la hélice a cada uno de los servomotores, como se observa en la Figura 2.19.



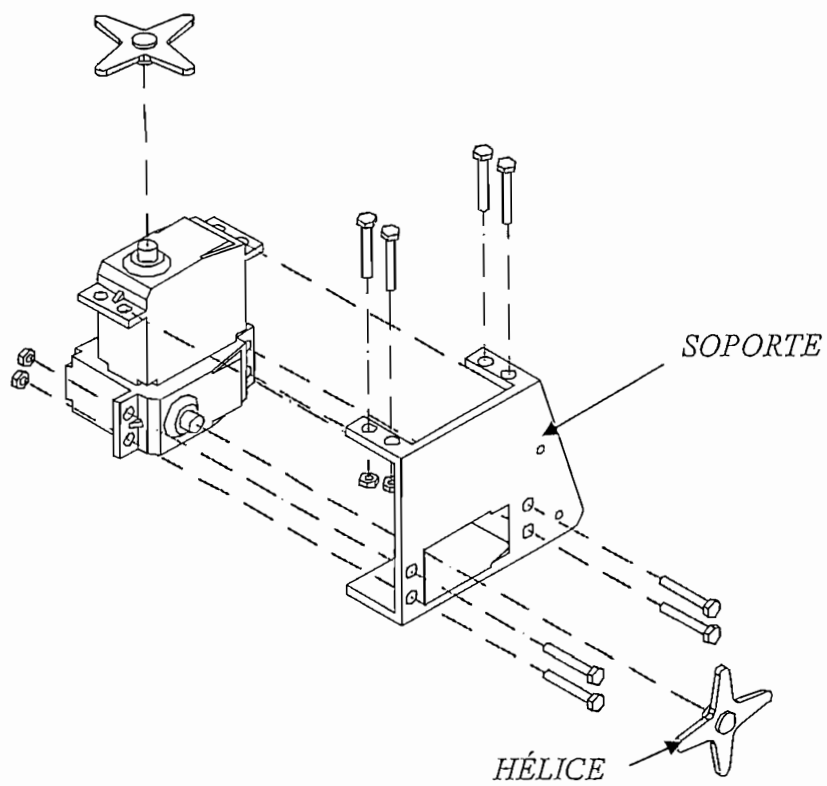


Figura 2.19 Esquema de ensamblaje de soporte-servos

Como resultado se obtiene una estructura firme mostrada en la Figura 2.20

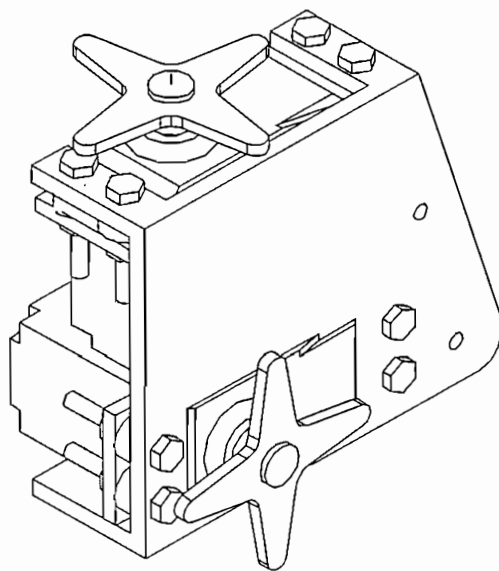


Figura 2.20 Servomotores ensamblados al soporte

### 2.5.3 ENSAMBLAJE PATA – HOMBRO

Luego de ensamblar tanto las barras entre sí, como los servomotores al soporte, se procede a ensamblar ambas estructuras (Figura 2.21), para lo cual se deben encajar los pernos P1 y P2 en los agujeros A1 y A2 del soporte respectivamente, hechos para el efecto. Finalmente se ensambla la barra de acople, cuyos extremos van asegurados mediante los pasadores S1 y S2 al agujero B1 de la barra y al agujero B2 de la hélice.

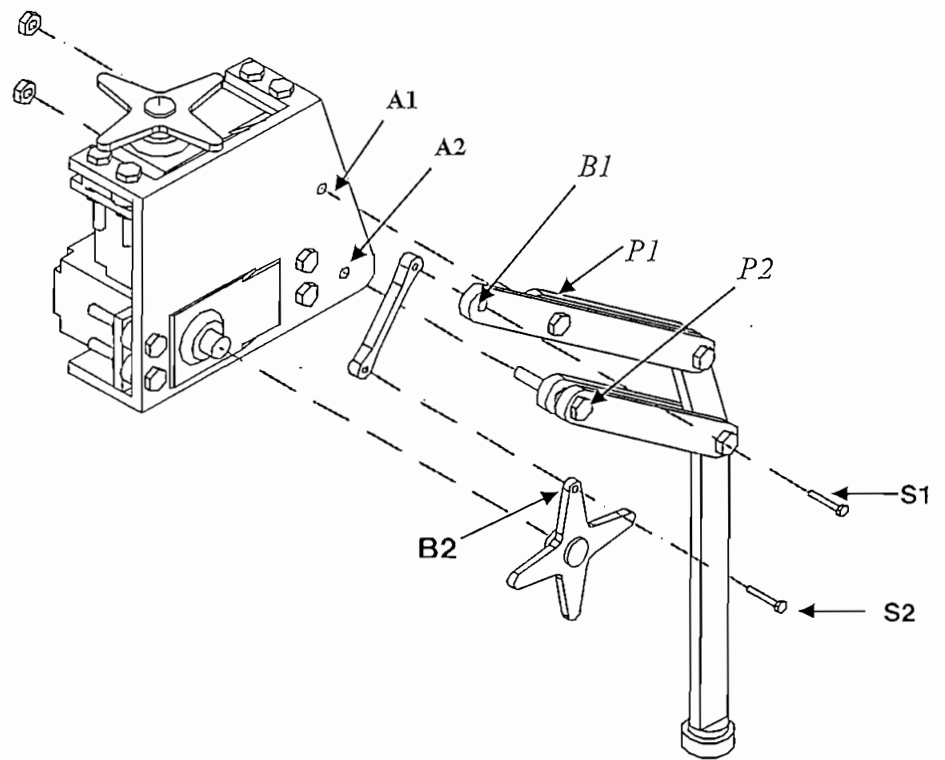


Figura 2.21 Esquema de ensamblaje del conjunto pata-hombro

La pata ensamblada en su totalidad se la puede observar en la Figura 2.22.

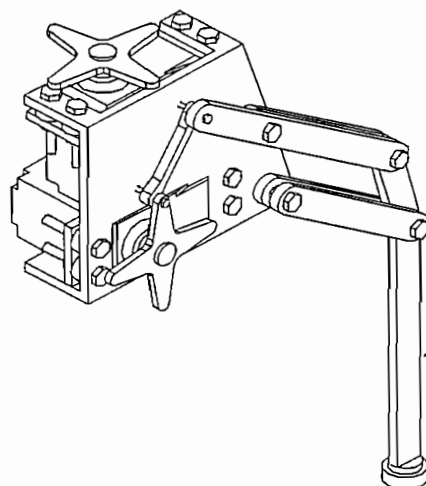


Figura 2.22 Pata totalmente ensamblada

#### 2.5.4 ENSAMBLAJE DEL CHASIS

El ensamblaje del nuevo chasis es bastante simple. Como se observa en la Figura 2.23, éste consta de dos placas, una superior o lomo del robot y una inferior. Estas placas son construidas de acrílico de 3 mm de espesor y entre ellas se va a sujetar el conjunto pata-hombro previamente ensamblado. Las dos placas antes mencionadas van aseguradas con pernos de 10 cm de largo, los mismos que van asegurados con tuercas al chasis. EL robot completamente ensamblado se observa en la Figura 2.24.

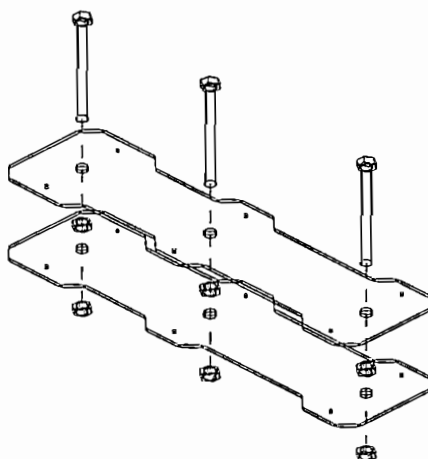
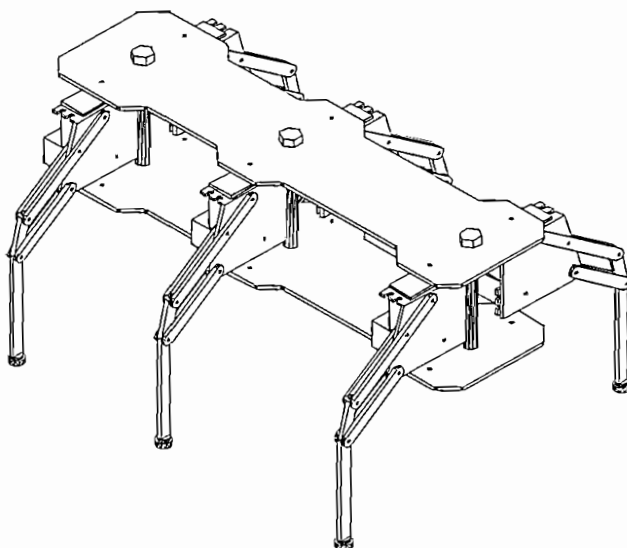


Figura 2.23. Esquema de ensamblaje del chasis.



*Figura 2.24. Robot completamente ensamblado*

## 2.6 SELECCIÓN DE MATERIAL

### 2.6.1 PRIMERA PRUEBA

Para las barras se escogió acrílico transparente de 2.5 mm de espesor. Este material fue muy fácil de conseguir en el mercado local y también fácil de trabajar. Sin embargo, resultó ser un material no funcional, por su alto grado de deflexión y fragilidad al aplicar una determinada fuerza.

Para el hombro o soporte se trabajó con las esquineras de canaletas plásticas que se encuentran en toda ferretería, este material es muy fácil de trabajar, el espesor de este material es de 2 mm.

Para el chasis se utilizó el mismo material que se usó para las barras (acrílico transparente de 2.5 mm de espesor). Este material no presentó mayores problemas, por lo que se mantuvo el mismo chasis para todas las pruebas.

pero para estas dimensiones resultaría extremadamente caro. Por esta razón se mantuvo las articulaciones de acrílico para las barras paralelas ya que el rozamiento es menor entre el par acrílico - aluminio que aluminio - aluminio.

La decisión de materiales esta vez fue bastante acertada, mejorando considerablemente la estabilidad al caminar y al subir obstáculos y eliminando la deflexión de las articulaciones.

## 2.7 TRACCIÓN DE LAS PATAS

El robot hexápodo como todo sistema móvil terrestre necesita un buen agarre al suelo. En este caso el punto de contacto es el extremo de la articulación principal, por lo que se cubrió con caucho que al estar en contacto con el piso, tiene buena adherencia, lo que impide que el robot resbale.

## 2.8 SENSORES UTILIZADOS

En los robots móviles, la información relacionada con su estado, (fundamentalmente la posición de sus articulaciones) la consigue con los denominados sensores internos, mientras que los elementos que permiten al robot interactuar con su ambiente de una manera flexible son los sensores externos.

Los sensores externos dan al robot mayor independencia del entorno concreto en el que se mueven, lo que se traduce en un mayor grado de "inteligencia". Dentro de estos es posible encontrar infinidad de sensores diferentes; en realidad, tantos como variables externas se puedan enumerar. Hay sensores para la temperatura, para la luminancia, el sonido, la humedad, presión, entre otros. Sin embargo, existen tres tipos de sensores externos que suelen ser utilizados por los robots de

La selección de los sensores para que pueda el robot hexápodo conocer el ambiente que lo rodea y explorarlo es un factor decisivo para obtener un buen funcionamiento del mismo.

El robot hexápodo debe semejar a un insecto, es por eso que a parte de poder explorar su entorno por si solo, evadiendo obstáculos grandes o evitando caerse de superficies altas, debe poder atravesar obstáculos de una altura moderada. Por tal razón se tiene que escoger dos tipos de sensores:

### **a) Sensores de evasión de obstáculos grandes y superficies elevadas**

Para que el robot evite colisionar con objetos grandes o caerse de un terreno alto se puede utilizar ya sea sensores de proximidad o sensores de alcance. Como se vio con anterioridad, los primeros permiten conocer si un objeto está o no presente dentro de un rango de acción determinado y los de alcance dan la distancia exacta del objeto. En vista de que la meta en este proyecto es la evasión de obstáculos y superficies elevadas, es suficiente usar los sensores de presencia o proximidad, que generalmente son los más considerados en robótica móvil.

Los sensores de presencia o proximidad más usados son los ultrasónicos y los ópticos. Como lo que se requiere es detectar objetos grandes a distancias pequeñas (menores a 20 cm), se eligió el sensor infrarrojo IS471F por su fácil implementación y estabilidad en la respuesta, además que para esta aplicación no es necesario detectar objetos a largas distancias. Por otro lado, para la detección de huecos se escogió los sensores de proximidad ultrasónicos, ya que permiten una distancia de detección considerable.

### **b) Sensores de detección de obstáculos pequeños y detección de contacto con el suelo**

Para poder detectar obstáculos pequeños y saber cuando cada pata está en contacto con el suelo se usarán sensores táctiles del tipo de contacto o bumpers o también llamados sensores de final de carrera. Estos sensores son los ideales por su sencillez, el bajo costo y por la facilidad de encontrarlos en el mercado local.

#### **2.8.1 SENSORES DE CONTACTO (BUMPERS)**

Los sensores de contacto indican simplemente si ha habido contacto o no con algún objeto, sin considerar la magnitud de la fuerza de contacto. Suelen ser dispositivos sencillos cuyo uso es muy variado. Se pueden situar en las pinzas de los brazos de robot para determinar cuando se ha cogido un objeto, o pueden

situarse en las patas de un robot para saber cuando topó un objeto. Estos sensores suelen ser interruptores de límite o microinterruptores, sencillos dispositivos eléctricos que cuando se contacta con ellos cambian de estado. Son de lógica binaria. Un ejemplo de estos sensores son los bumpers (Figura 2.25), que es un conmutador de 2 posiciones con muelle de retorno a la posición de reposo y con una palanca de accionamiento más o menos larga según el modelo elegido. En estado de reposo el pin común (C) y el de reposo (R) están en contacto permanente hasta que la presión aplicada a la palanca del bumper hace saltar la pequeña pletina acerada interior y entonces el contacto pasa de la posición de reposo a la de activo (A), se puede escuchar cuando el bumper cambia de estado, porque se oye un clic, esto sucede casi al final del recorrido de la palanca.

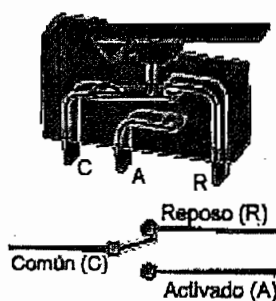


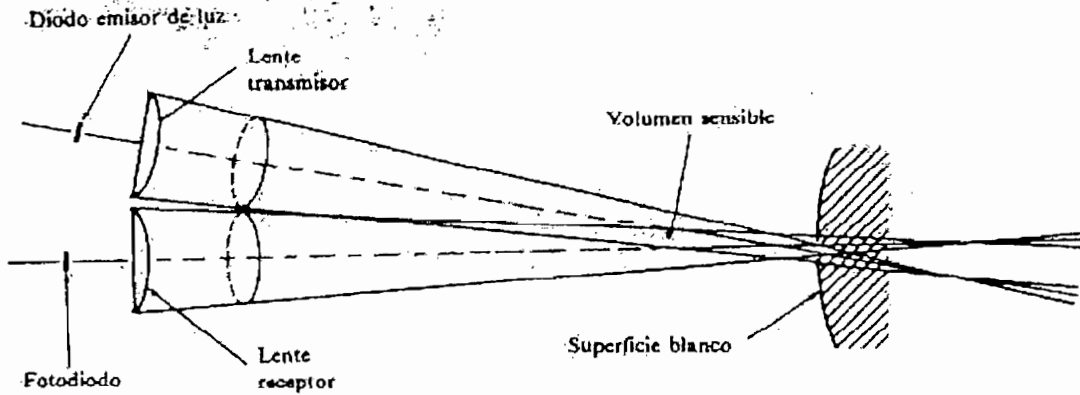
Figura 2.25 Bumper

Se usan para detección de obstáculos por contacto directo. No son adecuados para robots de alta velocidad ya que cuando detectan el obstáculo ya están encima y no da tiempo a frenar.

### 2.8.2 SENSORES DE PROXIMIDAD ÓPTICOS Y ACONDICIONAMIENTO

Los sensores de proximidad ópticos detectan la proximidad de un objeto por su influencia sobre una onda propagadora que se desplaza desde un transmisor hasta un receptor. Uno de los métodos más utilizados para detectar la proximidad por medio de sensores ópticos se muestra en la Figura 2.26. Este sensor esta

constituido por un diodo emisor de luz de estado sólido (led), que actúa como un transmisor de luz infrarroja y un fotodiodo de estado sólido que actúa como el receptor.



*Figura 2.26 Funcionamiento del sensor óptico*

Los conos de luz formados enfocando la fuente y el detector en el mismo plano se intersecan en un volumen largo en forma de lápiz. Este volumen define el campo de operación del sensor, puesto que una superficie reflectora que interseca el volumen se ilumina por la fuente y es vista simultáneamente por el receptor. Dicho de otro modo una superficie localizada en cualquier lugar en el volumen producirá una lectura. Aunque es posible calibrar la intensidad de estas lecturas como una función de la distancia para características reflectoras y orientaciones del objeto conocidas, la aplicación típica, está en un modo en donde una señal binaria recibe una intensidad de luz superior a un valor umbral.

### 2.8.2.1 Sensor IS471F

Es un sensor basado en el dispositivo IS471F (Figura 2.27) inmune a interferencias de luz normal. Incorpora un modulador/demodulador integrado en su carcasa y a través de su pin 4 controla un diodo LED infrarrojo externo, modulando la señal que éste emitirá, para ser captada por el IS471F que contiene el receptor. Cuando un objeto se sitúa en frente del conjunto emisor/receptor parte



de la luz emitida es reflejada y demodulada para activar la salida en el pin 2 que pasará a nivel bajo si la señal captada es suficientemente fuerte. El uso de luz IR modulada tiene por objeto hacer al sensor relativamente inmune a las interferencias causadas por la luz normal de una bombilla.

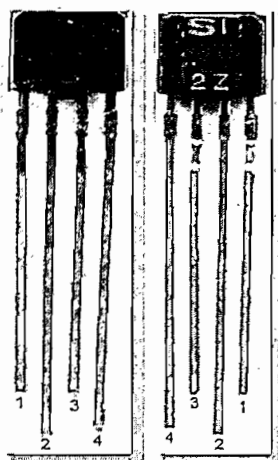


Figura 2.27. Sensor IS471F

Como puede verse en el esquema de la Figura 2.28, el sensor se alimenta por sus pines 1 y 3 y estas corresponden a Vcc y Gnd respectivamente, el pin 2 es la salida del detector y el 4 es la salida que modula al led emisor externo.

**Acondicionamiento:** Mediante el potenciómetro P1 se varía la distancia a la que es detectado el objeto. Mientras más baja sea la resistencia de este potenciómetro, más intensa será la luz emitida por el diodo de infrarrojo y por lo tanto mayor la distancia a la que puede detectar el objeto. En la Figura 2.28 se ve el simple circuito necesario para hacer funcionar al sensor.

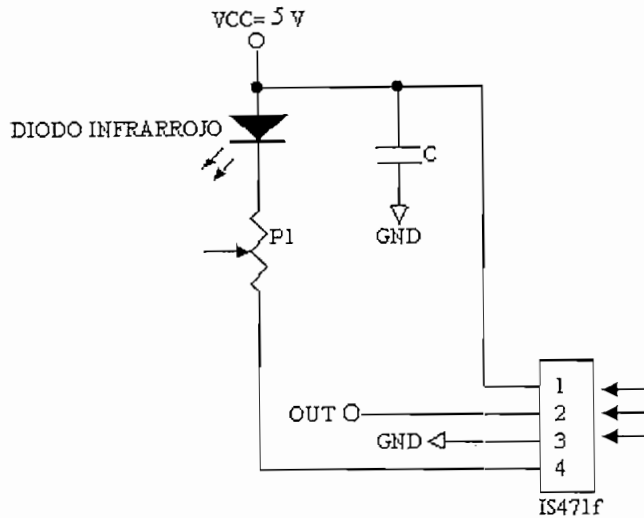


Figura 2.28 Módulo del sensor IS471F

En el circuito de acondicionamiento implementado en el robot la resistencia que se ocupó en vez del potenciómetro fue de 82 ohmios con lo que el sensor detecta un objeto a una distancia máxima de 13 cm aproximadamente, lo cual es suficiente para la aplicación.

### 2.8.3 SENSORES DE ULTRASONIDO Y ACONDICIONAMIENTO

El funcionamiento de los sensores ultrasónicos se basa en el principio de que las ondas de sonido viajan a través de un medio a una velocidad constante; mediante la medición precisa del pulso de sonido transmitido y la reflexión del mismo en un obstáculo, es posible determinar la distancia del mismo [12].

El sensor emite un haz (impulsos de ultrasonidos inaudibles para el oído humano) localizado en la banda de ultrasonido (arriba de 20 KHz), este haz viaja a línea recta a una velocidad aproximada de 150 m/s cuando se transmite en el agua y a una velocidad de 340 m/s aproximadamente en el aire a una temperatura de 20°C; cuando este haz encuentra un objeto, choca con él y parte del haz es reflejado produciendo "eco", este reflejo es detectado por un receptor que es amplificado y transformado en una señal utilizable, al medir el tiempo entre la

emisión y recepción del eco puede entonces calcularse la distancia a la cual se encuentra el objeto. La dirección en la cual se encuentra el objeto detectado estará mejor precisada cuanto mayor sea la directividad del haz, en otras palabras cuanto más estrecho sea el haz de energía emitido, el objeto se detectará con mayor precisión logrando que no se pueda detectar más que un obstáculo a la vez.

Las ventajas que ofrecen estos dispositivos son: bajo costo y mayor alcance que los dispositivos con luz infrarroja; comparado con los sensores de tacto, los dispositivos basados en ultrasonido detectan los objetos antes y no se realiza contacto físico, lo cual evita el desgaste de este tipo de sensores, estos dispositivos no son afectados por características externas aleatorias como puede ser: la intensidad de la luz o el tipo de luz (natural o artificial), etc. Entre sus desventajas pueden citarse que la velocidad del sonido es afectada por la temperatura y por el medio en que viaja; sin embargo, para propósitos generales en autómatas, el medio que se usa es el aire; cabe señalar que aunque se afecta la velocidad, realmente las mediciones dadas por dicho sensor son afectadas únicamente cuando las temperaturas son extremas. Otra desventaja consiste en que los datos proporcionados pueden verse alterados debido al ruido eléctrico y por reflexiones no deseadas. Por último, los datos obtenidos mediante esta forma son muy generales y no puede definirse un objeto con facilidad.

### 2.8.3.1 Transmisor de Ultrasonido

El transmisor del sensor ultrasonido a emplearse tiene las siguientes especificaciones [13]:

- Frecuencia central (KHz) : 40.0 ± 1.0
- Nivel de Presión del Sonido : 119 dB/40± 1.0KH  
(0 dB= 0.0002 μbar) /10V SN/30cm/Min.
- Ancho de Banda (KHz) Min. : 4.0 / 112 dB

- Capacitancia (pF) : 2000 ± 30%

En el microcontrolador PIC se genera la señal de los pulsos para la activación del transmisor de ultrasonido.

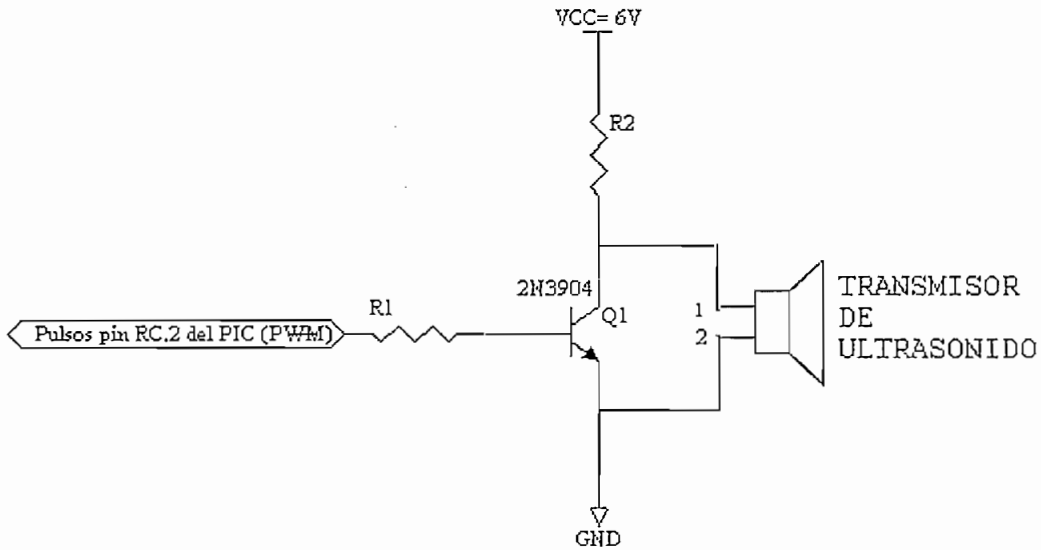


Figura 2.29 Acondicionamiento del Transmisor de Ultrasonido

Para alimentar el transmisor de ultrasonido con 6 V se utiliza un transistor de juntura bipolar (TBJ) trabajando en la zona de corte y saturación. El valor de la resistencia R1 se obtiene fijando la corriente necesaria para activar el transistor TBJ en 15 mA; como el voltaje corresponde al nivel del pulso emitido por el PIC, se aplica la ecuación:

$$R1 = \frac{\text{Voltaje}}{\text{Corriente}} = \frac{5V}{15mA} = 333,33\Omega$$

Por lo que la resistencia R1 será de 330 Ω. La resistencia R2 es de 1 KΩ.

### 2.8.3.2 Receptor de Ultrasonido

El receptor de ultrasonido empleado presenta las siguientes especificaciones [13]:

- Frecuencia central (KHz) :  $40.0 \pm 1.0$
- Sensibilidad Mínima :  $65 \text{ dB}/40 \pm 1.0 \text{ KH}$   
(0 dB vs IV  $\mu\text{bar}$ ) ( R = 3.9 K $\Omega$  )
- Ancho de Banda (KHz) Min. :  $3.5 / ( a -71 \text{ dB} )$
- Capacitancia (pF) :  $2000 \pm 30\%$

En el acondicionamiento del receptor de ultrasonido se utilizó el detector de tonos LM567; con este dispositivo se reduce la cantidad de elementos que serían necesarios para acondicionar la señal senoidal de frecuencia constante proveniente del receptor.

El LM567 se usa para detectar una señal con una frecuencia específica, dicha frecuencia es calibrada conectando resistencias y capacitancias en los terminales de este detector de tonos.

El instante en que detecta una señal con la frecuencia fijada, envía un pulso en nivel bajo (0 lógico) cuyo tiempo de duración depende de la amplitud de la señal de entrada, es decir, mayor será la duración del pulso mientras mayor sea la amplitud de la señal.

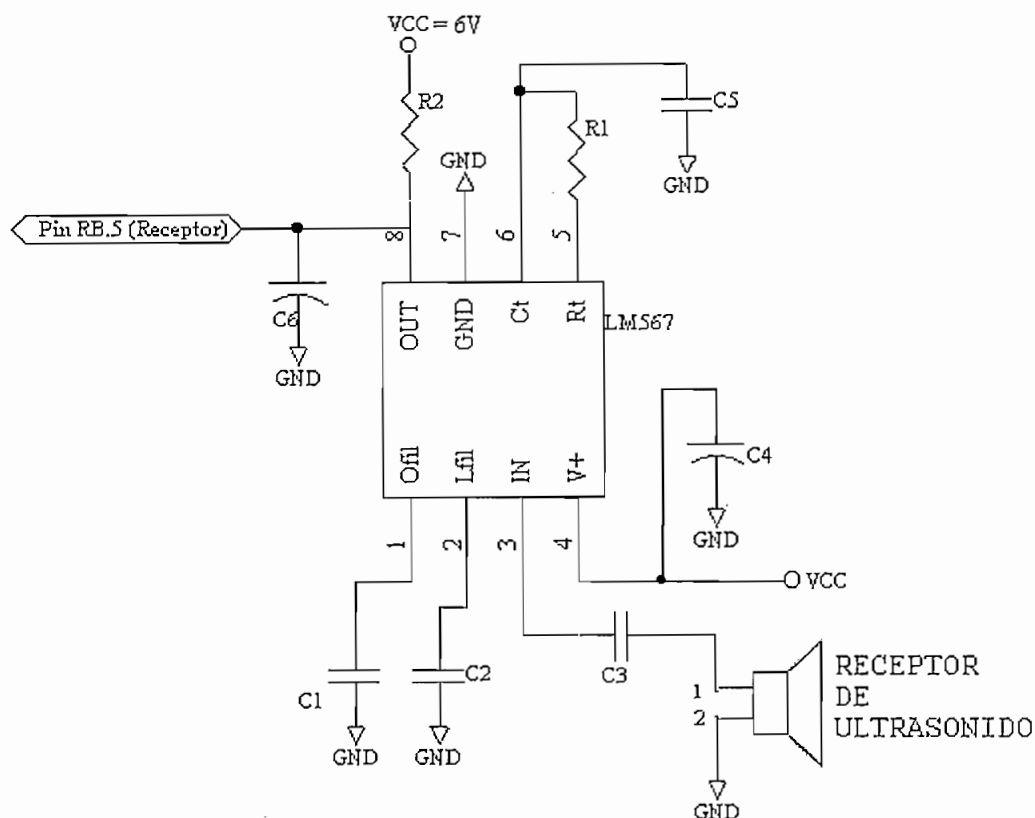


Figura 2.30 Acondicionamiento del Receptor de Ultrasonido

La Figura 2.30 presenta el circuito con los elementos que permiten acondicionar el receptor de ultrasonido.

Los capacitores utilizados para el funcionamiento del detector de tonos LM567 tienen los valores sugeridos en las hojas de especificaciones de dicho dispositivo, y estos son:  $C1 = 22 \text{ pF}$ ,  $C2 = 4.7 \text{ nF}$ ,  $C3 = 0.01 \text{ uF}$  y  $C4 = 1 \text{ uF}$ .

La frecuencia central del decodificador de tonos debe ser igual a la frecuencia de la señal de entrada en el pin 3 y viene dada por:

$$\text{frecuencia central} = f_0 = \frac{1}{1.1 \cdot R1 \cdot C5}$$

De esta ecuación se calcula la resistencia R1 y el capacitor C5. Para una frecuencia central de 40 KHz se asume un capacitor C5 = 0.01 uF y se determina el valor de la resistencia R1.

$$R1 = \frac{1}{1.1 \cdot f_0 \cdot C5} = \frac{1}{1.1 \cdot 40000 \text{ Hz} \cdot 0.01 \mu\text{F}} = 2272,72 \ \Omega$$

Normalizando la resistencia, se emplea una de 2,2 K $\Omega$ .

La resistencia R2 corresponde a la resistencia de carga del circuito, lo cual según las hojas de características debe ser mayor a 200  $\Omega$  para un voltaje de 6 V [14]. Para la aplicación se utilizó una resistencia de 3,3 K $\Omega$ .

El capacitor C6 de 10 uF se emplea para eliminar la señal que se genera en el receptor a causa de la emisión de ultrasonido cerca de él, la desventaja de usar esta capacitancia es la formación de la zona muerta .

Finalizada el acondicionamiento del receptor, el pin de salida se conecta a un pin del microcontrolador, entonces al detectar algún obstáculo se producirá un cambio de estado en la señal de salida del detector (0L) e ingresará a al pin de interrupción por cambio de estado.

## 2.9 ACTUADORES Y CONTROL

Los actuadores más utilizados en robots con patas articuladas son los servomotores, debido a que permite un control preciso, es decir se puede controlar exactamente la posición del eje del mismo en cualquier instante, lo que no sucede con los motores de revolución completa, además de ser posible controlarlo con cualquier microcontrolador. Puesto que para el movimiento del hexápodo, las patas deben movilizarse en distintas posiciones, es ideal ocupar los servos con los cuales se consigue colocar las articulaciones en la posición

deseada. Otra razón importante por la que se escoge este tipo de actuador es su tamaño que permite ubicarlo con facilidad en el robot. Sin embargo una de las principales desventajas de éstos es su alto costo y la falta de disponibilidad de los mismos en el mercado nacional.

### 2.9.1 SERVOMOTORES Y SU CONTROL

Los servos son un tipo especial de motor que se usan en aviones, coches y vehículos a escala a control remoto. El diagrama de un servomotor típico se presenta en la Figura 2.31:

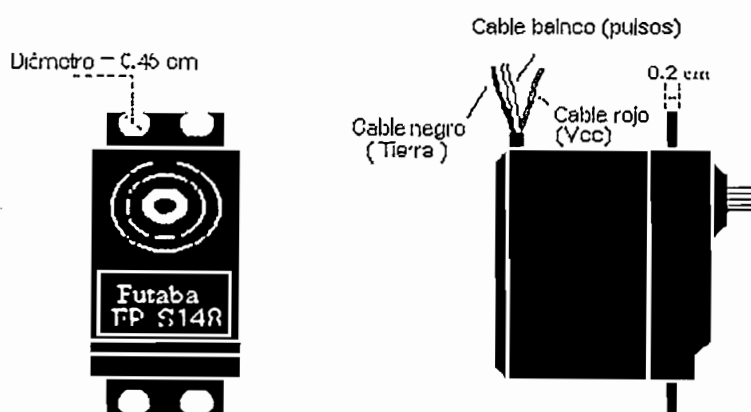


Figura 2.31 Un servomotor

Un servomotor es básicamente un motor eléctrico que sólo se puede mover en un ángulo de aproximadamente  $180^\circ$  (no dan vueltas completas como los motores normales). Consta de tres cables que salen de su cajita. El rojo es de alimentación de voltaje (+5V), el negro es de tierra (GND). El cable blanco (en ocasiones amarillo) es el cable por el cual se le pide al servomotor en qué posición acomodarse (de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ ).

Dentro del servomotor, una tarjeta controladora le dice a un pequeño motor de corriente cuánto debe girar para acomodar la flecha (la hélice de plástico que sale al exterior) en la posición que se le ha pedido.



La Figura 2.32 muestra cómo están acomodadas estas piezas dentro del servo:

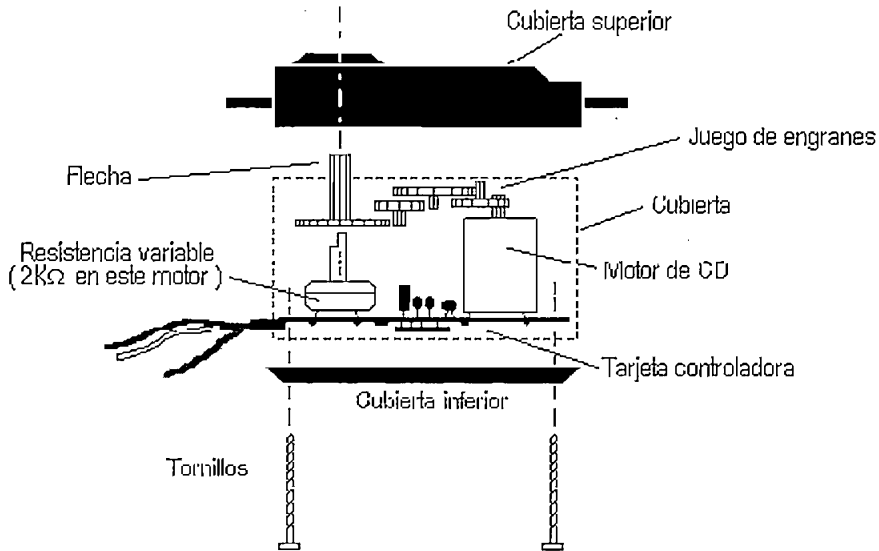


Figura 2.32. Estructura de un servomotor

La resistencia variable está sujeta a la flecha, y mide hacia dónde está rotada en todo momento. Es así como la tarjeta controladora sabe hacia dónde mover al motor.

El control de la posición deseada para el servomotor se genera por medio de pulsos. Todo el tiempo debe haber una señal de pulsos enviados por ese cable. La señal de pulsos controla al servo de la siguiente forma:

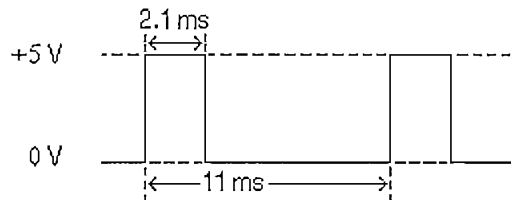


Figura. 2.33 Onda PWM para el control de un servomotor

Nótese en la Figura 2.33 que el intervalo de tiempo entre pulsos se mantiene constante, y la variación del ancho de los mismos es lo que le indica al servo la posición que se desea. Responden adecuadamente a pulsos desde 50 Hz hasta

aproximadamente 100 Hz, pero una vez escogida una frecuencia de operación debe procurarse mantener la misma frecuencia todo el tiempo.

Los servomotores usados corresponden a los FUTABA S3003 y FP-S148, los cuales son servos estándares cuyos torques son de 44,4 onz/in para 4,8 V y de 57 onz/in para 6 V de alimentación; y tienen una velocidad estándar del movimiento del eje igual a 0,23 seg/60°.

Tienen varias aplicaciones en robots con patas para movimiento y posicionamiento de las articulaciones, en robots sin patas, en aviones y vehículos de competencia a escala, para posicionar una cámara o pinza acoplada al robot, entre otras.

## **2.10 SISTEMA MICROPROCESADO**

Los microcontroladores están conquistando el mundo ya que están presentes en nuestro trabajo, en nuestra casa y en nuestra vida, en general. Se pueden encontrar controlando el funcionamiento de los ratones y teclados de los computadores, en los teléfonos, en los hornos microondas y los televisores de nuestro hogar. Pero la invasión acaba de comenzar y el nacimiento del siglo XXI será testigo de la conquista masiva de estos diminutos computadores, que gobernarán la mayor parte de los aparatos que fabrican y usan los humanos.

En la actualidad, todos los elementos del controlador se han podido incluir en un chip, el cual recibe el nombre de microcontrolador. Realmente consiste en un sencillo pero completo computador contenido en el corazón de un circuito integrado (chip).

Un microcontrolador es un circuito integrado de alta escala de integración que incorpora la mayor parte de los elementos que configuran un controlador.

Un microcontrolador dispone normalmente de los siguientes componentes:

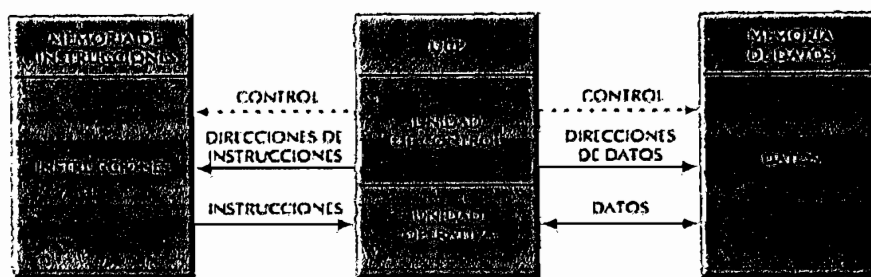
- Procesador o UCP (Unidad Central de Proceso).
- Memoria RAM para Contener los datos.
- Memoria para el programa tipo ROM/PROM/EPROM.
- Líneas de E/S para comunicarse con el exterior.
- Diversos módulos para el control de periféricos (temporizadores, puertos serie y paralelo, conversores Analógico/Digital, Conversores Digital/Analógico, etc).
- Generador de impulsos de reloj que sincronizan el funcionamiento de todo el sistema.

El microcontrolador es en definitiva un circuito integrado que incluye todos los componentes de un computador. Debido a su reducido tamaño es posible montar el controlador en el propio dispositivo al que gobierna. En este caso, el controlador recibe el nombre de *controlador empotrado* (embedded controller).

### 2.10.1 MICROCONTROLADORES PIC

La arquitectura del procesador sigue el modelo Harvard. En esta arquitectura, la CPU se conecta de forma independiente y con buses distintos con la memoria de instrucciones y con la de datos.

La arquitectura Harvard permite a la CPU acceder simultáneamente a las dos memorias. Además, propicia numerosas ventajas al funcionamiento del sistema como se irán describiendo.



*Figura 2.34 La arquitectura Harvard dispone de dos memorias independientes para datos y para instrucciones, permitiendo accesos simultáneos.*

En los microcontroladores PIC la memoria de programa es interna puesto que se halla en forma de EEPROM o FLASH integrada en el propio chip. Se aplica la técnica de segmentación ("pipe-line") en la ejecución de las instrucciones. La segmentación permite al procesador realizar al mismo tiempo la ejecución de una instrucción y la búsqueda del código de la siguiente. De esta forma se puede ejecutar cada instrucción en un ciclo (un ciclo de instrucción equivale a cuatro ciclos de reloj). Las instrucciones de salto ocupan dos ciclos al no conocer la dirección de la siguiente instrucción hasta que no se haya completado la de bifurcación.

Poseen un procesador e arquitectura RISC (Computador de Juego de Instrucciones Reducido), el cual dispone de un repertorio de 33 instrucciones para gama baja, 35 los de la gama media y casi 60 los de la alta. Todas las instrucciones son ortogonales, es decir, cualquier instrucción puede manejar cualquier elemento de la arquitectura como fuente o como destino. Además, su arquitectura está basada en un "banco de registros", esto significa que todos los objetos del sistema (puertas de E/S, temporizadores, posiciones de memoria, etc.) están implementados físicamente como registros.

Para el desarrollo del robot móvil, se utiliza un microcontrolador PIC 16F877, el mismo que posee las características generales de los microcontroladores PIC descritas con anteriormente y características específicas enunciadas seguidamente:

- Procesador de arquitectura RISC avanzada
- Juego de 35 instrucciones con 14 bits de longitud. Todas ellas se ejecutan en un ciclo de instrucción, menos las de salto que tardan dos.
- Frecuencia de 20 MHz.
- 8 K palabras de 14 bits para la Memoria de Código, tipo FLASH.
- 368 bytes de Memoria de Datos RAM.
- 256 bytes de memoria de Datos EEPROM.
- Catorce fuentes de interrupción internas y externas.
- Modos de direccionamiento directo, indirecto y relativo.
- Perro Guardián (WDT).
- Modo SLEEP de bajo consumo.
- Tres temporizadores
- Dos módulos de captura-comparación PWM.
- Conversor A/D de 10 bits.
- Puerto Serie Síncrono (SSP) con SPI e I<sup>2</sup>C.
- USART.
- Puerta Paralela Esclava (PSP).

La Figura 2.35 muestra el encapsulado con la distribución de pines del microcontrolador PIC 16F877.

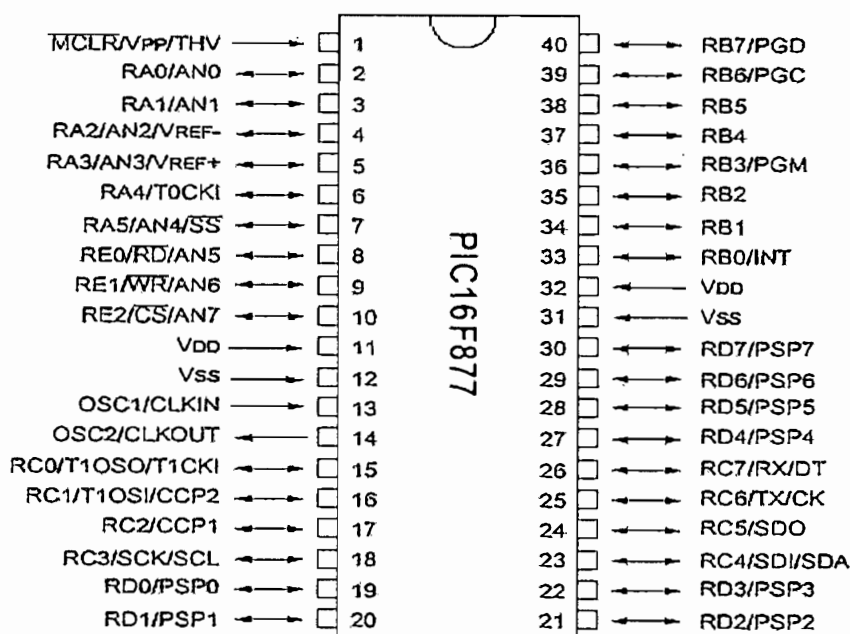


Figura 2.35 Microcontrolador PIC 16F877

## 2.10.2 DESCRIPCIÓN DE LA TARJETA DEL MICROCONTROLADOR PIC

Al analizar el robot hexápodo y después de haber estudiado algunos robots que se han elaborado, se utilizó como cerebro del robot un microcontrolador de la familia de la gama media 16F877 que consta de 40 pines.

El motivo de usar el microcontrolador pic es por la complejidad que lleva realizar el control de los servos sin utilizar algún tipo de ayuda electrónica como son los temporizadores y las interrupciones. Otra razón es que aun disponiendo de algún recurso del tipo anterior, no cualquier microcontrolador los tiene en un número suficiente, es por eso que se optó por escoger el pic 16F877 que posee lo necesario para los objetivos planteados.

El autómatas consta de varios dispositivos para que pueda ejecutar las diferentes funciones el momento de su encendido, es por eso que el microcontrolador 16F877 dispone de los pines indispensables para conectar a cada uno de los elementos que hacen mover al robot.

En la Figura 2.36 se puede apreciar la distribución de los componentes del circuito.

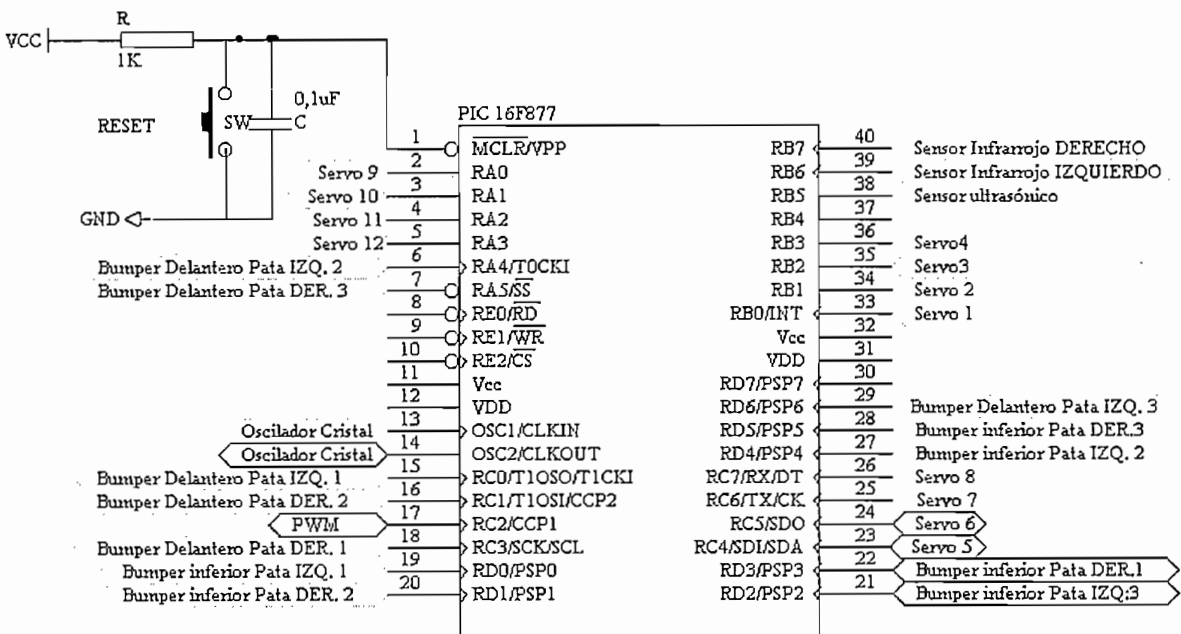


Figura 2.36 Distribución de los componentes de la tarjeta del microcontrolador

Luego de describir el por qué se escogió el pic 16F877, se enumeran los dispositivos que se han usado y posteriormente la situación de cada puerto del controlador.

En el pin 1 del PIC se conecta el pulsador para reset.

Los pines del 2 al 5, del puerto A, que corresponden a los bits RA0, RA1, RA2 y RA3 respectivamente, se configuran mediante el programa como salidas digitales y corresponden a las señales PWM que se generan para controlar a los servomotores que según sea la duración del pulso se sitúan en diferentes posiciones. Estos motores comandan el posicionamiento de cada pata del autómeta. Se utiliza un servo para el movimiento vertical de cada pata y otro para el desplazamiento horizontal de la misma; es decir, se tiene un servo por cada articulación y dos servos por cada pata.

Los bits del puerto A, RA4 y RA5, están configurados como entradas digitales y son los pines donde se conectan los bumpers (o finales de carrera) de cada pata. En la parte delantera de las patas se ubica un bumper el cual se usa en el recorrido del robot. Cuando éste haya tocado un obstáculo, el hexápodo alza la pata más de lo que lo hace normalmente cuando se encuentra caminando, y trepa el objeto. Más adelante se explica detalladamente en que momento actúan en el programa estos dispositivos.

Los pines 13 y 14 son la entrada y salida del reloj, para la conexión del cristal. Para este caso se utiliza un oscilador TTL tipo XT, con cristal de 4 MHz. A cada pin del oscilador se le conecta un capacitor de 22 pF cuyo otro extremo está a tierra. En la Figura 2.37 se presenta el esquema de conexión de este tipo de oscilador hacia el PIC.

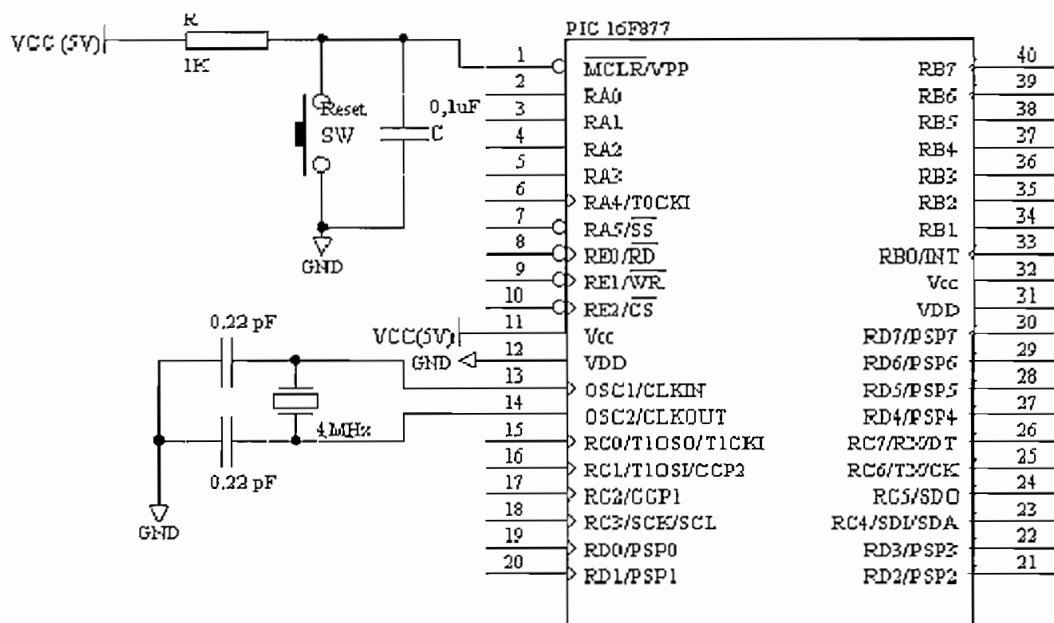


Figura 2.37 Esquema de conexión del oscilador

Los pines 15, 16 y 18 (bits RC0, RC1 y RC3 del Puerto C respectivamente) y el pin 29, RD6, del Puerto D, están configurados como entradas digitales y son donde se conectan los cuatro bumpers restantes para las otras patas. En estado normal, estos pines se encuentran en 0 lógico, cuando se pulsa cualquiera de ellos pasa a 1 lógico y genera el movimiento de ascenso de la pata para subir el objeto. Su conexión hacia el pic se puede observar en la Figura 2.38.

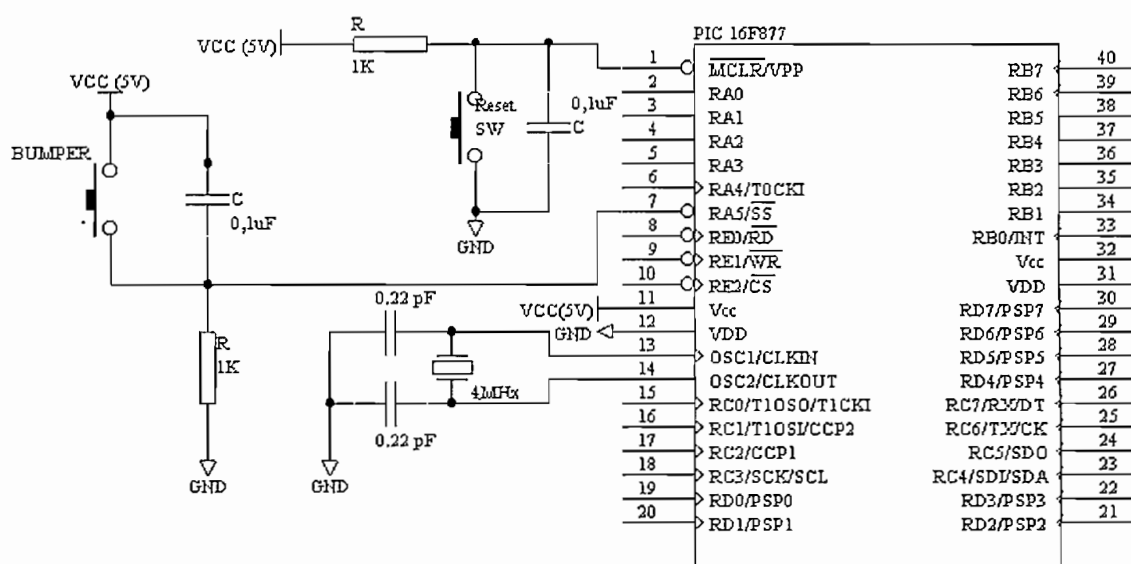


Figura 2.38. Conexión del bumper delantero de una pata de robot hacia el pic



El pin 17 del Puerto C, que es el bit RC2, se configura como salida digital y corresponde a la señal PWM de 40 KHz que necesita el sensor ultrasónico para operar.

En el Puerto C, los pines 23, 24, 25 y 26, que son los bits RC4, RC5, RC6 y RC7; y los pines 33, 34, 35 y 36 del Puerto B, que pertenecen a los bits RB0, RB1, RB2 y RB3; se configuran en el programa como salidas digitales y por ellas se envían las señales PWM que se envían al pin de control de los ocho siguientes servomotores. La conexión de un servomotor al pic se presenta en la Figura 2.39.

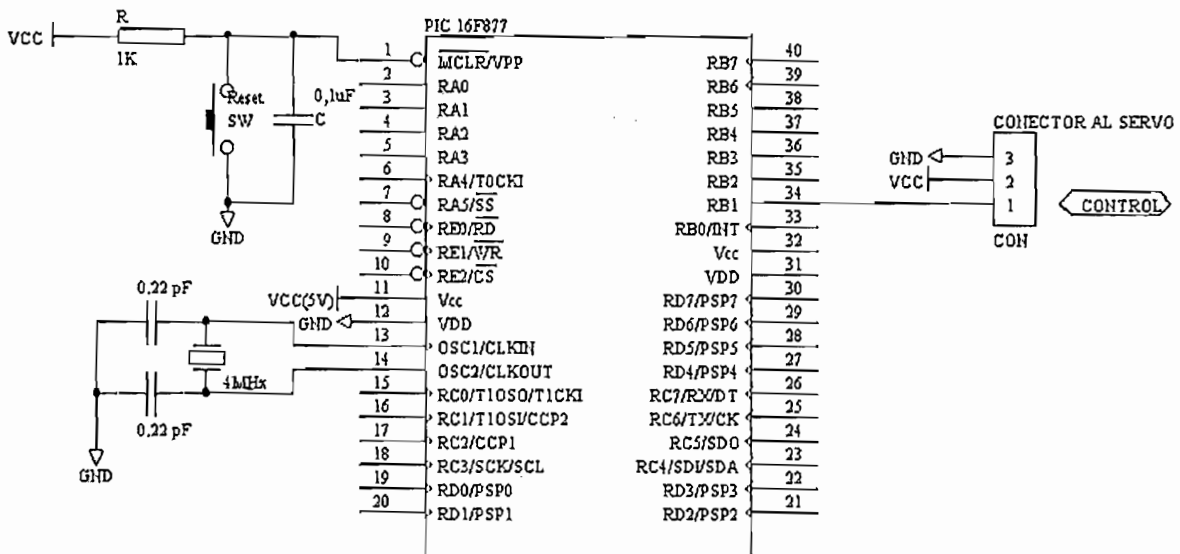


Figura 2.39 Conexión del servomotor al pic

Del Puerto B, los bits RB5, RB6 y RB7, cuyos pines son 38, 39 y 40 respectivamente, se encuentran configurados en el programa como entradas digitales; en RB5 se encuentra conectado el sensor de ultrasonido, y en RB6 y RB7 están conectados los sensores infrarrojos Sharp IS471F. El esquema del circuito que se requiere para hacer funcionar los sensores, descrito detalladamente en el capítulo 2, se muestra en la Figura 2.40

Figura 2.41 Conexión del bumper inferior de una pata de robot hacia el pic

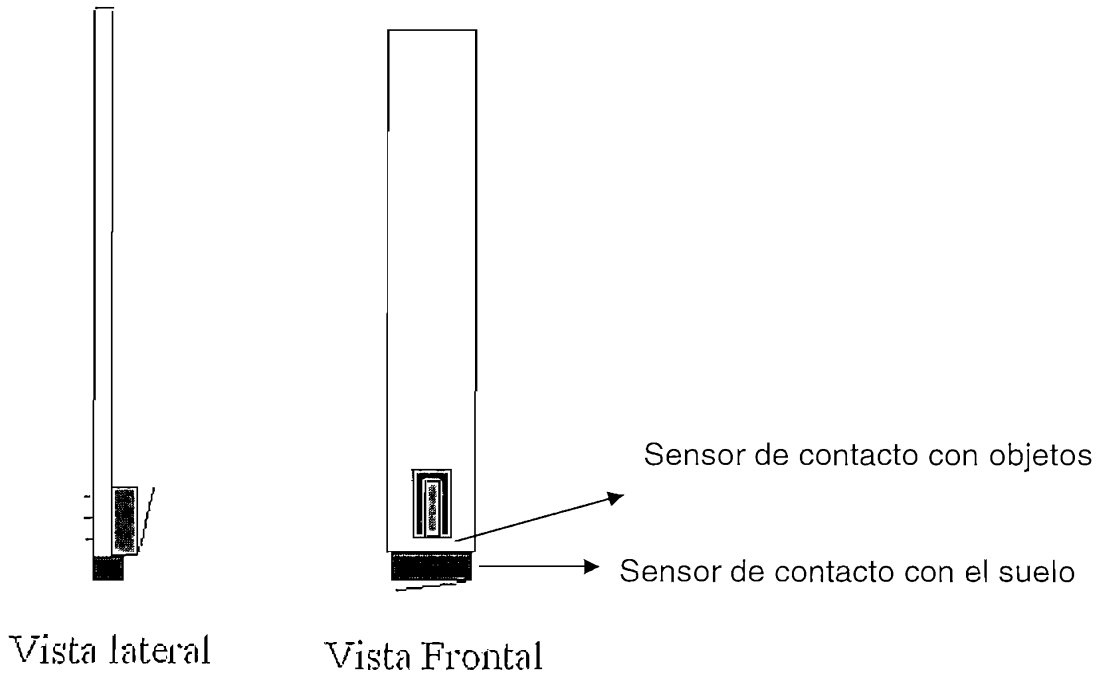
se manejan con 6V y no con 4.8V, el torque de éstos se incrementa. Como el hexápodo tiene un tamaño y peso considerable, de 1,42 Kg, y los FUTABA tiene un torque de 44,4 oz/inch a 4,8 V y de 57 oz/inch a 6V, se optó por usar 6V para lograr mover al robot con mayor seguridad.

El autómatas utiliza para el funcionamiento de los sensores, servomotores y del sistema de control una batería de 6V conformada por cinco pilas de 1.2 V cuyo compuesto químico es níquel – metal hidróxido (NiMh), de 2100 mA/h, lo que es de gran ayuda para el manejo de los doce servos. En la alimentación del acondicionamiento del sensor ultrasónico y de los servomotores se usó las 5 pilas (6 V) y para alimentar a los sensores infrarrojos y al circuito de control se utilizó cuatro pilas que proporcionan 4.8 V. Estas pilas son recargables y además están protegidas de sobrecorriente por dos fusibles (uno para cada fuente) colocados en la parte externa al circuito.

## **2.11 UBICACIÓN FÍSICA DE LOS SENSORES**

### **2.11.1 UBICACIÓN DE LOS SENSORES DE CONTACTO**

Como se explicó anteriormente, para que el robot pueda caminar y subir obstáculos es imprescindible colocar dos sensores de fin de carrera o bumper, tanto en la parte frontal de la articulación principal para detectar obstáculos pequeños en el recorrido horizontal de la pata, como en la parte inferior para detectar el contacto con el suelo. En la Figura 2.40 se puede apreciar la disposición de estos sensores en la pata.

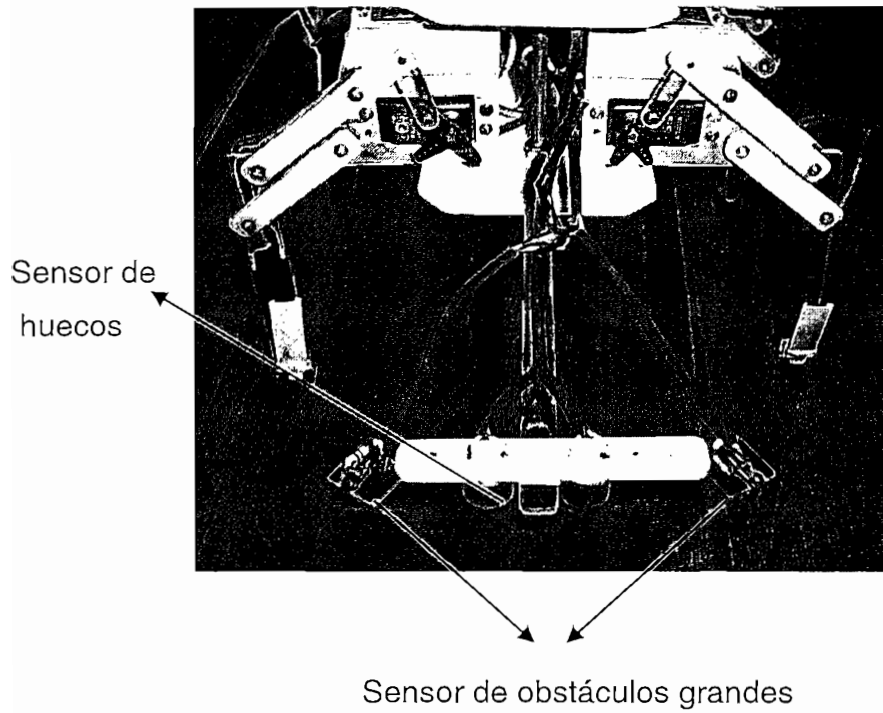


*Figura 2.42 Disposición de los sensores en la pata*

### 2.11.2 UBICACIÓN DE LOS SENSORES DE PROXIMIDAD

Los sensores de proximidad de huecos están ubicados a 13 cm del borde frontal del robot, para permitirle al mismo tener el espacio suficiente para retroceder y curvar evitando el hueco con antelación.

Los sensores de proximidad de obstáculos grandes están ubicados a los costados de la placa que sirve de soporte a los sensores de proximidad de huecos, de manera que estén alejados del robot. Además están colocados con una ligera inclinación hacia fuera para detectar los obstáculos grandes con efectividad, aun si el robot no se aproxima de frente, sino de lado a los mismos. La Figura 2.43 muestra la ubicación de los sensores en el robot.



*Figura 2.43 Ubicación de los sensores de proximidad.*

## CAPÍTULO 3

# CAPÍTULO 3

## CONTROL DEL ROBOT HEXÁPODO

### 3.1 INTRODUCCIÓN

El programa de control para los diferentes movimientos y acciones del robot autómatas fue elaborado totalmente en lenguaje ensamblador con la ayuda del software proporcionado por Microchip, MPLAB 5.70. Dicho software permite desarrollar proyectos para varios tipos de microcontroladores PIC incluidos los de la familia PIC16F87X. Con él se puede editar y simular programas que luego son descargados en el microcontrolador.

El objetivo del programa de control es hacer que el robot hexápodo actúe de forma automática, es decir, una vez encendido, se desplaza libremente en su entorno de trabajo evitando los obstáculos que se encuentran en su trayectoria.

En la figura 3.1 se aprecia la arquitectura del programa.

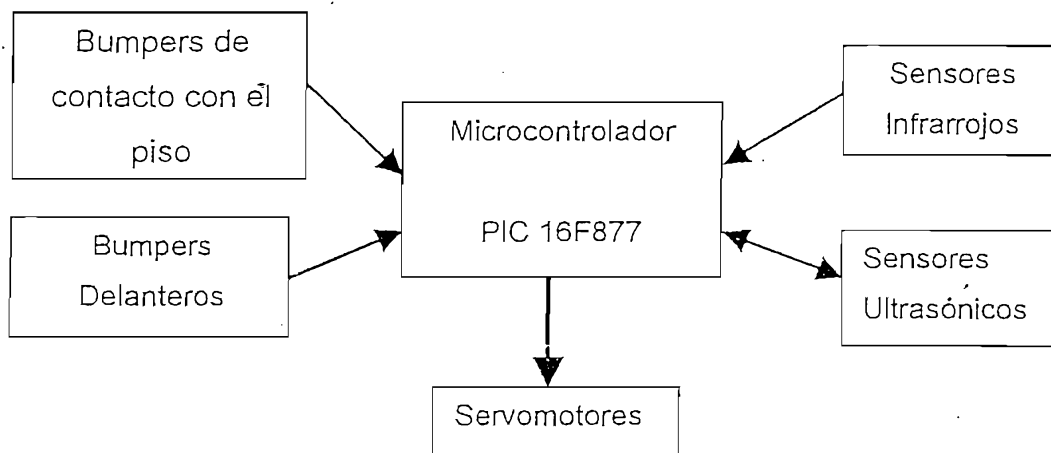


Figura 3.1. Arquitectura del programa de control

Dentro de su ambiente de trabajo, el robot se encuentra caminando normalmente y toma diferentes decisiones frente a distintas situaciones. Si encuentra obstáculos grandes, los sensores los detectan y el robot retrocede y gira al lado derecho o izquierdo; y si son objetos pequeños posee la facultad de escalarlos. Además el hexápodo tiene la facultad de detectar superficies altas que las puede o no descender, si no le es posible retrocede y gira para evitar dicho obstáculo. Con esto se pretende independizar al robot para que pueda actuar de manera autónoma.

El programa ha sido desarrollado en forma modular, es decir en base a un programa principal y a la utilización de subrutinas para las diferentes actividades que ejecuta el robot. A continuación se realiza una descripción detallada del programa de control, se explican los algoritmos y rutinas en el microcontrolador para los movimientos del robot hexápodo: caminata, retroceso, movimiento al lado izquierdo y derecho, ascenso y decisiones de desplazamiento frente a diferentes obstáculos, y finalmente en el ANEXO E se presentan los diagramas de flujo para indicar específicamente como se relacionan las subrutinas de movimientos del hexápodo.

Para poder entender los movimientos que ejecutan las patas del robot hexápodo en todas sus funciones, es necesario numerar los trípodes que forman las patas del robot, y los servomotores. En las Figuras 3.2. y 3.3 se presenta dicha numeración.

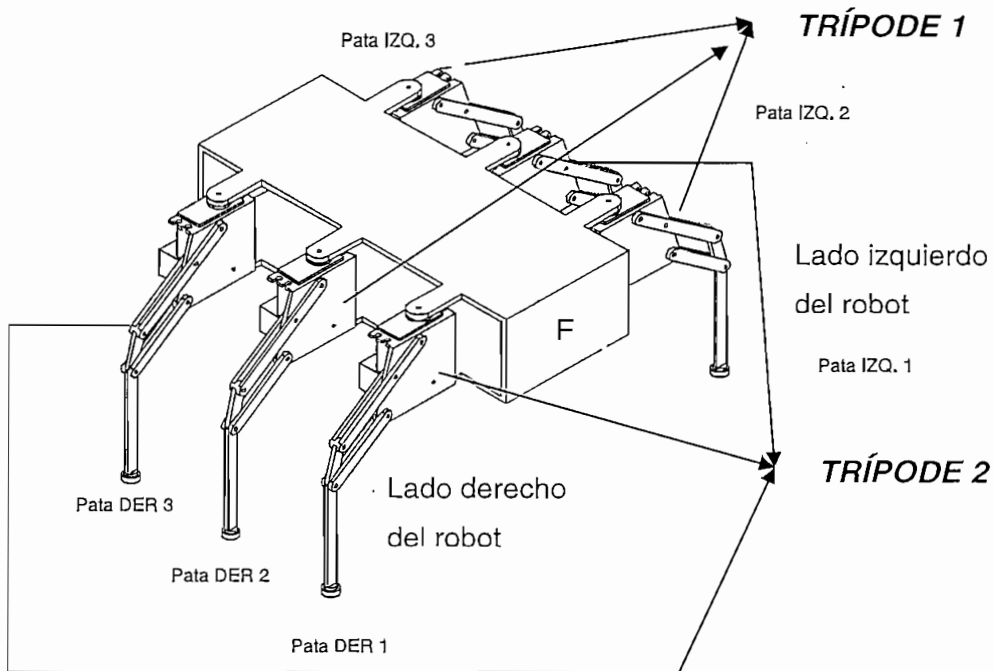
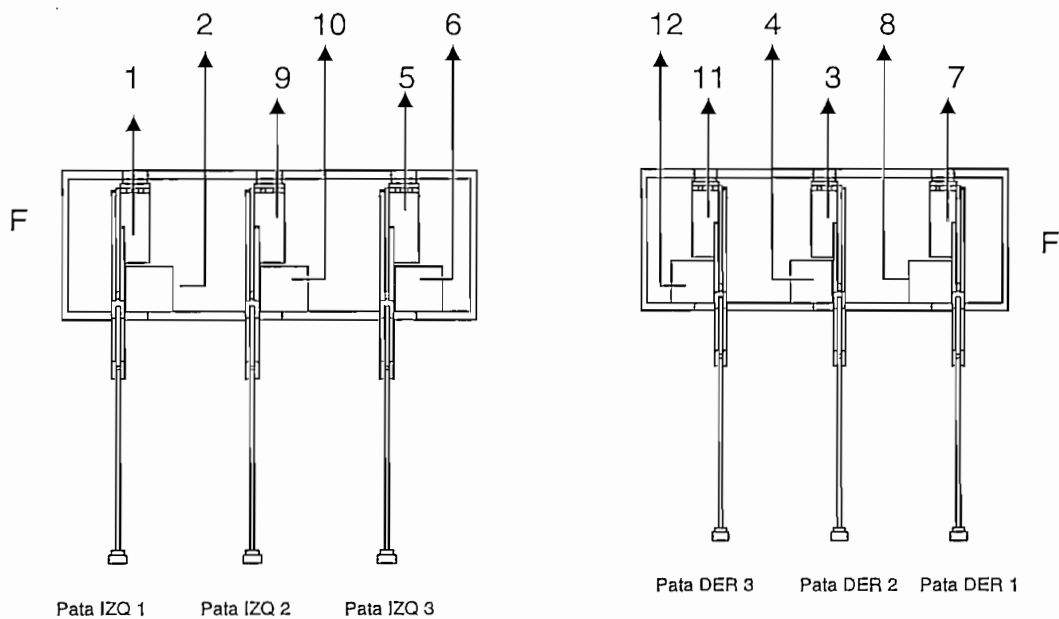


Figura 3.2 Numeración de los trípodes del robot hexápodo



Figuras. 3.3 Numeración de los servomotores del robot hexápodo

La letra F indica la parte delantera del robot.



Con esta identificación de las patas y servos, en la Tabla 3.1 se aprecia claramente cuál es el pin y el número de servo que controla, y el pin con el bumper al cual está conectado.

*Tabla 3.1 Designación de los pines del microcontrolador*

NOMBRE		DESIGNACIÓN DE VARIABLE	FUNCIÓN
NÚMERO DE PIN	PIN		
33	PB.0	SALIDA	PWM para control del servo 1 (posicionamiento horizontal de la pata IZQ.1)
34	PB.1	SALIDA	PWM para control del servo 2 (posicionamiento vertical de la pata IZQ.1)
35	PB.2	SALIDA	PWM para control del servo 3 (posicionamiento horizontal de la pata DER.2)
36	PB.3	SALIDA	PWM para control del servo 4 (posicionamiento vertical de la pata DER.2)
23	PC.4	SALIDA	PWM para control del servo 5 (posicionamiento horizontal de la pata IZQ.3)
24	PC.5	SALIDA	PWM para control del servo 6 (posicionamiento vertical de la pata IZQ.3)
25	PC.6	SALIDA	PWM para control del servo 7 (posicionamiento horizontal de la pata DER.1)
26	PC.7	SALIDA	PWM para control del servo 8 (posicionamiento vertical de la pata DER.1)
2	PA.0	SALIDA	PWM para control del servo 9 (posicionamiento horizontal de la pata IZQ.2)
3	PA.1	SALIDA	PWM para control del servo 10 (posicionamiento vertical de la pata IZQ.2)
4	PA.2	SALIDA	PWM para control del servo 11 (posicionamiento horizontal de la pata DER.3)
5	PA.3	SALIDA	PWM para control del servo 12 (posicionamiento vertical de la pata DER.3)
15	PC.0	ENTRADA	Conexión del bumper delantero de la pata IZQ 1 que actúa en el ascenso de obstáculos
16	PC.1	ENTRADA	Conexión del bumper delantero de la pata DER 2 que actúa en el ascenso de obstáculos
29	PD.6	ENTRADA	Conexión del bumper delantero de la pata IZQ 3 que actúa en el ascenso de obstáculos
18	PC.3	ENTRADA	Conexión del bumper delantero de la pata DER 1 que actúa en el ascenso de obstáculos
6	PA.4	ENTRADA	Conexión del bumper delantero de la pata IZQ 2 que actúa en el ascenso de obstáculos
7	PA.5	ENTRADA	Conexión del bumper delantero de la pata DER 3 que actúa en el ascenso de obstáculos

Tabla 3.1 Continuación

19	PD.0	ENTRADA	Conexión del bumper en la base de la pata IZQ 1 para hacer contacto con la superficie
20	PD.1	ENTRADA	Conexión del bumper en la base de la pata DER 2 para hacer contacto con la superficie
21	PD.2	ENTRADA	Conexión del bumper en el pie de la pata IZQ 3 para hacer contacto con la superficie
22	PD.3	ENTRADA	Conexión del bumper en el pie de la pata DER 1 para hacer contacto con la superficie
27	PD.4	ENTRADA	Conexión del bumper en el pie de la pata IZQ 2 para hacer contacto con la superficie
28	PD.5	ENTRADA	Conexión del bumper en el pie de la pata DER 3 para hacer contacto con la superficie
38	PB.5	ENTRADA	Conexión del sensor ultrasónico para detectar los obstáculos
39	PB.6	ENTRADA	Conexión del sensor infrarrojo derecho para detectar los obstáculos
40	PB.7	ENTRADA	Conexión del sensor infrarrojo izquierdo para detectar los obstáculos

### 3.2 INICIALIZACIÓN

Se inicia el programa de control definiendo los registros de servicio al usuario por medio de 'etiquetas', se configuran los puertos del pic, los bits 0 al 3 del Puerto A como salidas mientras que los bits 4 y 5 como entradas; los bits 0 al 3 del Puerto B como salidas y los bits 4 al 7 como entradas; los bits 0,1 y 3 del Puerto C como entradas y los bits 4 al 7 como salidas; los bits 0 al 6 del Puerto D como entradas.

Se configura los registros relacionados con las interrupciones que se utiliza, en este caso, por desbordamiento de TIMER 0, del TIMER1 y por cambio de estado del Puerto B (PB4-PB7).

El microcontrolador PIC 16F877 posee todos sus elementos implementados como registros, entre los que se hallan algunos que cumplen funciones específicas; se configura los bits del registro OPTION\_REG para que el TIMER 0 trabaje con un pre-scale de 256 y se genere la señal periódica de 20 ms que necesitan los

### 3.3 PROGRAMA PRINCIPAL

El programa que se mantiene dentro de un lazo; para que el robot opere de manera automática y pueda realizar sus funciones continuamente, depende esencialmente de la operación de los servomotores que comandan las articulaciones del mismo.

Mientras se están ejecutando las instrucciones de movimiento de las patas

servomotores para su funcionamiento, por eso se carga el valor de 20 ms en el registro TMR0. Se configura el registro T1CON que controla el TIMER 1, el cual se usa para la generación de tiempos que tardan en posicionarse los servos en cada paso. Inicialmente también se cargan los registros auxiliares que se usan para producir los retardos de los anchos de los pulsos de los PWM para dirigir a los servos y colocar las extremidades del robot en posición central.

Como los sensores ultrasónicos usados requieren para operar de la generación de una onda de 40 KHz (25 us), se configura el registro CCP1CON en modo PWM y se carga el valor de 25 us en el registro PR2 para obtener dicha señal; para generar el PWM es necesario configurar también el TIMER 2. El pin por donde se envía el PWM es el 2 del Puerto C por lo que se configura como salida.

Finalmente se limpian los registros por seguridad antes de empezar el programa principal.

### **3.3 PROGRAMA PRINCIPAL**

El programa que se mantiene dentro de un lazo; para que el robot opere de manera automática y pueda realizar sus funciones continuamente, depende esencialmente de la operación de los servomotores que comandan las articulaciones del mismo.

Mientras se están ejecutando las instrucciones de movimiento de las patas pertenecientes al trípode 1, es decir cuando se dirigen hacia arriba, adelante o cuando descienden, es probable que el robot toque un objeto al cual lo puede trepar, por tanto, el programa principal salta a revisar los bits PC0, PC1 y PD6, los cuales se hallan conectados los bumpers delanteros de las extremidades del trípode 1; si algunos de estos pines se activa es porque la pata tocó un objeto y por tanto el programa ejecuta las instrucciones pertinentes para que el robot actúe frente a esta situación. Lo mismo ocurre cuando las patas del trípode 2 están en

movimiento; el programa chequea el estado de los bits PC3, PA4 y PA5 y actúa de forma similar si alguno de estos se activa el instante en que topó un obstáculo.

### 3.4 RUTINA DE CAMINATA

Cuando el circuito electrónico es energizado, el hexápodo se coloca con las patas en la posición central, es decir, a los motores se les envía los PWM correctos para dicha posición.

Para la caminata del robot hexápodo se escogió el movimiento *por secuencia dividiéndoles en trípodas que se alternan*, entonces cada trípode consta de las patas delantera y trasera del un lado y la pata intermedia del otro costado. Con esto se consigue la estabilidad del robot ya que pueden mantener con sus patas una base triangular en la superficie que pisan, lo que los hace útiles para atravesar terrenos dispares con un mínimo de balanceos.

Los pasos para ejecutar el algoritmo para caminar se explica a continuación:

**PRIMERO:** Una vez que las patas están en la posición central, se alza el trípode 1. El trípode 2 se queda en la posición central.

**SEGUNDO:** Las patas del trípode 1 se mueven hacia delante en el aire mientras que las patas del trípode 2 se movilizan hacia atrás, topando el suelo y simultáneamente al movimiento del trípode 1.

**TERCERO:** Cuando termina de posicionarse delante, bajan las patas del trípode 1 hasta tocar el suelo.

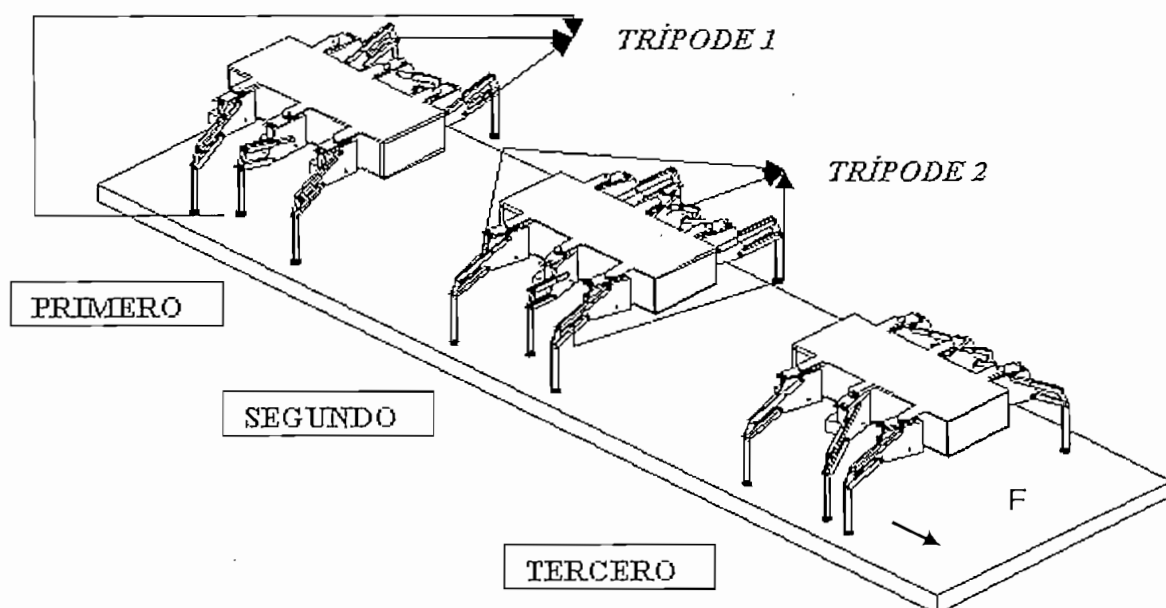
**CUARTO:** Se levantan las patas del trípode 2 y se verifica que los finales de carrera correspondientes a la base de cada pata de este trípode se despeguen del suelo. Cuando los tres bumpers están fuera de contacto, se alzan las patas a una altura determinada. Al mismo tiempo las patas del trípode 1 que estaban

adelante, se dirigen a la posición del medio. Este último movimiento se ejecuta para que el robot no pierda el equilibrio cuando solo un trípode permanece en el suelo.

**QUINTO:** Se mueven hacia el frente las patas alzadas del trípode 2 y las patas del trípode 1 se dirigen hacia atrás al mismo tiempo.

**SEXTO:** Baja el trípode 2 al piso mientras permanece en la misma posición anterior el trípode 1.

**SÉPTIMO:** Levanta nuevamente el trípode 1 y se verifica que los finales de carrera correspondientes a la base de cada pata de este trípode se despeguen del suelo. Cuando los tres bumpers se hallan libres de contacto, se alzan las patas a una altura predeterminada. Simultáneamente, las patas del trípode 2 que se encontraban adelante, se mueven a la posición intermedia. Luego se vuelve a realizar un lazo a partir del paso 2. Los pasos del algoritmo se observan en la Figura 3.4.



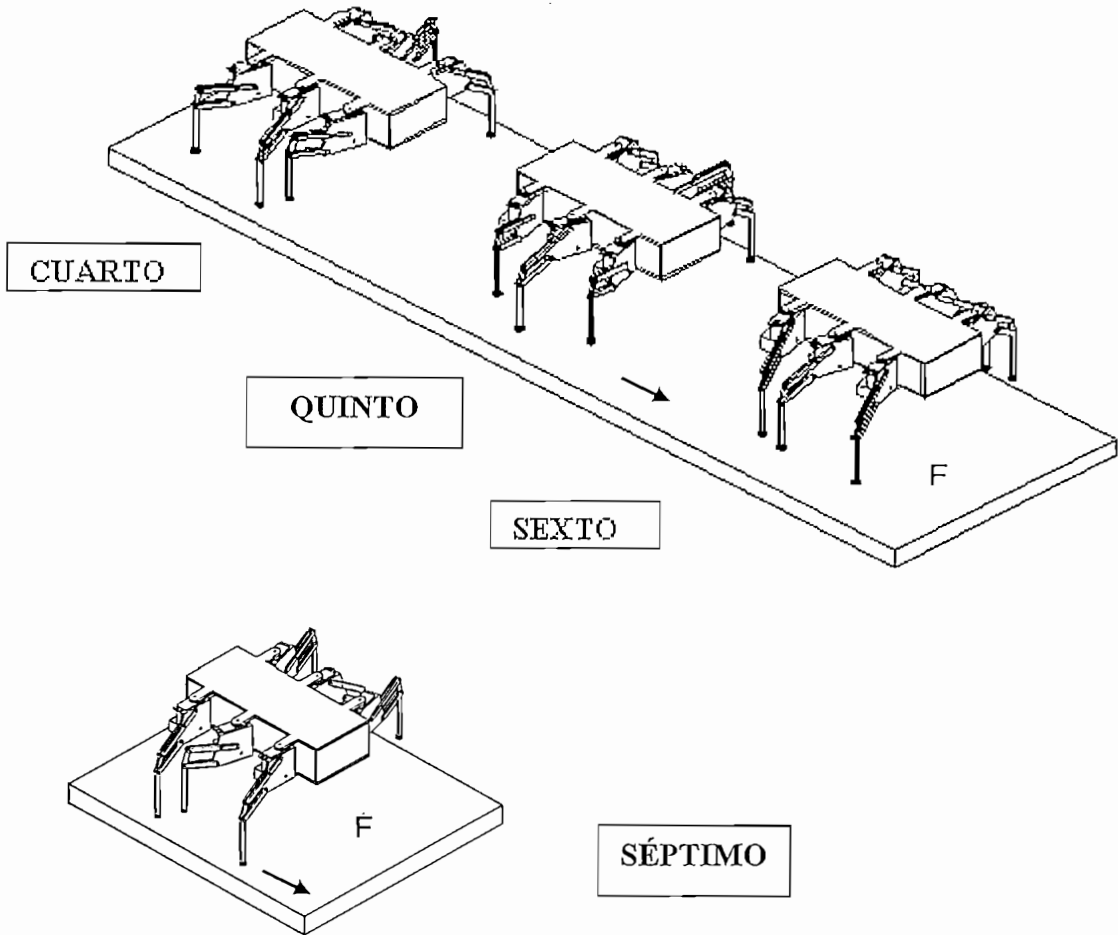
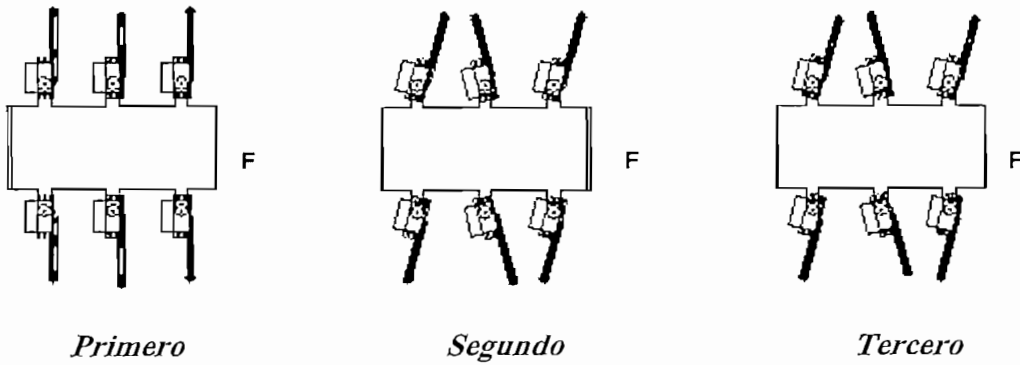
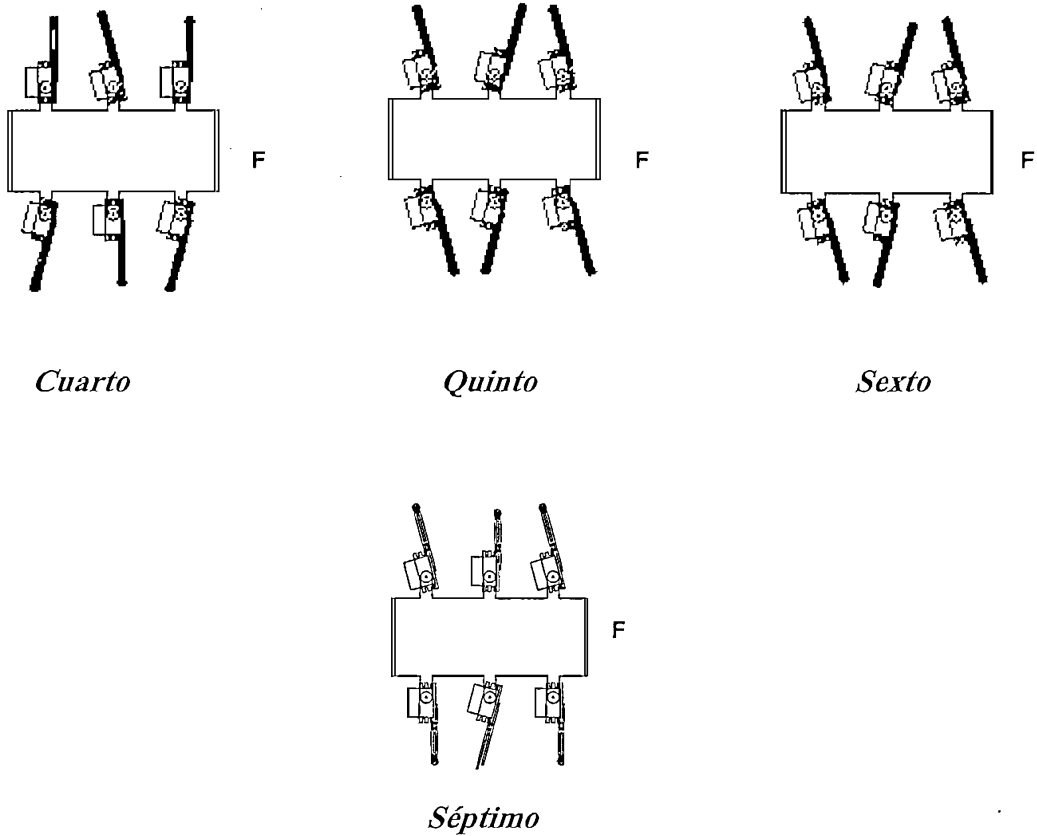


Figura 3.4a. Vista isométrica para los pasos para el algoritmo de caminata del hexápodo

En la siguiente figura están los pasos de caminata desde una vista superior.





*Figura 3.4b. Vista superior para los pasos para el algoritmo de caminata del hexápodo*

Debido a que el robot se encuentra en constante movimiento, los servomotores deben estar actuando continuamente, por lo que para su operación se necesita de señales PWM's como se explicó en el capítulo 2, es por eso que se hace uso de los temporizadores y de las interrupciones para la generación de dichos pulsos las mismas que se explican a continuación.

### 3.4.1 RUTINA DE LA INTERRUPCIÓN DEL TIMER 0 Y DEL TIMER 1

El programa para la caminata del hexápodo se lo hace utilizando dos interrupciones: la del TIMER 0 y la del TIMER 1 que son las que ayudarán para producir los PWM's requeridos para los servomotores.

Dentro de la interrupción por desbordamiento del TIMER 1 se cargan en los registros auxiliares relacionados con cada servomotor las cifras correspondientes a las veces que se debe realizar el retardo para que se produzca el ancho de pulso deseado, es decir, el pin se mantiene en alto durante este tiempo. Se observa seis distintos valores que se envían a seis registros; esto es porque se han producido seis PWM's para el control de los doce servos, salvo cuando sube la pata que ha tocado un obstáculo, en la que se generan siete PWM's. Más adelante se explica el por qué de la utilización de seis PWM's y a qué servo/s corresponde cada señal. Las cifras que se escriben en los registros para cada retardo de los servos están calculadas de acuerdo con la duración del lazo de retardo que se encuentra en la interrupción del TIMER 0 que es de 15 us. Se ha tomado como referencia el valor mínimo, intermedio y máximo de la anchura de pulso para posicionar al eje del FUTABA (ver Tabla 3.2).

*Tabla 3.2 Tiempos requeridos para anchos de pulso de los Futaba*

<b><i>Posición del eje</i></b>	<b><i>Tiempo del ancho de pulso requerido</i></b>
Mínimo	0,2 ms
Medio	1,3 ms
Máximo	2,3 ms

Así por ejemplo si se quiere generar un ancho de pulso de 300 us, el valor a cargar en el registro del servo será de:

$$300/15= 20$$

Entonces 20 veces durará el bucle de retardo del ancho de pulso.

Además en la interrupción del TIMER 1 se carga en los registros TMR1L y TMR1H, el valor del tiempo que demora en ubicarse el servomotor a la nueva posición enviada, para esto se tomó en cuenta que el tiempo que tarda en girar 60° un servo FUTABA S3003 y FP148 es de 0,23 segundos. Puesto que en cada paso se mueven simultáneamente los doce servos, la cantidad que se coloca en



En la Figura 3.5 se tiene un esquema de la formación de los anchos de pulsos.

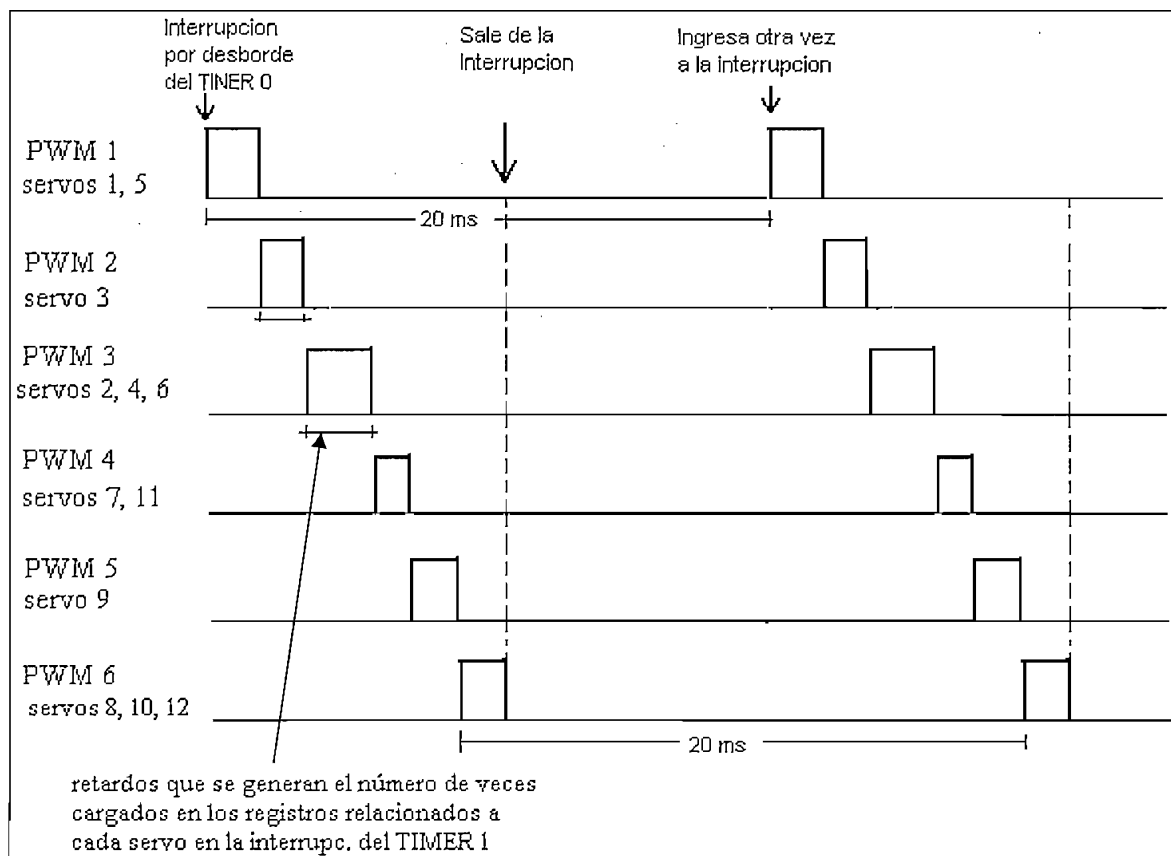


Figura 3.5 Generación de los PWM's mediante interrupción por desborde del Timer 0

Por la ubicación mecánica de los servomotores, los que mueven las patas en sentido horizontal 1, 5 y 9 se desplazan en un ángulo de  $0^\circ$  a  $180^\circ$  (ver Figura 3.6), en tanto que los servos 3, 7 y 11 se trasladan en un ángulo de  $180^\circ$  a  $0^\circ$  (ver Figura 3.7). En cuanto al sentido vertical, los servos del trípode 1 (2, 4, 6) tienen un despliegue igual entre ellos pero diferente al trípode 2 (8, 10, 12), esto se aprecia en las Figuras 3.6 y 3.7.

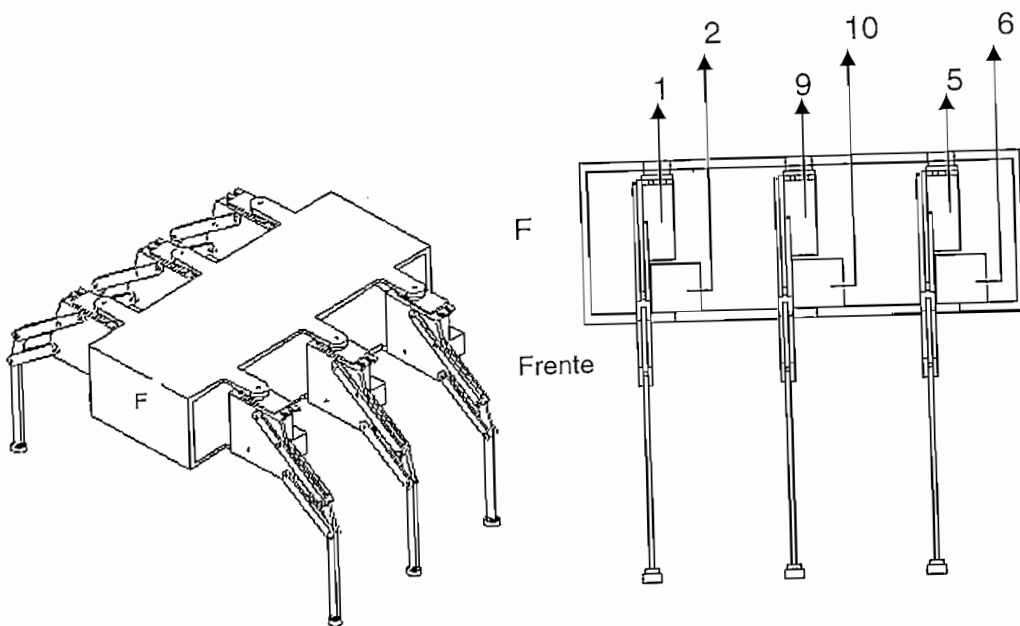


Figura 3.6 Vista isométrica y del lado izquierdo respecto al robot hexápodo

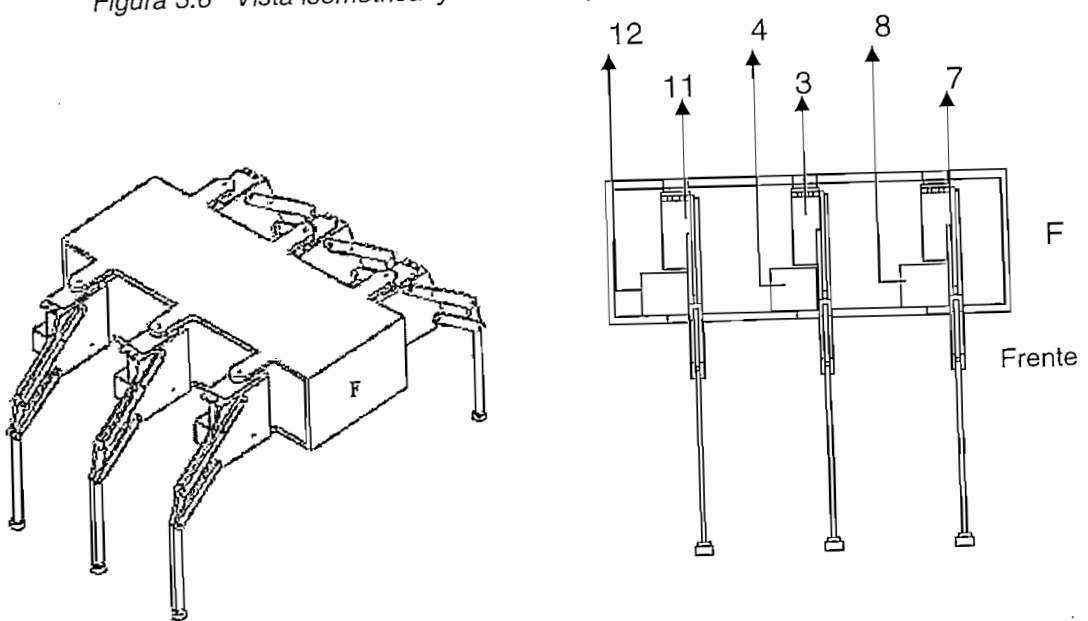


Fig. 3.7 Vista isométrica y del lado derecho respecto al robot hexápodo

Los movimientos para caminar se hacen por trípodés, como se dijo, es decir los tres servos que dirigen las patas en sentido horizontal del trípode 1 (1,3 y 5) deben moverse juntos al igual que los servos que controlan la dirección vertical del mismo. De igual forma ocurre con los motores del trípode 2. Entonces en el desplazamiento horizontal del trípode 1 se generan dos PWM, uno para los

- Para los servos 1, 3 y 5 del trípode 1 (desplazamiento vertical).
- Para los servos 7 y 11 del trípode 2 (desplazamiento horizontal).
- Para el servo 9 del trípode 2 (desplazamiento horizontal).
- Para los servos 8, 10, 12 del trípode 2 (desplazamiento vertical).

Todos estos PWM's se presentan en la Figura 3.5.

Cabe resaltar que para mantener el equilibrio del robot, debe estar con por lo menos tres patas en contacto con el suelo, es por eso que es muy importante la disposición de los bumpers en cada base de las patas. Siempre que las patas de cada trípode están ascendiendo, se revisa si los bumpers inferiores de éstas se

servos 1 y 5 y otro para el servo 3, debido a su disposición física. Análogamente se tiene para los servos de movimiento horizontal del trípode 2, un PWM para los servos 7 y 11 y otro para el servo 9.

En definitiva se generaron seis PWM repartidos de la siguiente manera:

- Para los servos 1 y 5 del trípode 1 (desplazamiento horizontal).
- Para el servo 3 del trípode 1 (desplazamiento horizontal).
- Para los servos 2, 4, 6 del trípode 1 (desplazamiento vertical).
- Para los servos 7 y 11 del trípode 2 (desplazamiento horizontal).
- Para el servo 9 del trípode 2 (desplazamiento horizontal).
- Para los servos 8, 10, 12 del trípode 2 (desplazamiento vertical).

Todos estos PWM's se presentan en la Figura 3.5.

Cabe resaltar que para mantener el equilibrio del robot, debe estar con por lo menos tres patas en contacto con el suelo, es por eso que es muy importante la disposición de los bumpers en cada base de las patas. Siempre que las patas de cada trípode están ascendiendo, se revisa si los bumpers inferiores de éstas se despegan del piso, si lo hacen, se alzan un poco más y podrán desplazarse hacia delante, caso contrario, seguirán levantándose hasta lograr estar fuera de contacto de cualquier superficie. En caso de que a pesar de que hayan ascendido lo máximo y uno de los bumpers sigue en contacto con el terreno, se espera un pequeño tiempo y se continúa con el siguiente movimiento del trípode, así el robot atraviesa cualquier obstáculo sin detenerse. Esto sirve sobre todo cuando está escalando un objeto donde sus patas van estar en diferentes niveles de altura.

### 3.5 RUTINAS DE ACCIÓN DEL ROBOT FRENTE A DIVERSOS OBSTÁCULOS

De forma similar que en las instrucciones de caminar, para retroceder y girar se necesita de varios movimientos del robot, o sea, varios posicionamientos de los servos; por ende, se utiliza los mismos recursos que son las interrupciones por desbordamiento del TIMER 0 y del TIMER 1, y una interrupción más que es la de cambio de estado del Puerto B donde se han colocado los sensores.

El hexápodo posee dos sensores infrarrojos que permiten detectar obstáculos grandes que le son imposibles escalar. Estos sensores emiten una señal a 10 cm aproximadamente del objeto que esté en frente, en ese caso el robot retrocede, luego gira 60°, con el objetivo de no chocar, y por último continúa caminando hacia delante. El que está ubicado en el lado derecho es usado para que cuando el obstáculo se encuentre más próximo al lado derecho del robot, este detecte y emita la señal que hace que mediante las rutinas del microcontrolador retroceda el robot y vire hacia la izquierda; el sensor del lado izquierdo da la señal para que el hexápodo retroceda y gire hacia la derecha porque el obstáculo está más cerca del lado izquierdo del mismo. Cuando detectan los dos sensores, se ejecuta la acción pertinente a la del sensor que envió primero la señal.

#### 3.5.1 RUTINAS DE RETROCESO Y GIRO A LA DERECHA

La localización de un objeto por parte del sensor infrarrojo del lado izquierdo del hexápodo se producirá frecuentemente cuando el objeto esté más cerca del alcance de dicho sensor, o cuando la pata delantera del trípode 1 está en la posición hacia delante (Figura 3.8), y por ende todo el trípode. Los pasos del algoritmo para que retroceda y curve hacia la derecha se realiza a partir de esta ubicación, y se describe a continuación.

posición media manteniendo sus extremidades en la superficie.

**QUINTO:** Las patas del trípode 2 se trasladan hacia atrás mientras que las del trípode 1, en contacto con el suelo, se colocan hacia delante.

**SEXTO:** Luego de posicionarse las patas del trípode 2 atrás, descienden y tocan el piso. El posicionamiento del trípode 1 es el mismo que del paso anterior.

Terminando el robot de dar dos pasos hacia atrás se dispone a girar hacia el lado derecho por lo cual:

**SÉPTIMO:** Se alza la pata DER.2 (del trípode 1), y las demás patas de los trípodes 1 y 2 permanecen en su posición anterior.

**OCTAVO:** Se mueve hacia delante las patas IZQ.1 e IZQ.3 (del trípode 1), y la pata DER.2 se dirige hacia atrás. Al mismo instante que sucede esto, para no perder el equilibrio el robot, las patas del trípode 2 se posicionan en el centro.

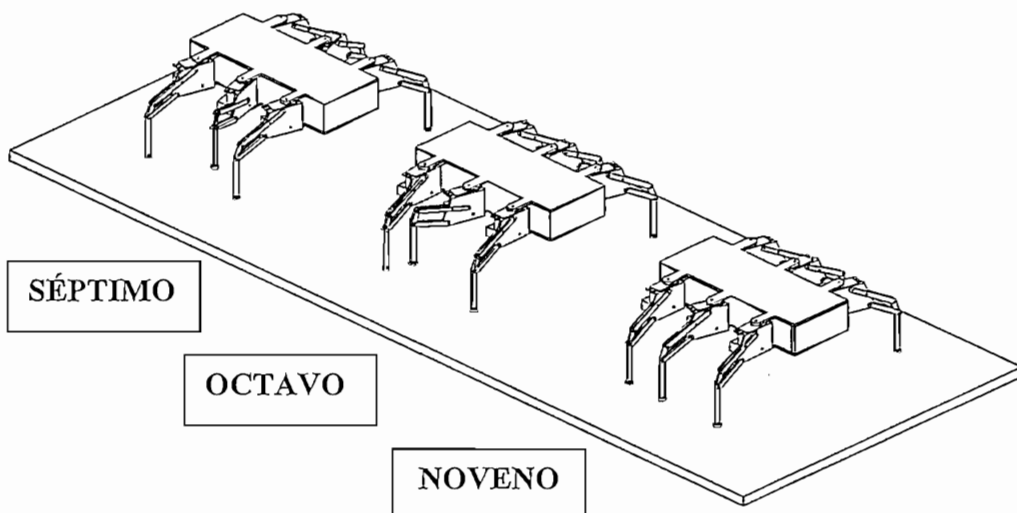
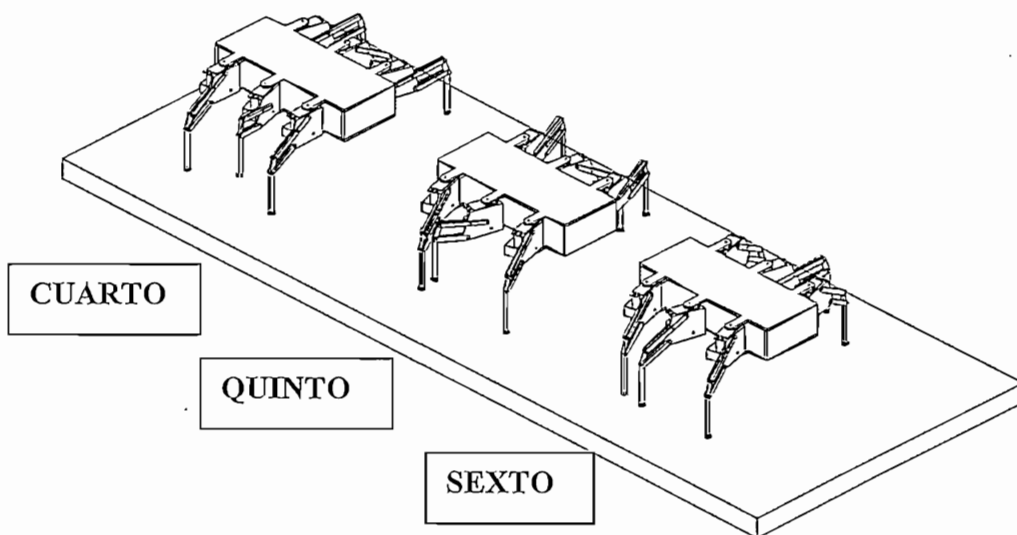
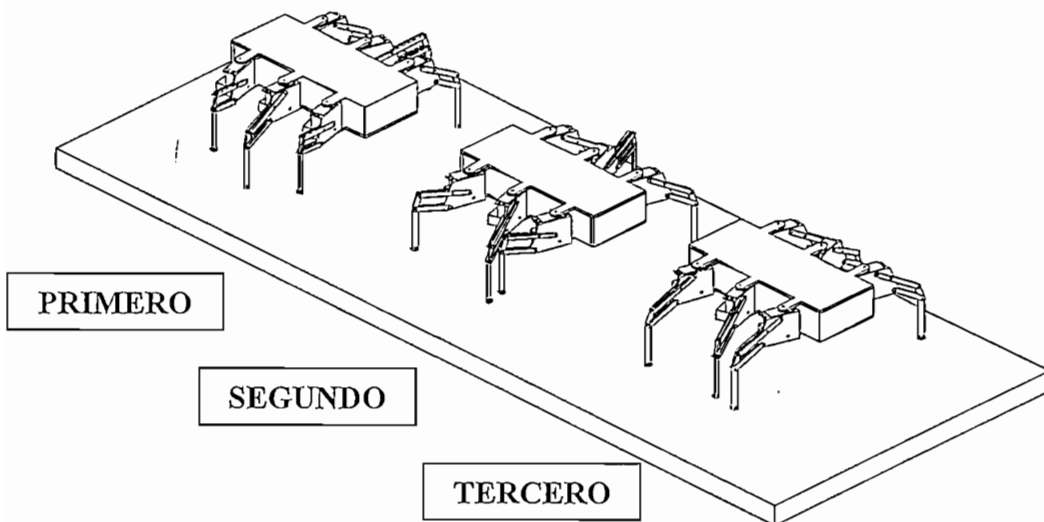
**NOVENO:** Cuando terminan de trasladarse las patas del trípode 1, éstas descienden sin realizar ningún movimiento las demás.

**DÉCIMO:** El momento en que topan la superficie, se levanta el juego de patas del trípode 2 que está en la posición central y las patas del trípode 1 no se mueven de su ubicación anterior.

**DÉCIMO PRIMERO:** Después de llegar las patas de trípode 2 a la posición determinada, las patas DER.1 y DER.3 del trípode se movilizan hacia atrás mientras que la pata IZQ.2 se sitúa hacia delante simultáneamente (recordar que estas patas están alzadas). En el mismo intervalo de tiempo el juego de patas del trípode 1 se ubican en posición intermedia.

**DÉCIMO SEGUNDO:** Culminando en su nueva posición, descienden las patas que se encuentran en el aire en tanto que las otras se establecen en la misma posición.

**DÉCIMO TERCERO:** Llega al suelo el trípode 2 y se levantan las patas del trípode 1. Cada paso se presenta en la Figura 3.9.



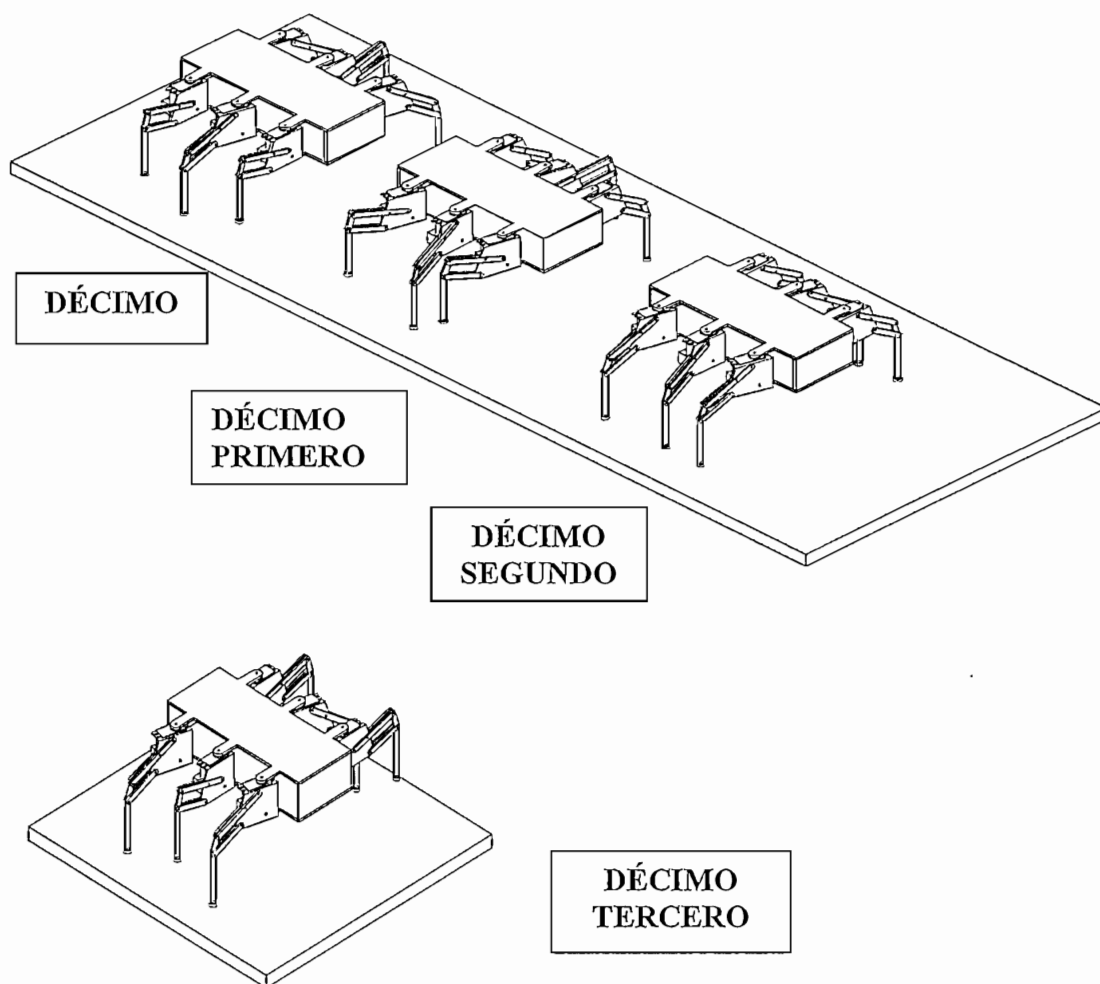
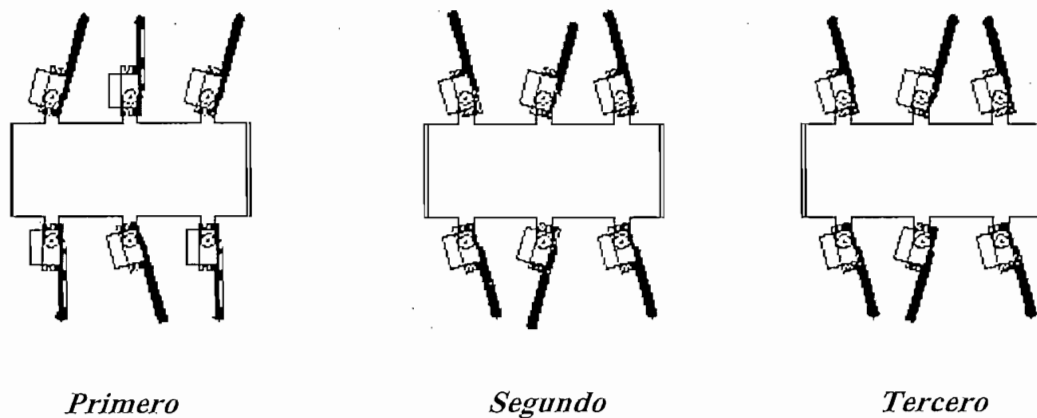
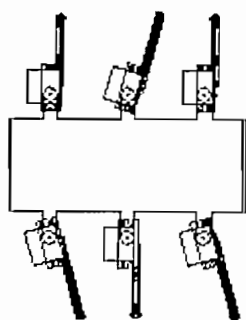
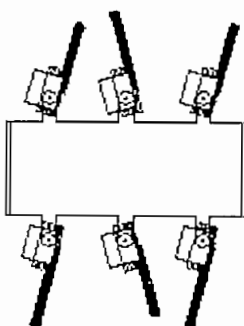
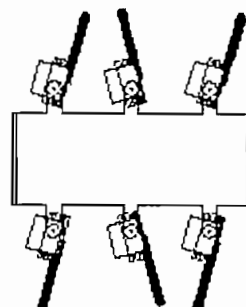
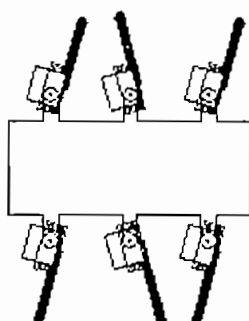
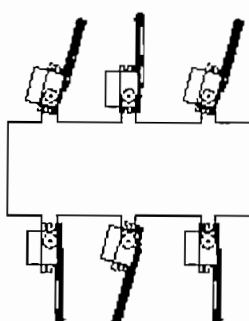
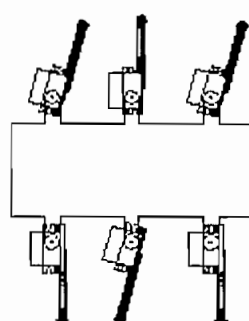
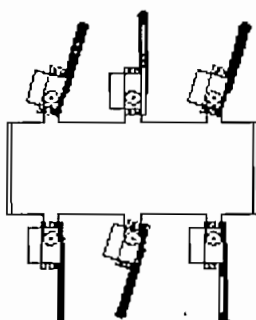
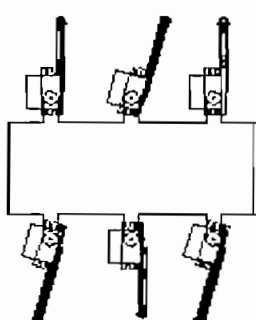
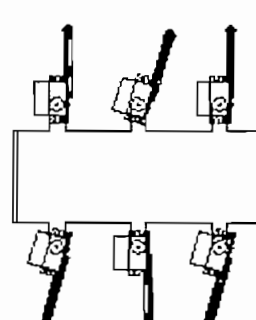


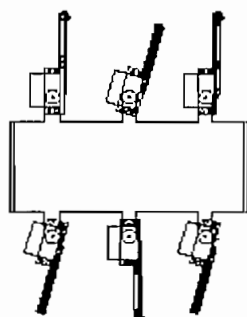
Figura 3.9a. Vista isométrica: a) Retroceso: Pasos primero a sexto, b) Giró Derecha: Séptimo a décimo tercero

En la Figura 3.9b se tiene los pasos del retroceso y giro a la derecha en vista superior.



*Cuarto**Quinto**Sexto**Séptimo**Octavo**Noveno**Décimo**Décimo primero**Décimo segundo*





*Décimo tercero*

*Figura 3.9b Vista superior: a) Retroceso: Pasos primero a sexto, b) Giro Derecha: Séptimo a décimo tercero*

Para que el hexápodo siga girando, se repiten los pasos del 8 al 13. Cuando haya alcanzado los  $60^\circ$  de giro aproximadamente, el robot automáticamente empieza a caminar hacia al frente. Si nuevamente detecta el sensor infrarrojo la presencia de algún objeto, repite los pasos a partir del 1, sin embargo, si al terminar de girar el sensor continúa detectando un objeto, el robot sigue girando.

### 3.5.1.1 Rutina de Interrupción por cambio de estado del Puerto B (PB4 – PB7)

Debido a que los sensores infrarrojos envían 1L cuando no detectan algún objeto, los pines PB6 y PB7 se encuentran inicialmente en 1L. Cuando el robot se aproxima a un obstáculo que está más cerca del lado izquierdo del mismo, el sensor de ese lado emite una señal al receptor cuando está a 10 cm del objeto y el pin cambia a 0L. Al cambiar de estado el pin PB7, el programa ingresa a atender la interrupción y habilita una bandera auxiliar para que cuando haya transcurrido el desbordamiento del TIMER 1 pase a realizar las instrucciones destinadas al retroceso y giro del hexápodo; además deshabilita el bit de permiso de interrupción por cambio de estado hasta terminar de retroceder y girar.

En cada una de las seis primeras interrupciones por desborde del TIMER 1, relacionadas con los pasos 1 a 6, se cargan los valores de las veces que se realizarán los retardos para generar los anchos de pulsos que requieren los

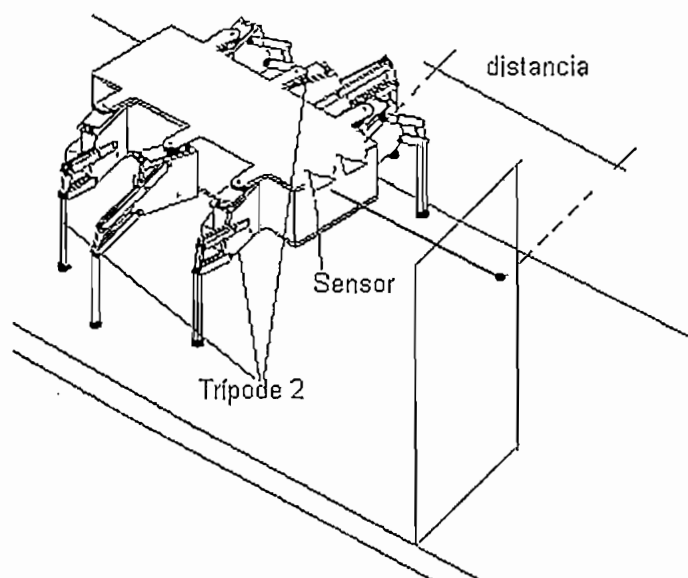
servomotores para su posicionamiento, y los valores de tiempos, en el TMR1L y TMR1H, que tardan los motores en situarse en su nueva posición, para que al momento de cada desborde pase a la interrupción y ejecute el siguiente paso. Como se explicó anteriormente, estas seis llamadas de interrupciones corresponden a las rutinas que hace el robot para retroceder. El momento de detectar el obstáculo, dependiendo de la posición en que se encuentra el trípode 1, empezará a realizarse el algoritmo de movimiento a partir del primero o del segundo paso, es decir, si el trípode 1 se encuentra en el aire dirigiéndose hacia delante, el algoritmo iniciará en el segundo paso, pero si las patas de este trípode ya se encuentran descendiendo, comenzará la secuencia desde el primer paso.

Las posteriores siete llamadas a interrupciones del TIMER 1, relacionadas con los pasos 7 a 13, corresponden a las rutinas de giro hacia la derecha, y al igual que en los pasos anteriores, en cada llamada se carga tanto las veces del retardo de duración del pulso para la posición determinada de cada servo, como el tiempo en que tardarán en dirigirse los ejes de los mismos a su siguiente ubicación. La rutina de giro, a partir del paso 8, se repite un número de veces que han sido calculadas para que se logre los 60°. Al terminar el giro, se revisa cómo se encuentra el estado del sensor, si está en 0L (porque continúa detectando obstáculo) se ejecutan las instrucciones para volver a girar, caso contrario se limpia la bandera auxiliar, se borra el flag de interrupción por cambio de estado del Puerto B, se habilita el bit de permiso de interrupción del Puerto B y el programa retorna a las instrucciones de caminata del robot.

Cabe notar que mientras retrocede y vira el autómatas, el sensor infrarrojo dejará de enviar la señal ya que está fuera de los 10 cm del obstáculo, entonces el pin 7 del puerto B cambia a 1L pero no vuelve el programa a atender la interrupción puesto que está deshabilitado el bit de permiso; en este caso el robot no tiene que hacer ninguna otra actividad hasta acabar de girar.

### 3.5.2 RUTINAS DE RETROCESO Y GIRO A LA IZQUIERDA

La señal de presencia de un objeto por parte del sensor infrarrojo del lado derecho del hexápodo, ocurrirá comúnmente cuando el obstáculo esté próximo a este sensor o cuando la primera pata del trípode 2 está en la posición hacia delante, y por ende todo el trípode (ver Figura 3.10). Los pasos del algoritmo para que retroceda y curve hacia la izquierda se realiza a partir de esta ubicación, y son similares a la de retroceder y girar a la derecha. Estos se describen a continuación.



*Figura 3.10 Sensor derecho detecta cuando está más cerca al objeto o cuando el trípode 2 está adelante*

**PRIMERO:** Ascienden las patas del trípode 2 y al mismo instante las patas del trípode 1 se mueven hacia posición central manteniendo el contacto en el suelo.

**SEGUNDO:** Se dirigen hacia atrás las patas del trípode 2 sin tocar el piso. En igual lapso de tiempo se trasladan las patas del trípode 1 hacia delante haciendo contacto al suelo.

**TERCERO:** Las patas pertenecientes al trípode 2 descienden hasta topar el la superficie y las patas del trípode 1 permanecen en la misma posición que el paso anterior.

**CUARTO:** Una vez que el trípode 2 se halla en contacto con el terreno, se alzan las patas del primer trípode y las del trípode 2 se movilizan hacia la posición media permaneciendo en contacto con la superficie.

**QUINTO:** Las patas del trípode 1 se mueven hacia atrás en tanto que las del trípode 2, en contacto con el suelo, se sitúan hacia delante.

**SEXTO:** Luego de posicionarse las patas del trípode 1 atrás, descienden y tocan el piso. El posicionamiento del trípode 2 es el mismo que del paso anterior.

El robot finaliza dando dos pasos hacia atrás y empieza a girar hacia el lado izquierdo por lo que:

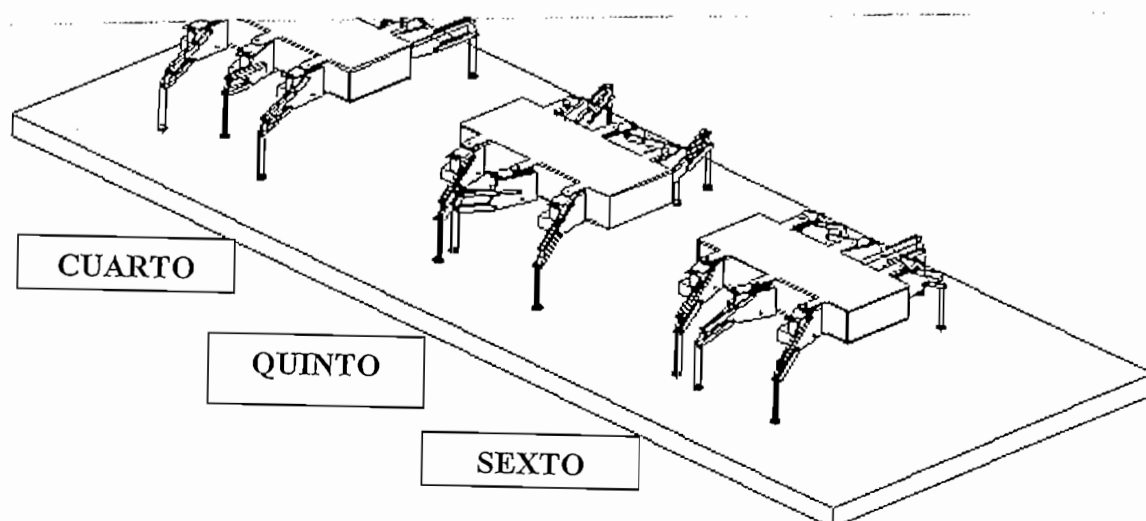
**SÉPTIMO:** Se alza la pata IZQ.2 (del trípode 2), y las demás patas de los trípodes se mantienen en su posición anterior.

**OCTAVO:** Se mueven hacia delante las patas DER.1 y DER.3 (del trípode 2) y la pata IZQ.2 se moviliza hacia atrás. Al mismo instante que sucede esto, para no perder el equilibrio el robot, las patas del trípode 1 se posicionan en el centro.

**NOVENO:** Cuando terminan de trasladarse las patas del trípode 2, bajan a la superficie sin realizar ningún movimiento las demás.

**DÉCIMO:** Cuando tocan el suelo, se alza el juego de patas del trípode 1 que está en la posición central y las patas del trípode 2 no se mueven de su posición explicada antes.

**DÉCIMO PRIMERO:** Luego de que llegan las patas del trípode 1 a la posición determinada, las patas IZQ.1 e IZQ.3 del mismo se mueven hacia atrás mientras que la pata DER.2 se traslada hacia delante (recordar que estas patas están alzadas). En el mismo intervalo de tiempo el juego de patas del trípode 2 se ubican en posición intermedia.



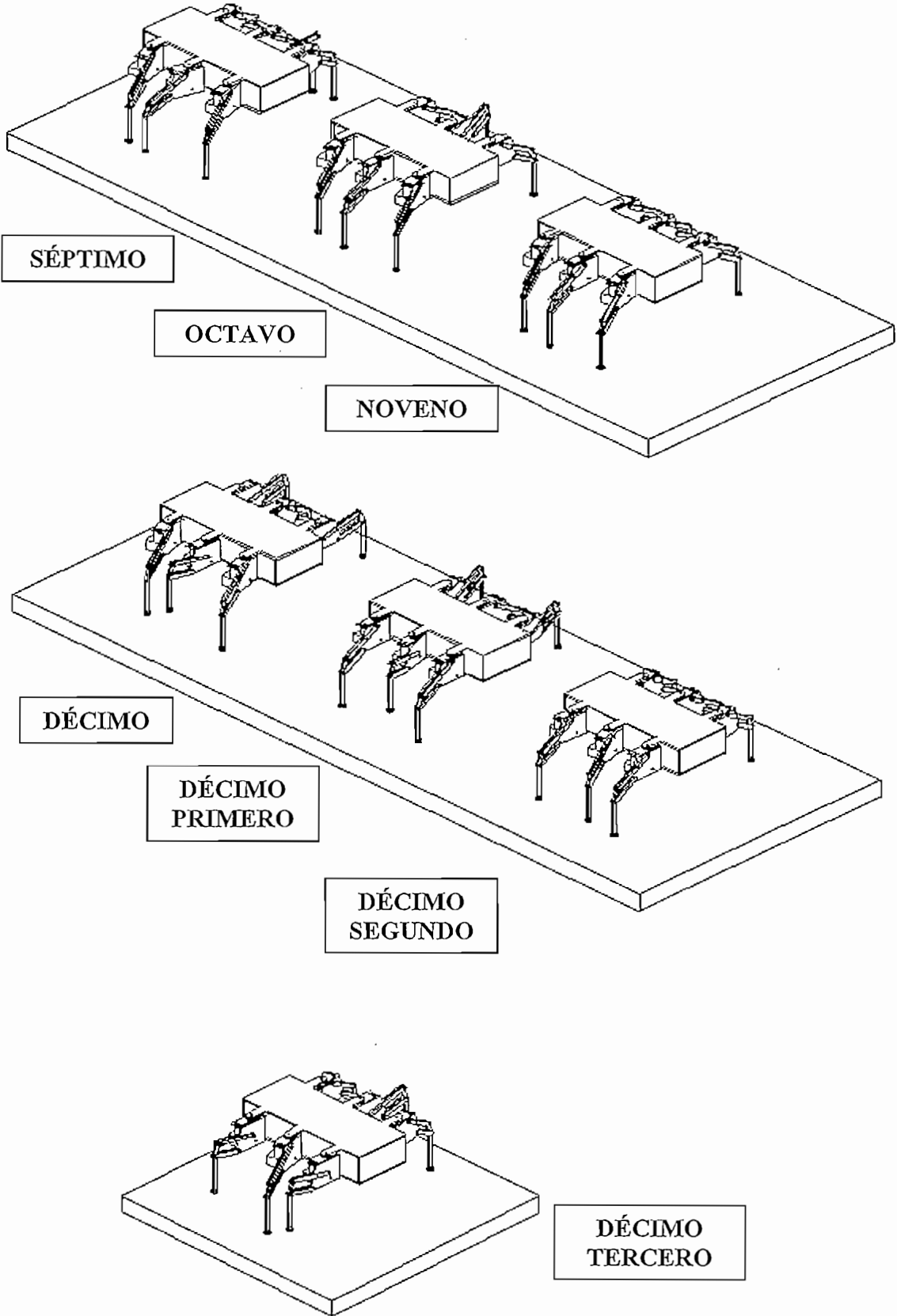
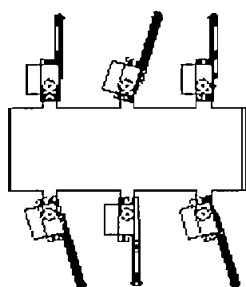
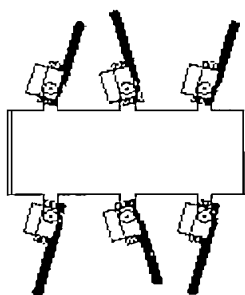


Figura 3.11a. Vista isométrica: a) Retrosceso: Pasos primero a sexto, b) Giro Izquierda: Séptimo a décimo tercero

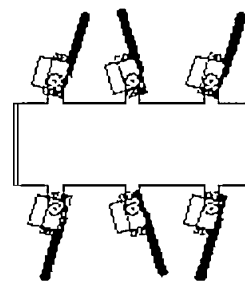
La Figura 3.11b muestra los pasos del retroceso y giro a la izquierda en vista superior.



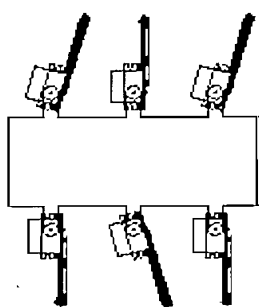
*Primero*



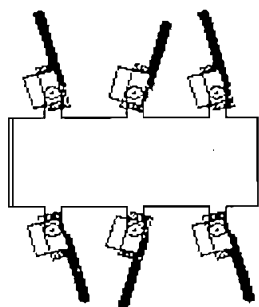
*Segundo*



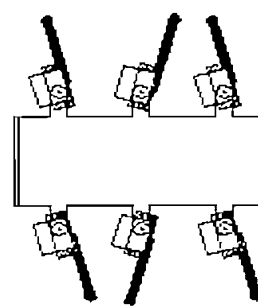
*Tercero*



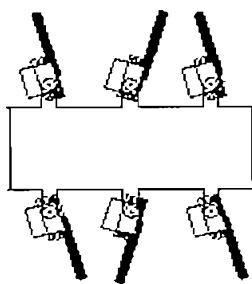
*Cuarto*



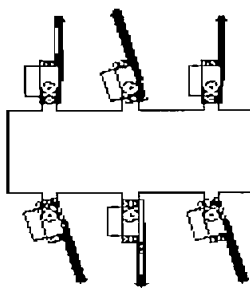
*Quinto*



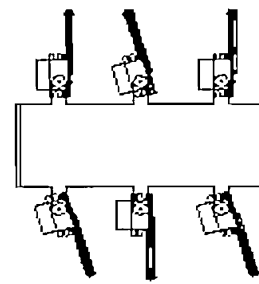
*Sexto*



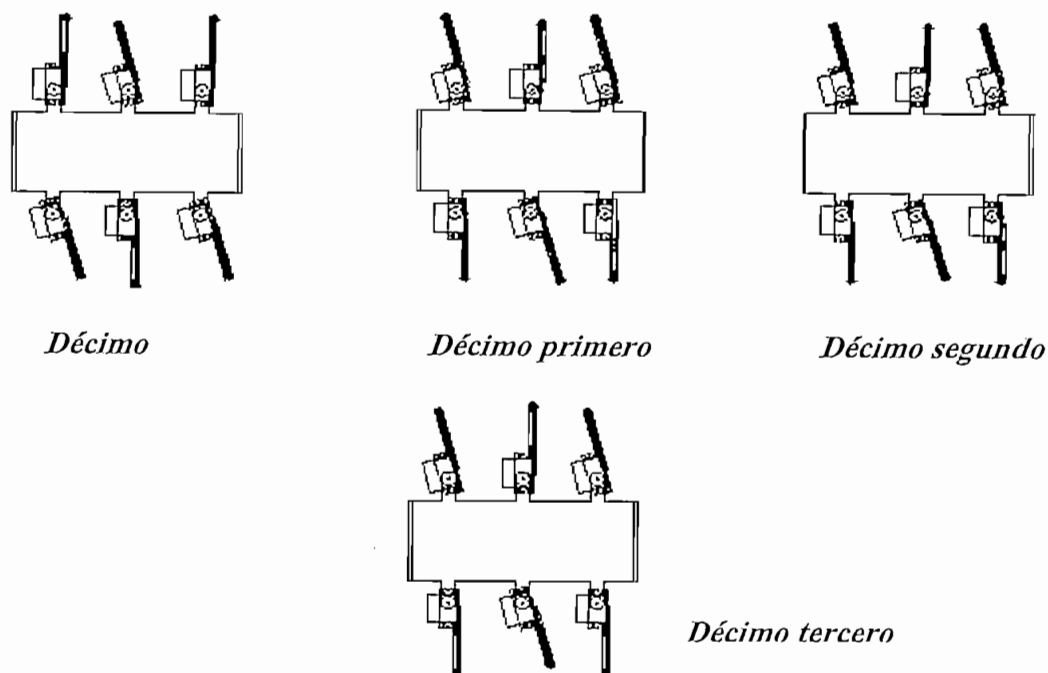
*Séptimo*



*Octavo*



*Noveno*



*Figura 3.11b. Vista superior: a) Retroceso: Pasos primero a sexto, b) Giro Izquierda: Séptimo a décimo tercero*

El programa repite los pasos del 8 al 13 para que el hexápodo siga girando. Cuando alcanza los 60° de giro, el robot automáticamente empieza a caminar hacia su frente. Si detecta en una nueva ocasión el sensor infrarrojo la presencia de otro obstáculo, reinicia los pasos a partir del 1, pero si terminado de girar, el obstáculo persiste, el robot sigue girando. Además, el instante de detectar el obstáculo, si las patas del trípode 2 están movilizándose hacia delante en el aire, el algoritmo empezará desde el segundo paso, sin embargo, si dichas patas ya se encuentran descendiendo, iniciará la secuencia de movimientos a partir del primer paso.

De la misma forma que el caso anterior, en la ejecución de esta rutina se utiliza la interrupción por cambio de estado del puerto B (PB4 – PB7) del microcontrolador. En este proceso se ha colocado en la salida del pin PB6 el sensor infrarrojo. El pin PB6 se encuentran inicialmente en 1L. Cuando el hexápodo se aproxima a un objeto que está más cercano del lado derecho del mismo, el sensor de ese lado envía una señal al receptor cuando está a 10 cm del obstáculo y el pin cambia a

0L. Al cambiar de estado el pin PB6, el programa ingresa a atender la interrupción y habilita una bandera auxiliar para que cuando suceda el desbordamiento del TIMER 1, pase a hacer las instrucciones designadas al retroceso y giro del hexápodo.

En las seis primeras interrupciones por desbordamientos del TIMER 1 se cargan los valores de las veces que se realizan los retardos para producir los anchos de pulsos que necesitan los servos para su posicionamiento, y los valores de tiempos, en el TMR1L y TMR1H, que tardan éstos en ubicarse, para que al instante de cada desborde pase a la interrupción y ejecute el paso siguiente. Las seis llamadas de interrupciones corresponden a las instrucciones de marcha atrás del hexápodo.

Las otras siete llamadas a interrupciones por desborde del TIMER 1 corresponden a las instrucciones de giro hacia la izquierda y al igual que en los pasos anteriores, en cada una se colocan tanto el las veces de retardo de duración del pulso para la posición determinada, como el tiempo que se demora el eje de cada servo en trasladarse a su siguiente ubicación. La rutina de giro, a partir del paso 8, se repite un número de veces que han sido calculadas para que gire 60° aproximadamente. Luego de girar, se revisa nuevamente el estado del sensor y según sea el caso se procede a ejecutar similares acciones que en la rutina de retroceso y giro a la derecha, salvo que en esta situación se realizará hacia el lado izquierdo.

El robot cuando retrocede se separa de los 10 cm de distancia al obstáculo, por lo que el sensor infrarrojo deja de mandar la señal. Por consiguiente, el pin del puerto B, PB6 cambia a 1L, sin embargo el programa no ingresa a la interrupción por estar deshabilitado su bit de permiso; en dicho caso el robot no tiene que realizar ninguna otra actividad hasta terminar de virar.

De igual manera que en la caminata, mientras se ejecuta la acción de retroceso y giro a cualquiera de los dos lados, se revisan si los bumpers inferiores del trípode que está ascendiendo se despegan del piso, si lo hacen, se alzan un poco



más y luego se dirigen a la siguiente posición; caso contrario, continúan subiendo hasta conseguir estar fuera de contacto de la superficie. También, si una vez alcanzado su máxima altura de ascenso, uno de los bumpers permanece en contacto con el terreno, se espera un tiempo mínimo y las patas realizan su movimiento posterior.

### 3.5.3 RUTINA DE ASCENSO DE OBSTÁCULOS

Mientras el robot se encuentra caminando, puede presentársele objetos a los cuales puede escalarlos. Si la altura es la determinada para que suba el obstáculo, no actúan los sensores infrarrojos y el hexápodo sigue hacia al frente. Cualquier bumper de las diferentes patas toca el objeto cuando dichas extremidades del trípode están alzándose o dirigiéndose hacia delante. Al topar una pata que pertenece al trípode 1, los pasos para que pueda ascender el elemento son los siguientes:

**PRIMERO:** El robot alza más la pata del trípode que está en el aire mientras que a las otras dos patas del trípode se les deja de enviar pulsos quedándose en el lugar cuando tocó el obstáculo. Simultáneamente para que el robot no pierda equilibrio, las patas del trípode 2 se trasladan hacia la posición central.

**SEGUNDO:** Una vez que asciende por completo la pata, ésta ya se halla fuera de contacto con el objeto, por lo que se mueve hacia delante, conjuntamente con las otras patas del trípode, hasta la posición indicada. Recordar que las otras dos patas están a la altura normal de la rutina de caminata. El trípode 2 se mantiene en su posición intermedia.

**TERCERO:** Termina de posicionarse hacia delante el trípode 1, y bajan las patas del mismo hasta tocar el suelo. En el mismo tiempo en que descienden, las patas del trípode 2 se dirigen hacia atrás.

trípode para poder atravesarlo.

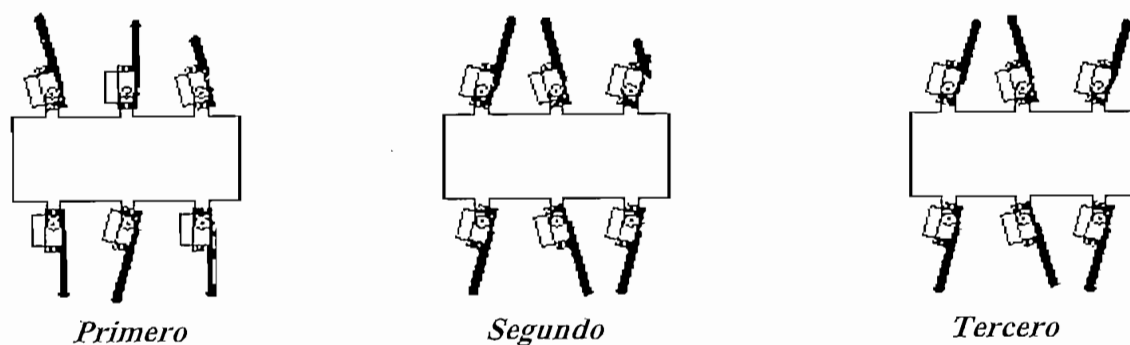


Figura 3.12b. Algoritmo para subir obstáculos. Vista superior

este paso, si es el trípode 1 el que está en el aire, se setea un bit auxiliar y en el bucle principal, mientras el trípode se posiciona arriba o adelante, se revisan si los pines conectados a los bumpers delanteros de las patas han cambiado de estado (normalmente se encuentran en 0L), si es así, el **primer paso** (relacionado con el algoritmo) que se hace es cargar los nuevos valores en los registros auxiliares relacionados a cada servo para generar el ancho de pulso adecuado con el objetivo de que cada uno de ellos logre la nueva posición, y los valores en el TMR1L y TMR1H del tiempo en que tarda en posicionarse la pata que asciende.

Se debe tomar en cuenta que cuando ocurre esta situación, la pata que tocó el objeto ya no actúa simultáneamente con las otras del mismo trípode, es por esta razón que también se activa otro bit auxiliar que hace que se generen otros PWM's. El momento que choca con el obstáculo ocurren las siguientes acciones:

- Se deja de enviar los pulsos en los servos que controlan el sentido horizontal de las patas del trípode 1, que están en el aire, para que no sigan moviéndose hacia al frente.
- Se generan los siguientes PWM's:
  - a) Para el servo del trípode 1 que levanta más la pata para no tocar el objeto y treparlo.
  - b) Para los otros dos servos del trípode 1 que mantienen las otras patas en el aire en la altura normal de caminata.
  - c) Para los servos 7 y 11 del trípode 2 que mueven las patas DER.1 y DER.3 en sentido horizontal en un giro de 180° a 0°.
  - d) Para el servo 9 del trípode 2 que mueve la pata IZQ.2 en sentido horizontal en un giro de 0° a 180°. Ya se explicó en la rutina de caminar que se tienen 2 PWM's para los servos de posición horizontal del mismo trípode por la ubicación mecánica de los mismos.
  - e) Para los servos 8, 10 y 12 del trípode 2 que desplazan las patas DER.1, IZQ.2 y DER.3 en sentido vertical.

El **segundo paso** se produce el instante en que la pata alcanzó su nueva posición vertical; el trípode 1 se mueve hacia al frente con una pata más alzada

que las otras. Para que ocurra esto, se ha desbordado el TIMER 1 y mediante otra bandera seteada en el paso 1 se ingresa a la interrupción y se ejecutan las instrucciones para que se proceda al movimiento del trípode en el aire. Los PWM's que se generan en este proceso son:

- a) Para los servos 1 y 5 del trípode 1 que dirigen las patas IZQ.1 e IZQ.3 hacia delante y atrás en un giro de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ .
- b) Para el servo 3 del trípode 1 que moviliza la pata DER.2 en sentido horizontal en un giro de  $180^\circ$  a  $0^\circ$ .
- c) Para el servo del trípode 1, que alza más la pata para no tocar el objeto y treparlo.
- d) Para los otros dos servos del trípode 1 que mantienen en el aire las otras patas en la altura normal.
- e) Para los servos 7 y 11 del trípode 2 que mueven las patas DER.1 y DER.3 en sentido horizontal en giro de  $180^\circ$  a  $0^\circ$ .
- f) Para el servo 9 del trípode 2 que mueve la pata IZQ.2 en sentido horizontal en un giro de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ .
- g) Para los servos 8, 10 y 12 del trípode 2 que dirigen las patas DER.1, IZQ.2 y DER.3 en sentido vertical.

En el **tercer paso** el trípode 1 desciende y debido a que la pata que estaba más levantada ya no debe actuar independiente del trípode, se deben generar seis PWM's y ya no uno más como en los otros pasos, sus valores se cargan en las instrucciones cuando se ingresa otra vez a la interrupción por TIMER 1. Una vez concluido este paso, el programa retorna a ejecutar las instrucciones de caminata.

Cabe resaltar que es posible que las patas del autómatas toquen el obstáculo mientras están descendiendo, luego de haberse movido hacia el frente; es por este motivo que en este lapso también se revisan los bits correspondientes a cada bumper delantero. Si durante este tiempo la pata tocó el objeto, como la acción después del contacto es la de alzar la pata una altura mayor a lo normal, pero al estar su pata posicionada adelante, se usó un bit auxiliar el cual se setea para que en el siguiente paso que hace el robot con esa pata, ya tiene conocimiento

que hay un obstáculo y por ende realizará las instrucciones pertinente a subir dicho objeto. Luego de finalizar con su rutina, se limpia la bandera auxiliar.

Ahora, si la pata que toca corresponde al trípode 2, los pasos para que pueda ascender el obstáculo son:

**PRIMERO:** El hexápodo sube más la pata del trípode que se encuentra en el aire mientras que las otras dos patas del trípode se les deja de enviar pulsos quedándose en el lugar en el instante que tocó el elemento. Sincrónicamente, para que el robot no pierda equilibrio, las patas del trípode 1 se movilizan hacia la posición media.

**SEGUNDO:** Después de que asciende completamente la pata, ésta ya no está en contacto con el objeto, entonces en conjunto con las otras patas del trípode se dirigen hacia delante hasta su posición indicada. El trípode 1 se mantiene en su posición intermedia.

**TERCERO:** Termina de situarse hacia delante el trípode 2, y descienden las patas del mismo hasta tocar el suelo. En el mismo instante de tiempo, las patas del trípode 1 se trasladan hacia atrás.

Culmina el paso tercero y el hexápodo retorna a caminar normalmente hasta encontrarse con otro objeto.

De la misma manera, cuando aparece un obstáculo y si el sensor infrarrojo no lo detecta, el robot está dispuesto a escalarlo. Cuando las patas del trípode 2 se mueven hacia arriba o adelante en el aire, se tiene la probabilidad de que pueden tocar el objeto. Por esto se setea una bandera auxiliar, y en el bucle principal, mientras el trípode se posiciona arriba o adelante, se revisan si los pines conectados a los bumpers han cambiado de estado (normalmente se encuentran en 0L), si es así, el **primer paso** (relacionado con el algoritmo) es cargar los nuevos valores en los registros relacionados a cada servo para generar el ancho de pulso adecuado con el objetivo de que éstos se ubiquen en la nueva posición,

y los valores en el TMR1L y TMR1H del tiempo en que tardará en posicionarse la pata que sube.

Al producirse esta situación, el trípode ya no actúa simultáneamente, por lo que se producen las siguientes acciones:

- Se deja de enviar los pulsos en los servos que controlan el sentido horizontal de las patas del trípode 2, que están en el aire, para que no sigan moviéndose hacia al frente.
- Se generan los siguientes PWM's:
  - a) Para el servo del trípode 2 que levanta más la extremidad para trepar el objeto.
  - b) Para los otros dos servos del trípode 2 que se mantienen en el aire en la altura normal.
  - c) Para los servos 1 y 5 del trípode 1 que mueven las patas IZQ.1 e IZQ.3 en sentido horizontal en un giro de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ .
  - d) Para el servo 3 del trípode 1 que mueve la pata DER.2 en sentido horizontal en un giro de  $180^\circ$  a  $0^\circ$ .
  - e) Para los servos 2, 4 y 6 del trípode 1 que dirigen las patas IZQ.1, DER.2 e IZQ.3 en sentido vertical.

El **segundo paso** se produce el momento en que la pata logró su nueva posición vertical, el trípode 2 se mueve hacia delante con la una pata más alzada que las otras. Para que ocurra esto, se ha desbordado el TIMER 1 y por medio de otro bit auxiliar seteado en el paso 1, se ingresa a la interrupción y se procesan las instrucciones de dicha ubicación del trípode en el aire. Los PWM's que se generan en este procedimiento son:

- a) Para los servos 1 y 5 del trípode 1 que dirigen las patas IZQ.1 e IZQ.3 hacia delante y atrás en un giro de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ .
- b) Para el servo 3 del trípode 1 que moviliza la pata DER.2 en sentido horizontal en un giro de  $180^\circ$  a  $0^\circ$ .

- c) Para el servo del trípode 2 que se levanta más para no tocar el objeto y treparlo.
- d) Para los otros dos servos del trípode 2 que se mantienen en el aire en la altura normal.
- e) Para los servos 7 y 11 del trípode 2 que mueven las patas DER.1 y DER.3 en sentido horizontal en giro de  $180^\circ$  a  $0^\circ$ .
- f) Para el servo 9 del trípode 2 que mueve la pata IZQ.2 en sentido horizontal en un giro de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ .
- g) Para los servos 8, 10 y 12 del trípode 2 que posicionan las patas DER.1, IZQ.2 y DER.3 en sentido vertical.

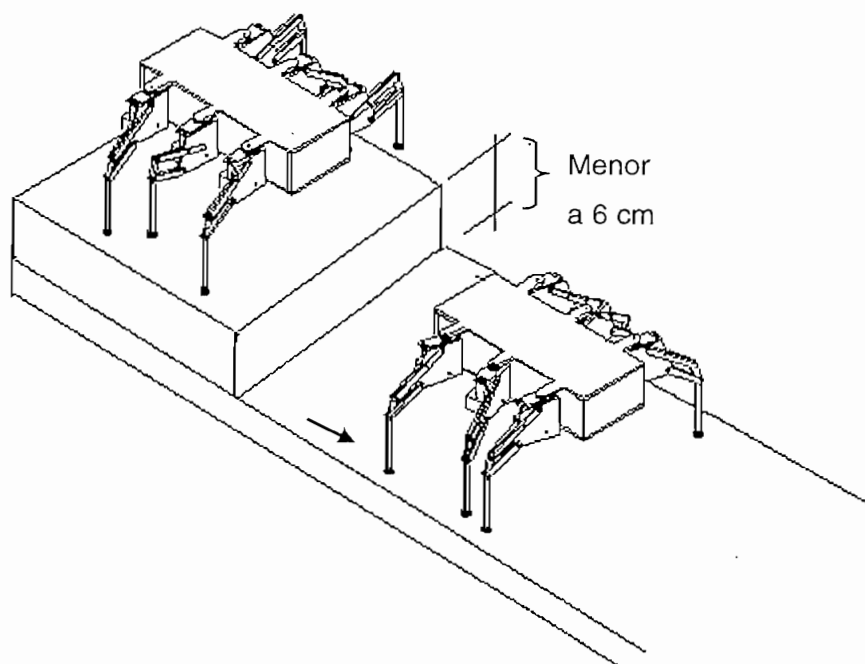
Por último, en el **tercer paso** el trípode 2 baja, cuyas instrucciones se cargan cuando se ingresa una vez más a la interrupción del TIMER 1.

#### 3.5.4 RUTINA DE ACCIÓN FRENTE A SUPERFICIES ALTAS (HUECOS)

En la parte delantera del robot también se encuentra un sensor ultrasónico, está localizado en una posición de tal manera que cuando el autómatasensa que está cerca de caerse de una superficie alta, mediante la detección de éste, logra retroceder y girar evadiendo este obstáculo.

La señal de salida del sensor se envía por el pin del Puerto B, PB5, el mismo que es revisado el instante que cambia de estado.

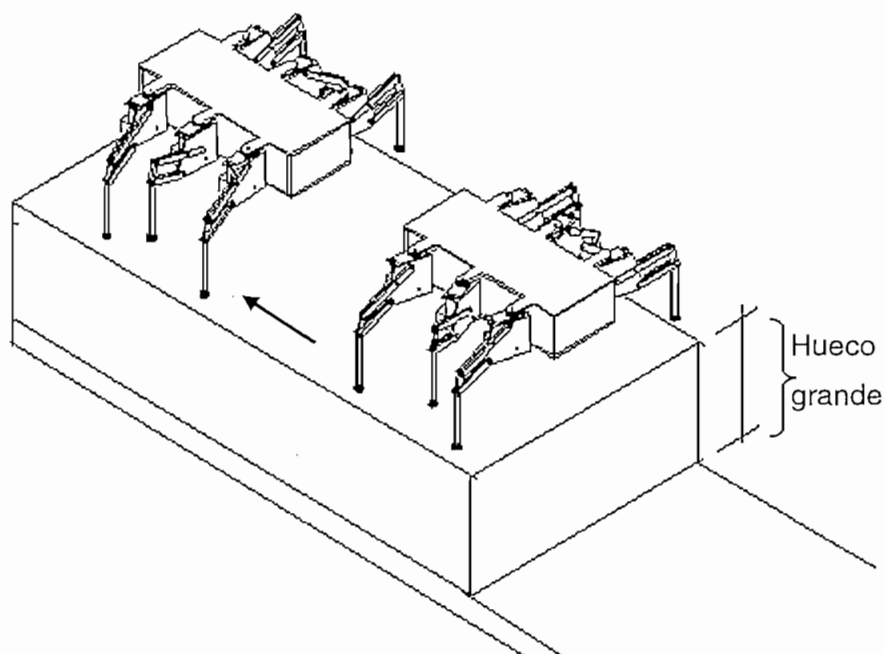
El sensor de ultrasonido fue calibrado para que actúe siempre y cuando la superficie sea profunda o alta, es decir, si el piso al cual se aproxima no es profundo, la señal que envía el sensor no cambia de valor y el hexápodo puede descender sin ningún problema. El autómatas desciende normalmente hasta una altura de 6 cm aproximadamente (Figura 3.13).



*Figura 3.13 Cuando la altura es de 6 cm o menor aproximadamente, el robot puede descender*

Mientras está caminando el robot, el sensor envía 0 lógico ya que está detectando el piso. El momento en que va a descender, si el hueco es alto, el sensor actuante envía 1 lógico que significa que la superficie es profunda y que el robot no puede bajar (Figura 3.14), entonces el pin enlazado a ese medidor cambia de valor y el programa ingresa a atender la interrupción por cambio de estado del Puerto B. Se setea un bit auxiliar que hace que se ejecuten las instrucciones de retroceso y giro para evitar su caída; también se deshabilita el bit de permiso de la interrupción del Puerto B hasta finalizar de ejecutarse el giro. El algoritmo y la manera como se procesan las instrucciones para retroceder y virar son las mismas que utiliza el robot cuando encuentra al frente un objeto que no puede atravesarlo.

La modificación que se encuentra es que gira 90° aproximadamente, en vez de 60°, y además, dependiendo que pata se encuentre más cerca del filo de la superficie a la cual no puede descender, gira a la izquierda o a la derecha.



*Figura 3.14 Cuando el hueco es grande el robot retrocede y gira*

Al tiempo en que retrocede y vira, el sensor volverá a detectar el suelo por lo que nuevamente cambia de 1L a 0L, en este caso no atiende la interrupción ya que se encuentra deshabilitada; en tal caso el robot no tiene que realizar ninguna otra actividad hasta terminar de virar por lo que se retira de la interrupción y continúa con la rutina de giro. Cuando finaliza el giro, si vuelve a detectar hueco se realizan otra vez las acciones de retroceder y girar.



## **CAPÍTULO 4**

## CAPÍTULO 4

### PRUEBAS Y RESULTADOS

Con el objeto de comprobar si el robot cumple con los requerimientos y objetivos previamente planteados y poder determinar las correspondientes limitaciones es necesario someter al robot a distintas pruebas, en diferentes ambientes de trabajo que permitan observar y validar el comportamiento del mismo, y de esa manera poder enunciar los resultados obtenidos.

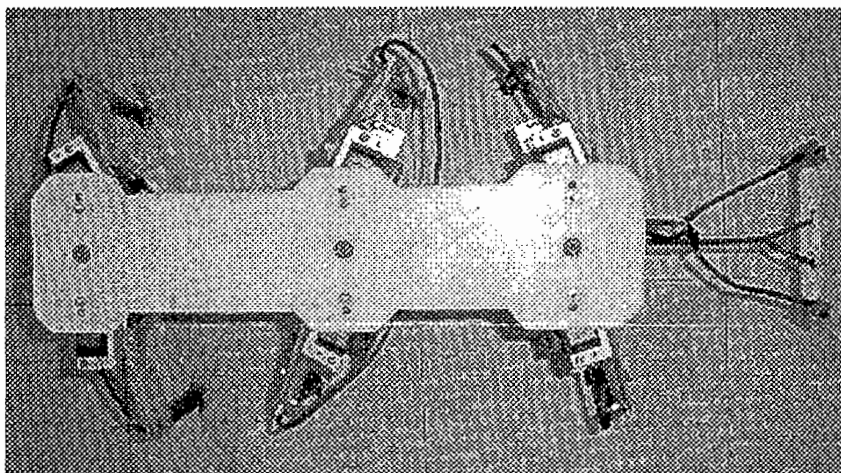
#### 4.1 CAMINATA SOBRE SUPERFICIES LISAS

La dinámica del robot en la caminata, sobre superficies lisas, es bastante aceptable en términos de estabilidad y fluidez en el movimiento. A pesar de que los terrenos lisos (por ejemplo, baldosas y pisos usados en interiores) presentan poca resistencia al rozamiento, el robot no se desliza o resbala puesto que sus patas han sido cubiertas con caucho para otorgarle buena adherencia a cualquier superficie, y de esa manera brindarle mayor estabilidad.

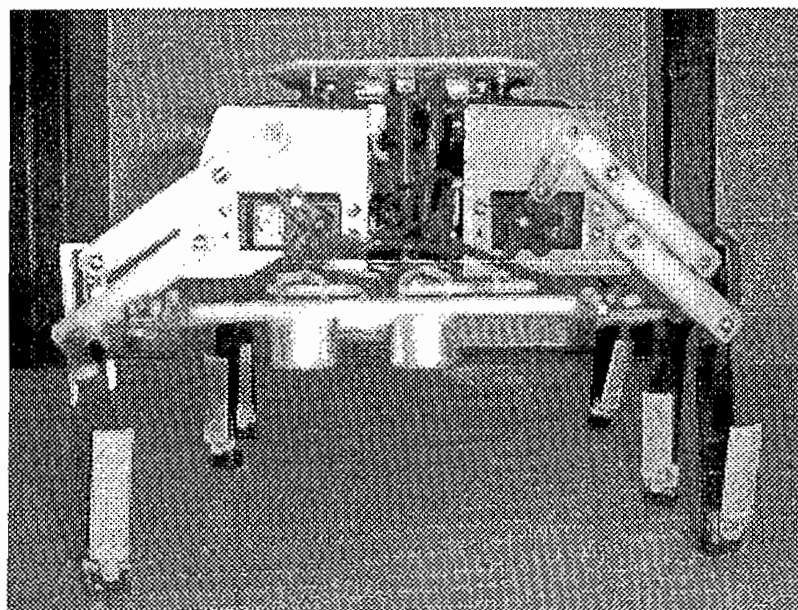
Se puede observar que el robot al caminar presenta un balanceo mínimo, debido a que el mayor peso del robot que son las baterías ha sido distribuido de tal manera que su centro de masa esté situado aproximadamente en el centro del triángulo formado por el trípode que se halla en tierra. Otro factor importante a tomar en cuenta es la velocidad de caminata del robot que es la adecuada para evitar los efectos inerciales del sistema, los cuales afectan la estabilidad del mismo, ya que a mayor velocidad el robot tiende a irse para adelante, produciéndose un movimiento torpe del robot. Esto también sucede cuando el ángulo de giro de las patas tanto de forma horizontal como vertical es muy grande, por lo que para el robot hexápodo el ángulo de giro de atrás hacia delante y viceversa no sobrepasa los veinte grados, logrando un buen equilibrio.

El robot al caminar tiende a levantar un poco la pata, una vez que los bumpers de contacto con el piso se han desactivado, con esto se logra evitar que éste arrastre sus extremidades y disminuir por ende el torque ejercido por los servos.

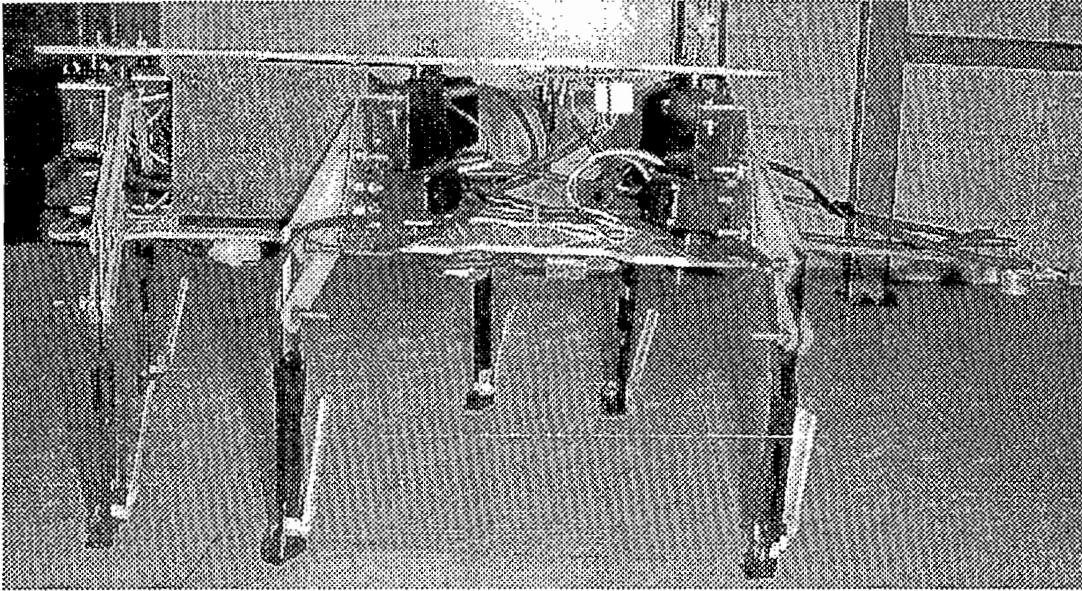
En la Figura 4.1 se observa al robot en su rutina de caminata sobre una superficie lisa en tres vistas, frontal, superior y lateral.



*Figura 4.1a Robot caminando sobre terreno liso (vista superior)*



*Figura 4.1b Robot caminando sobre terreno liso (vista frontal)*

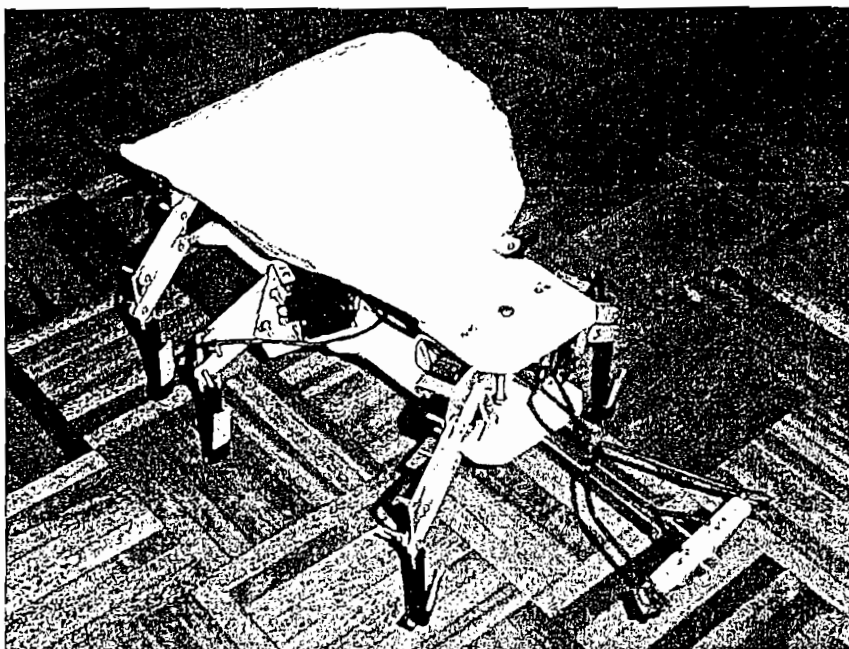


*Figura 4.1c Robot caminando sobre terreno liso (vista lateral)*

## 4.2 CAPACIDAD DE CARGA

Los servomotores usados en el presente proyecto son del tipo estándar, por lo cual su torque es bajo. Además para conseguir que el robot suba obstáculos debe tener una relación potencia-peso bastante equilibrada. Esto justifica los materiales usados para la estructura del robot los cuales son los más livianos. A pesar de que el robot no está diseñado para que lleve ningún tipo de carga adicional a su hardware y baterías, el robot presenta una capacidad de carga aceptable cuando está caminando en terrenos horizontales. Sin embargo presenta limitaciones para transportar carga en terrenos inclinados y cuando sube obstáculos. De las pruebas realizadas la capacidad de carga máxima, manteniendo una velocidad aceptable de caminata es de 2,5 Kg.

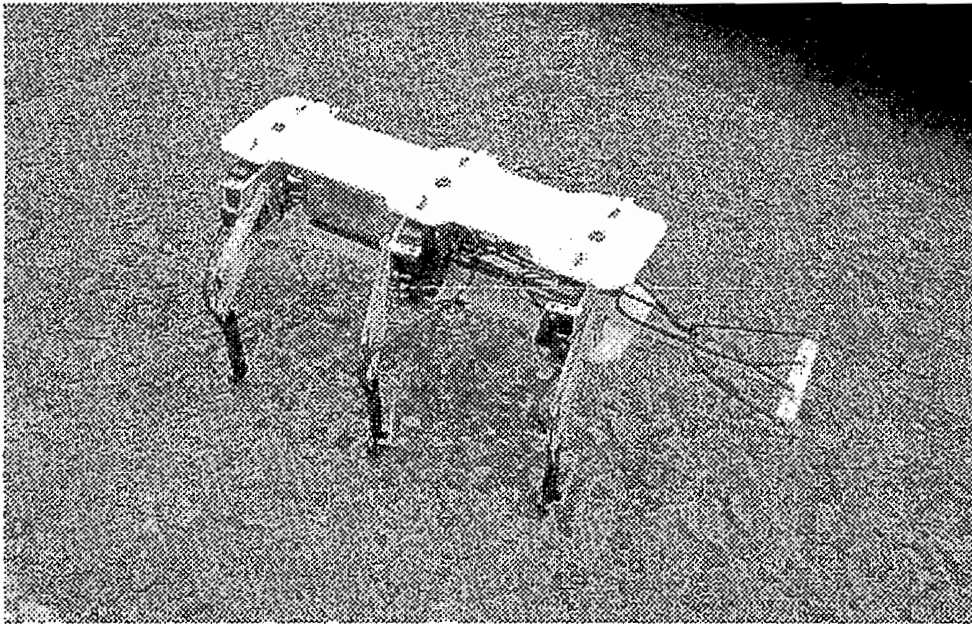
Se debe añadir que al aumentar carga la velocidad del robot disminuye por el incremento del torque en los servomotores, y esto conlleva por ende a un mayor requerimiento de corriente y consecuentemente una disminución en el tiempo que



*Figura 4.2 Robot transportando carga*

### **4.3 CAMINATA SOBRE TERRENOS IRREGULARES**

Uno de los objetivos de un robot con patas articuladas es que tenga la habilidad de desenvolverse sobre terrenos irregulares. El robot hexápodo del presente proyecto se mueve sin dificultad en estos terrenos; sin embargo, podría presentar problemas al movilizarse en terrenos con partículas grandes de tierra o piedras muy pequeñas, ya que éstas pueden incrustarse entre la palanca de accionamiento del bumper de contacto con tierra, impidiendo que éste se active. Sin embargo, esto de ninguna manera impediría que el robot siga caminando, pero tendría ciertas dificultades en subir obstáculos grandes. Además, el robot presenta problemas al caminar sobre terrenos cuya superficie no es sólida, como el césped. Esto se debe al funcionamiento propio del sensor de ultrasonido, cuya onda emitida es absorbida y por tanto no se refleja apropiadamente en dichas superficies. Lo mismo sucede con terrenos demasiado irregulares, pero en este caso el problema se debe a que la onda emitida es reflejada en otra dirección.

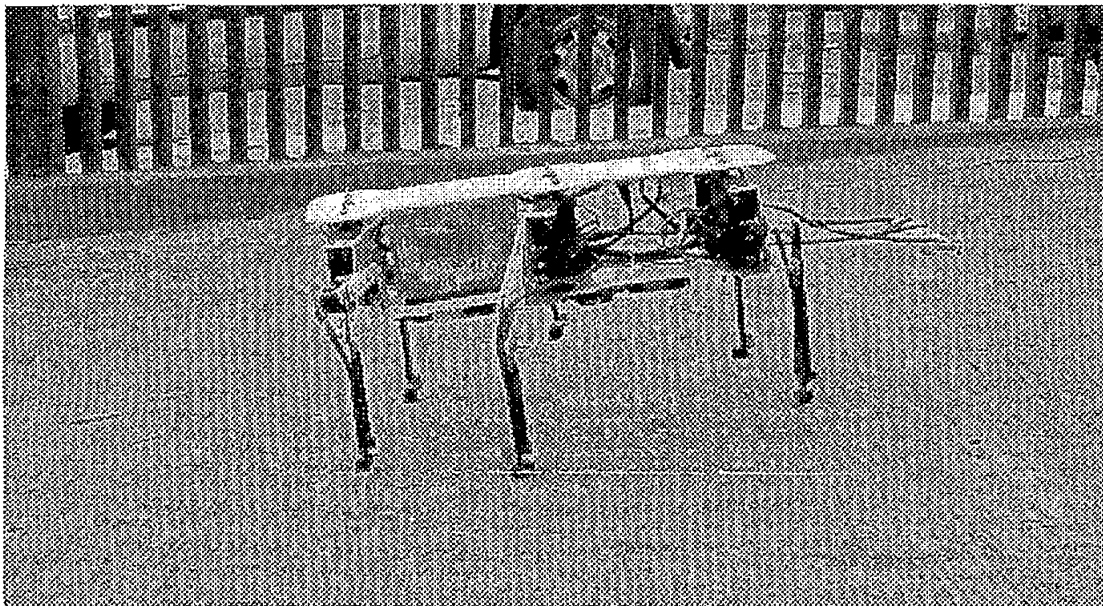


*Figura 4.3 Robot caminando sobre superficies irregulares*

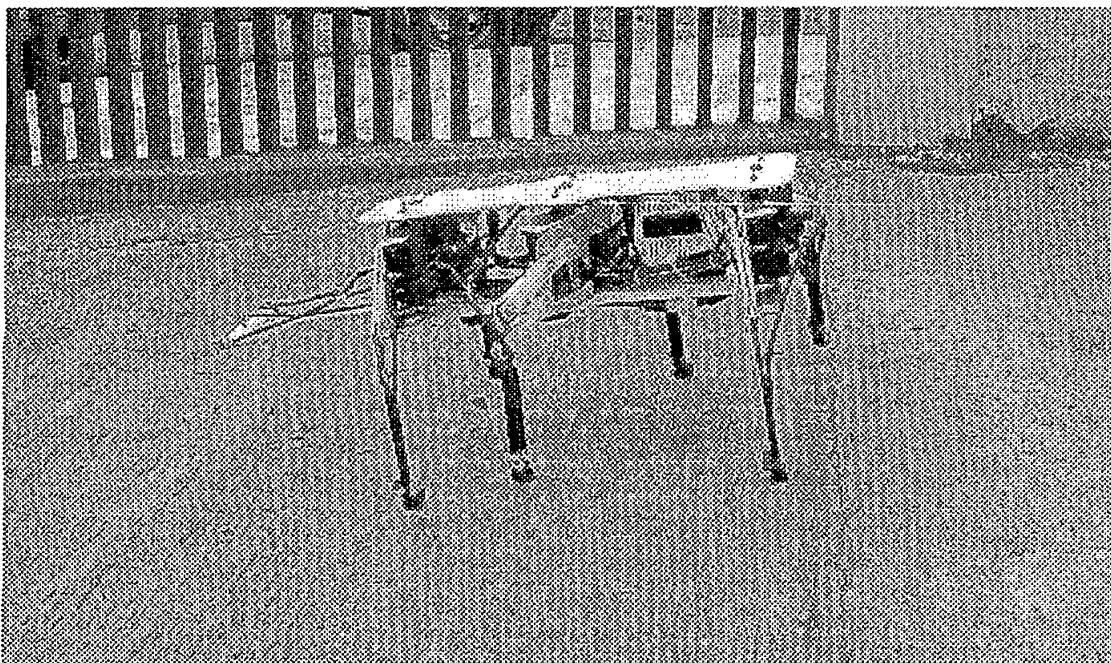
#### **4.4 CAMINATA SOBRE TERRENOS INCLINADOS**

Como se explicó con anterioridad el robot presenta ciertas limitaciones en su capacidad de carga, está limitación también se ve reflejada cuando tiene que caminar sobre terrenos con una pendiente demasiado pronunciada ya sea subiendo o bajando. En éstas situaciones el par de patas traseras o delanteras según sea el caso respectivamente, experimentan un torque mayor que las demás impidiendo que el robot camine con facilidad, puesto que el punto del centro de masa del sistema cambia según la pendiente del terreno y además los servomotores no tienen la fuerza suficiente en caso de que esté subiendo. Sin embargo de las pruebas realizadas el robot puede movilizarse en superficies con una inclinación no muy pronunciada. Cabe recalcar que en ésta situación el robot no debe estar con ninguna carga adicional.





*Figura 4.4a Robot subiendo sobre terreno inclinado*



*Figura 4.4b Robot bajando sobre terreno inclinado*

## 4.5 COMPORTAMIENTO DEL ROBOT FRENTE A OBSTÁCULOS GRANDES Y HUECOS

El robot hexápodo tiene la capacidad de moverse libremente en su entorno evitando obstáculos grandes como paredes y huecos que son muy altos para atravesarlos, para lo cual cuenta con sensores de proximidad. En el primer caso, para evitar chocar contra paredes cuenta con sensores infrarrojos; sin embargo, la distancia a la que el robot va a detectar la proximidad de una pared va a depender del color de la misma. Esto se debe al principio físico de los sensores infrarrojos, ya que dependen de la propiedad del objeto donde incide el haz infrarrojo para reflejarlo. Es así como el robot detectará los objetos de tonos claros a una mayor distancia que los objetos con tonos más oscuros, siendo el caso más crítico los objetos de color negro, frente a los cuales el robot los detecta a unos pocos milímetros de los mismos. A pesar de esta limitación, esto no incide en el comportamiento del robot ni en su capacidad de evitar obstáculos. Además, se realizaron pruebas con objetos de distintas tonalidades, para observar a que distancia los detecta según los diferentes colores, de lo cual se obtuvo lo siguiente:

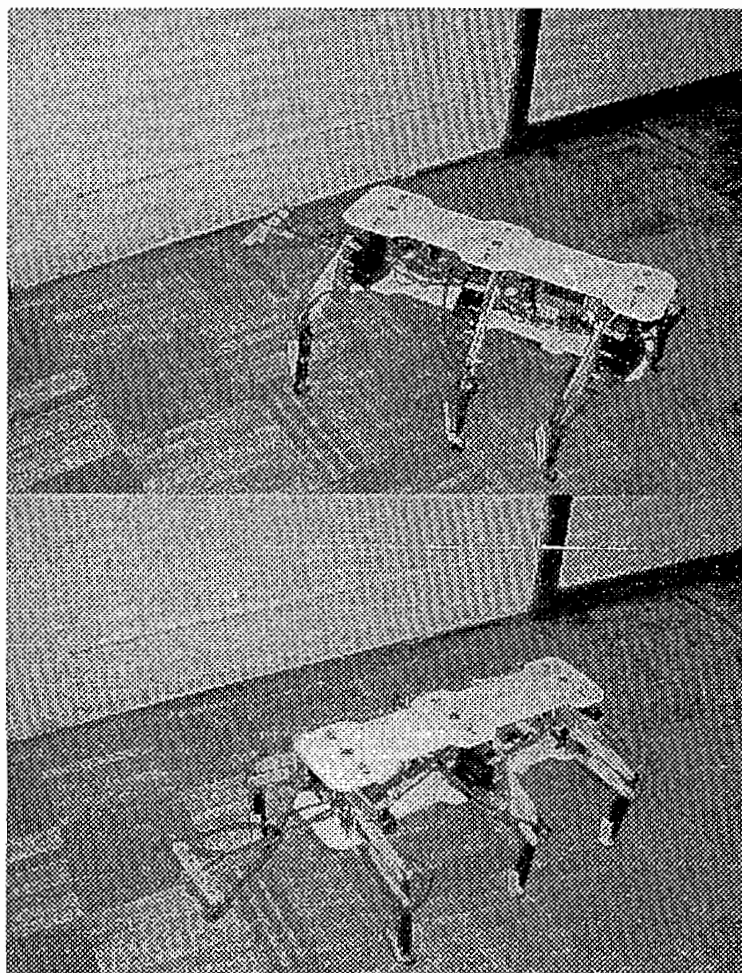
*Tabla 4.1 Distancia de detección de obstáculos de lo sensores infrarrojos*

<b>Color</b>	<b>Distancia de detección (mm)</b>
Blanco	130
Café claro	90
Café obscuro	50
Negro	15

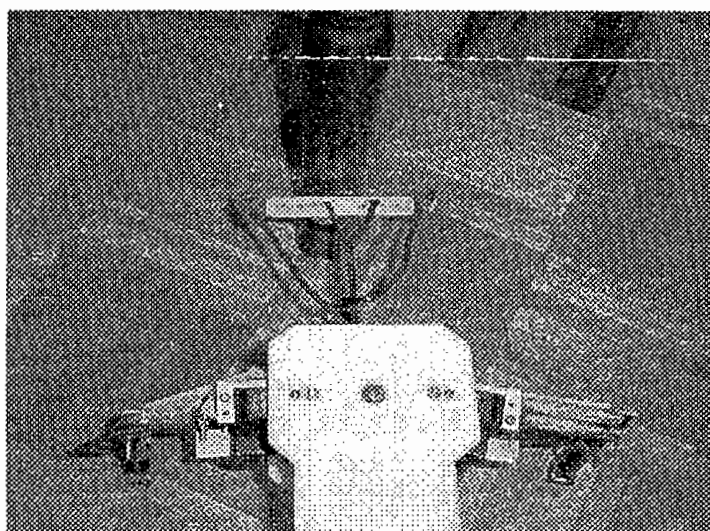
El robot hace uso de dos sensores para detectar obstáculos, éstos se hallan dispuestos en su parte frontal, el uno al lado derecho del robot, y el otro en el izquierdo, y dependiendo de esto tomará la decisión de girar al lado izquierdo o al derecho, respectivamente. No obstante, de las pruebas realizadas se observa que el robot presenta ciertas zonas ciegas, como son los costados del robot y en la mitad de los dos sensores frontales ya que no existen sensores en dichas zonas.



En la Figura 4.5b se puede observar un posible conflicto del robot al no detectar un obstáculo demasiado delgado, ya que está en la zona ciega.



*Figura 4.5a Robot evitando obstáculo*



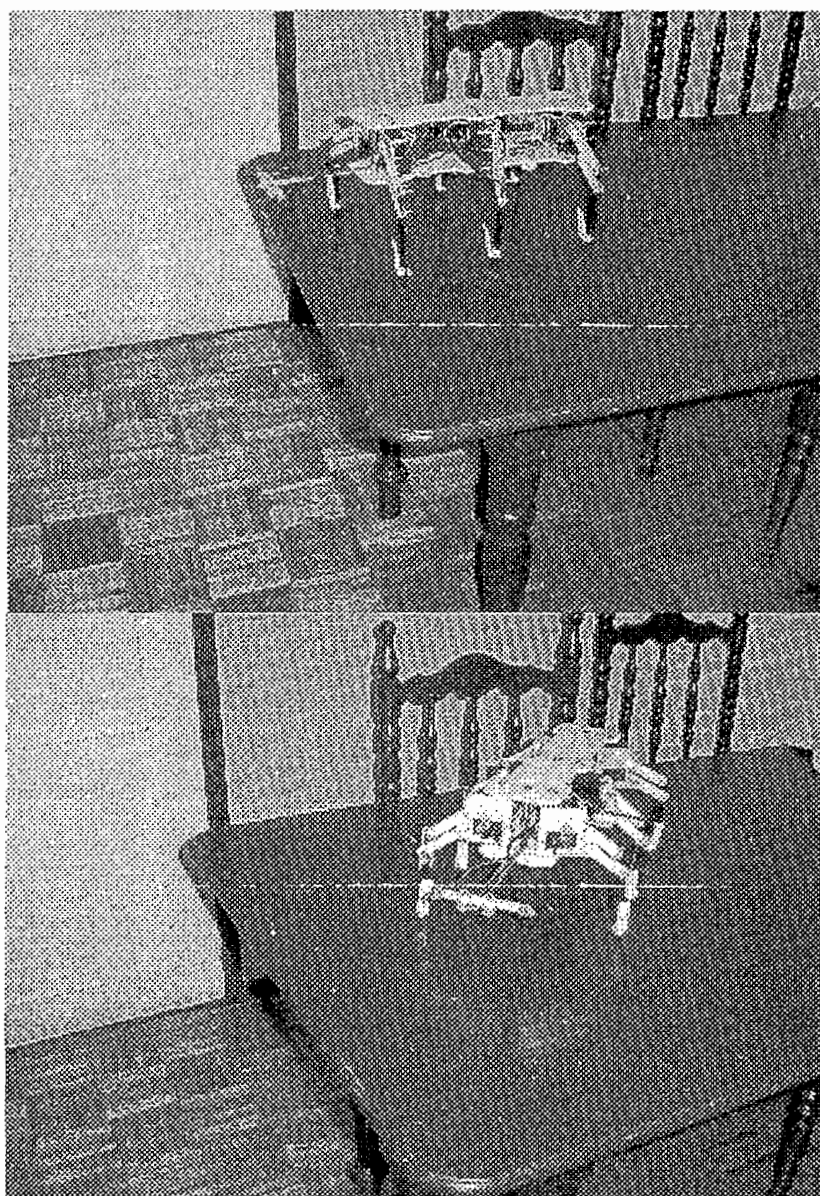
*Figura 4.5b Zona ciega del robot en la cual no detecta el obstáculo.*

#### 4.5.1 COMPORTAMIENTO FRENTE A HUECOS

Debido a que los sensores infrarrojos no tienen un comportamiento constante frente a objetos de diferentes colores, esto los hace poco útiles al momento de detectar huecos, puesto que si el robot quiere sobrepasar un objeto de color oscuro o negro estos sensores no lo detectan si no se encuentran cerca del objeto, es decir, en vista que los sensores de huecos están siempre detectando el suelo (0L), y lo que realmente van a detectar es la ausencia de éste, al cambiar la señal del sensor de estado de 0L a 1L, éstos se comportarían de manera incorrecta dando la orden de curvar cuando en realidad no hay la presencia de huecos. Esto implicaría ubicar a los sensores cerca del piso o junto a las patas, en su parte inferior. El problema de situarlos cerca del piso es que cuando el robot se aproxima a un obstáculo que puede ascenderlo, lo que sucedería es que al acercarse, primero tomaría contacto el sensor antes que la pata. Ubicarlos en la parte inferior de las patas ocasionaría que el instante en que va a subir un objeto podría tocar tanto la pata como el sensor y posiblemente causarían daños a este último, incluso en este caso el sensor dejaría de detectar el suelo únicamente cuando cualquiera de las patas delanteras estén a nivel del hueco, o sea cuando el robot esté a punto de caerse, lo que no es recomendable.

Los sensores ultrasónicos usados para el efecto, por su principio físico de funcionamiento no presentan las desventajas de los sensores infrarrojos, pero requieren de un hardware más complejo para su funcionamiento. De las pruebas realizadas con estos sensores se observa que el robot se comporta bastante bien ante la presencia de huecos; sin embargo, también se observó que el circuito de acondicionamiento es bastante sensible, especialmente cuando el robot sube obstáculos, enviando un pulso, lo que en el robot se traduce en una percepción falsa de obstáculo y por ende curva para evadirlo. Para evitar esto se hace una discriminación del pulso mediante software, comprobando dos veces para estar seguros que no sea un pulso falso, tiempo en el cual el robot se para momentáneamente. Sin embargo, esto es casi imperceptible el momento que el robot está caminando, por lo que se consideran los resultados satisfactorios.

Además, dependiendo del ángulo que exista entre el filo de la superficie y el eje longitudinal del robot, es probable, debido a su tamaño considerable, que la pata del robot llegue al filo antes que el sensor, lo que ocasiona que el robot se caiga. Esto se produce puesto que además de las dimensiones del robot, se tiene un solo sensor ultrasónico ubicado en el medio, y lo ideal sería poner dos sensores ultrasónicos repartidos a ambos lados, como la ubicación de los sensores infrarrojos. Con las pruebas elaboradas, el ángulo mínimo que puede haber para que no se produzca este problema es de  $50^\circ$ .



*Figura 4.6b Robot evitando un hueco*

### 4.5.2 RETROCESO Y GIRO

El robot retrocede siempre y cuando los sensores para evitar tanto paredes como huecos, cambien de estado, es decir detecten presencia. Si se observa con detenimiento al proceso de retroceso se notará que el algoritmo es el mismo que si estuviera caminando hacia delante.

En las pruebas se observa que el robot gira sin dificultad tanto para la izquierda como para la derecha, variando los ángulos de los servomotores de movimiento horizontal tan solo unos pocos grados, con esto se consigue que las articulaciones no experimenten fuerzas de torsión demasiado grandes que pueden fisurarlas o dañar el chasis. También es importante notar que el robot gira sobre un eje imaginario situado aproximadamente en el centro de masa del mismo, que como ya se dijo es el centro del triángulo formado por el trípode que está en tierra.

### 4.5.3 SOBREPASANDO OBSTÁCULOS PEQUEÑOS

La principal característica del robot hexápodo del presente proyecto, es la capacidad de sobrepasar obstáculos pequeños. En realidad el robot fue diseñado para superar obstáculos de una altura máxima de 6,5 cm; sin embargo, en las pruebas se puede observar que esta distancia disminuye a 5,5 cm, debido a factores como la inercia misma del sistema y el peso del hardware y las baterías. No obstante, esto es suficiente para superar los obstáculos planteados como objetivo, cuya altura es de 5 cm.

Los bumpers delanteros del robot usados para detectar los obstáculos funcionan correctamente, además que en las pruebas se nota la ventaja que tienen las extensiones plásticas colocadas en los bumpers delanteros (Figura 4.8a), que aumentan la superficie de contacto con el sensor, y por ende la efectividad al detectar obstáculos pequeños aumenta.

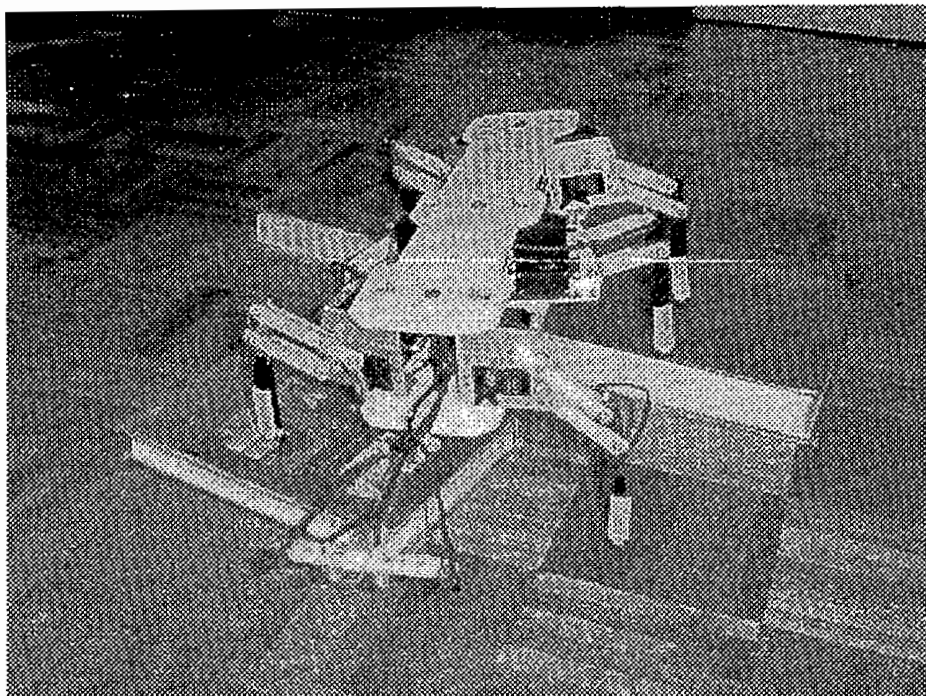
Se realizaron pruebas en varios ambientes y con obstáculos dispuestos en distintas formas, frente a lo cual el resultado fue exitoso. Se observó que el robot pasa con mayor facilidad obstáculos cortos como libros y canaletas de cableado, presentando mayor dificultad frente a obstáculos en los cuales el robot sube a un nivel superior al que se encontraba, puesto que en este caso el robot tiende a estar en una posición inclinada por más tiempo, produciéndose como ya se dijo un mayor esfuerzo en las patas traseras.

Finalmente, se debe también tomar en cuenta el momento en que el robot está bajando el obstáculo, donde se observa en cambio, un mayor esfuerzo de las patas delanteras, por el cambio de posición del centro de masa. En las pruebas se nota como si el robot tiende a trabarse en su parte delantera cuando el obstáculo a bajar es muy grande, pero finalmente siempre supera los obstáculos.

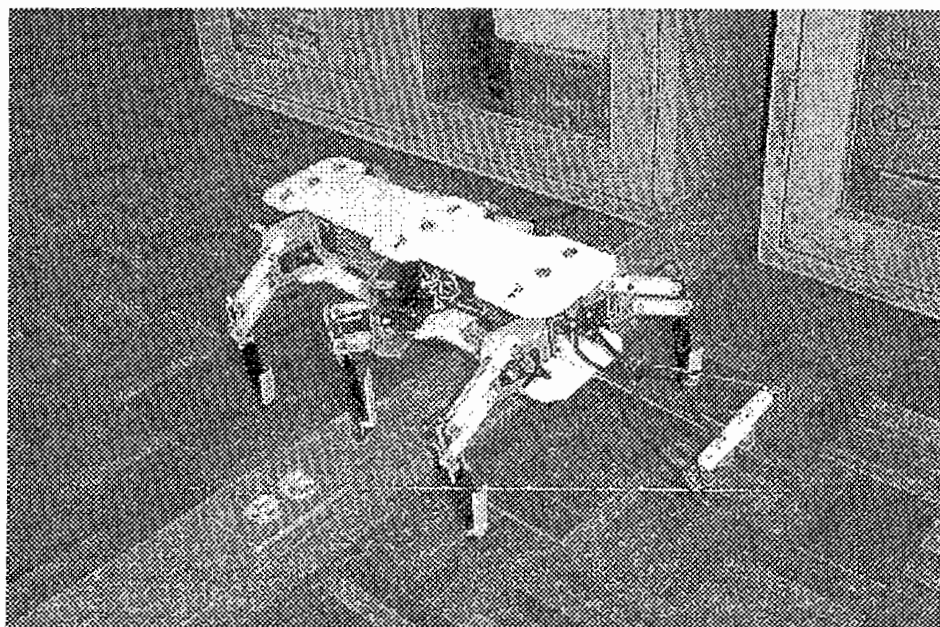


*Figura 4.8a Extensión de la palanca de accionamiento de bumper delantero*





*Figura 4.8b Robot atravesando un ambiente con obstáculos (libros)*



*Figura 4.8c Robot atravesando una canaleta*

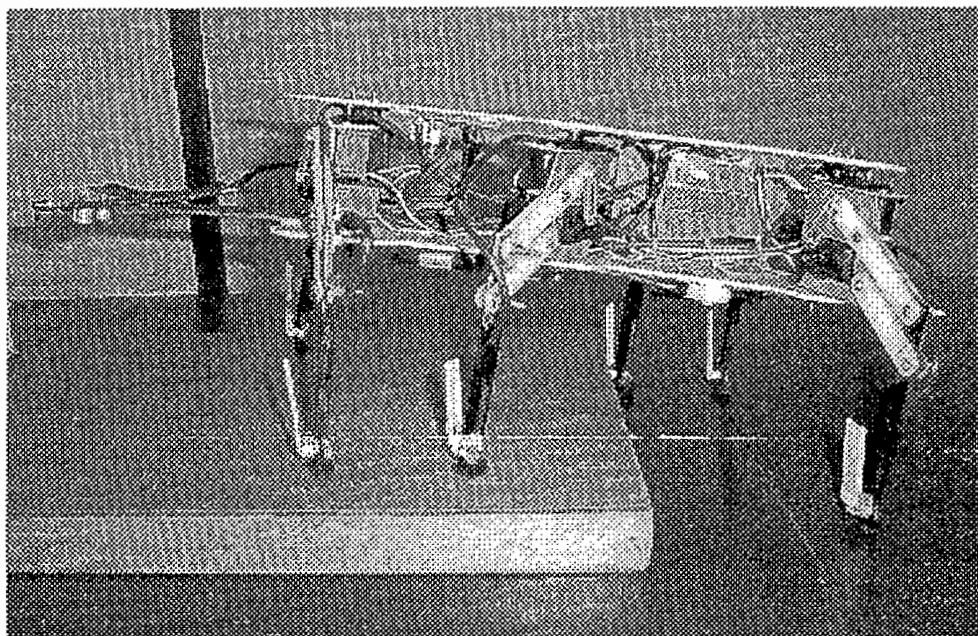


Figura 4.8d Robot subiendo a un nivel superior

#### 4.6 LISTA DE ELEMENTOS Y COSTOS

A continuación se presenta el listado de los elementos utilizados y los costos de los mismos en dólares Americanos.

Tabla 4.2 Lista de elementos y costos

Elemento	Cantidad	Costo Unitario (dólares)	Costo Total (dólares)
Servomotores	12	20	240
Bumpers	12	0.25	3
PIC16F877	1	12	12
Elementos electrónicos			15
Baterías			30
Cable de timbre			2
Espaguetis para cable			8

## CAPÍTULO 5

Por el modo de movilizarse en su entorno, el robot tiene un comportamiento reactivo. Se denomina reactivo porque el robot no tiene ningún modelo previo del entorno, sino que reacciona ante los estímulos de éste. A pesar de que este sistema de navegación le restringe un poco al robot en su capacidad de trasladarse por cualquier superficie al tener una percepción limitada del ambiente, presenta otras ventajas como la rapidez de procesamiento de la información y por ende la toma de decisiones por parte del robot. Esto corrobora la investigación de Braintenberg [4] que llama a estos robots como "robots con comportamiento explorador", debido a que modela un comportamiento de repulsión a los espacios cerrados y obstáculos, y una atracción a los espacios vacíos.



secuencias que debe realizarse para que el hexápodo cumpla un ciclo de desplazamiento (es decir, que hayan dado un paso todas las patas), hace que éste se comporte lento el momento de caminar, por lo que para el movimiento del robot hexápodo se escogió el de *secuencia dividiéndoles en trípodes que se alternan*. El movimiento por trípodes, al igual que los otros, le hace estable a la estructura ya que tiene siempre una base triangular en contacto con el piso, y además, el menor número de secuencias en comparación con los otros métodos que requiere para que el autómatas realice todos los pasos de su algoritmo y movilice todas sus patas le da rapidez el momento que avanza.

En todas las funciones que realiza el robot hexápodo, sea caminar, subir obstáculos, retroceder, girar a la derecha o izquierda, es indispensable que el ángulo de desplazamiento hacia delante y hacia atrás de cada una de las patas sea corto para lograr mantener una mayor estabilidad estática en el avance del robot. Los ángulos de desplazamiento grandes hacen que el robot tienda a caerse y pierda el equilibrio cuando el trípode que está en el aire se posiciona hacia el frente mientras el otro se desliza hacia atrás. Los ángulos cortos son también de gran ayuda en la actividad más crítica que es la del ascenso de obstáculos, ya que mientras sube el objeto, todo el peso del robot tiende a dirigirse hacia atrás y si son desplazamientos grandes, sobre todo de las patas traseras, es muy probable que el robot se vire.

Para obtener una mayor estabilidad del hexápodo cuando realiza sus movimientos, se puede modificar el algoritmo de movimiento por secuencia de trípodes que se alternan, en el paso en el cual las patas de cualquier trípode ascienden para moverse hacia delante. En este paso mientras las patas que están hacia atrás se levantan, las demás del otro trípode, que están adelante, se quedan en esa misma posición. Mediante el control de ubicación de los servos se cambia dicho paso, haciendo que las patas que están adelante se deslicen a la posición central mientras las otras ascienden; con este movimiento el robot se mantiene más equilibrado el instante en que uno de sus trípodes está fuera de contacto del piso.

Para mantener el equilibrio del robot, éste debe estar con por lo menos tres patas en contacto con el suelo, es por eso que es muy importante la disposición de los bumpers en cada base de la pata. Si no se colocan los bumpers inferiores el robot se limita a levantar sus trípodes a una altura determinada y esto causa problemas cuando el hexápodo quiere escalar algún obstáculo puesto que si topa con un objeto, suben primero las dos patas de adelante, en esta posición es muy posible que las patas del medio no estén tocando el suelo si la altura del objeto es grande, y por tanto el robot queda moviéndose en el mismo sitio y no puede ascender ya que no tiene por lo menos un trípode en contacto con la superficie. Es por eso que la implementación de bumpers en la base de las patas permiten revisar si el trípode que asciende está fuera de contacto con el suelo, lo que es de gran ayuda en la caminata y en el avance ante cualquier traba.

El momento en que descienden las patas de un trípode, se debería revisar si están en contacto con el piso (o sea si los bumpers hicieron contacto) para levantar el siguiente trípode y avanzar; sin embargo este método no siempre es beneficioso ya que en ciertos terrenos irregulares puede que una de las patas no haya tocado el suelo por la geometría misma de los bumpers, y por consiguiente no podría levantar el otro trípode. Por medio del control lo que se hace es levantar el trípode correspondiente, revisando que sus bumpers inferiores se despeguen del piso y garantizando de esa manera que el robot esté apoyado en el otro trípode. Solo si esto sucede, el trípode podrá desplazarse hacia delante, caso contrario, seguirán levantándose hasta lograr estar fuera de contacto de cualquier superficie.

Es recomendable que el desplazamiento vertical de las patas no sea grande para garantizar un movimiento armónico en el robot puesto que los trípodes llegan más rápido a sus siguientes posiciones.

Los servomotores son los actuadores de mayor utilidad para el movimiento de robots articulados; ya que permiten el control exacto de su posición en cualquier instante.

El tipo de servomotor seleccionado no necesita un lazo cerrado de control, ya que posee internamente la circuitería necesaria para realizar el control de posición. Lo que realmente controla el movimiento del hexápodo es una serie de secuencias de pulsos aplicadas individualmente a cada motor de manera coordinada. Para generar estos pulsos se utilizan los microcontroladores que son muy útiles en el ámbito de la microrrobótica.

Es importante considerar que un control demasiado complejo para el robot hexápodo con numerosos lazos de realimentación para saber la mayor cantidad de variables tanto internas como externas puede no resultar lo mejor ya en la práctica. De hecho, evidencia biológica sugiere que un alto nivel de retroalimentación sensorial no es necesario para lograr tareas básicas de locomoción. Para muchos animales, tales como gatos y cucarachas, el movimiento cíclico de sus miembros son controlados por grupos de neuronas capaces de mantener el movimiento con un bajo nivel de percepción sensorial.

Mientras más sensores hayan distribuidos en los robots móviles, mayor facilidad tendrán para interactuar con el entorno y realizar sus funciones de manera autómata.

Los sensores infrarrojos son estables en su operación; sin embargo, además que no son de gran alcance, tiene la desventaja de no ser inmunes a la luz solar por lo que pueden no detectar un objeto resplandeciente o luminoso, lo que haría que choque el robot, o por el contrario dar un pulso falso haciendo que el robot gire.

Debido a las características propias de los sensores el robot tiene dificultades al caminar sobre terrenos que no sean sólidos, como se explicó en el capítulo de resultados. Para solucionar este inconveniente se recomienda cambiar la lógica de funcionamiento del sensor de proximidad ultrasónico, es decir en lugar de detectar únicamente la onda de rebote, es mejor medir el tiempo de vuelo de la onda que viaja, haciendo más estable y fiable al sensor.

Los sensores de proximidad ópticos usados para el proyecto (IS471F), no son totalmente inmunes a interferencias de luz normal, especialmente cuando están bajo la incidencia directa de los rayos solares, por lo que se recomienda usar sensores ultrasónicos en lugar de los ópticos.

Los robots caminantes presentan muchas dificultades desde un punto de vista de ingeniería. El control de estas plataformas requiere un entendimiento más profundo de su dinámica. Mucho de su comportamiento y rendimiento energético se basa en las propiedades inherentes de su estructura mecánica y del mismo modo, la complejidad mecánica es uno de las mayores motivos de fallas en los robots y a mayor complejidad el costo aumenta considerablemente; además que a mayor grados de libertad que posea el sistema, menor será la confiabilidad ya que aumentan el número de actuadores.

La coordinación de los movimientos es realmente un reto en el diseño de controladores para estos sistemas, por lo que la solución más simple a estos problemas es usar algoritmos que garanticen la estabilidad estática manteniendo el centro de masa dentro del área formada por las patas que se encuentran en el piso. La efectividad de este método, sin embargo, ha sido basada en la necesidad de operar a bajos niveles de velocidad donde la cinemática domina el comportamiento, sacrificando de esa manera velocidad por fuerza necesaria para sobrellevar los obstáculos.

El rozamiento entre el sistema de barras, y en los puntos de unión de las barras con el soporte juega un papel muy importante en el torque requerido por el motor, por lo que se debe procurar disminuir lo máximo posible el mismo. A pesar que lo ideal sería usar rodamientos en las juntas para reducir el rozamiento, en la práctica resulta demasiado costoso adquirirlos para esas dimensiones. Una alternativa más económica es usar pasadores y untar grasa liviana o lubricante líquido en las superficies en contacto.

La resistencia de los materiales a la torsión es un factor que se debe tomar muy en cuenta al momento de seleccionar los mismos, puesto que mientras más se

doblen los materiales cuando el robot está caminando o subiendo obstáculos mayor será el torque necesario para mover al robot, con lo que se comprueba que el torque ejercido por los motores aumenta considerablemente mientras menos rígidas sean las piezas.

Se debe procurar que las barras estén aseguradas o ajustadas correctamente entre sí, ya que de lo contrario esto afectaría en la dinámica del sistema, especialmente en la estabilidad del robot.

El centro de masa de un robot articulado es un factor muy importante a considerar en la dinámica del sistema, pues de la ubicación del mismo dependerá la estabilidad del robot. El centro de masa debe estar situado en el centro del robot. Esto se logra ubicando las patas en el chasis de tal forma que los puntos de contacto con el suelo formen en lo posible un triángulo equilátero, entonces el centro de masa por geometría estará en el centro de esta región poligonal y por ende en el centro del robot. Así mismo, es recomendable ubicar la mayor cantidad de peso del robot lo más cercano al piso para lograr que el centro de masa esté también cercano al mismo, con esto se garantiza una buena estabilidad, especialmente en las operaciones de subir o bajar obstáculos, en la cual el robot tiende a virarse hacia delante (cuando baja obstáculos), o hacia atrás (cuando sube obstáculos).

El robot hexápodo usa doce servomotores, además de los sensores externos necesarios para su funcionamiento y navegación, esto implica un consumo de corriente bastante elevado para las baterías comunes y corrientes. Para la aplicación se utilizó baterías de níquel - metal hidruro, de 2,1 A/h lo cual permite hacer funcionar al robot por un período considerable de tiempo; sin embargo, para el robot es necesario considerar no solamente la capacidad de corriente que puede entregar la batería sino también su geometría. Como se explicó anteriormente la ubicación del centro de masa es muy importante por lo que si se coloca el banco de baterías en la parte de atrás del hexápodo, éste tiene dificultades al subir obstáculos, ya que sus servomotores traseros no soportan el peso ejercido sobre ellos, impidiendo que el robot suba el obstáculo. *En cambio si*

se colocan las baterías en la parte delantera el robot presenta problemas al bajar obstáculos. La mejor opción es distribuir el peso de las baterías a lo largo de todo el robot, con lo que se logra una estabilidad aceptable.

En robótica móvil, cuando se trabaja con baterías es imprescindible poner todas las protecciones para evitar cortocircuitos, ya que los mismos pueden causar calentamiento de las baterías disminuyendo su vida útil, dañarlas definitivamente, o en el peor de los casos explotar y causar quemaduras serias al operario.

El diseño mecánico implementado permite un ensamble y desensamblaje fácil, y posibilita además el uso de materiales livianos como el acrílico en algunas partes y de una buena rigidez como el aluminio. Esto reduce el peso total del robot que es un factor bastante crítico puesto que a mayor peso del robot sería necesario usar servomotores de mayor torque lo que además de ser difícil de conseguir en el mercado local, triplicaría el precio de los servomotores estándar utilizados.

El sistema de barras paralelas se lo diseñó cinemáticamente de tal manera que el robot alce la pata 6.5 cm del suelo, sin embargo, esta distancia se reduce a 5,5 cm cuando el hexápodo está en movimiento. Esto se debe a que no se consideró en el diseño el aspecto dinámico del robot, como aceleración e inercia del sistema, los cuales influyen en el comportamiento del autómatas cuando se halla en movimiento.

El uso de computadoras en aplicaciones de diseño mecánico y simulación de modelos matemáticos, ha cobrado una gran fuerza en los últimos tiempos, como una ayuda poderosa al momento de diseñar y simular estructuras. Estas aplicaciones computacionales dedicadas han sido usadas tanto para simular la dinámica de las cargas que intervienen en los sistemas robóticos, como para tener una buena aproximación del comportamiento de las estructuras previa su construcción, ahorrando tiempo y dinero.

Para una adecuada movilización sobre ambientes naturales con un terreno muy irregular y demasiados obstáculos sería recomendable hacer una navegación

combinando la movilización autónoma reactiva, con la posibilidad de operar al robot a distancia dependiendo de las circunstancias y del ambiente en sí, esto le daría al robot una gran capacidad de exploración de obstáculos.

El estudio e implementación de la estructura mecánica más adecuada para un sistema de patas articuladas, así como el análisis cinemático y dinámico del mismo, requiere de una profunda comprensión de la mecánica del sistema y de las leyes básicas que la rigen. Estos conocimientos no son parte del perfil profesional en la Carrera de Ingeniería en Electrónica y Control, por lo que se recomienda hacer este tipo de proyectos conjuntamente con estudiantes de la Carrera de Ingeniería Mecánica, para de esa manera tener la posibilidad de ampliar los objetivos en cuanto al control se refiere, como por ejemplo explorar técnicas de navegación más complejas con robots hexápodos o planificación de trayectorias.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Pérez V. (2001), La Robótica, SANLOZ holonic.  
<http://www.geocities.com/Eureka/Office/4595/robotica.html>
- [2] Barrientos A., Fundamentos de Robótica, Editorial McGraw-Hill
- [3] Espina M. (1997), Robótica y aplicaciones.  
<http://www.monografias.com/trabajos10/robap/robap.shtml>
- [4] Chávez J. (2001), Análisis y Desarrollo de Técnicas para la Exploración de un Ambiente Desconocido por un Robot Móvil, Universidad de las Américas-Puebla.  
[http://www.pue.udlap.mx/~tesis/msp/chavez\\_a\\_ja/seccion\\_2\\_3.pdf](http://www.pue.udlap.mx/~tesis/msp/chavez_a_ja/seccion_2_3.pdf)
- [5] Robots: tipos y definiciones  
<http://usuarios.bitmailer.com/aperobot/robots.htm>
- [6] Prieto A. (2003), Diseño y construcción de un robot articulado que emula modelos animales: aplicación a un gusano, IEA ROBOTICS.  
[http://www.iearobotics.com/personal/juan/proyectos/cube-2.0/doc/cube\\_1.pdf](http://www.iearobotics.com/personal/juan/proyectos/cube-2.0/doc/cube_1.pdf)
- [7] Carabaza F. (2003), Máquinas que piensan.  
<http://www.acicuecalo@yahoo.com>
- [8] Six-Legged Walker  
<http://home.hccnet.nl/raymond.van.elst/sixleg.htm>

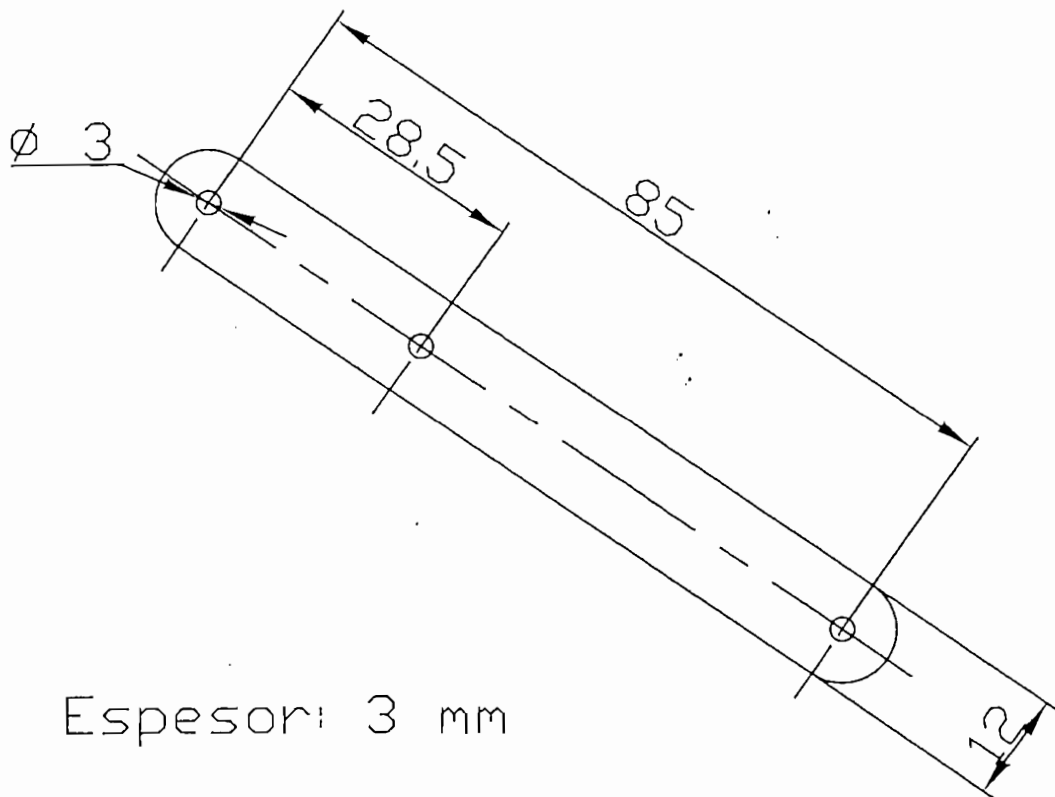


- [9] Howard V., Hexapod Robot  
[http://www.ocf.berkeley.edu/~vincebot/robots/bio-logical/mrroach/mr\\_roach\\_hexapod\\_robot.htm](http://www.ocf.berkeley.edu/~vincebot/robots/bio-logical/mrroach/mr_roach_hexapod_robot.htm)
- [10] Jet Propulsion Laboratory (2003), Arañas robot en Marte  
<http://axxon.com.ar/not/123/c-123InfoAranaRobot.htm>
- [11] Prieto A. (2003), Evolución de la Robótica, IEA ROBOTICS .  
<http://www.iearobotics.com/personal/andres/proyectos/pucho/pucho.html>
- [12] Capítulo 2: Sensores Ultrasónicos  
[http://www.pue.udlap.mx/~tesis/msp/amador\\_g\\_ja/capitulo2.pdf](http://www.pue.udlap.mx/~tesis/msp/amador_g_ja/capitulo2.pdf)
- [13] Sensor Ultrasonic,40KHZ, Jameco.  
<http://www.jameco.com>
- [14] Lm 567. Data Sheet  
<http://www.national.com/pf/LM/LMC567.html>


## **ANEXOS**

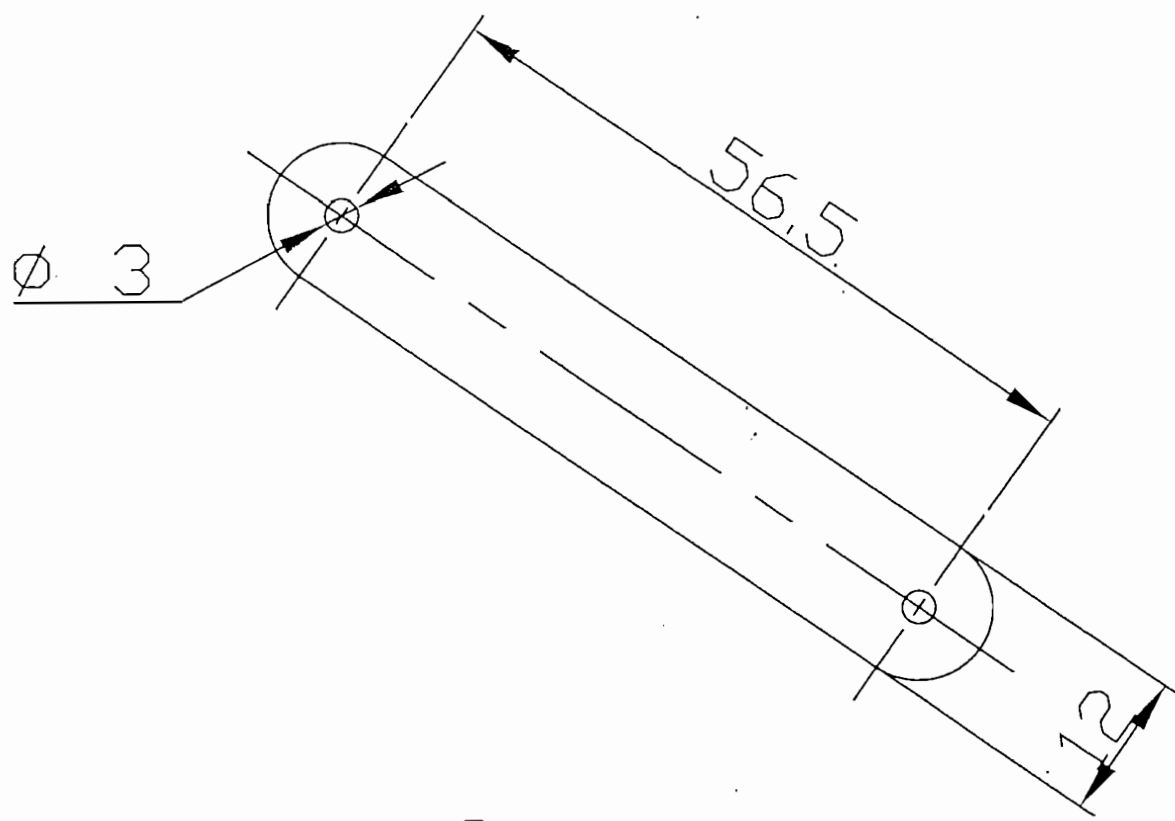
**ANEXO A**

**PLANOS**



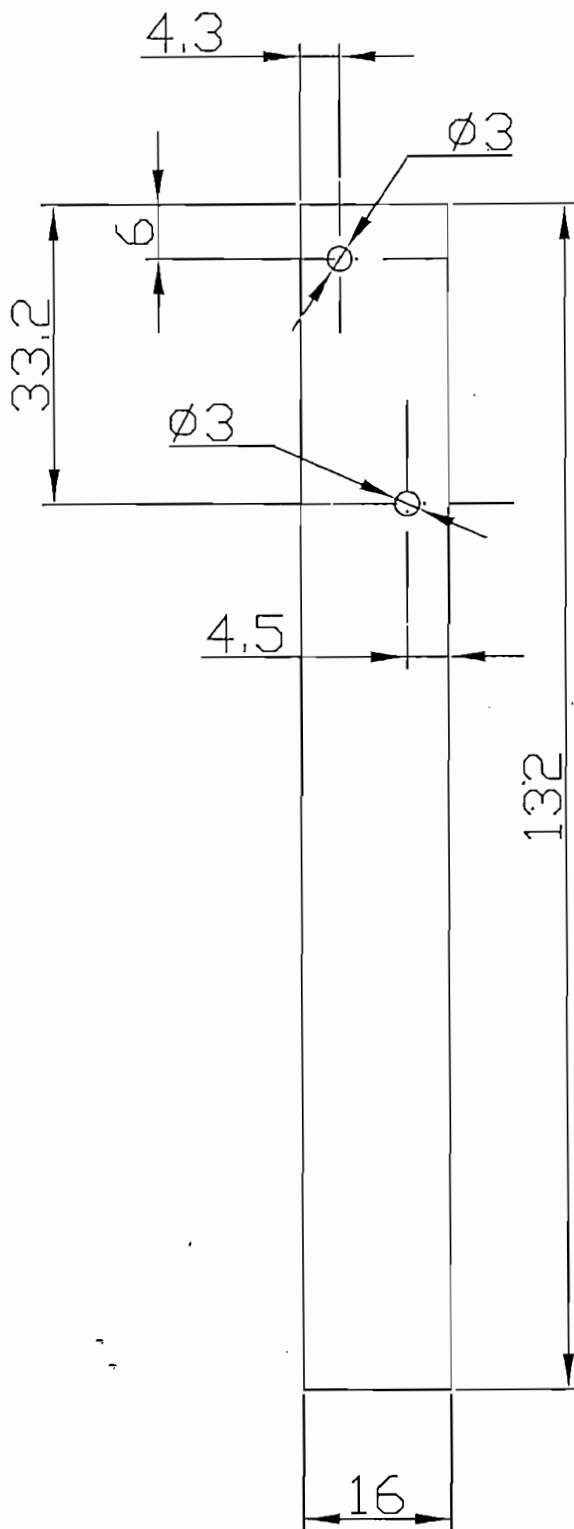
Espesor: 3 mm

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL: ACRILICO	CANTIDAD: 6
BUJADO				NOMBRE: BARRA 1	ESCALA: 1:1
REVISADO					
PROBADO					
E.P.N.				TOLERANCIA GENERAL: $\pm 0.5$	
CARRERA DE INGENIERIA ELECTRONICA EN CONTROL				SUBSTITUYE A:	

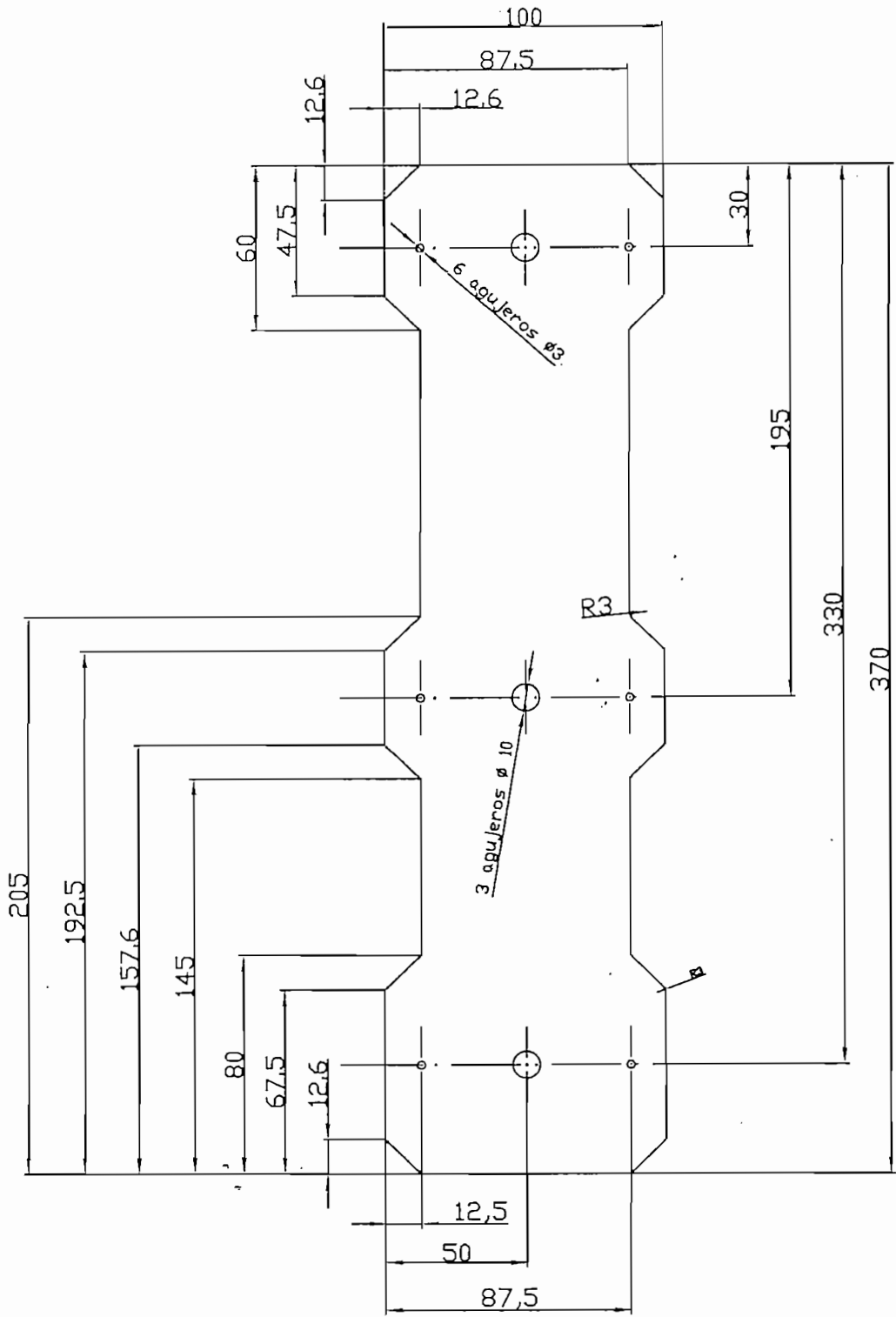


Espesor: 3 mm

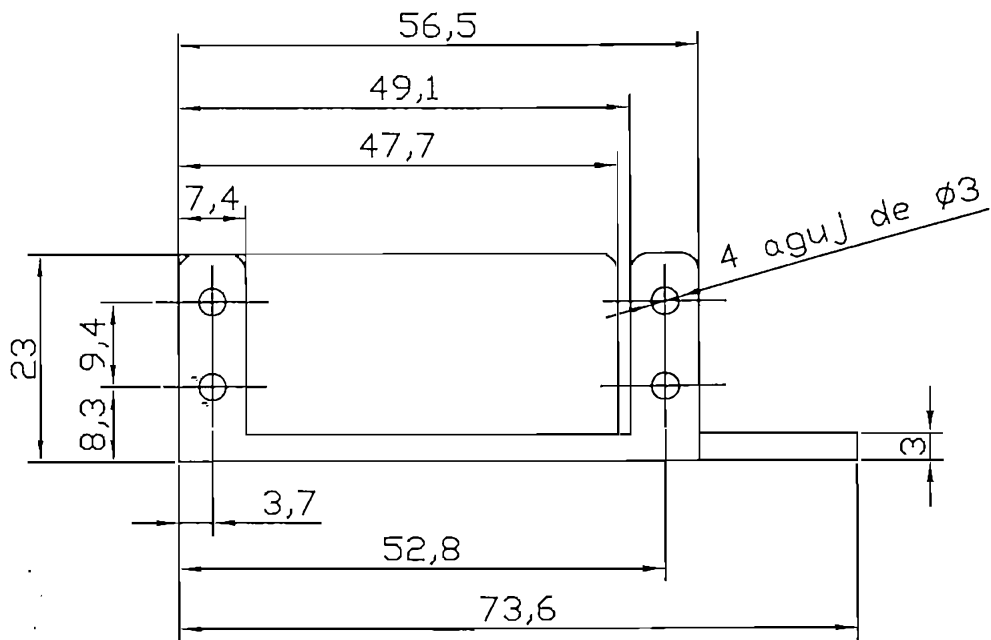
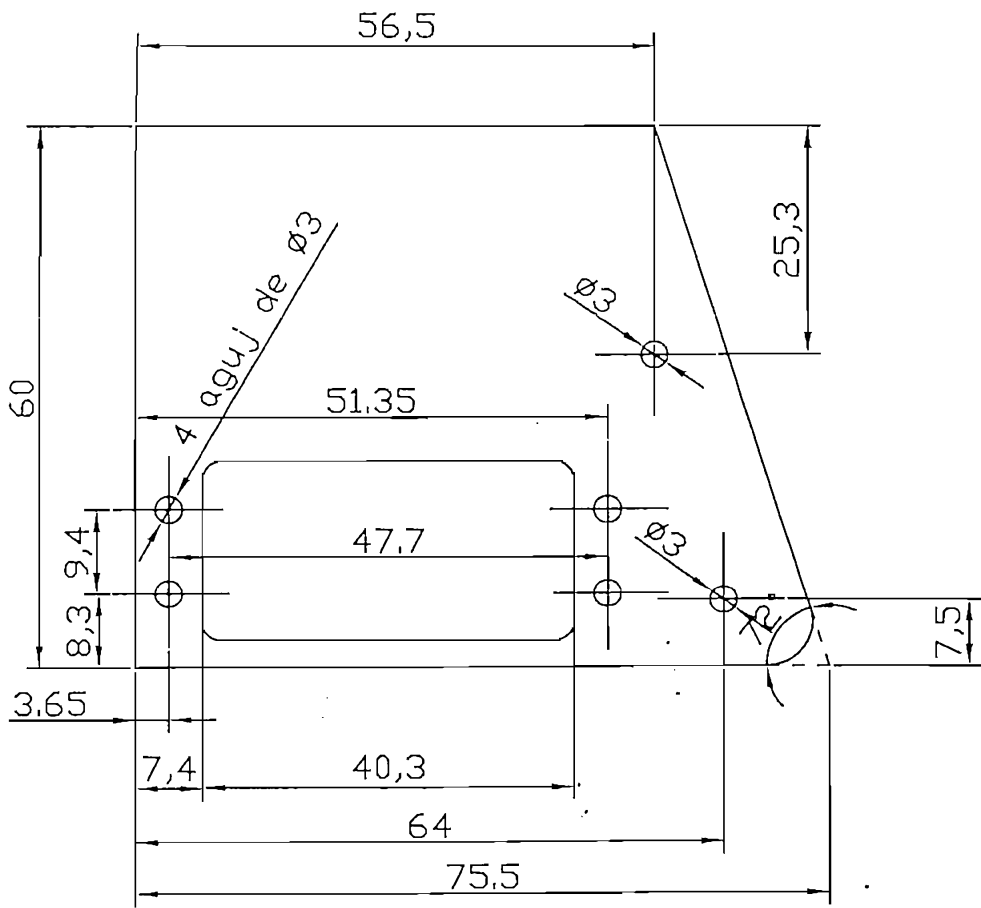
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL: ACRILICO	CANTIDAD: 18
REVISADO				NOMBRE: BARRA 2	ESCALA: 1:1
PROBADO					
E.P.N. CARRERA DE INGENIERIA ELECTRONICA EN CONTROL				TOLERANCIA GENERAL: ±0.5	
				SUBSTITUYE A:	



	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL: ALUMINIO	CANTIDAD: 6
BUJADO				NOMBRE: PATA	ESCALA: 1:1
EVISADO					
PROBADO					
E.P.N. CARRERA DE INGENIERIA ELECTRONICA EN CONTROL				TOLERANCIA GENERAL: $\pm 0.5$	
				SUBSTITUYE A:	Lámina N°: 03



	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL:	CANTIDAD:
DISEÑADO				ACRILICO e = 3mm	2
REVISADO				NOMBRE:	ESCALA:
PROBADO				CHASIS	1:1
E.P.N.				TOLERANCIA GENERAL: $\pm 0.5$	
CARRERA DE INGENIERIA ELECTRONICA EN CONTROL				SUBSTITUYE A:	



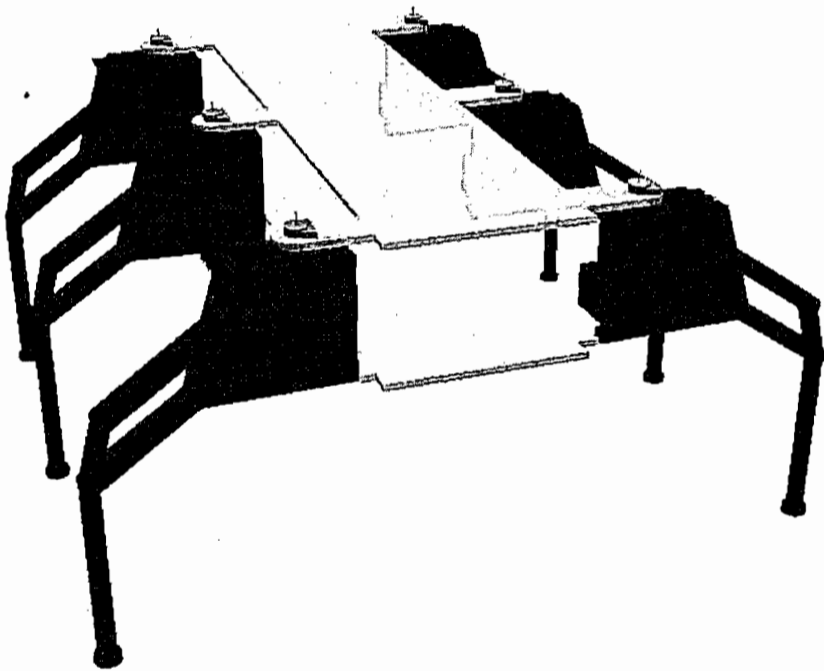
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL: ALUMINIO	CANTIDAD: 3
DIBUJADO				NOMBRE: HOMBRO	ESCALA: 1:1
REVISADO					
APROBADO					
E.P.N.				TOLERANCIA GENERAL: $\pm 0.5$	
CARRERA DE INGENIERIA ELECTRONICA EN CONTROL				SUBSTITUYE A:	



**ANEXO B**  
**SIMULACIONES**

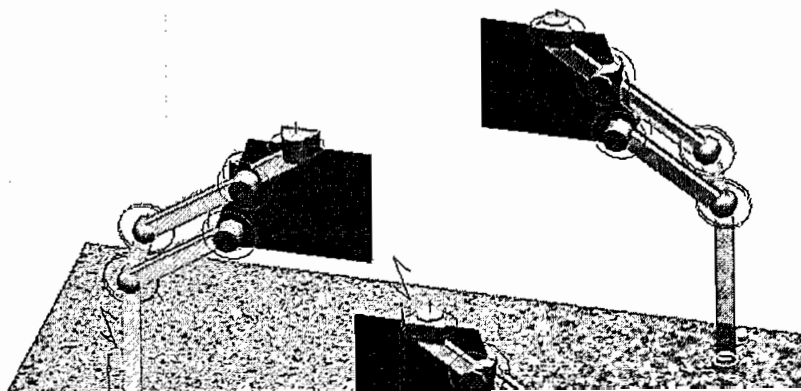
## SIMULACIÓN EN WORKING MODEL 4D

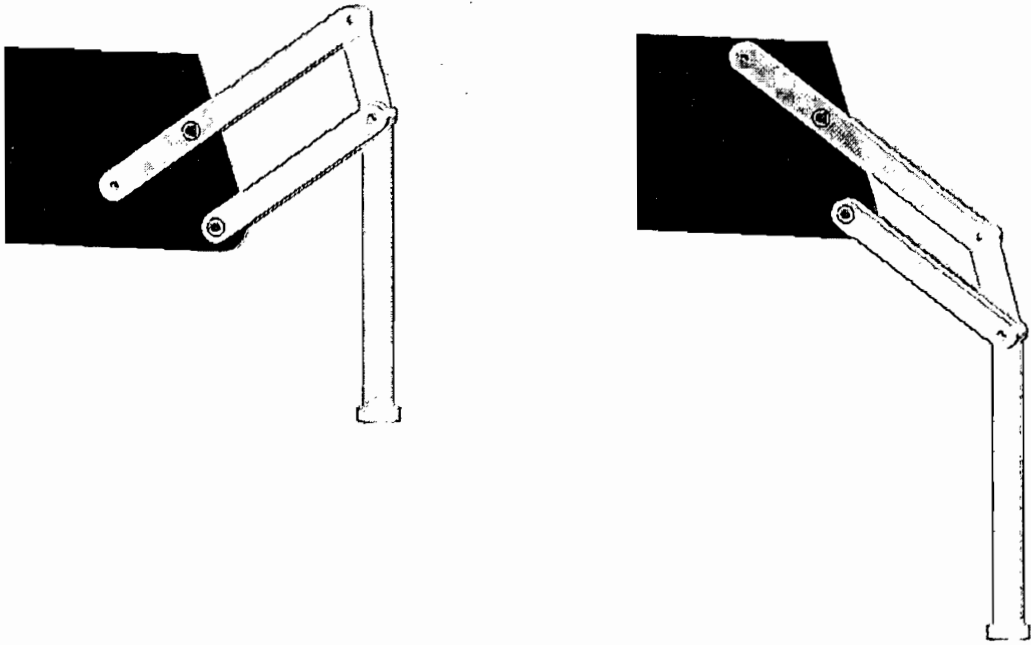
El programa Working Model 4D, es un paquete computacional muy poderoso que permite la simulación de estructuras mecánicas tridimensionales, diseñadas previamente en AUTOCAD o en el mismo programa. Este software resulta de gran ayuda para analizar el comportamiento tanto cinemático como dinámico del robot, puesto que permite simular el movimiento del conjunto pata hombro y analizar los posibles puntos de ruptura de los mismos, seleccionando los materiales a utilizarse previo la manufactura. Además, se obtuvieron gráficas de los desplazamientos del conjunto pata hombro tanto angular como lineal. A continuación se presenta las gráficas de los prototipos diseñados tridimensionalmente, y de las gráficas obtenidas de las simulaciones.



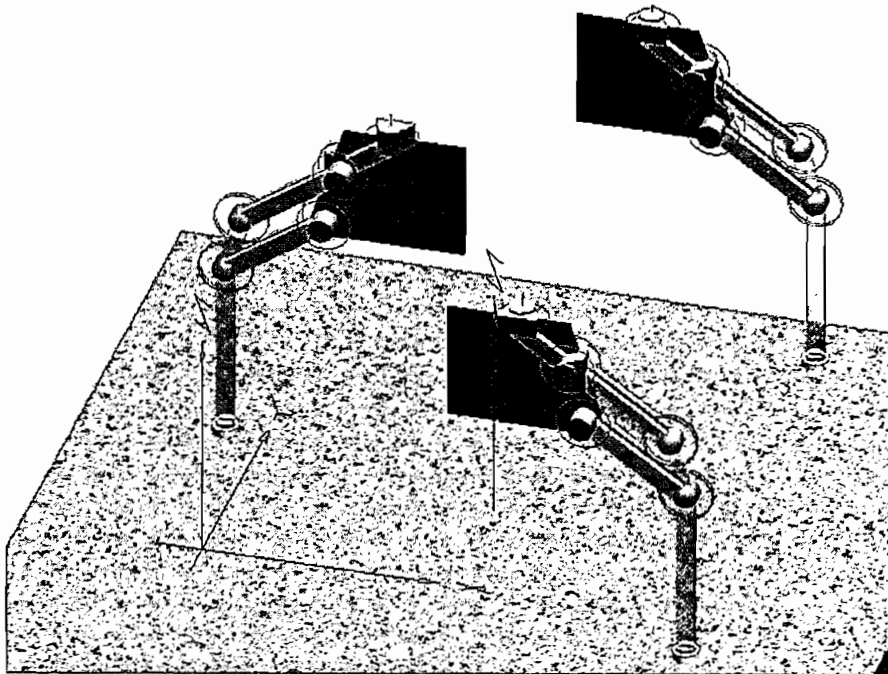
*Figura B.1 Prototipo virtual de robot hexápodo.*

*Figura B.2 Simulación del movimiento vertical del conjunto pata-hombro.*





*Figura B.2 Simulación del movimiento vertical del conjunto pata-hombro.*



*Figura B.3 Simulación tridimensional del movimiento del trípode.*

La Figura B.4 representa el máximo desplazamiento angular horizontal en grados del conjunto pata-hombro en función de un tiempo dado para la simulación. Este ángulo es el máximo permisible para que las patas no choquen entre sí cuando se mueven horizontalmente (en el plano paralelo al piso).

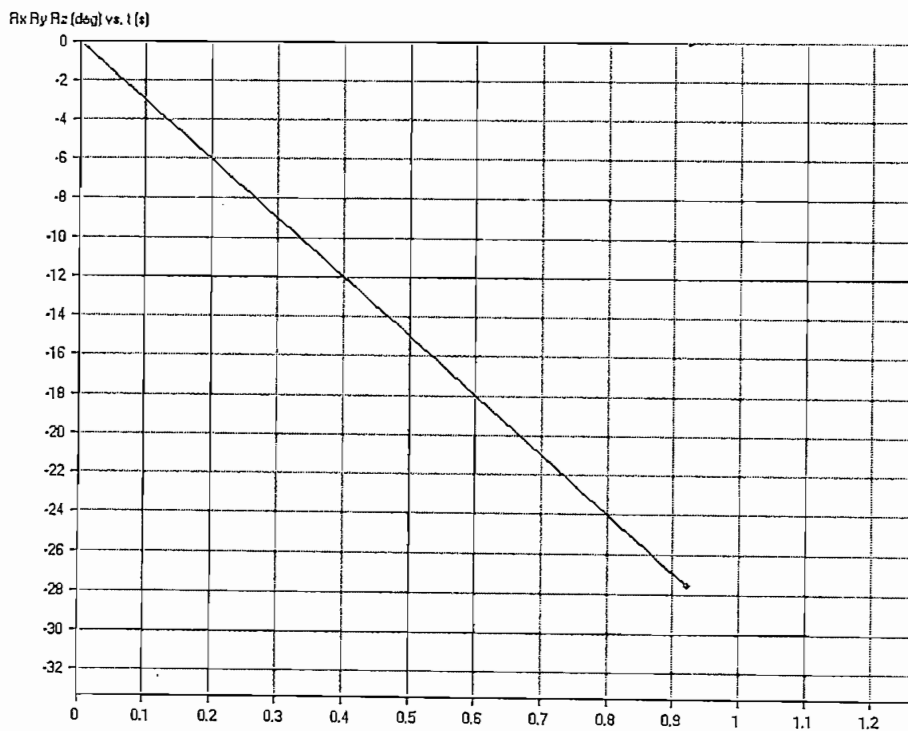


Figura B.4 Gráfica de desplazamiento angular horizontal del conjunto pata-hombro vs tiempo

La Figura B.5 consta de tres gráficas:

La gráfica 1 representa el desplazamiento lineal de la pata en centímetros, medida desde el suelo. Este es de 6,5 cm.

La gráfica 2 muestra la desviación en el desplazamiento vertical de la pata, puesto que ésta cuando sube esta siempre paralela al cuerpo pero no es equidistante al mismo en todo momento, formando en su trayectoria un segmento de circunferencia. Esta desviación es de 1 cm.

La gráfica 3 representa el movimiento horizontal de la pata, que para la simulación no fue tomado en cuenta por lo que no varía en el tiempo.

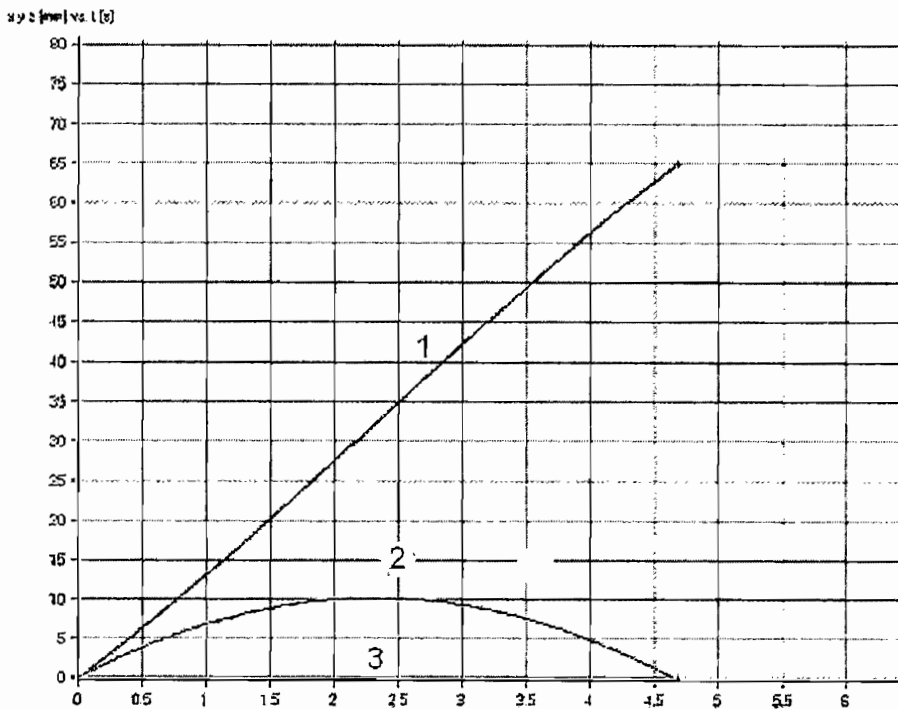
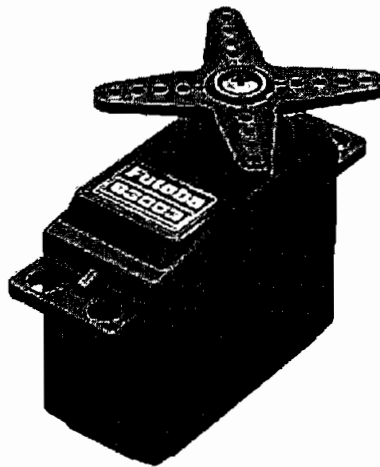


Figura B.5 Gráfica de desplazamiento vertical del conjunto pata-hombro Vs tiempo.

## SERVOMECANISMOS

Para el movimiento del robot hexápodo se necesitan de unos motores con control de posición. Debido a que sus articulaciones (patas) deben situarse en diferentes y determinadas posiciones, no es indispensable que sean de revolución continua, con un giro de  $180^\circ$  es suficiente, un tipo de motores que cumplen las características anteriormente mencionadas constituyen los servomecanismos, que se utilizan con mucha frecuencia en aplicaciones de aerodelismo para mover los alerones, subir y bajar trenes de aterrizaje, orientar hélices, acelerar o decelerar motores y un sin fin de aplicaciones más. Entre todos los modelos que existen, sobresale una marca por su calidad, son los servomecanismos FUTABA.



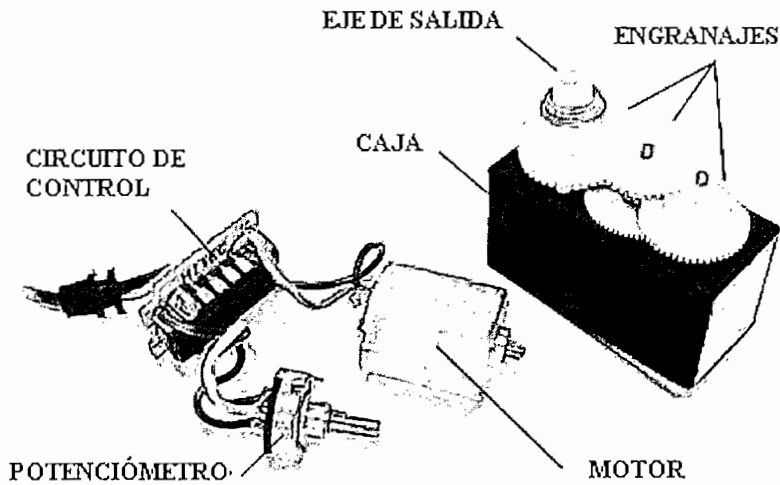
*Figura C.1 Servomecanismo Futaba*

Un servomotor es un dispositivo pequeño que tiene un eje de salida. Este eje se puede colocar a las posiciones angulares específicas enviando al servo una señal cifrada. Mientras la señal cifrada exista en la línea de entrada, el servo mantendrá la posición angular del eje. Mientras que si la señal cifrada cambia, la posición angular del eje cambia. En la práctica, los servos se utilizan en aviones controlados por radio, para colocar superficies de control como los elevadores y los timones. También se utilizan en los coches controlados por radio, marionetas, y por supuesto, en robots articulados.

## ESTRUCTURA DE UN SERVOMOTOR

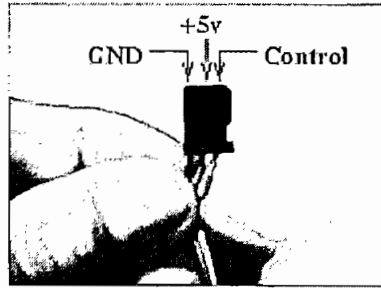
Los servos vienen en "tamaños estándares" (de modo que quepan bien en los modelos) y utilizan un circuito de control. A diferencia de los motores de fines generales, los servos no dan rotaciones completas, ellos tienen una rotación limitada a un rango de ángulo comprendido entre 0° y 180°.

Los servomotores son extremadamente útiles en robótica. Son pequeños, como se puede ver en la Figura C.1, sin embargo, un servo estándar, tal como el Futaba S-3003 o el FP-S148, que tienen 42 oz/inches de esfuerzo de torsión, es bastante fuerte para su tamaño; por lo que ligeramente cargado no consume mucha energía. La estructura de manera general se muestra en la Figura C.2, y en la que se aprecia el trazado de circuito del control, el motor, un sistema de engranajes, y el casco o caja.



*Figura C.2 Estructura general de un servomotor*

Además, exteriormente consta de tres cables que salen de su cajita (Figura C.3). El rojo es de alimentación de voltaje, funcionan típicamente con 4.8V, pero a menudo trabajan con voltajes entre 4.8 y 6 voltios. El cable negro es de tierra (0V o GND). El cable blanco (en algunos casos amarillo) es el cable por el cual se le pide al servomotor en qué posición acomodarse (de 0 a 180 grados).



*Figura C.3 Cables externos del servomotor*

Más detalladamente se puede observar en la Figura C.4 la estructura o partes de un servo. Comenzando por la parte superior se tiene:

- 1 La rueda del eje de salida,
- 2 La tapa de la caja reductora,
- 3 Los engranajes que forman la caja reductora,
- 4 La caja del servomotor,
- 5 La tarjeta de control, la cual consta de un potenciómetro, un circuito de control y un motor; y por último,
- 6 La tapa del servomotor junto con los tornillos de sujeción.



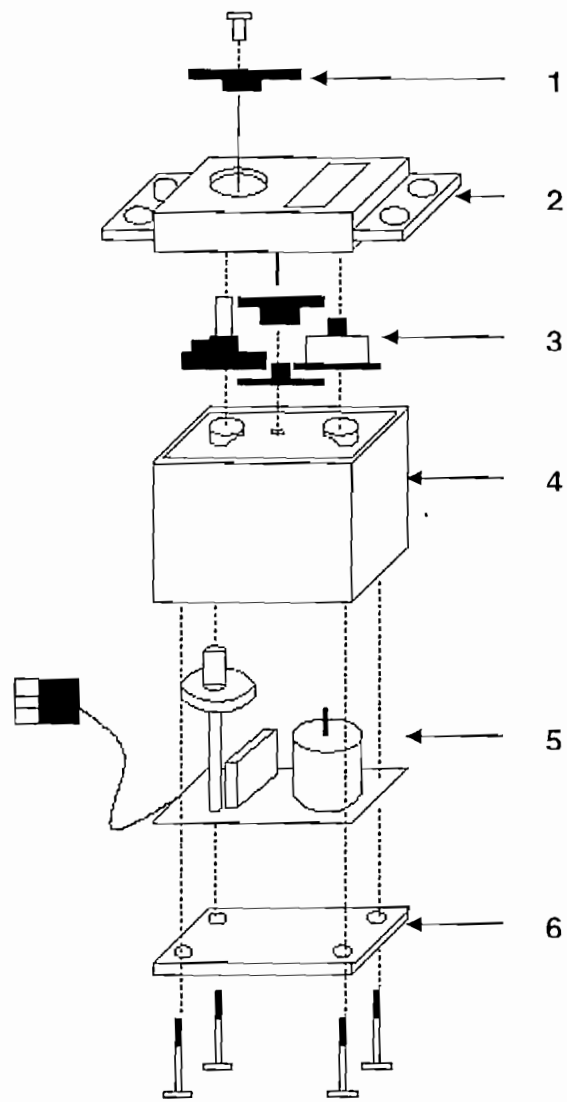
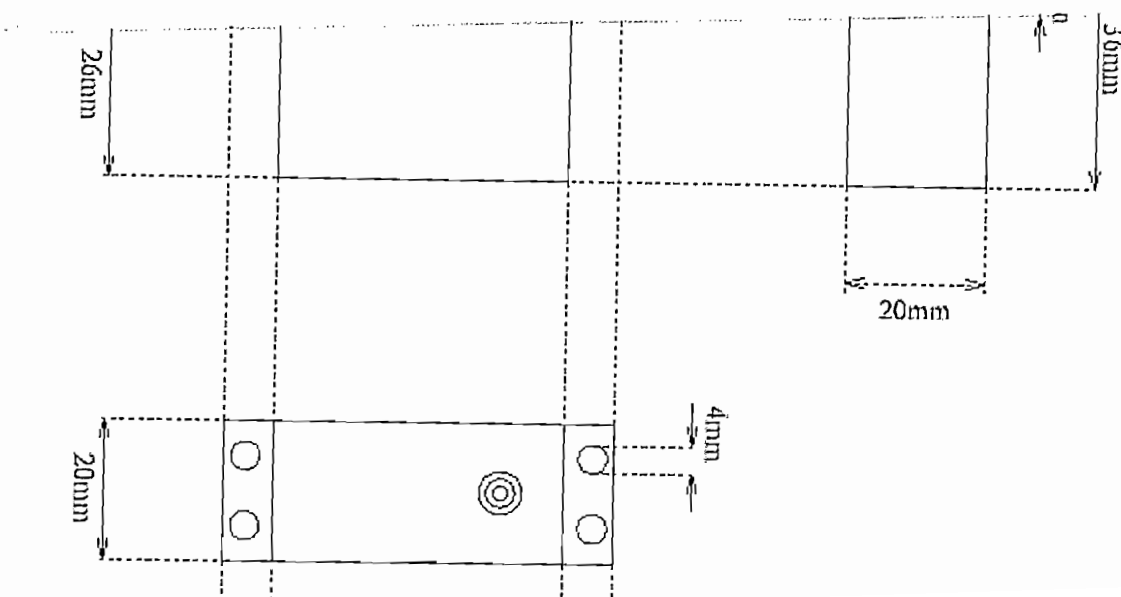


Figura C.4 Estructura del Futaba S3003.



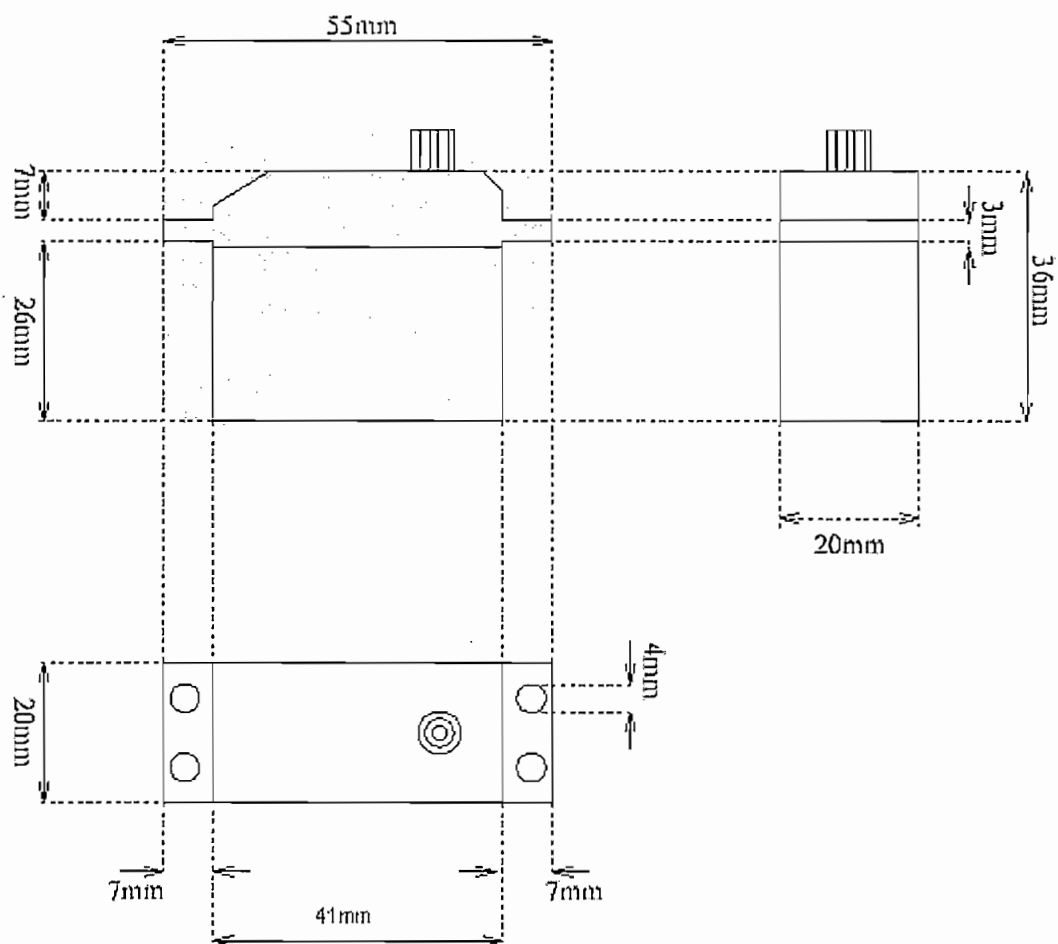
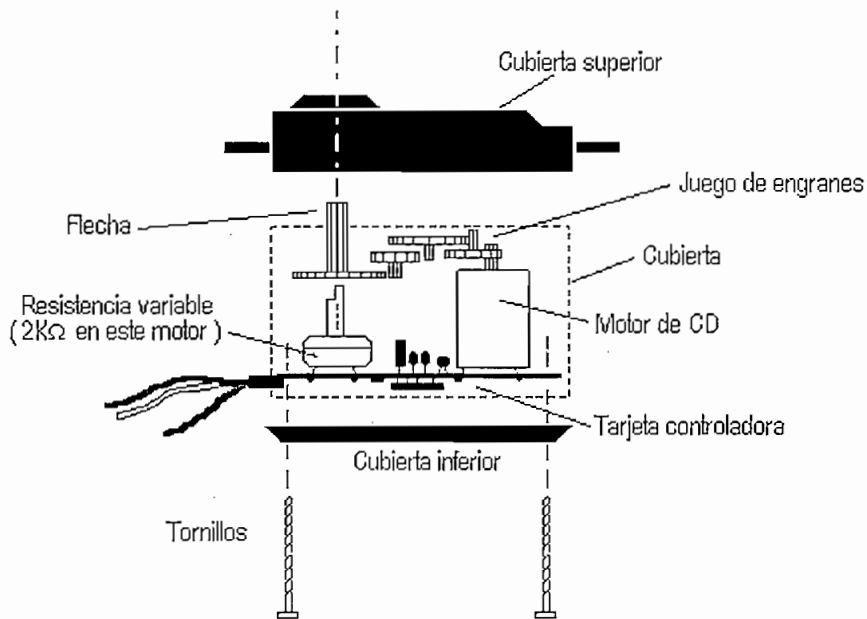


Figura C.5 Dimensiones del Futaba S3003

Tabla C.1 Especificaciones Técnicas del FUTABA S3003 y del FP-S148

<b>Voltaje</b>	<b>Torque de salida</b>	<b>Velocidad</b>
<b>4.8 V</b>	44.4 oz/in	0.23 seg/60 °
<b>6.0 V</b>	57.0 oz/in	0.23 seg/60 °
<b>Dimensiones</b>		<b>Peso</b>
1.6 x 0.8 x 1.4 in		1.3 oz

En la Tabla C.1 se resumen las especificaciones técnicas dadas por el fabricante de los servomotores Futaba S3003 y Futaba FP-S148 respectivamente.



*Figura C.6 Disposición interna del servomotor*

El servomotor internamente realiza un control de posición en bucle cerrado, para lo que utiliza un potenciómetro y un circuito de control. El potenciómetro se encarga de cerrar el bucle de control, es el que examina la posición del motor. El circuito de control recibe la información del tren de pulsos y del potenciómetro y sitúa al eje del motor en su nueva posición; en otras palabras, este potenciómetro permite que el trazado del circuito de control supervise el ángulo actual del servomotor. Si el circuito encuentra que el ángulo no está correcto, dará vuelta al motor a la dirección exacta hasta que el ángulo esté correcto. El eje de salida del servo es capaz de viajar en alguna parte alrededor 180°. En algunas ocasiones, el rango de movimiento está dentro la gama de 210°, pero varía por el fabricante. Un servo normal se utiliza para controlar un movimiento angular entre de 0 y 180°; además no es mecánicamente capaz de dar vuelta a un valor más lejano debido a una parada mecánica construida en el engranaje principal de la salida.

La cantidad de energía que se aplica al motor es proporcional a la distancia que necesita viajar. Así pues, si el eje necesita dar vuelta a una distancia grande, el

de control, el lazo se cerrará internamente. Este método es muy usado y utilizado en aeromodelismo, ya que, por control remoto se indica la posición en la que debe situarse el eje, y el propio servomotor se encarga de buscarla y posicionar su eje en ella. De esa forma, no hay que transmitir datos desde el avión hasta el mando de control remoto. Cuando se elimina el circuito de control, el lazo se tendrá que cerrar por medio de un circuito colocado externamente.

4. **Sin potenciómetro:** En el que se suprime el primer tope mecánico y la posibilidad de cerrar el lazo. Cuando se mantiene el circuito de control es posible realizar un control izquierda-derecha en lazo abierto por medio de los pulsos, evitando montar exteriormente un circuito de potencia .
5. **Con topes mecánicos:** Sólo se tienen giros limitados, su aplicación es muy útil en pinzas, brazos robots, mecanismos ON/OFF, aeromodelismo, manipuladores, etc.
6. **Sin topes mecánicos:** Se eliminará el tope del rodamiento y el potenciómetro, por lo tanto se pierde la posibilidad de cerrar el bucle internamente.

Los seis modos anteriores se despliegan en la Tabla C.2, en la cual se describe todas las formas de funcionamiento y su aplicación más común. De todas ellas, los métodos más frecuentes que se usan en la práctica son: el servomecanismo en su estado original (con todos los elementos) o utilizarlo sin circuito de control y sin potenciómetro (sin los elementos). Aplicaciones intermedias utilizan el servomecanismo en su estado natural pero sin el circuito de control.

Tabla C.2 Modos de funcionamiento de un servomotor

<b>Con revolución continua (Sin topes mecánicos)</b>		
<b>Sin potenciómetro</b>	Con control	Ej: Sin etapa de potencia
	Sin control	Ej: En ruedas motrices
<b>Sin revolución continua (Con topes mecánicos)</b>		
<b>Con potenciómetro</b>	Con control	Ej: Estado natural
	Sin control	Ej: PID's
<b>Sin potenciómetro</b>	Con control	Ej: Sin etapa de potencia
	Sin control	Ej: No se suele usar

## **FUNCIONAMIENTO DEL SERVO**

El control de un servomotor se limita a indicar en que posición se debe situar. La posición deseada se le da al mismo por medio de un tren de pulsos. La duración del pulso indica el ángulo de giro del motor.

Cada servo tiene sus márgenes de operación, es decir, un máximo y un mínimo de ancho de pulso que entiende el servomotor y que corresponden a los extremos de posición (0 y 180°). Estos valores no son "estándar" pero hay las convenciones que se aceptan generalmente. La convención es que un pulso de aproximadamente 1500 microsegundos (1,5 ms) es el punto "neutral" para el servo. Dado los apremios de la rotación del servo, el hilo neutro se define para ser la posición donde el servo tiene exactamente la misma cantidad de rotación potencial en la dirección a la izquierda como en la dirección a la derecha. Es importante observar que diversos servos tienen diversos apremios en su rotación pero cada uno de ellos debe tener una posición neutral, y la posición es siempre alrededor 1500 us. Cuando el pulso enviado a un servo es menos de 1500 us, el eje de salida señala un cierto número de grados a la izquierda del neutral. Cuando



Otro parámetro que varía de servo a servo es la tarifa de la vuelta. Éste es el tiempo que le toma al servo cambiar de una posición a otra.

Un servo típico estándar el cual se usó en el robot es el FUTABA S3003. Sus valores de ancho de pulsos mínimo y máximo corresponden a 0,2 ms y 2,3 ms, respectivamente, que dejan al motor en ambos extremos. Un pulso de 1,3 milisegundos, por ejemplo, hace que el motor de vuelta a la posición de 90° (a menudo llamada la posición neutral). Si el pulso es más corto de 1,3 ms, el motor da vuelta al eje más cercano a los 0°. Si el pulso es más largo que 1,3 ms, el eje da vuelta más cercana a 180°. Como se dijo, estos valores suelen ser los más recomendados para este tipo de servo, sin embargo, es posible emplear otras cifras, dependiendo de la marca del servo, pudiéndose conseguir ángulos mayores de 180°. Si se sobrepasan los límites de movimiento de posicionamiento del servo, éste comenzará a emitir un zumbido, indicando que se debe cambiar la longitud del pulso.

La señal de pulsos que controla al servo Futaba S3003 es de la siguiente forma:

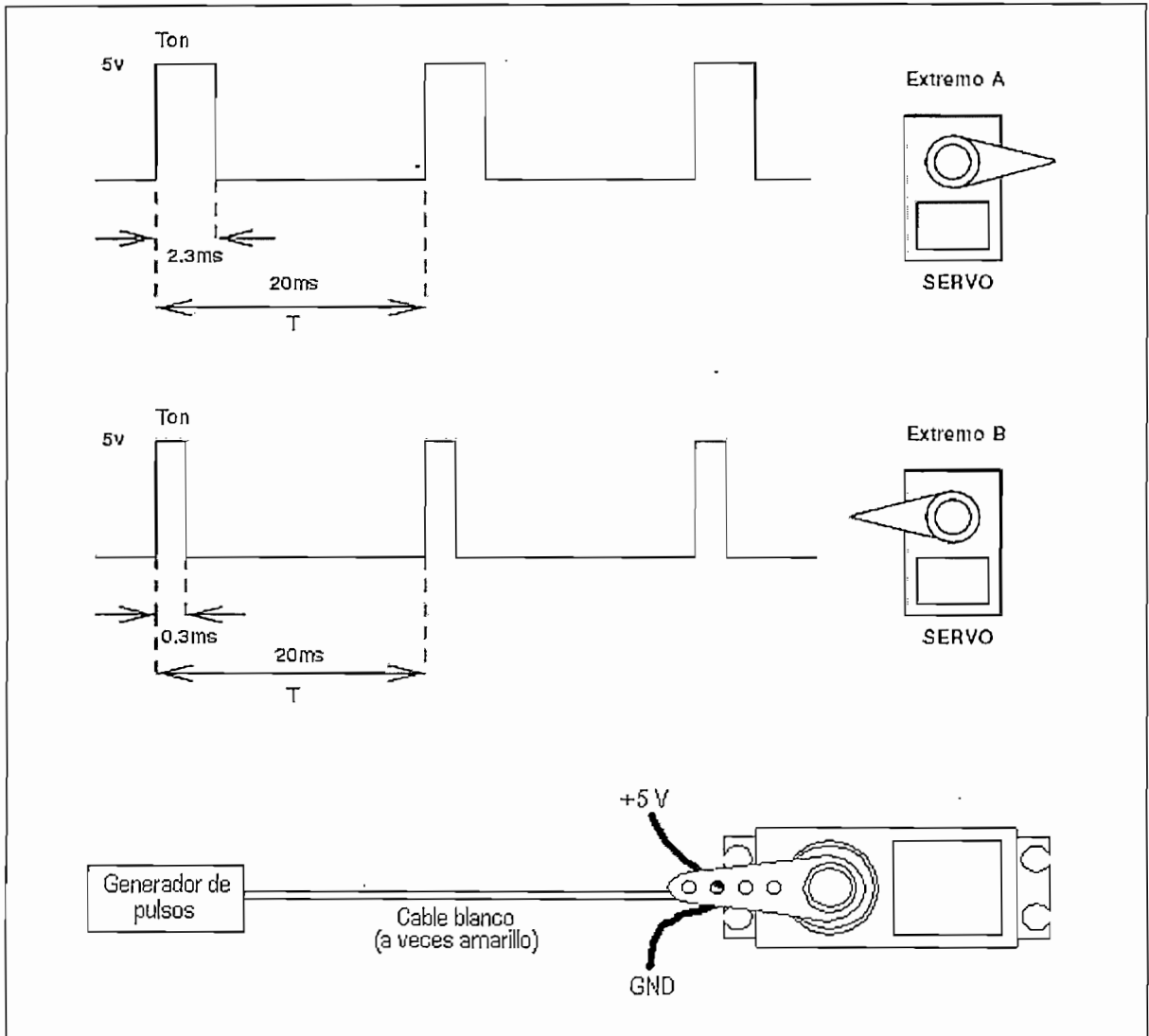


Figura C.9 Anchos de pulsos para ubicar al eje del servo FUTABA S3003 en sus extremos

En todo momento debe haber una señal de pulsos presente en el cable de control.

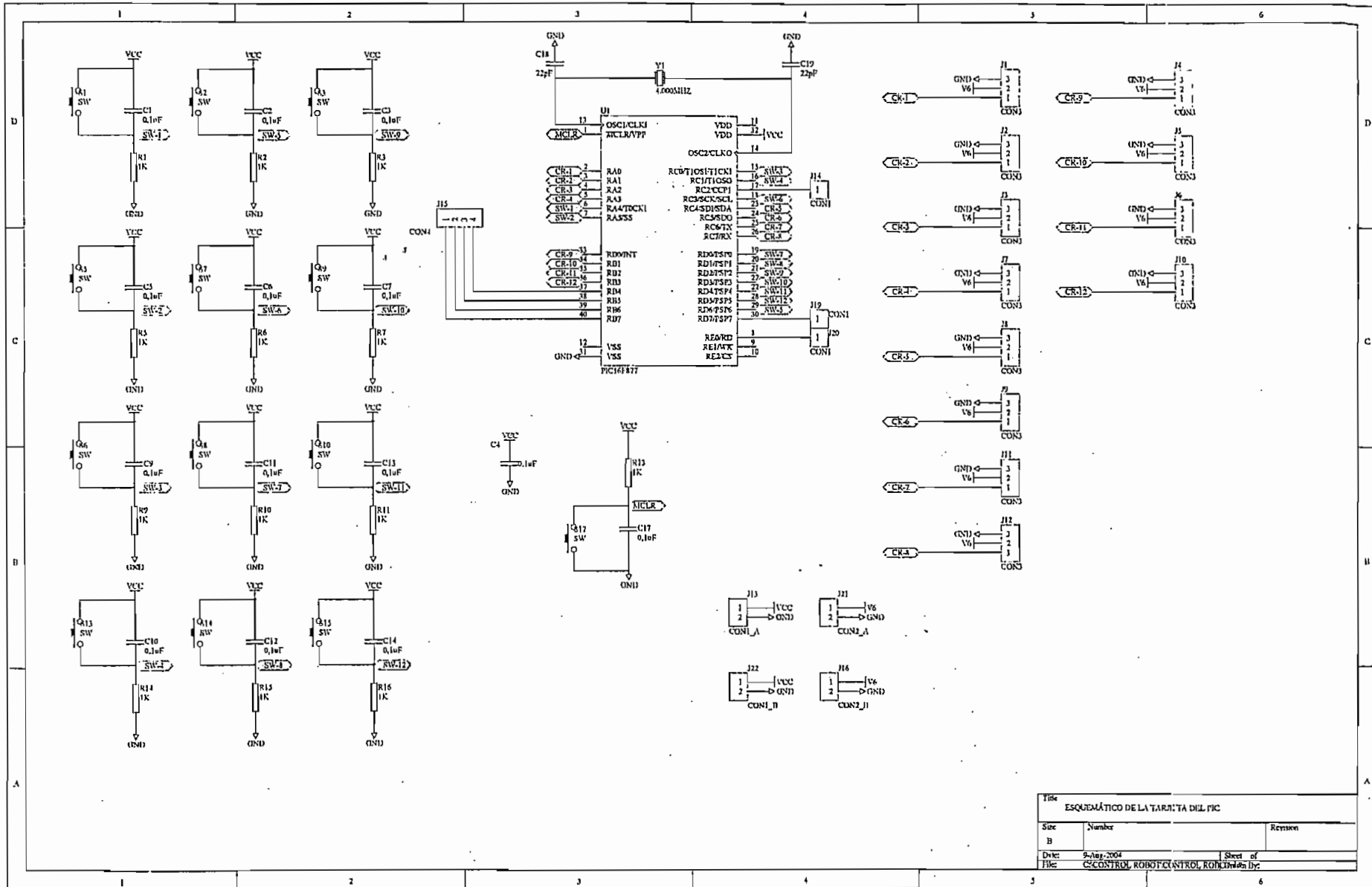
Al generar los pulsos, el período entre pulso y pulso no es crítico, e incluso puede diferir entre uno y otro pulso. Responden adecuadamente a pulsos desde 50 Hz (20 ms) hasta aproximadamente 100 Hz, pero una vez escogida una frecuencia de operación debe procurarse mantener la misma frecuencia todo el tiempo. Cuando este período expira y no se han producido otros pulsos al control del servo, se desenergiza el motor. En este estado, puede ser eliminado de la posición y no volverá a la posición ordenada. Por otra parte, si el intervalo entre



pulsos es inferior al mínimo de operación del servo, puede interferir con la temporización interna del motor, provocando un zumbido y la vibración del brazo de salida. Si es mayor que el máximo, entonces el servo pasará a estado dormido, entre pulsos, lo cual provoca que se mueva con intervalos pequeños.

Mientras el servo esté cambiando de una posición a otra, si se quiere aplicar o si existe una fuerza externa que le impulse a mover al servo de su posición fijada, éste intentará resistirse. La fuerza máxima que el servo puede ejercer es el grado del esfuerzo de torsión del servo. El servo Futaba S3003 tiene una fuerza de 44 oz/inches o 3,02 libras de empuje en 1 pulgada lejos del eje del motor. Si se desea mantener al motor en una determinada posición (fija) durante un cierto tiempo, se debe enviar una señal del ancho de pulso de manera continua; en caso de que se deje de enviar pulsos o si el intervalo entre pulsos es mayor al límite máximo, el servo perderá fuerza; y si existe una fuerza externa sobre él, dejará de mantenerse en su posición y se desplazará a otra con facilidad.

**ANEXO D**  
**ESQUEMÁTICOS**



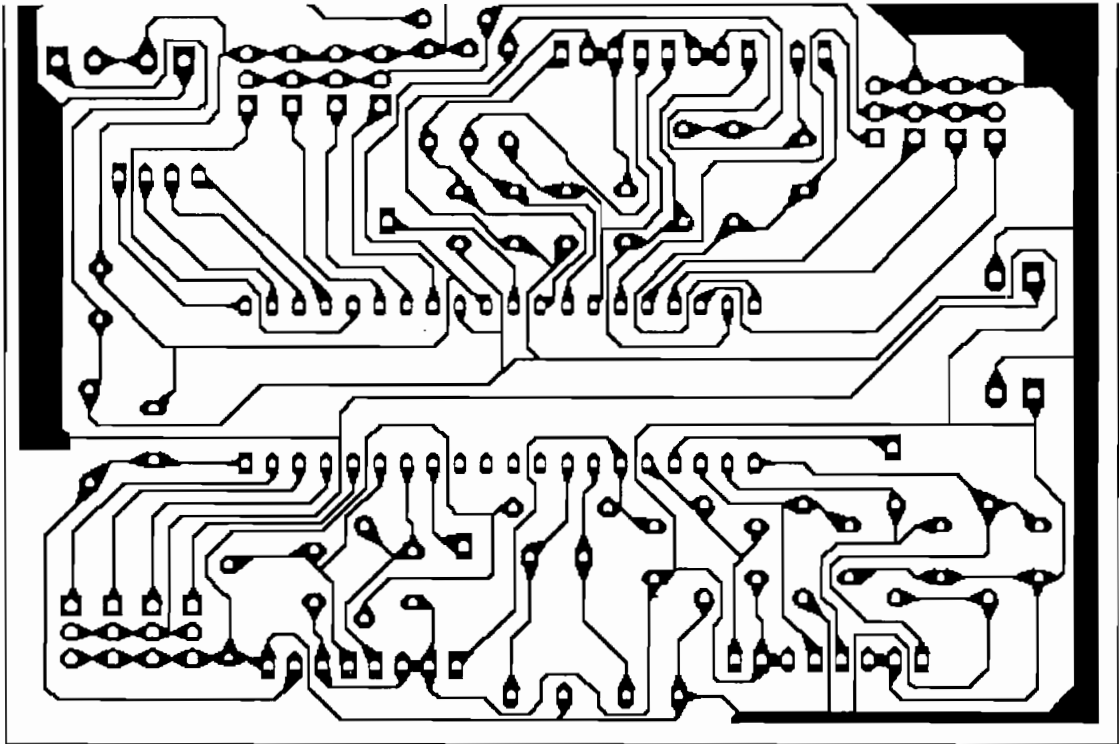


Figura D.2 Tarjeta del PIC16F877

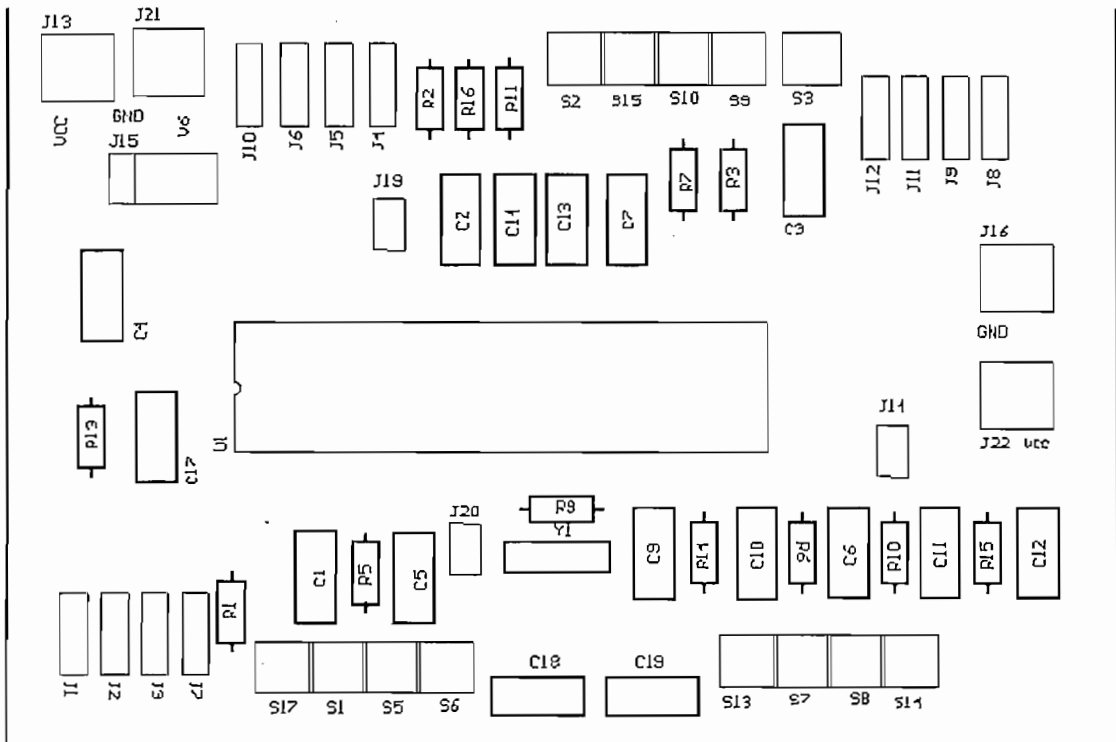
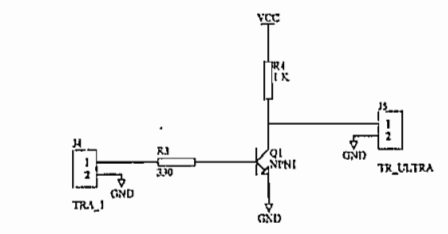
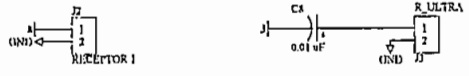
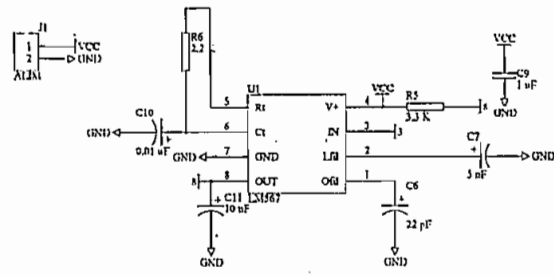


Figura D.3 Tarjeta del PIC16F877, Componentes

Tabla D.1 Componentes

Elemento	Designación	Cantidad	Valor
PIC 16F877	U1	1	
Resistencias	R1, R2, R3, R5, R6, R7, R9, R10, R11, R13, R14, R15, R16	13	1 k $\Omega$
Capacitores	C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C9, C10, C11, C12, C13, C14	13	0.1 $\mu$ F
Capacitores	C18, C19	2	22 pF
Oscilador	Y1	1	4 MHz
Conectores macho para bumpers delanteros	S1, S2, S5, S6, S13, S7,	6	
Conectores macho para bumpers de contacto con el piso	S3, S8, S9, S10, S14, S15	6	
Pulsador	S17	1	
Conectores macho de servos	J1, J2, J3, J4, J5, J6, J7, J8, J9, J10, J11, J12	12	
Conector macho para salida PWM	J14	1	
Conectores macho para alimentación	J13, J16, J21, J22	4	
Conectores macho para la entrada de sensores	J15	1	



Title		
ESQUEMÁTICO DEL ACONDICIONAMIENTO DEL SENSOR ULTRASONICO		
Size	Number	Revisión
B		
Date:	9-Aug-2004	Sheet of
File:	CAROLINA/ISS/CONTROL ROBOT/CONT 2/REV 00/OUT.ASH	

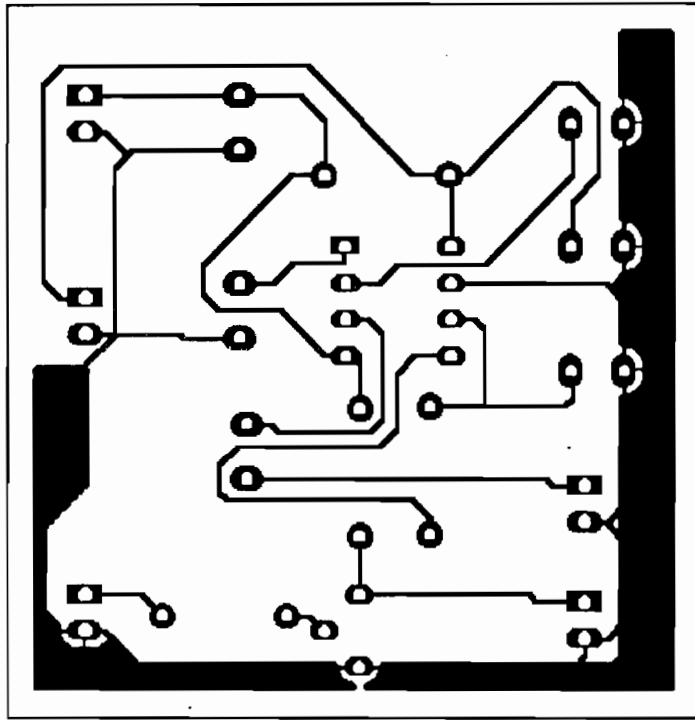


Figura D.5 Tarjeta del acondicionamiento del Sensor Ultrasónico

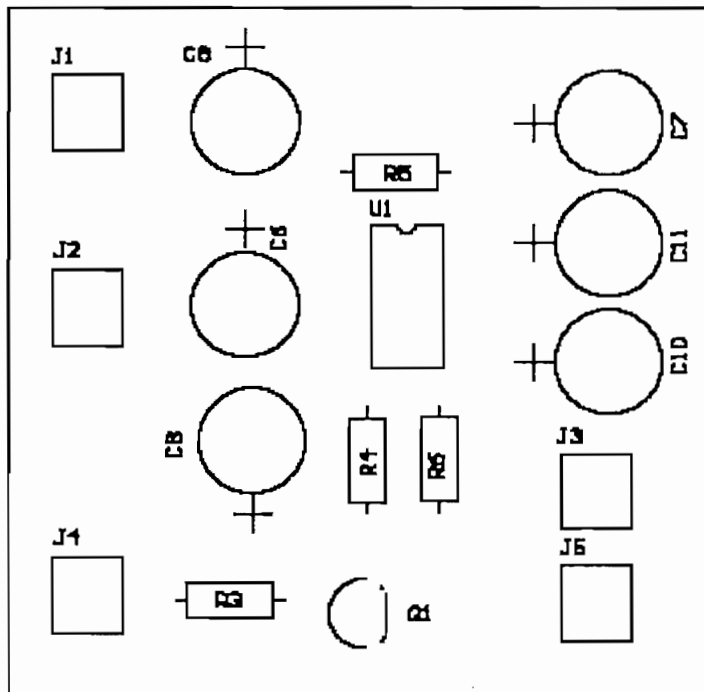
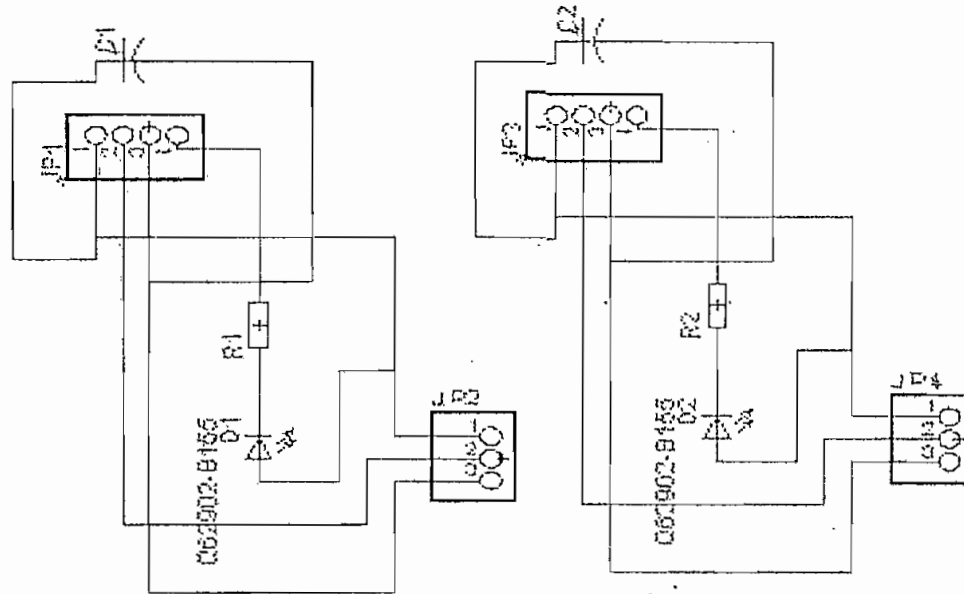


Figura D.6 Acondicionamiento del Sensor Ultrasónico, Componentes

Tabla D.2 Componentes

Elemento	Designación	Cantidad	Valor
Resistencias	R3	1	330 $\Omega$
	R4	1	1 K $\Omega$
	R6	1	2.2 K $\Omega$
	R5	1	3.3 K $\Omega$
Capacitores	C6	1	22 pF
	C7	1	5 nF
	C8, C10	2	0.01 $\mu$ F
	C9	1	1 $\mu$ F
	C11	1	10 $\mu$ F
LM567	U1	1	
TBJ 2N3904	Q1	1	
Conector macho para alimentación	J1	1	
Conector macho para emisor de ultrasonido	J6	1	
Conector macho para receptor de ultrasonido	J3	1	





ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

Esquemático

ESQUEMÁTICOS DE ACONDICIONAMIENTO DE LOS  
SENSORES INFRARROJOS

Size:

File:C:\CONTROL

Diseño:

Revisión:

Pag.

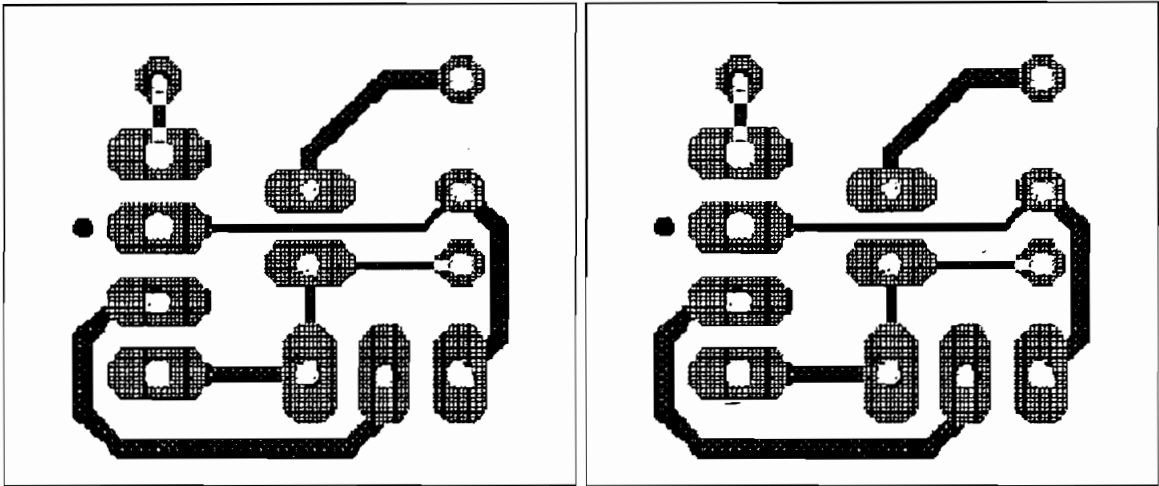


Figura D.8 Tarjetas del acondicionamiento de los Sensores Infrarrojos

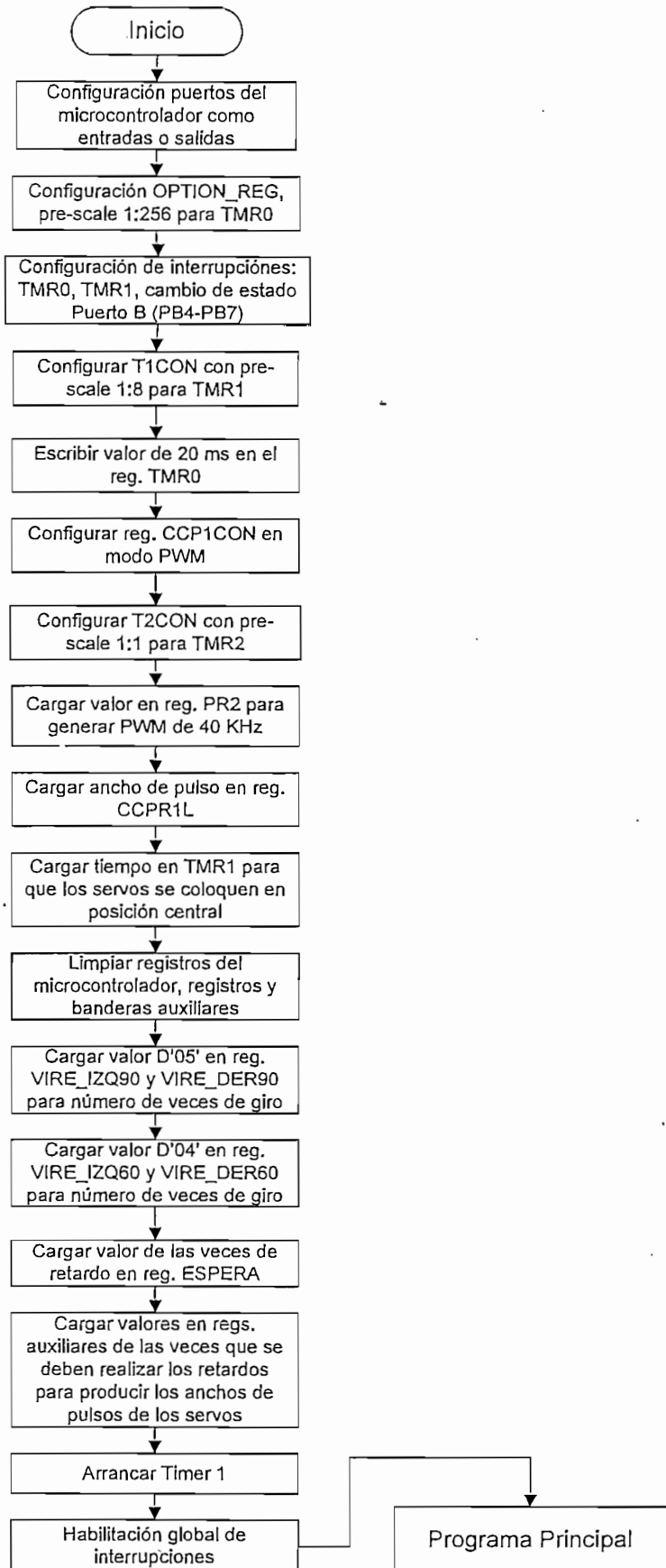
Tabla D.3 Componentes

Elemento	Designación	Cantidad	Valor
Sensor infrarrojo Sharp IS471f	JP1, JP3	2	
Led emisor de infrarrojo	D1, D2	2	
Resistencias	R1, R2	2	82 $\Omega$
Capacitores	C1, C2	2	0.1 $\mu$ F
Conectores macho para alimentación y salida del sensor	JP2, JP4	2	

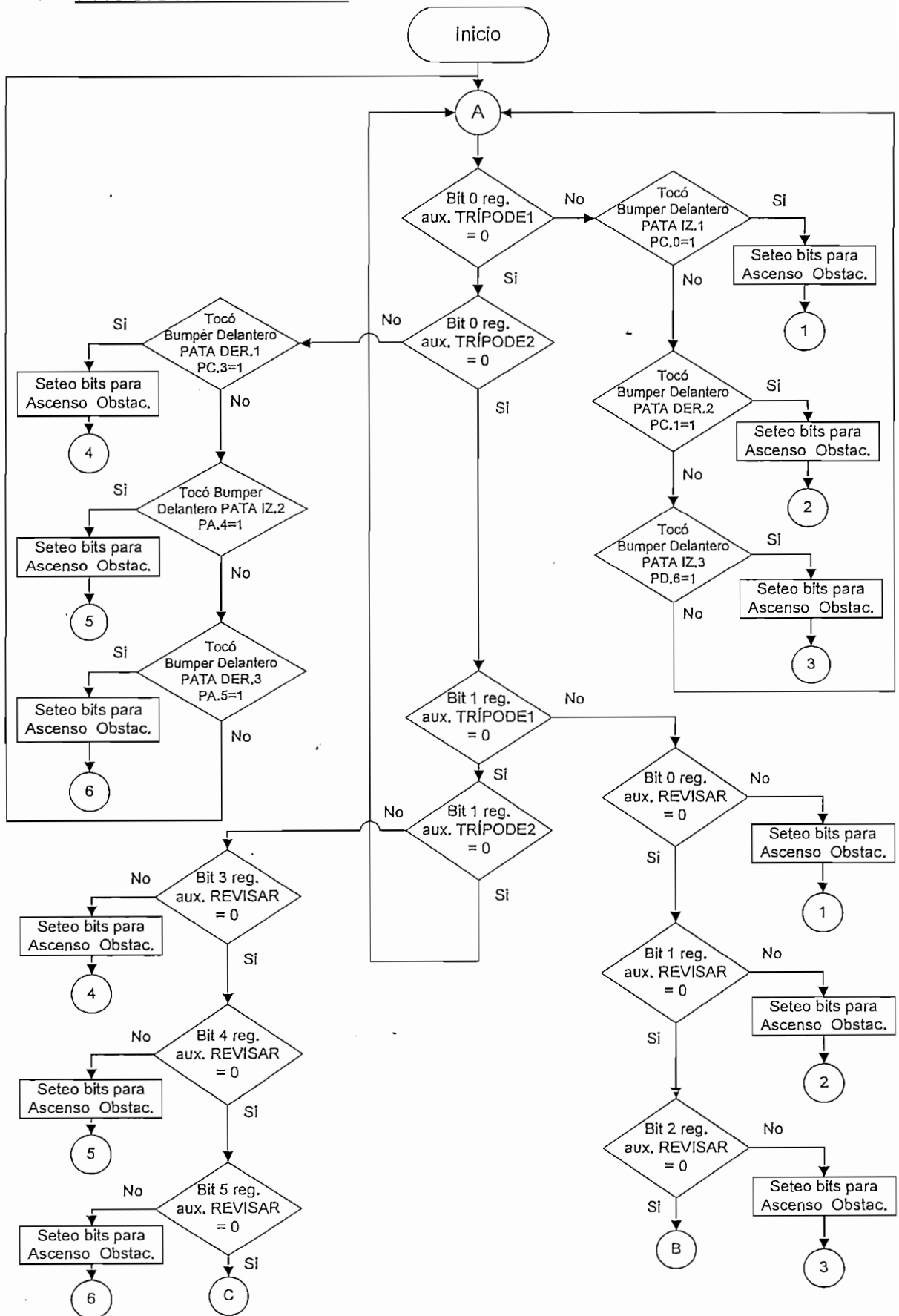
**ANEXO E**

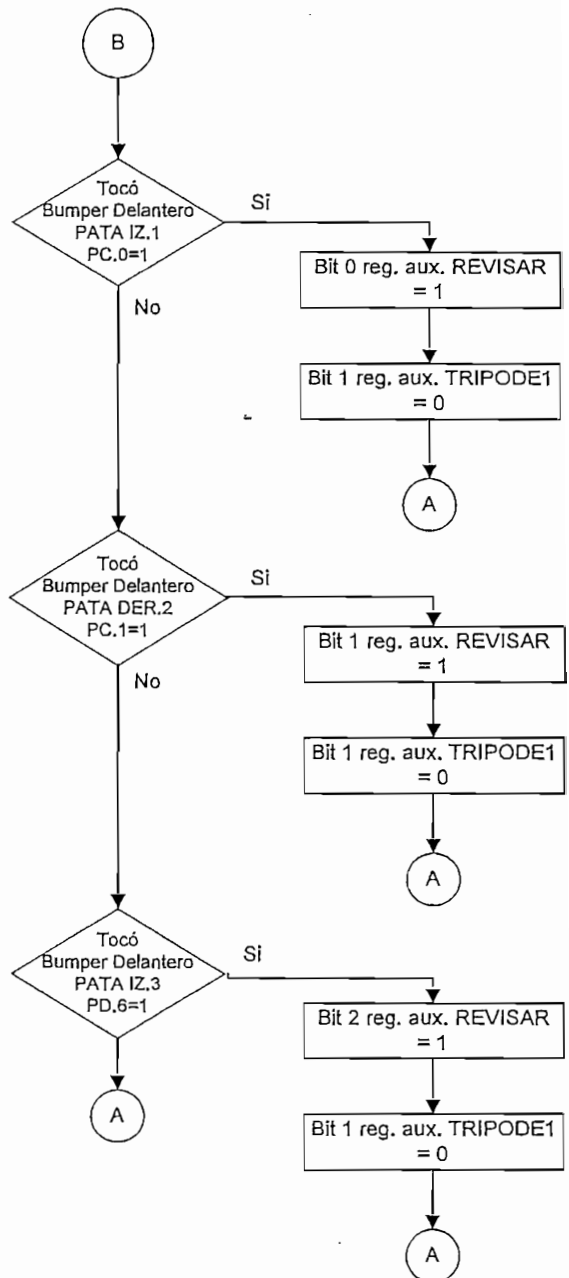
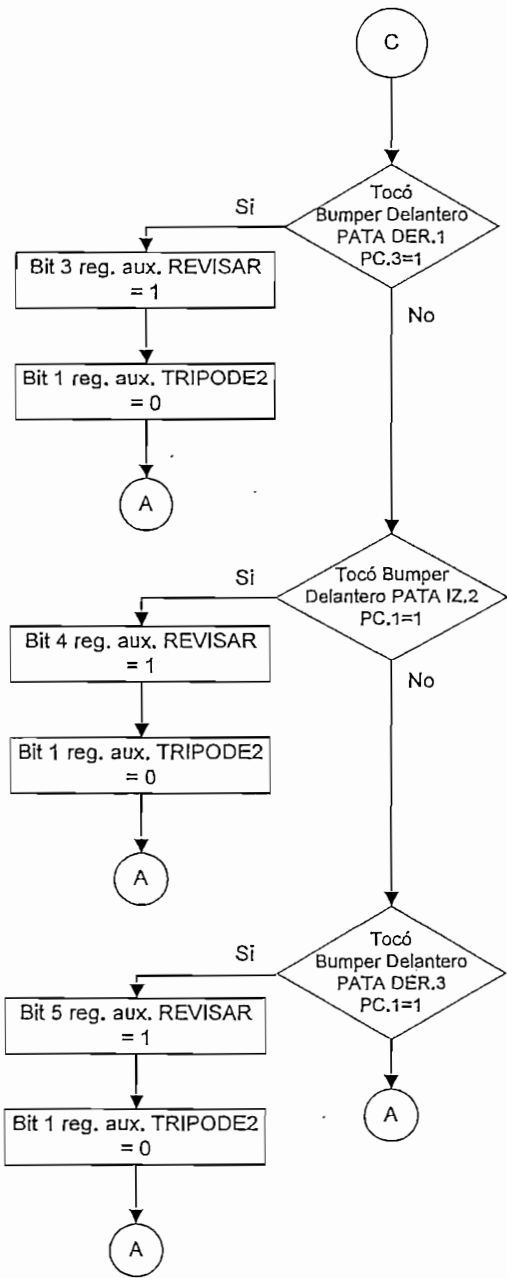
**FLUJOGRAMA DE CONTROL**

# E1 INICIALIZACIÓN

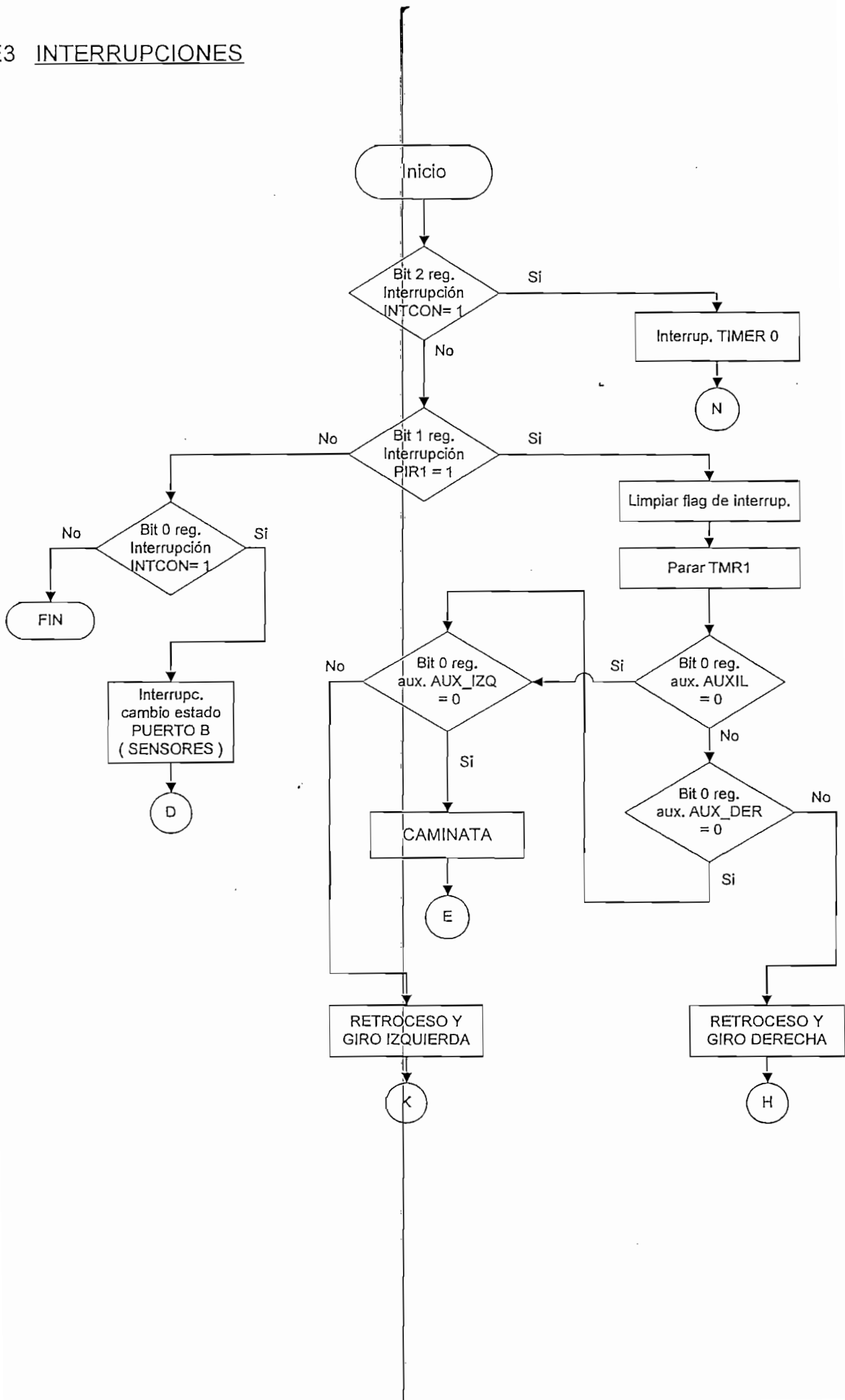


# E2 PROGRAMA PRINCIPAL

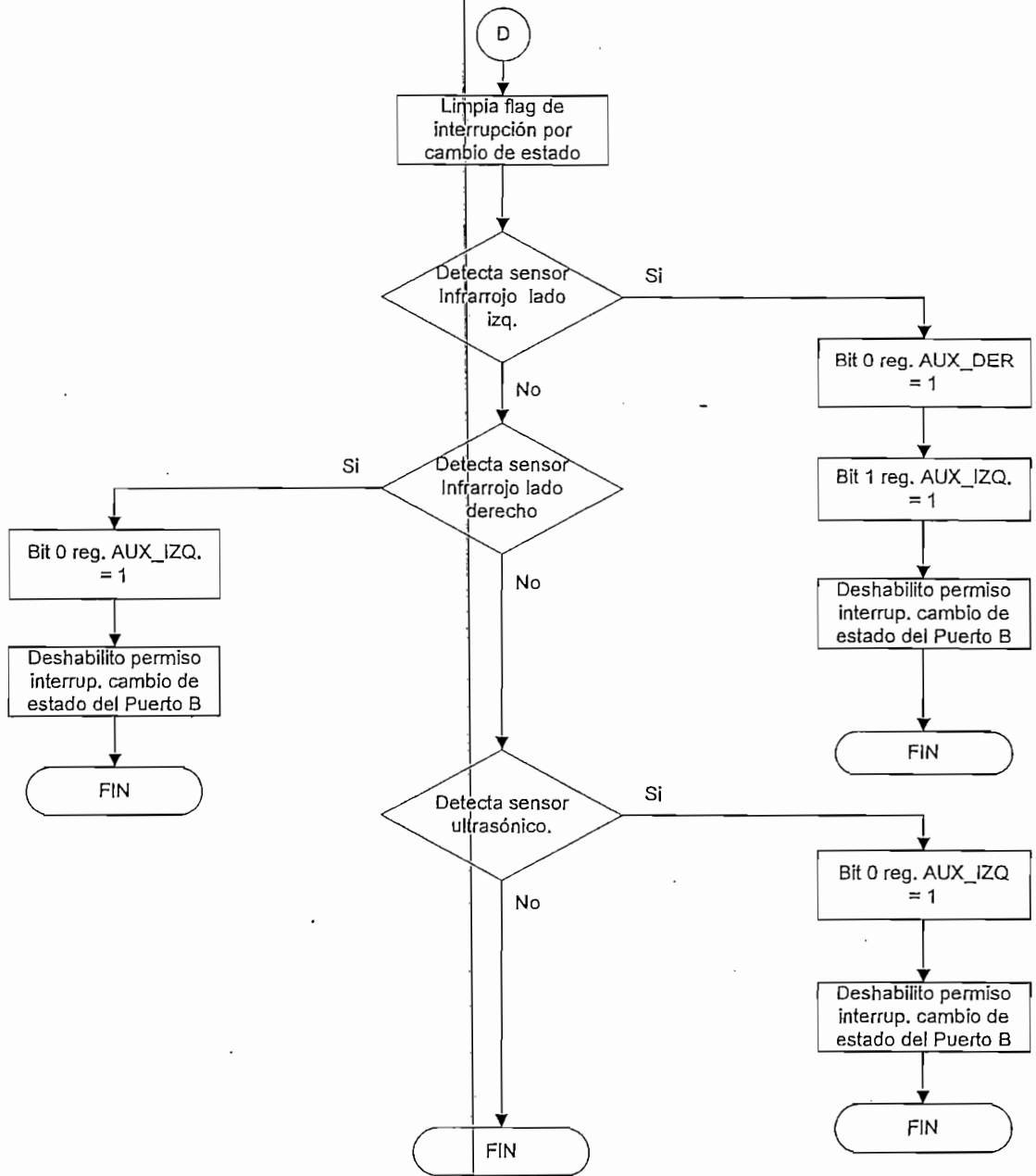




# E3 INTERRUPCIONES

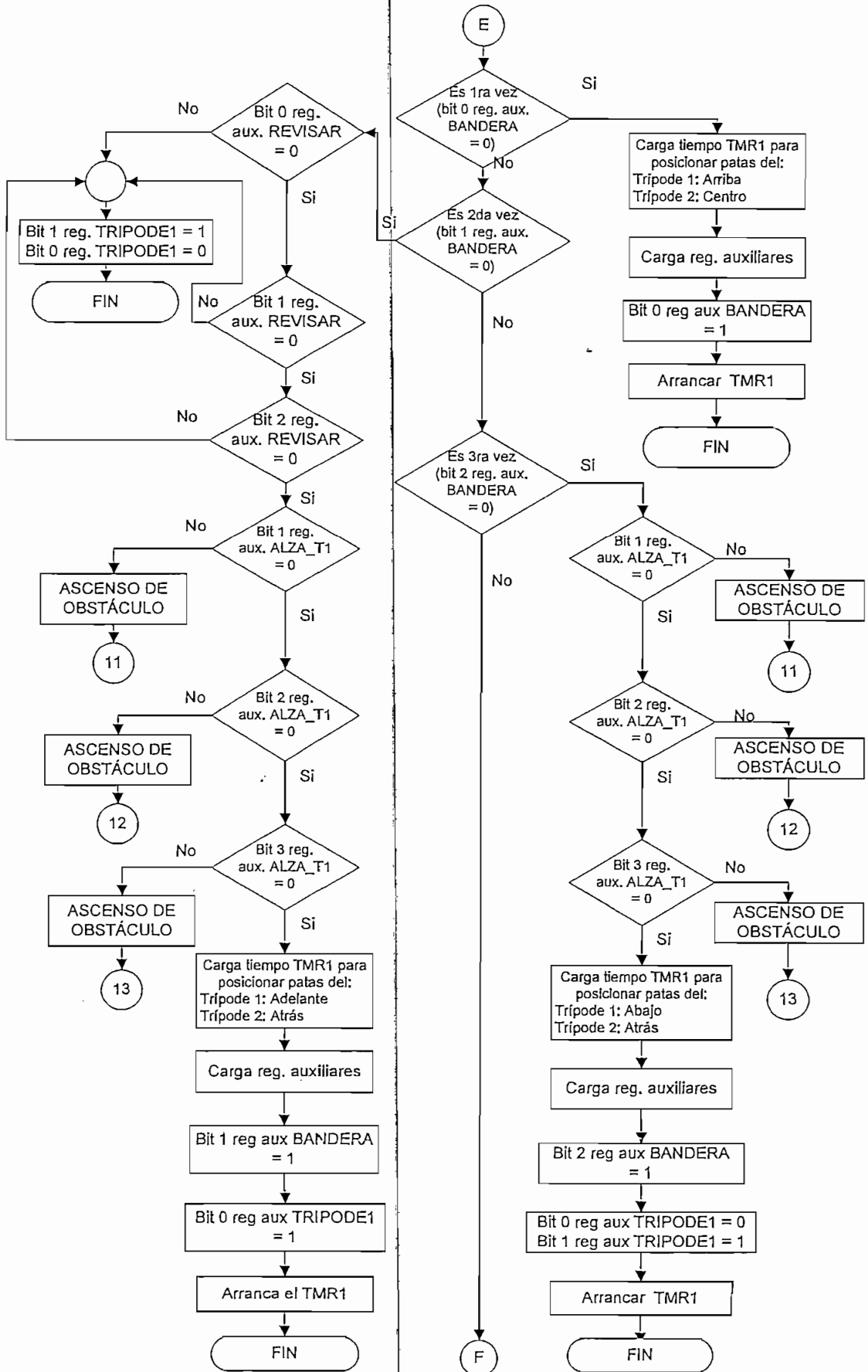


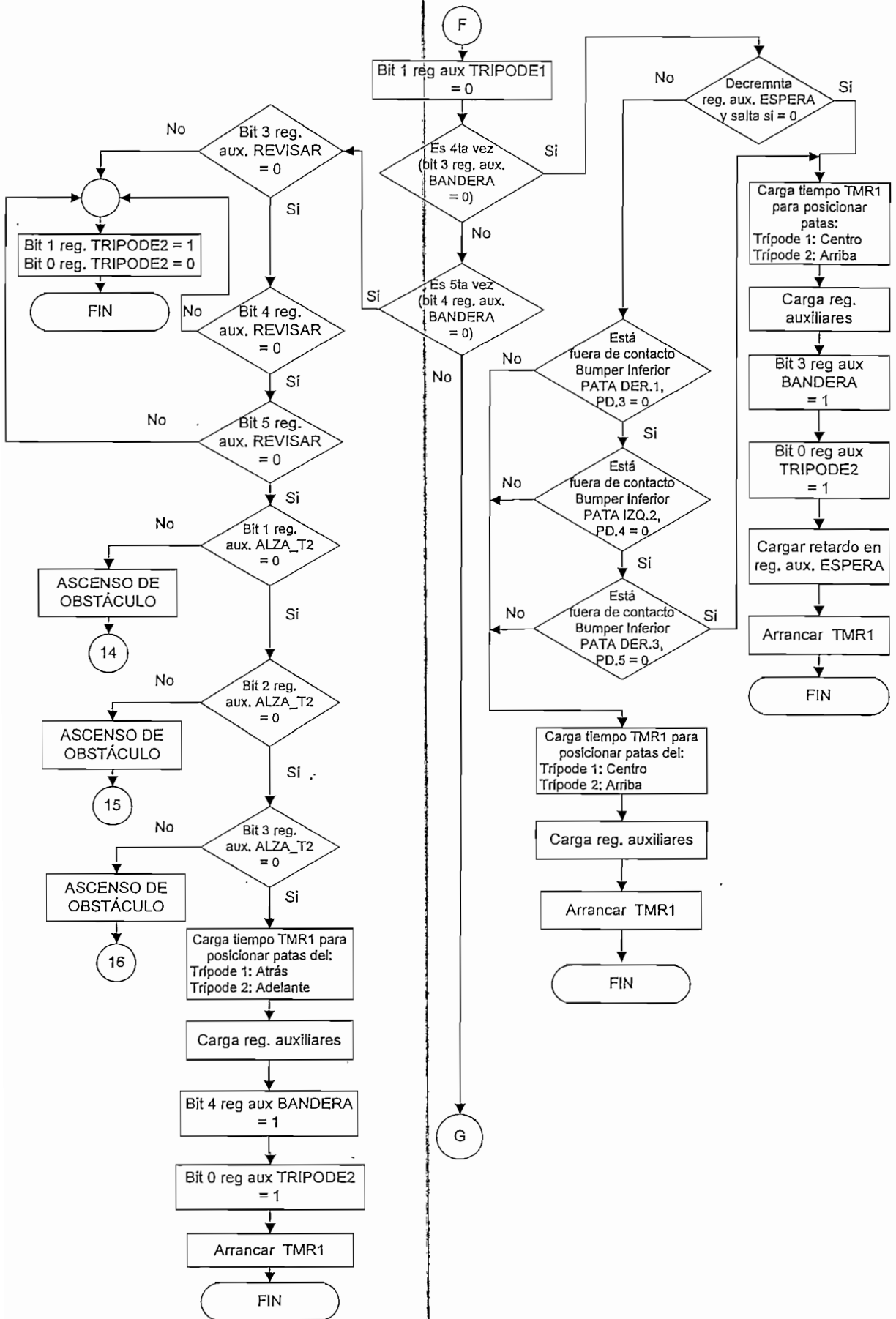
### E3.1 INTERRUPTIÓN POR CAMBIO DE ESTADO PUERTO B

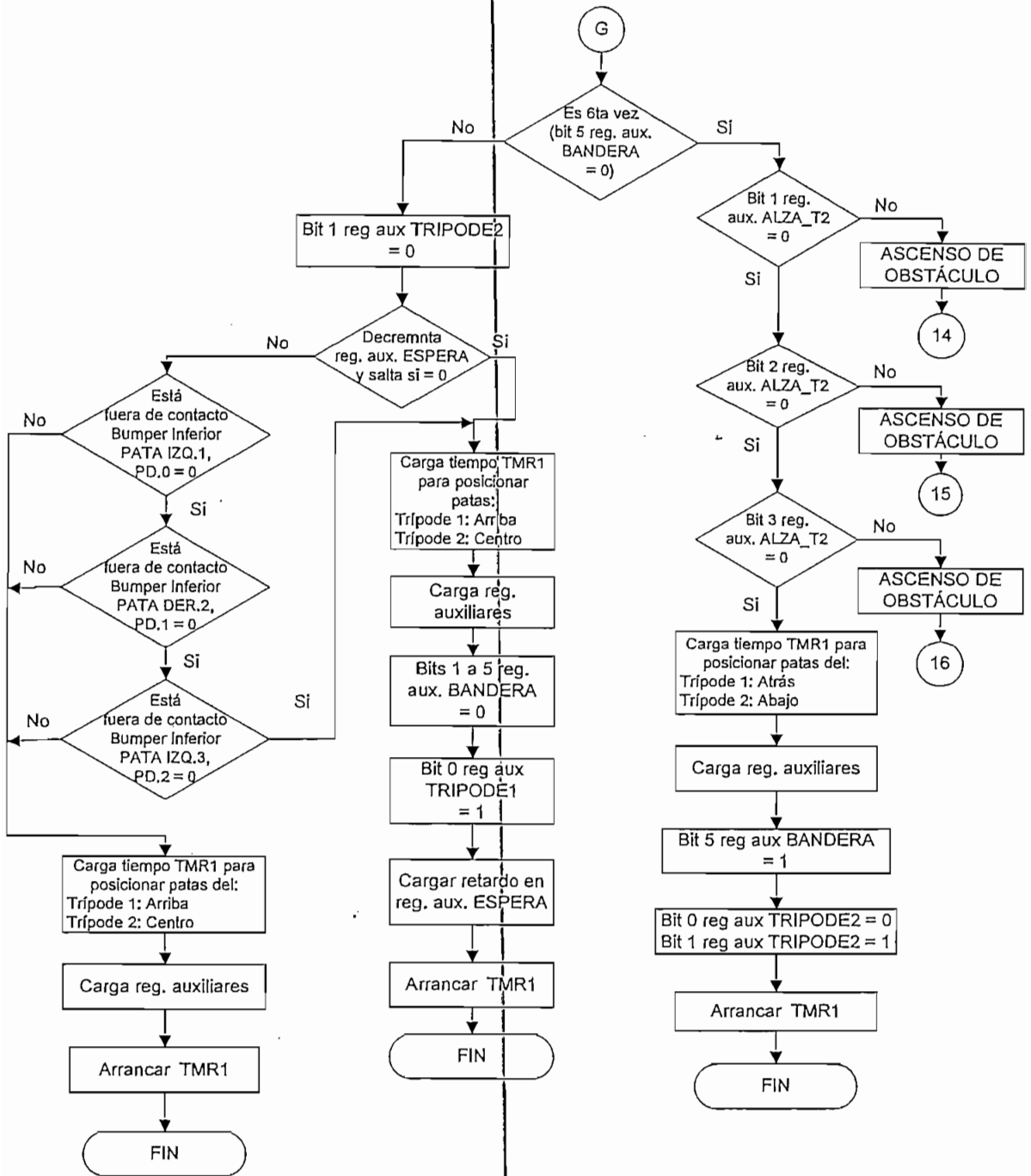




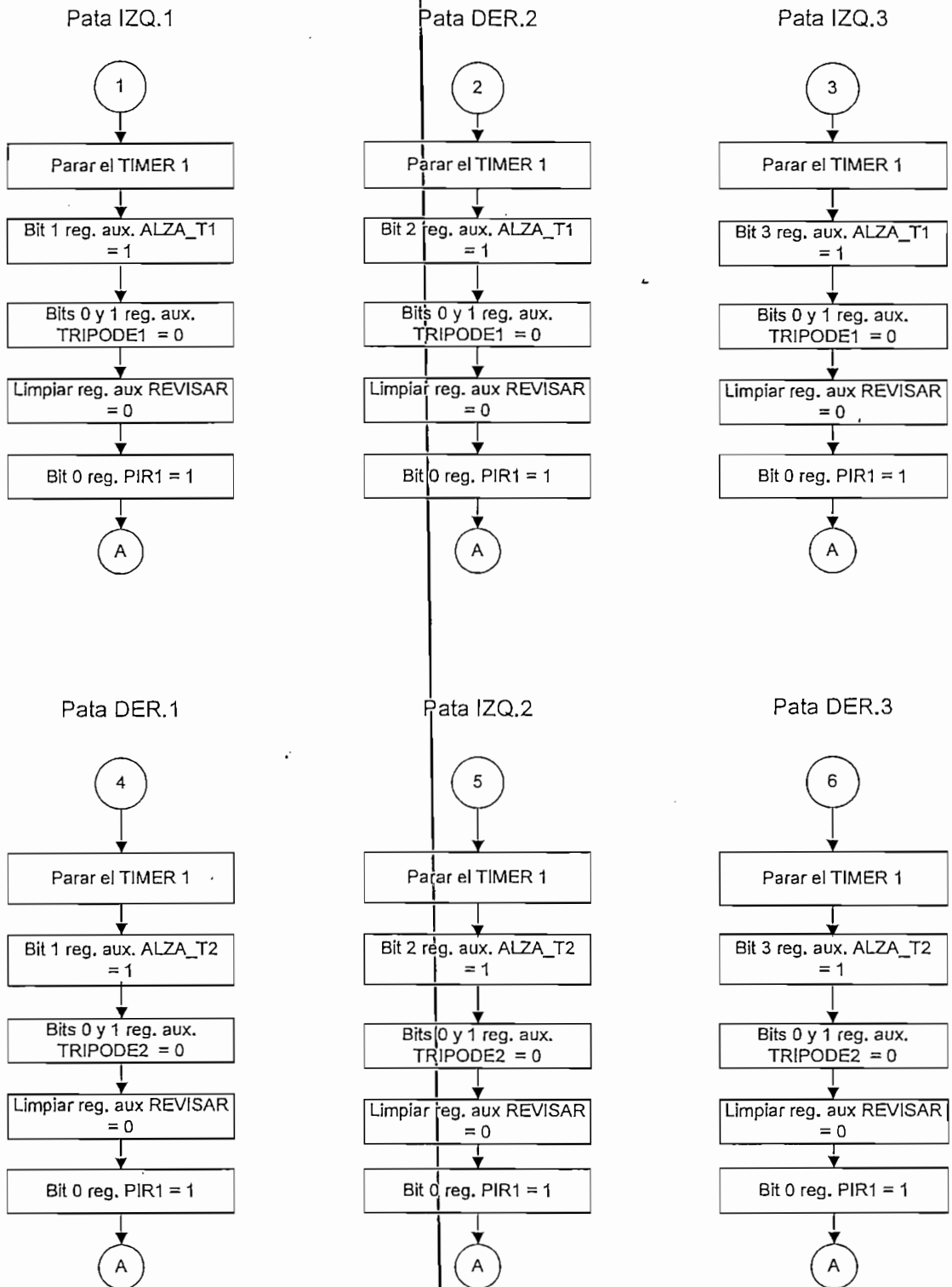
E3.2 CAMINATA





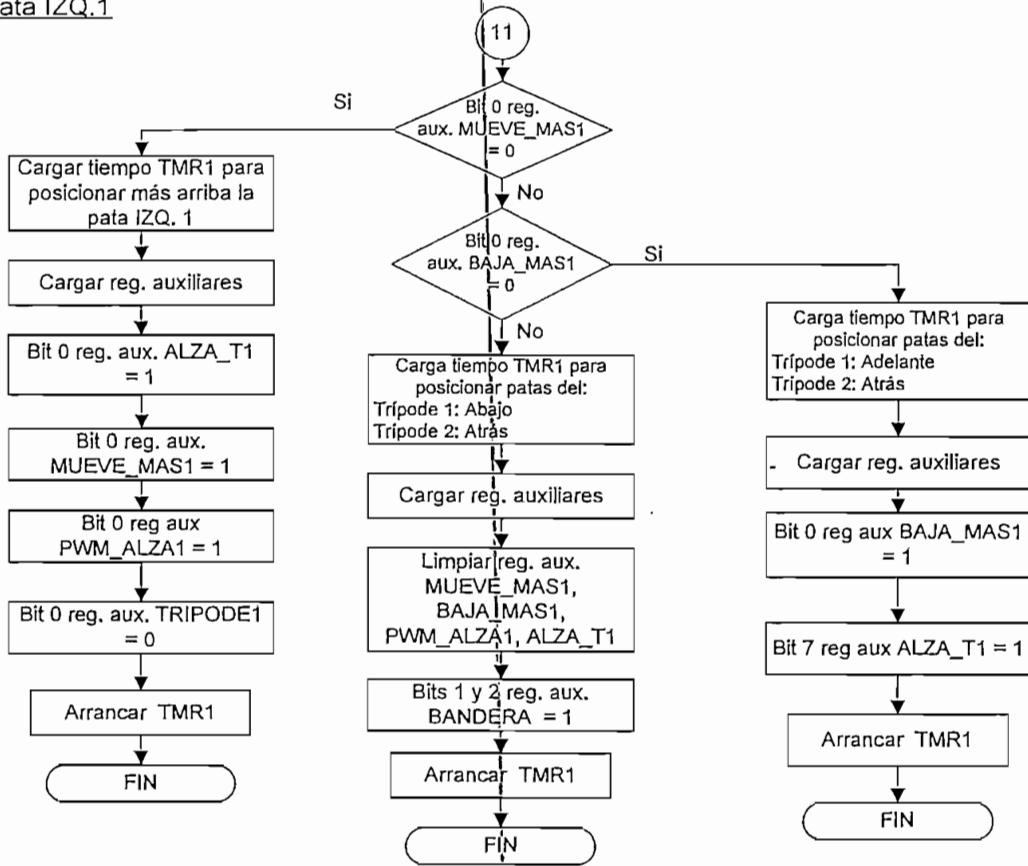


### E3.3 SETEO DE BITS PARA ASCENSO DE OBSTÁCULOS

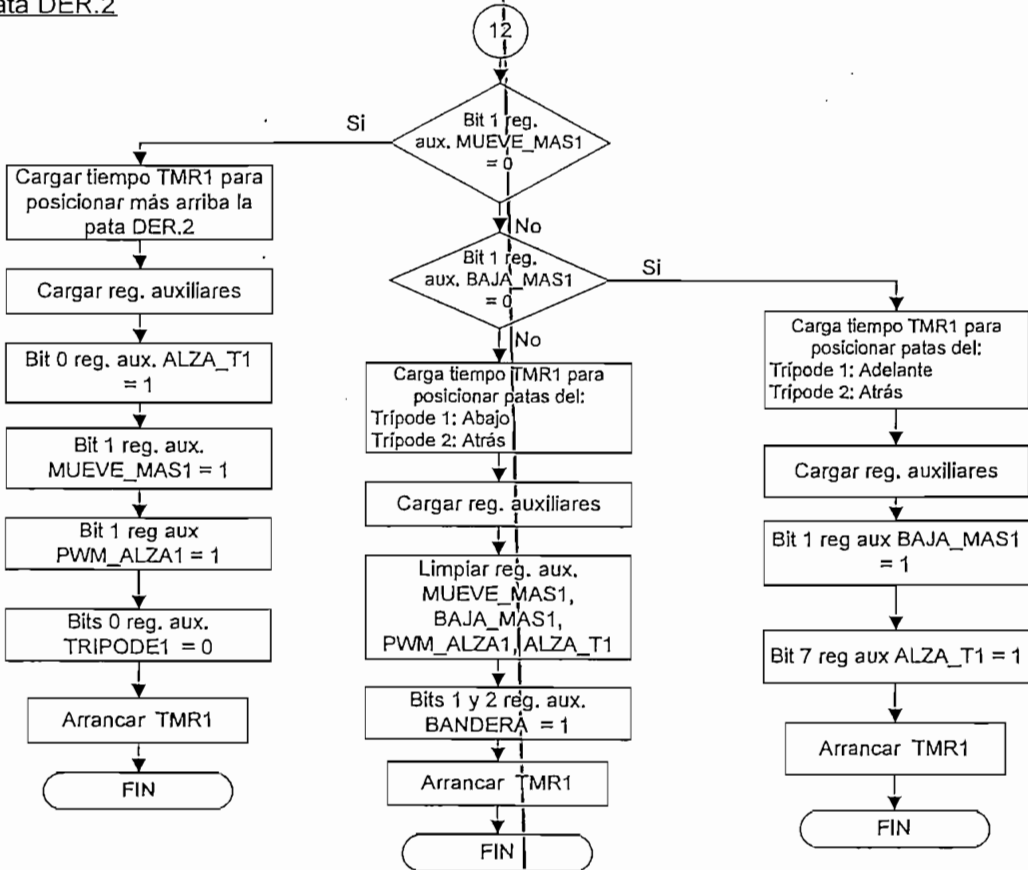


### E3.4 ASCENSO DE OBSTÁCULO (INTERRUP. TIMER1)

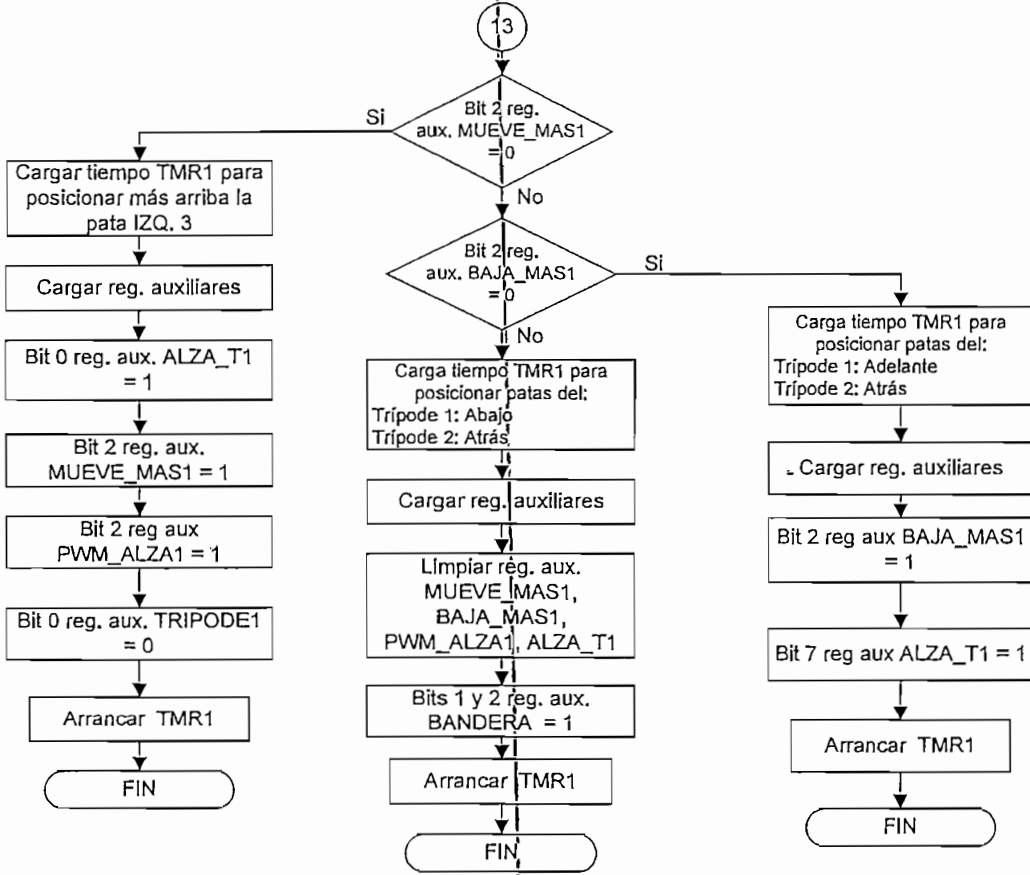
#### Pata IZQ.1



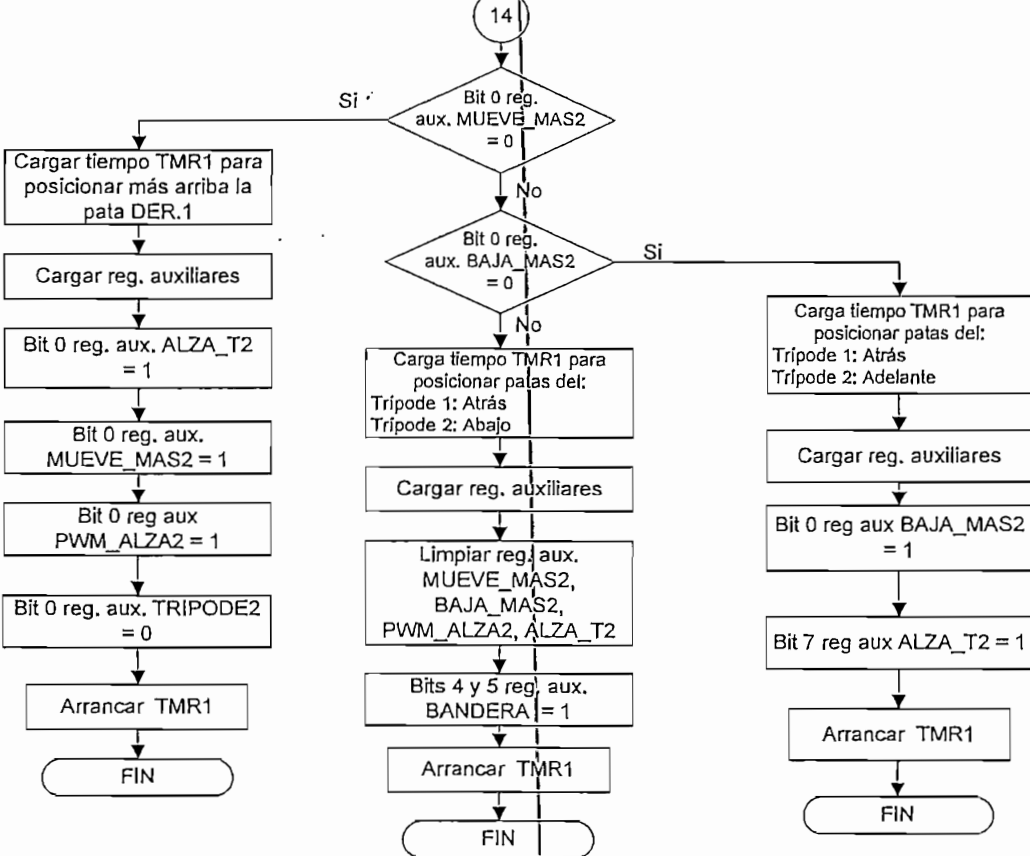
#### Pata DER.2



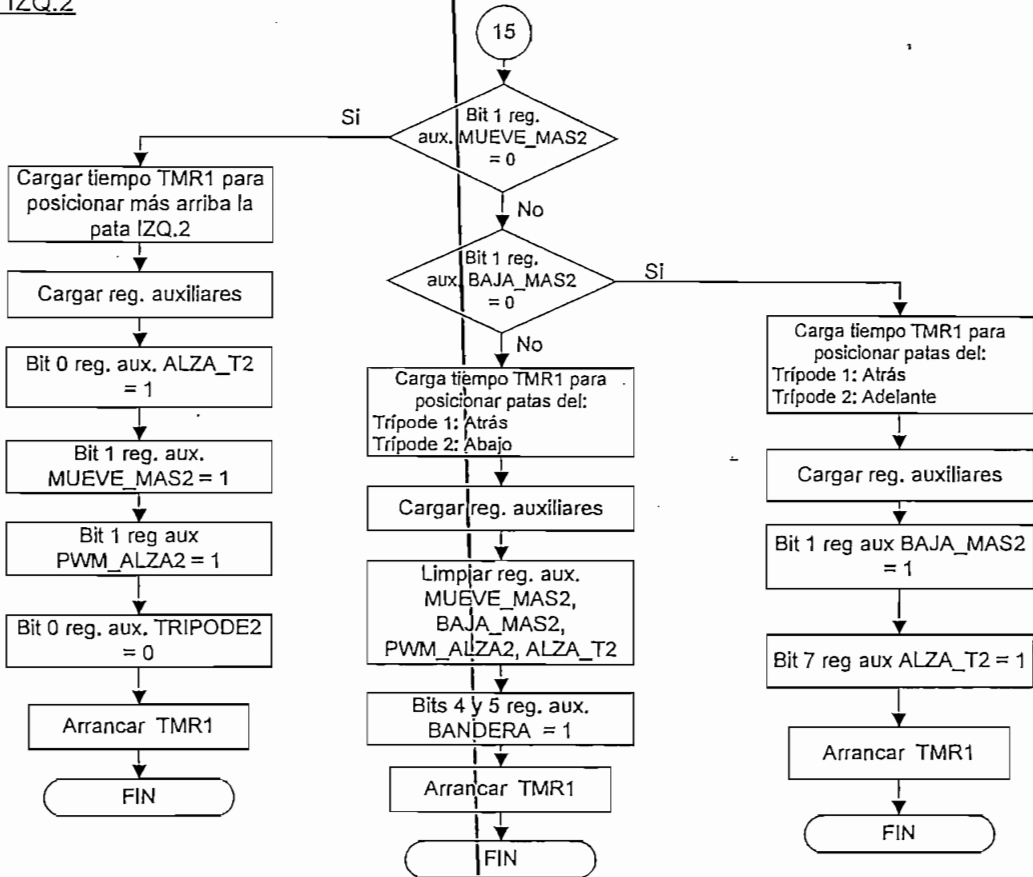
Pata IZQ.3



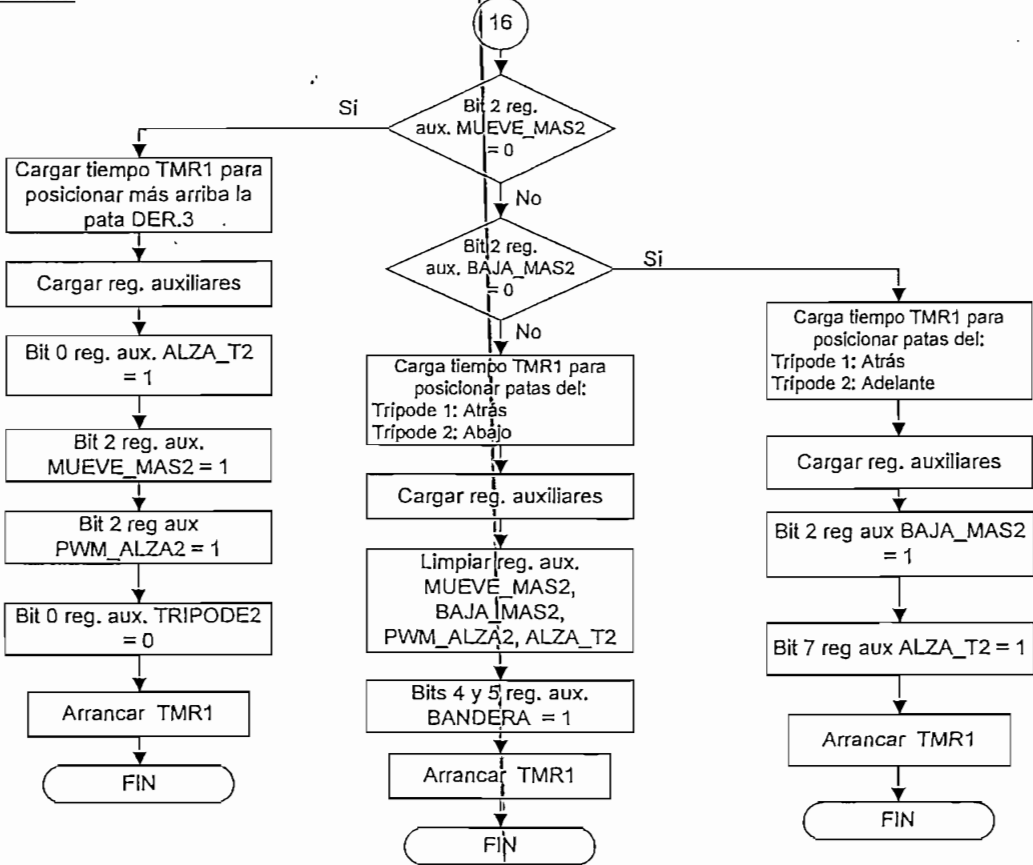
Pata DER.1



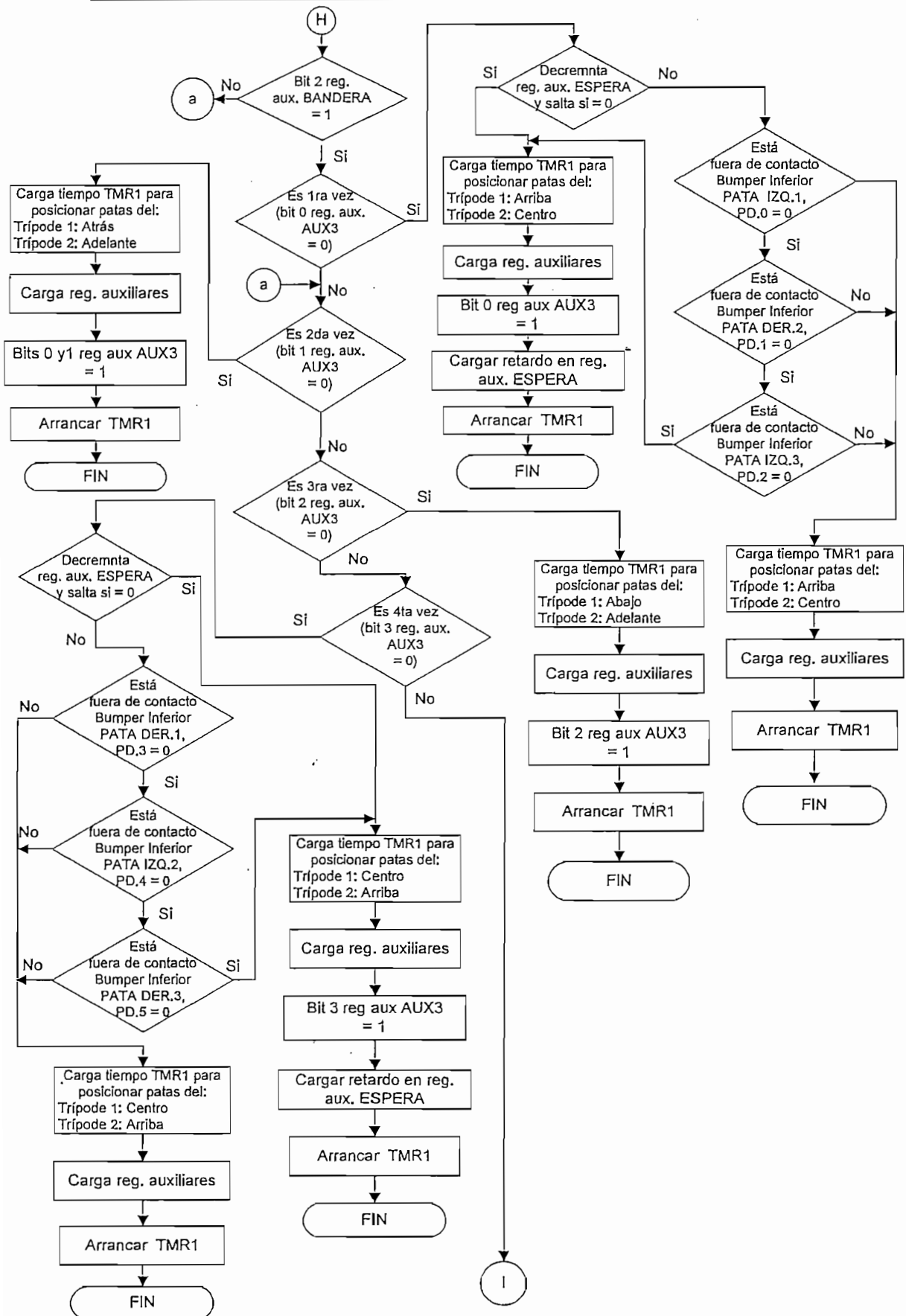
Pata IZQ.2



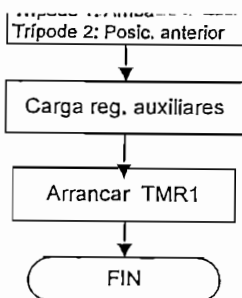
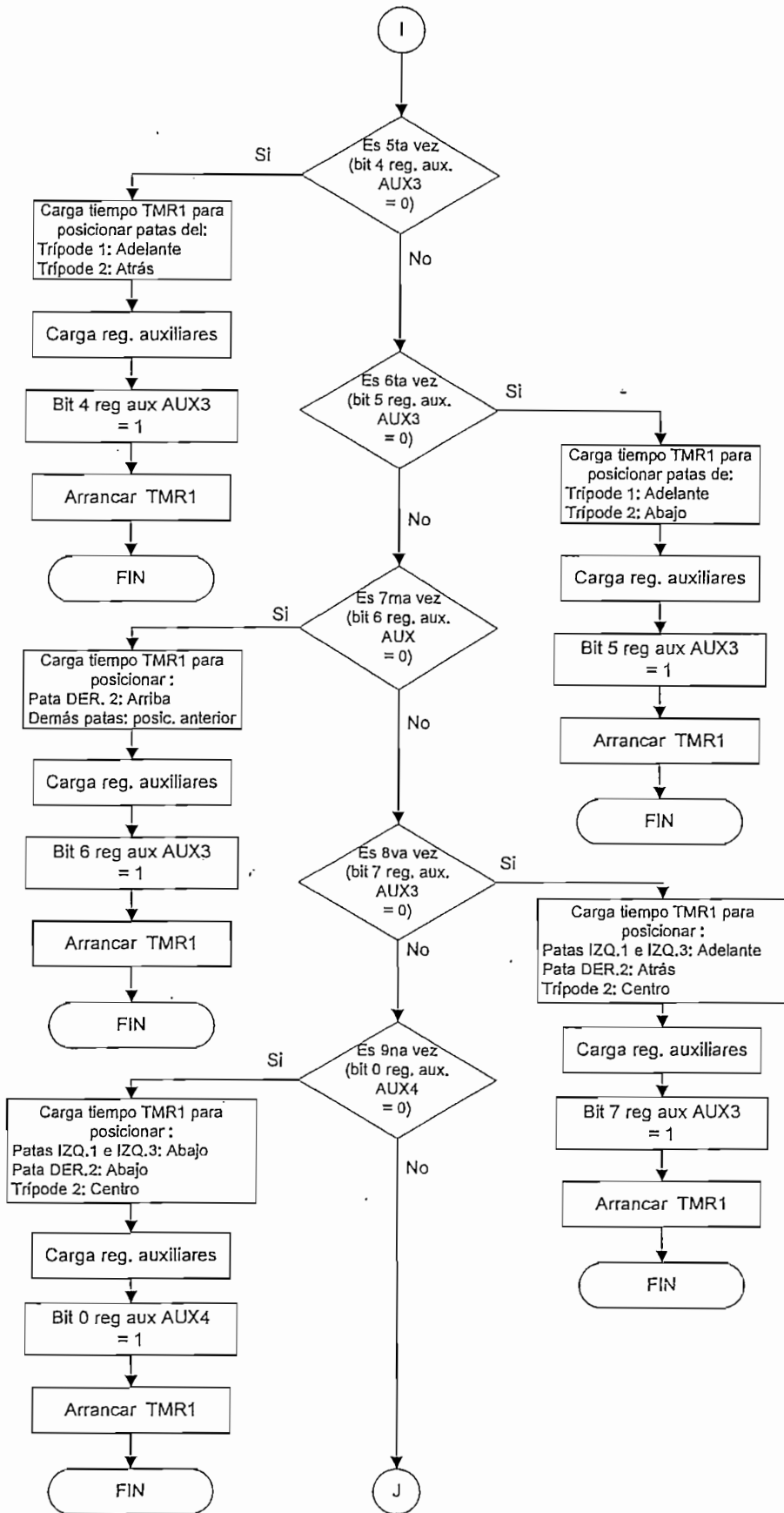
Pata DER.3

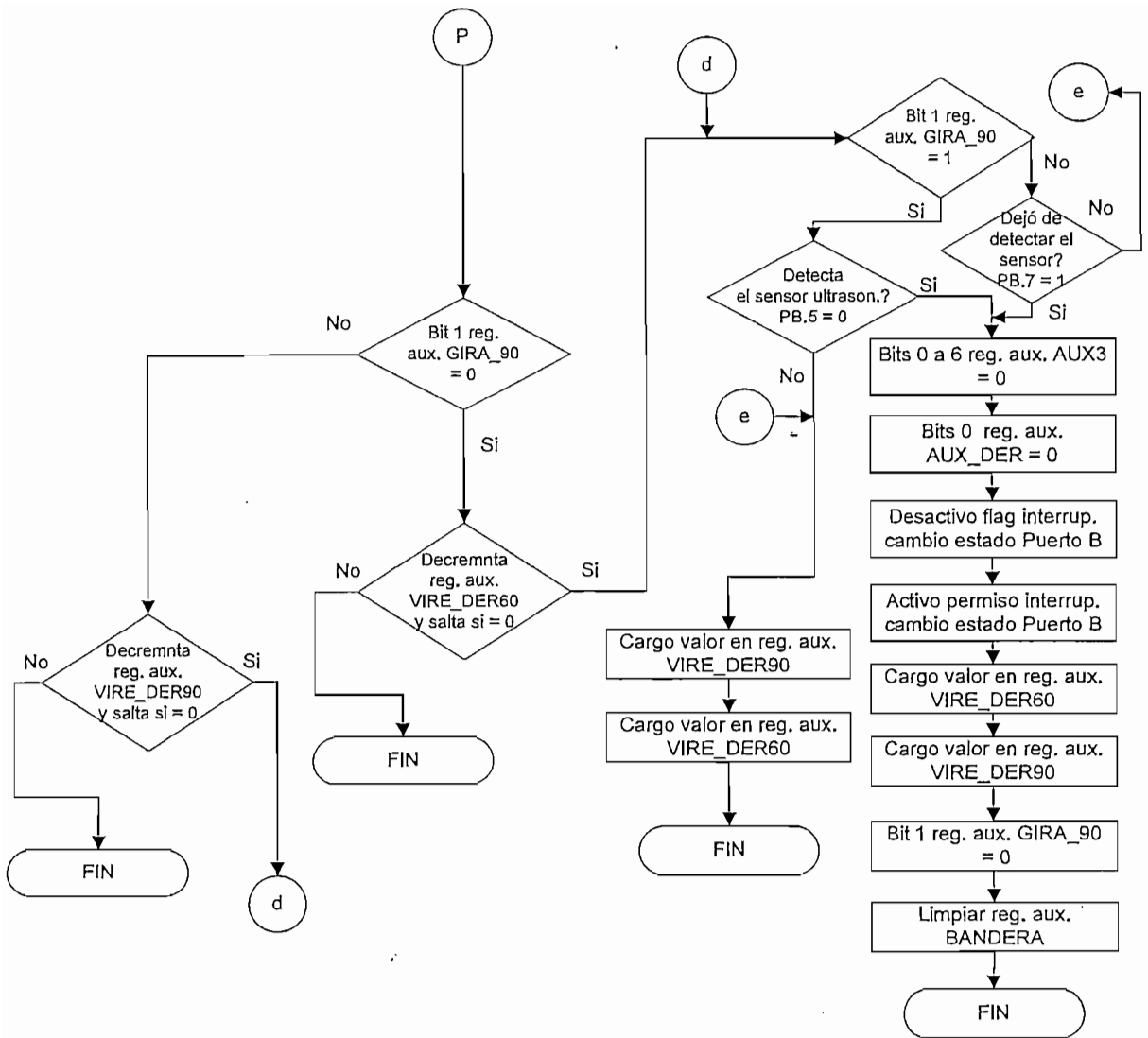


### E3.5 RETROCESO Y GIRO DERECHA

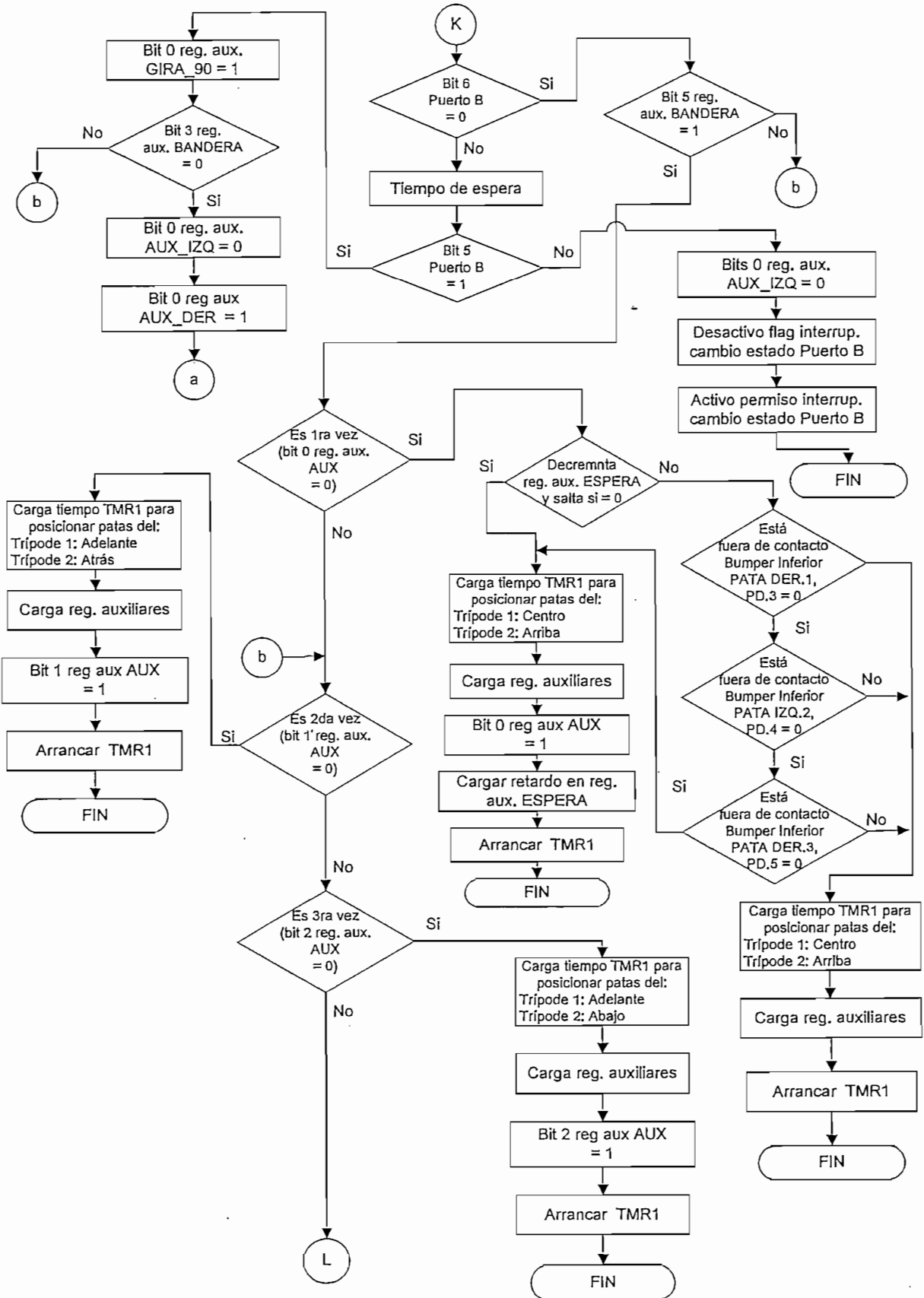


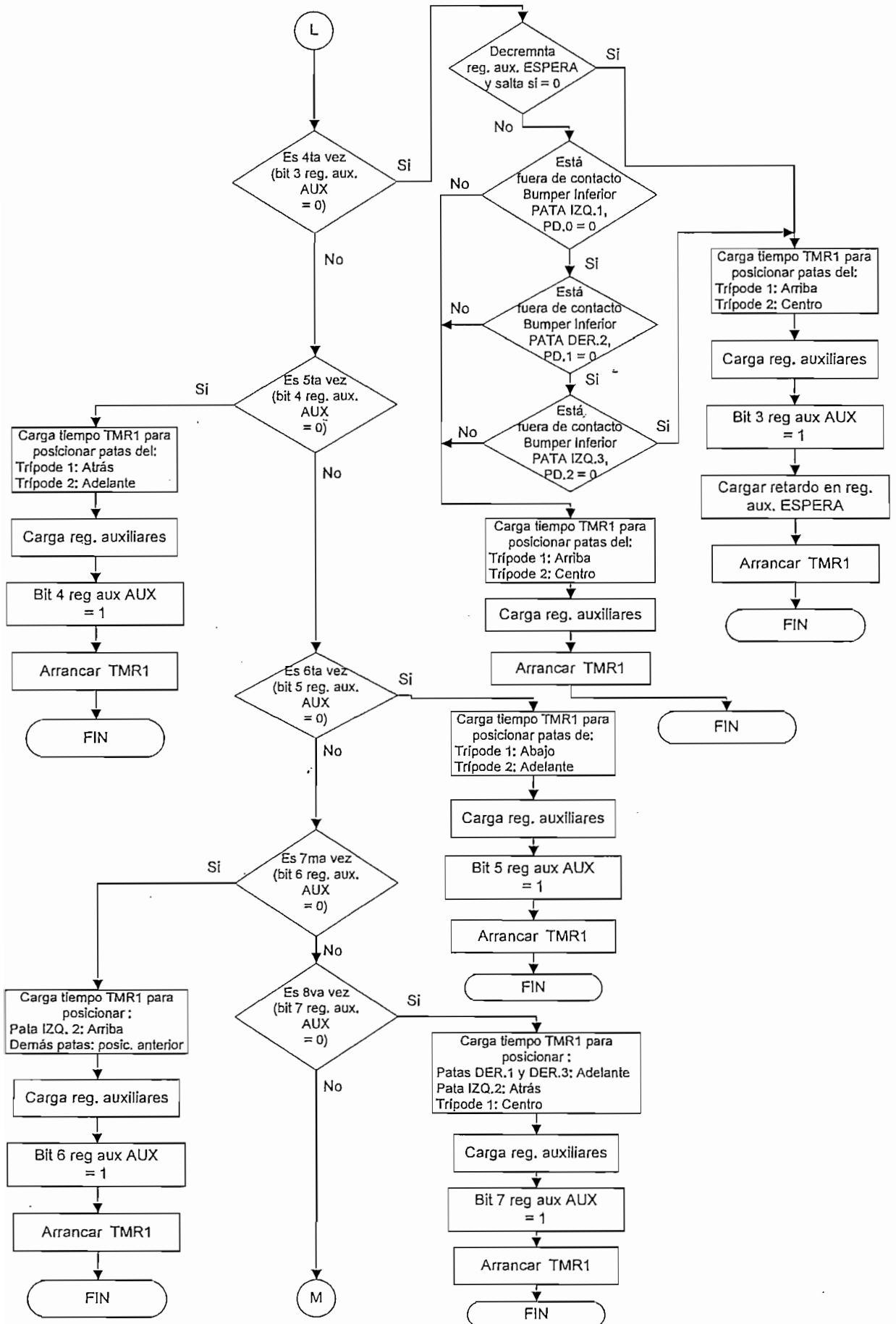


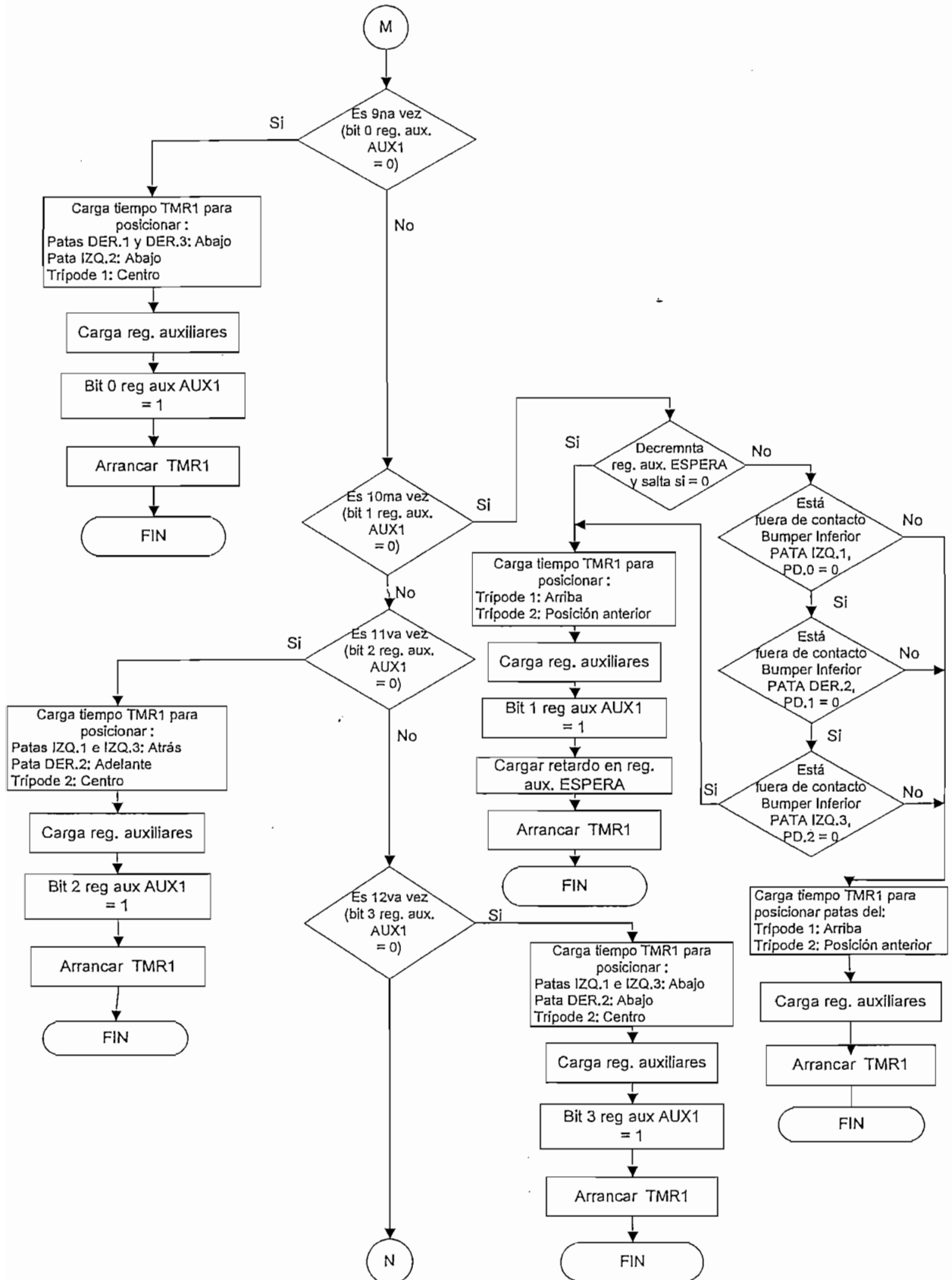


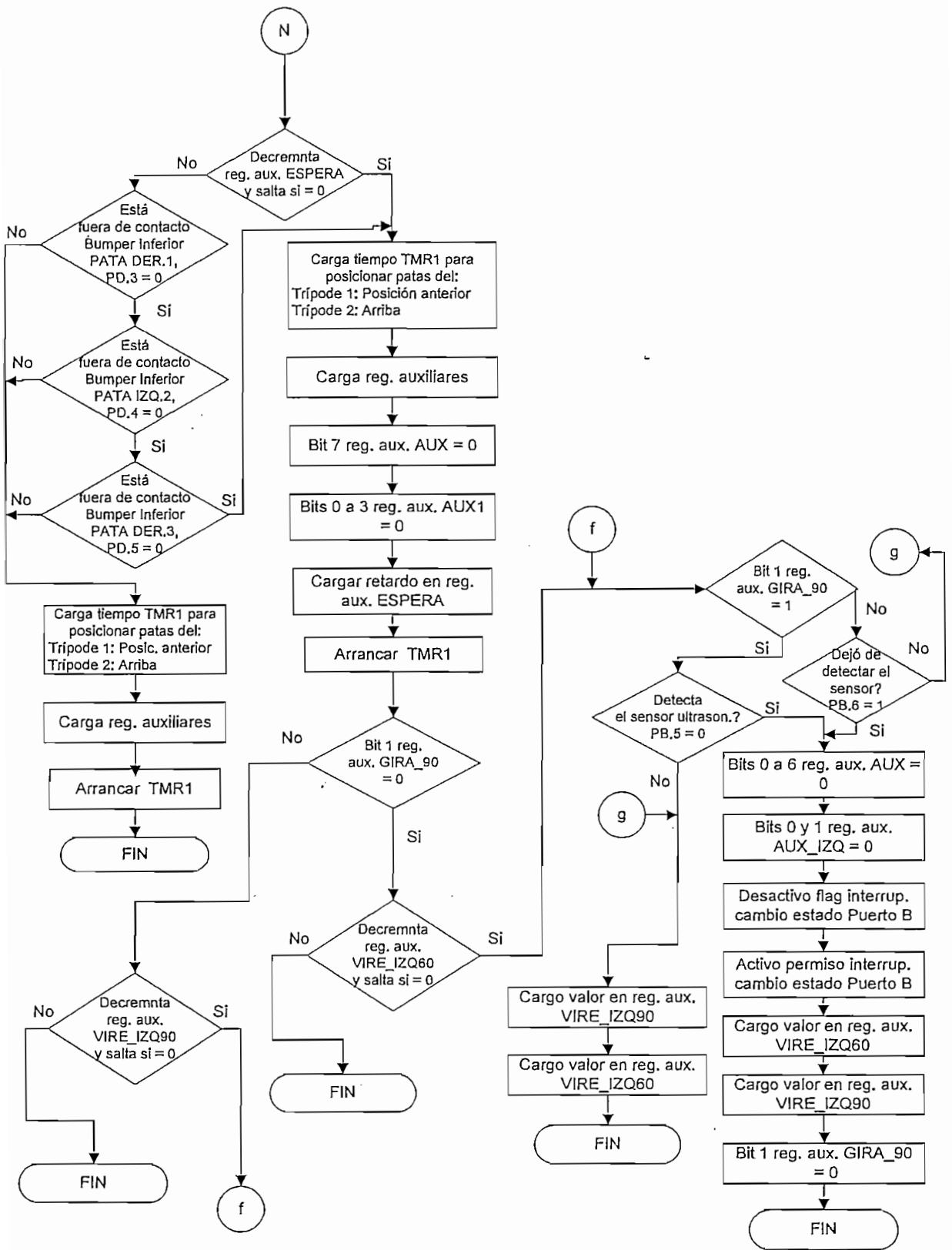


### E3.6 RETROCESO Y GIRO IZQUIERDA

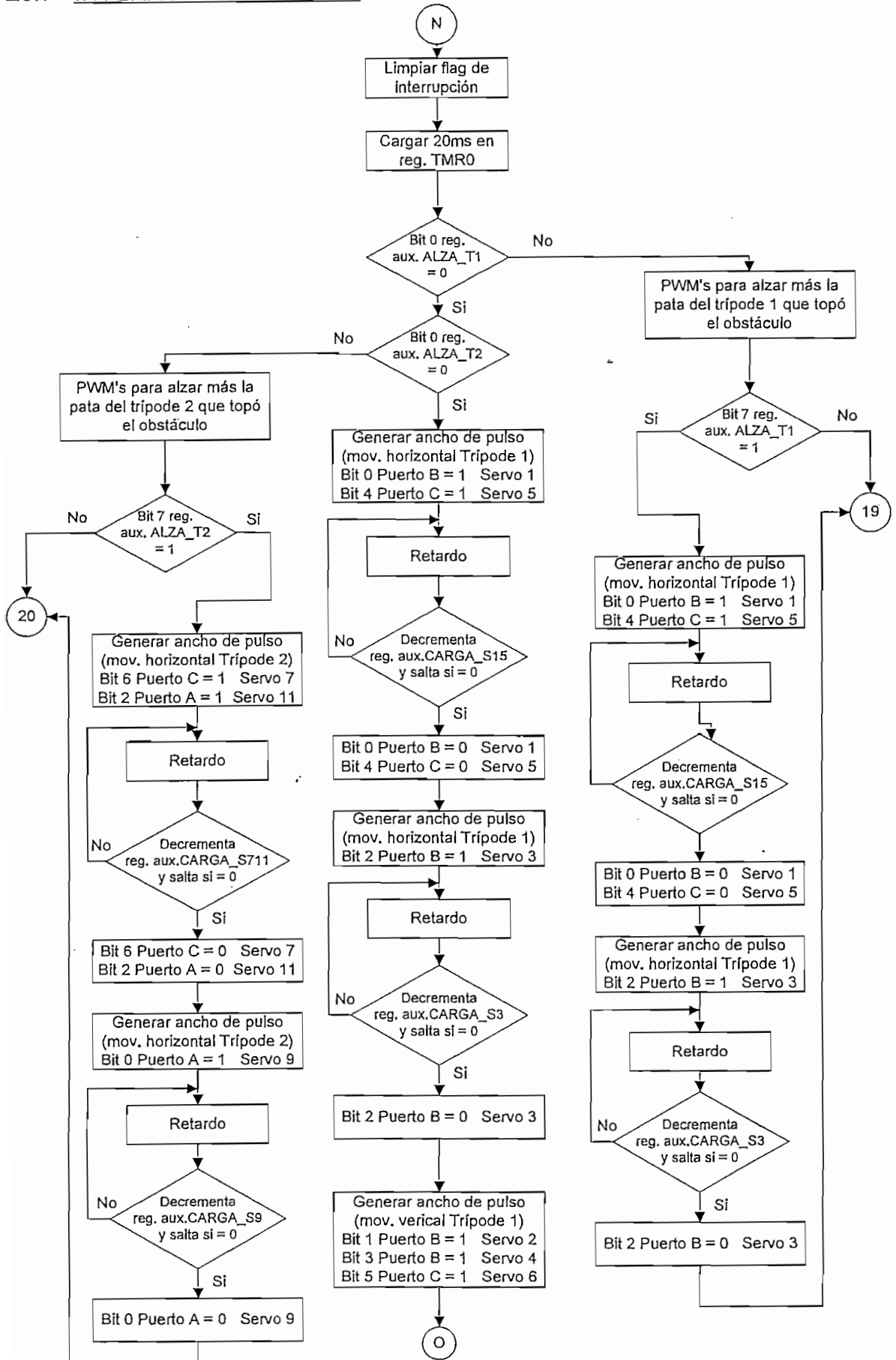


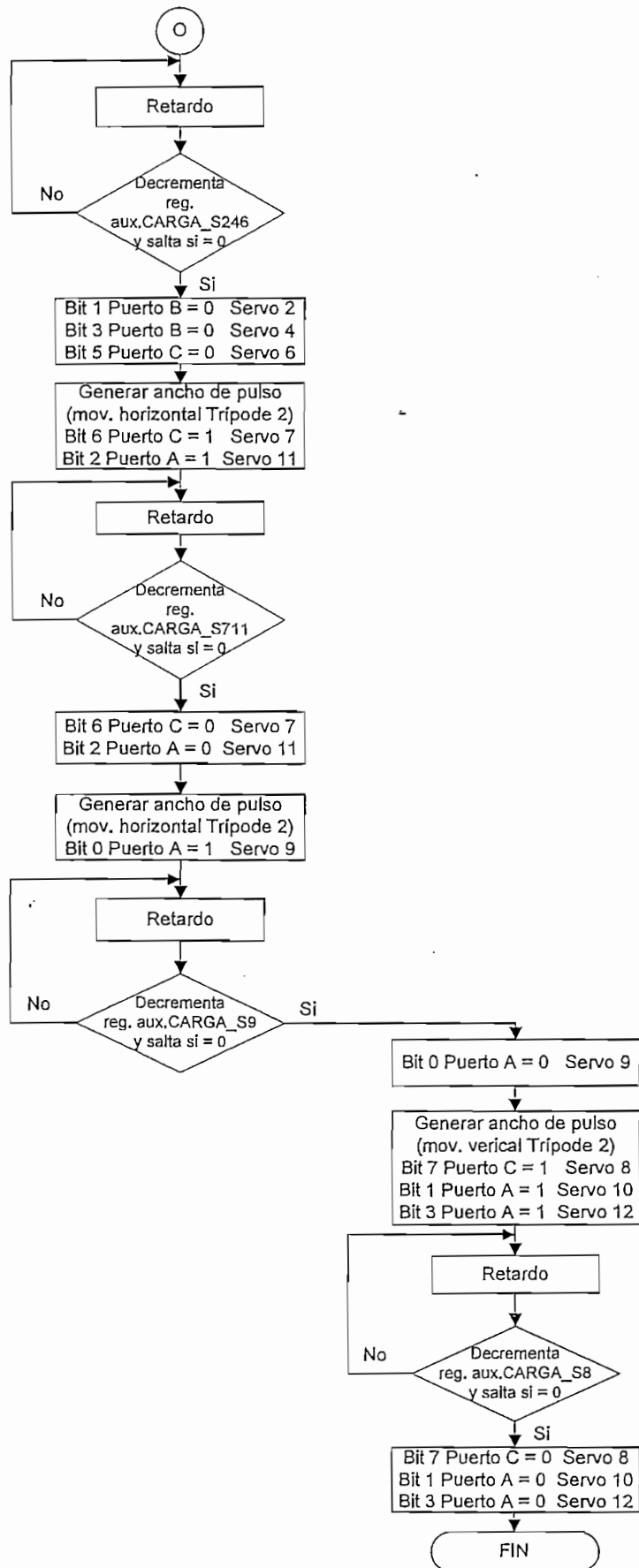




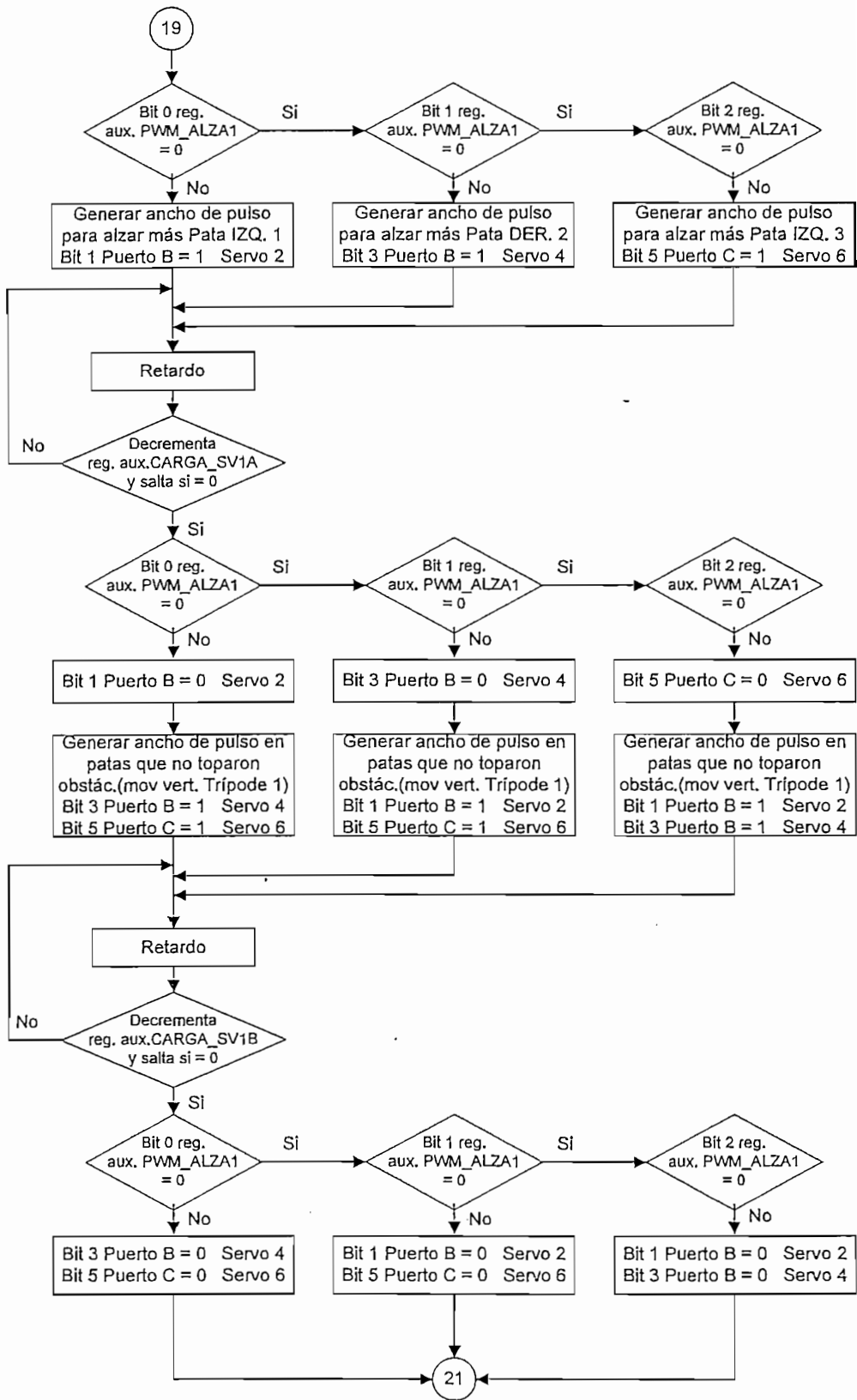


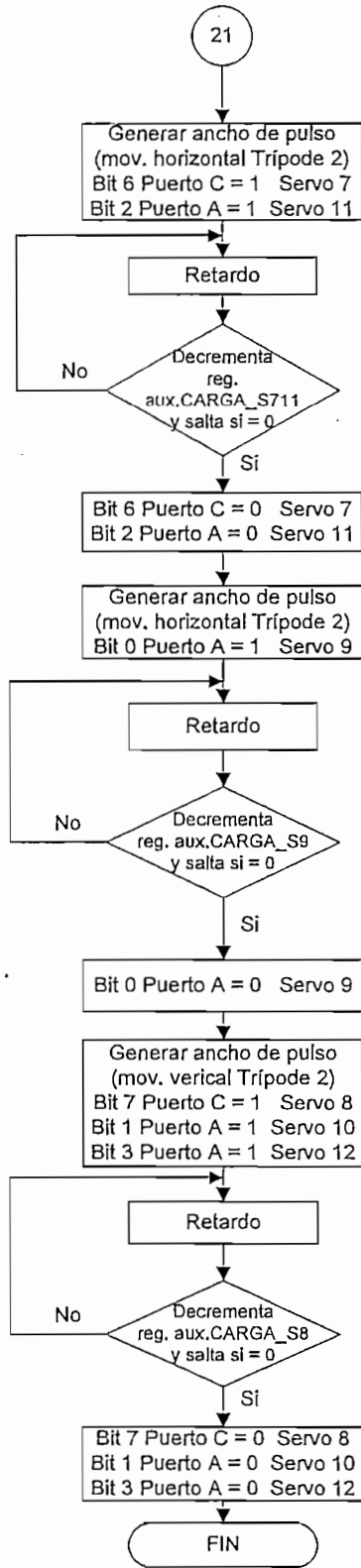
### E3.7 INTERRUPCIÓN TIMER 0

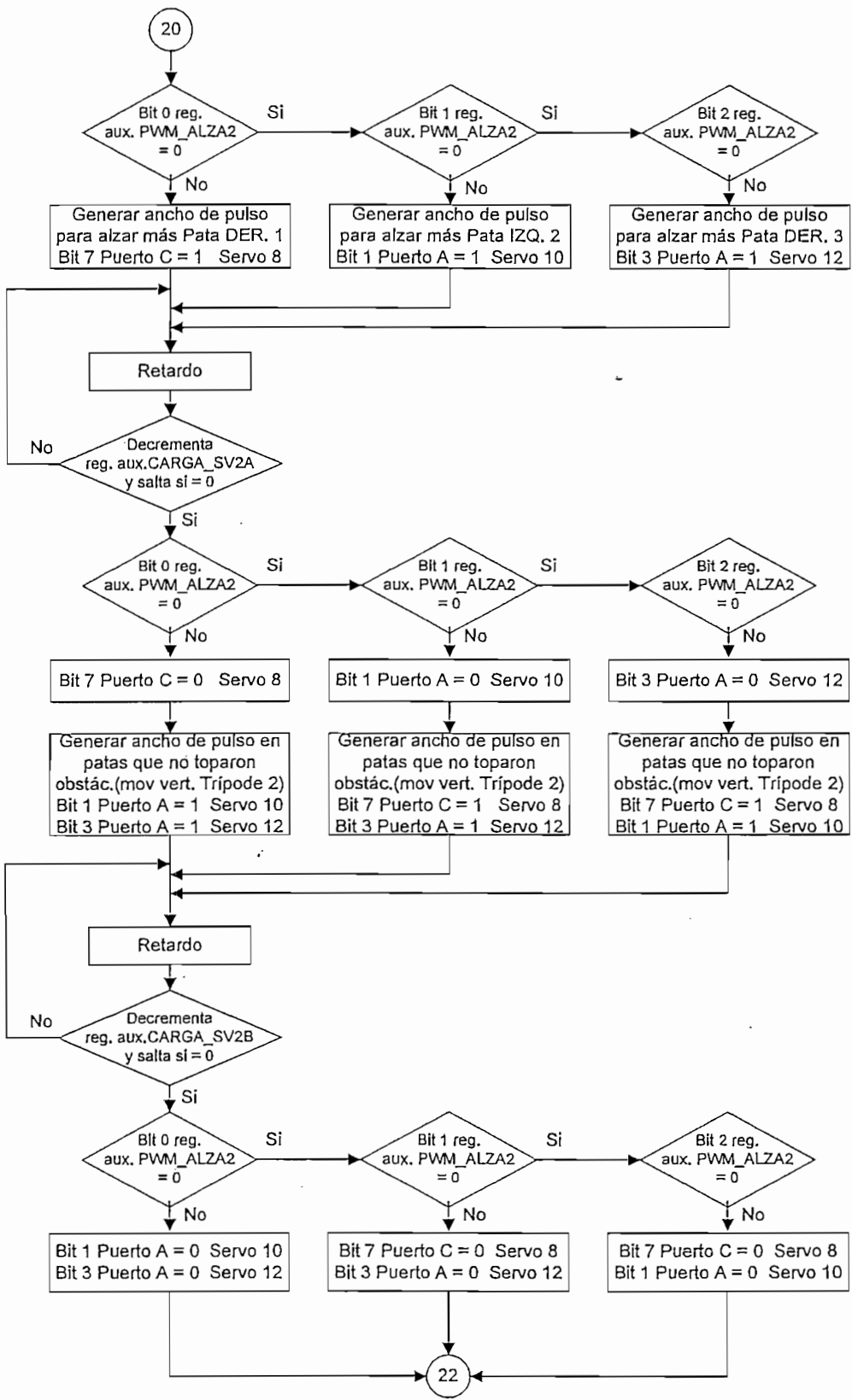


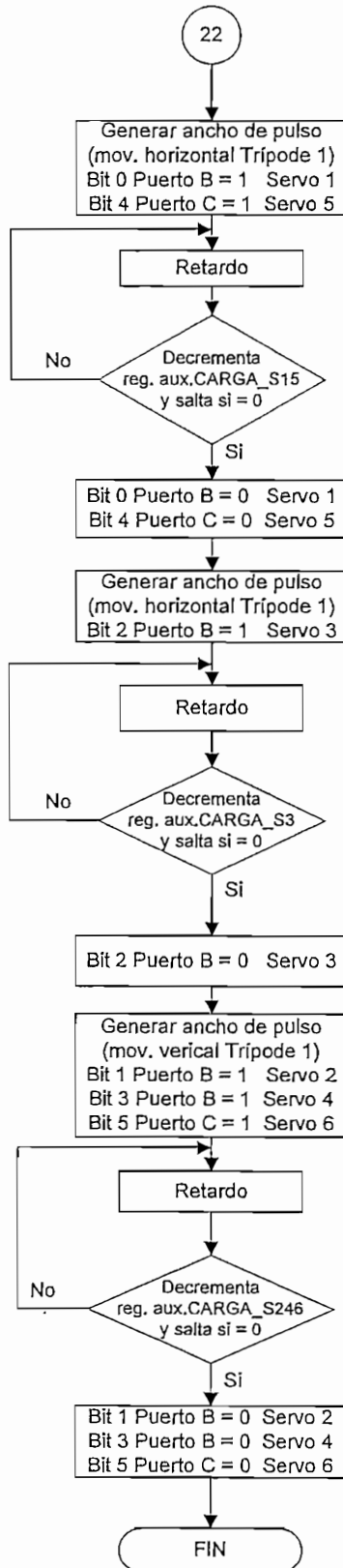












**ANEXO F**  
**SENSORES**

Jameco Part number 136653

ULTRASONIC SENSOR (TRANSMITTER / RECEIVER USE)

MODEL NO.: 40TR16F (CASE:ALUMINUM/FLOWER)

MODEL NO.: 40TR16P (CASE:PLASTIC/BLACK)

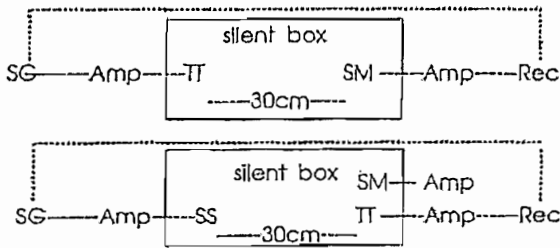
TRANSMITTER UNIT:

. Center Frequency (KHz)	: 40.0±1.0
. Sound Pressure Level (0 dB=0.0002 μbar)	: 119dB/40±1.0KH /10V SN/30cm/Min.
. Band Width (KHz) Min.	: 4.0 / 112 dB
. Capacitance (PF)	: 2000 ± 30%

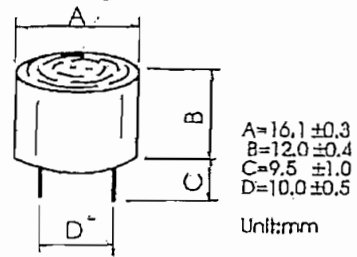
RECEIVER UNIT:

. Center Frequency (KHz)	: 40.0 ± 1.0
. Sensitivity Min. (0 dB vs IV μbar)	: 65dB/40 ± 1.0KH (R=3.9KO)
. Band Width (KHz) Min.	: 3.5 / (at -71 dB)
. Capacitance (PF)	: 2000 ± 30%

• TEST CIRCUIT :



OUTLINE DIMENSION:



- |                       |                       |
|-----------------------|-----------------------|
| TT : test transducer  | TT : test transducer  |
| Rec : recorder        | Rec : recorder        |
| SM : std.microphone   | SM : std.microphone   |
| Amp : amplifier       | Amp : amplifier       |
| SG : signal generator | SG : signal generator |
|                       | SS : std.speaker      |
|                       | R : resistance        |

# IS471F

## OPIC Light Detector with Built-in Signal Processing Circuit for Light Modulation System

### ■ Features

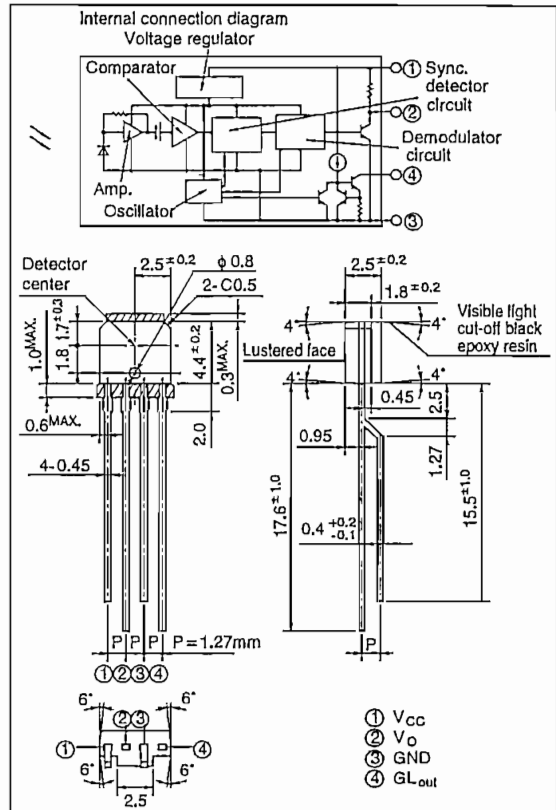
1. Impervious to external disturbing lights due to light modulation system
2. Built-in pulse driver circuit and sync. detector circuit on the emitter side
3. A wide range of operating supply voltage ( $V_{CC}$ : 4.5 to 16V)

### ■ Applications

1. Optoelectronic switches
2. Copiers, printers
3. Facsimiles

### ■ Outline Dimensions

(Unit: mm)



\*\*"OPIC" (Optical IC) is a trademark of the SHARP Corporation. An OPIC consists of a light-detecting element and signal-processing circuit integrated onto a single chip.

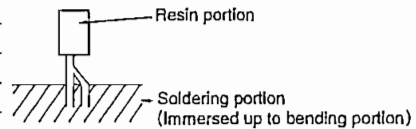
### ■ Absolute Maximum Ratings

( $T_a = 25^\circ\text{C}$ )

Parameter	Symbol	Rating	Unit	
Supply voltage	$V_{CC}$	-0.5 to 16	V	
Output	Output voltage	$V_O$	16	V
	Output current	$I_O$	50	mA
*1 GL output	Output voltage	$V_{GL}$	16	V
Power dissipation	P	250	mW	
Operating temperature	$T_{opr}$	-25 to +60	$^\circ\text{C}$	
Storage temperature	$T_{stg}$	-40 to +100	$^\circ\text{C}$	
*2 Soldering temperature	$T_{sol}$	260	$^\circ\text{C}$	

\*1 Applies to  $GL_{out}$  terminal

\*2 For 5 seconds at the position shown in the right figure



\* In the absence of confirmation by device specification sheets, SHARP takes no responsibility for any defects that occur in equipment using any of SHARP's devices, shown in catalogs, data books, etc. Contact SHARP in order to obtain the latest version of the device specification sheets before using any SHARP's device.

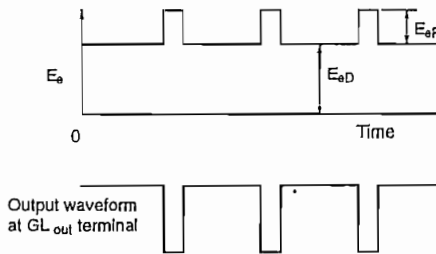
■ Electro-optical Characteristics

( $V_{CC}= 5V, T_a= 25^{\circ}C$ )

Parameter	Symbol	Conditions	MIN.	TYP.	MAX.	Unit	
Operating supply voltage	$V_{CC}$	-	4.5	-	16	V	
Supply current	$I_{CC}$	$V_O, GL_{out}$ terminals shall be opened.	-	3.5	7.0	mA	
Output	Low level output voltage	$V_{OL}$	$I_{OL}= 16mA, E_{VP}= 500lx, E_{VD}= 0^{*3}$	-	0.15	0.35	V
	High level output voltage	$V_{OH}$	$E_{VD}= E_{VP}= 0^{*3}$	4.97	-	-	V
	Output short circuit current	$I_{OS}$	$E_{VP}= E_{VD}= 0^{*3}$	0.25	0.5	1.0	mA
GL output	Low level output current	$I_{GL}$	$V_{GL}= 1.2V$	40	55	70	mA
	*4Pulse cycle	$t_p$	-	70	130	220	$\mu s$
	*4Pulse width	$t_w$	-	4.4	8	13.7	$\mu s$
*5 "Low→High" threshold irradiance	$E_{ePLH}$	$E_{eD}= 0^{*3}$ Light emitting diode ( $\lambda_p= 940nm$ ) <sup>*6</sup>	-	0.4	2.66	$\mu W/mm^2$	
*5 "High→Low" threshold irradiance	$E_{ePHL}$		-	0.7	2.8	$\mu W/mm^2$	
Hysteresis	$E_{ePLH} / E_{ePHL}$		0.45	0.65	0.95	-	
Response time	"High→Low" propagation delay time	$t_{PHL}$	*6	-	400	670	$\mu s$
	"Low→High" propagation delay time	$t_{PLH}$	*6	-	400	670	$\mu s$
*7 External disturbing light illuminance	$E_{VDX}$	$E_{ep}= 7.5 \mu W/mm^2, ^*3\lambda_p= 940nm$	2000	7500	-	lx	

\*3  $E_{eP}$  represents illuminance of signal light in sync with the low level timing of output at  $GL_{out}$  terminal.  
 $E_{eD}$  represents illuminance of DC light. For detail, see Fig. 1.  
 Light source; Infrared light emitting diode ( $\lambda_p= 940nm$ )  
 $E_{VP}$  represents illuminance of signal light in sync with the low level timing of output at  $GL_{out}$  terminal.  
 $E_{VD}$  represents illuminance of DC light. Note that the light source is CIE standard light source A.

Fig.1



(Note) Fig. 1 shows the output waveform at  $GL_{out}$  terminal with IS471F connected as shown in Fig. 3.

\*4 Pulse cycle ( $t_p$ ), pulse width ( $t_w$ ) are defined as shown in Fig. 2.  
 The waveform shown in Fig. 2 is the output voltage waveform at  $GL_{out}$  terminal with IS471F connected as shown in Fig. 3

Fig.2

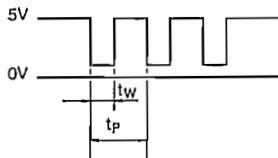
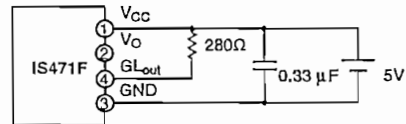


Fig.3

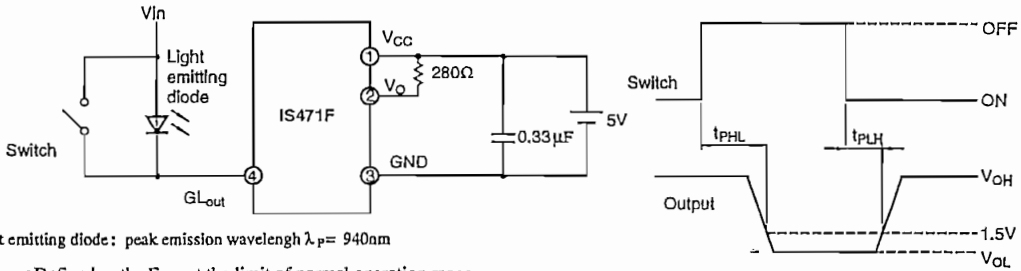


\*5 Defined as  $E_{ep}$  that causes the output to go " Low to High" (or " High to Low" ).



\*6 Test circuit for response time, threshold irradiance is shown in Fig. 4.

Fig. 4



Light emitting diode: peak emission wavelength  $\lambda_p = 940\text{nm}$

\*7  $E_{VOX}$ : Defined as the  $E_{VD}$  at the limit of normal operation range.

Fig. 5 Power Dissipation vs. Ambient Temperature

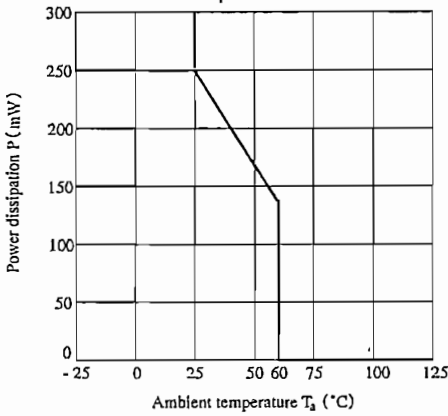


Fig. 6 Low Level Output Voltage vs. Low Level Output Current

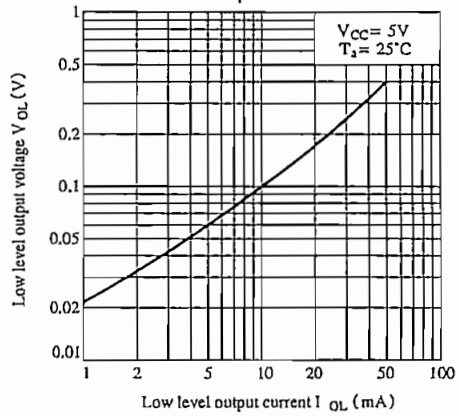


Fig. 7 Low Level Output Voltage vs. Ambient Temperature

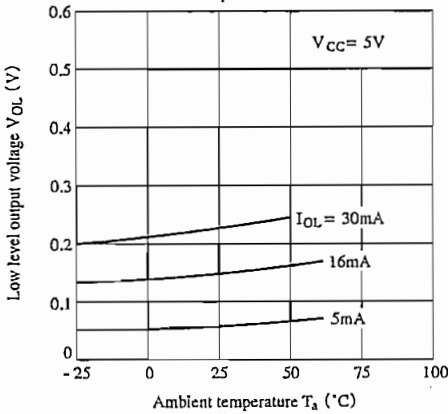


Fig. 8 Supply Current vs. Supply Voltage

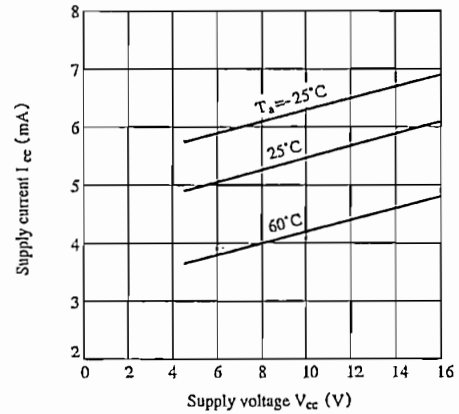


Fig. 9 Low Level Output Current vs. Supply Voltage

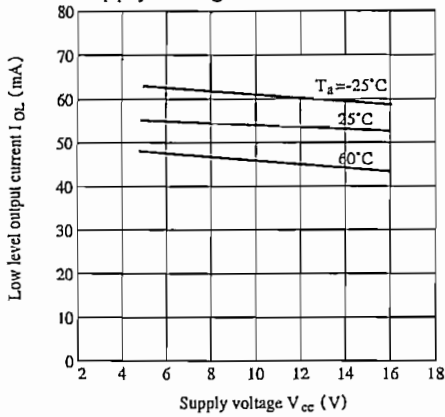


Fig.10 Sensitivity Diagram ( $T_a = 25^\circ\text{C}$ )

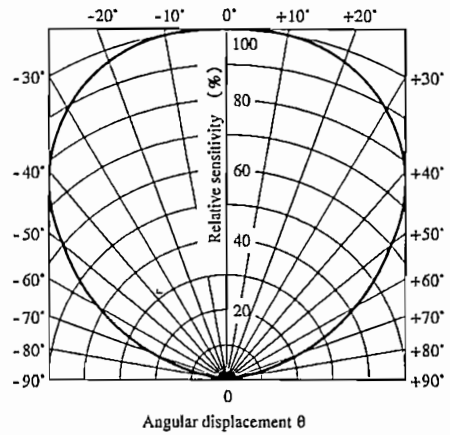
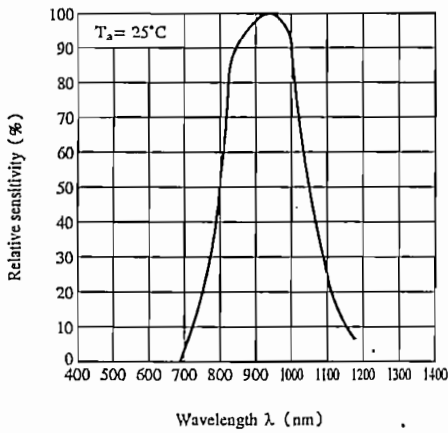
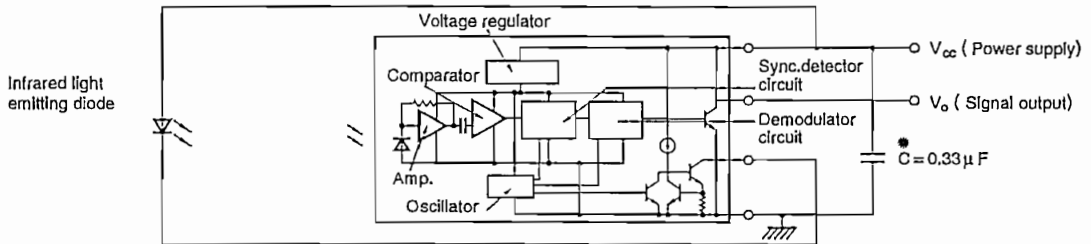


Fig.11 Spectral Sensitivity



■ Basic Circuit



● In order to stabilize power supply line, connect a by-pass capacitor of  $0.33\mu\text{F}$  or more between  $V_{cc}$  and GND near the device.

● Please refer to the chapter "Precautions for Use."

# LMC567

## Low Power Tone Decoder

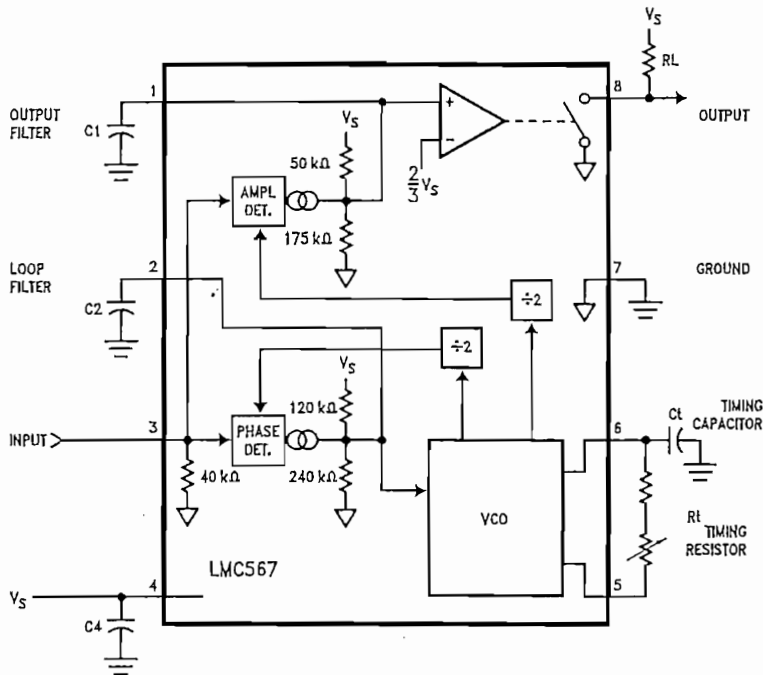
### General Description

The LMC567 is a low power general purpose LCMOS™ tone decoder which is functionally similar to the industry standard LM567. It consists of a twice frequency voltage-controlled oscillator (VCO) and quadrature dividers which establish the reference signals for phase and amplitude detectors. The phase detector and VCO form a phase-locked loop (PLL) which locks to an input signal frequency which is within the control range of the VCO. When the PLL is locked and the input signal amplitude exceeds an internally pre-set threshold, a switch to ground is activated on the output pin. External components set up the oscillator to run at twice the input frequency and determine the phase and amplitude filter time constants.

### Features

- Functionally similar to LM567
- 2V to 9V supply voltage range
- Low supply current drain
- No Increase in current with output activated
- Operates to 500 kHz input frequency
- High oscillator stability
- Ground-referenced Input
- Hysteresis added to amplitude comparator
- Out-of-band signals and noise rejected
- 20 mA output current capability

### Block Diagram (with External Components)



Order Number LMC567CM or LMC567CN  
See NS Package Number M08A or N08E

DS000670-1

## Absolute Maximum Ratings (Note 1)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

Input Voltage, Pin 3	2 V <sub>p-p</sub>
Supply Voltage, Pin 4	10V
Output Voltage, Pin 8	13V
Voltage at All Other Pins	V <sub>s</sub> to Gnd
Output Current, Pin 8	30 mA
Package Dissipation	500 mW
Operating Temperature Range (T <sub>A</sub> )	-25°C to +125°C

Storage Temperature Range -55°C to +150°C

### Soldering Information

Dual-In-Line Package	
Soldering (10 sec.)	260°C
Small Outline Package	
Vapor Phase (60 sec.)	215°C
Infrared (15 sec.)	220°C

See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" for other methods of soldering surface mount devices.

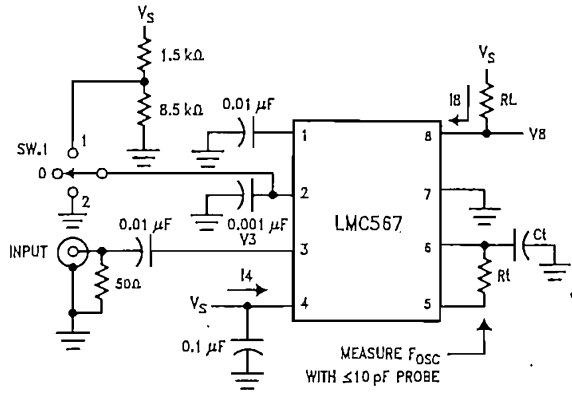
## Electrical Characteristics

Test Circuit, T<sub>A</sub> = 25°C, V<sub>s</sub> = 5V, RtCt #2, Sw. 1 Pos. 0, and no Input, unless otherwise noted.

Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units	
I <sub>4</sub>	Power Supply Current	RtCt #1, Quiescent or Activated	V <sub>s</sub> = 2V		0.3	mAdc	
			V <sub>s</sub> = 5V		0.5		0.8
			V <sub>s</sub> = 9V		0.8		1.3
V <sub>3</sub>	Input D.C. Bias			0		mVdc	
R <sub>3</sub>	Input Resistance			40		kΩ	
I <sub>8</sub>	Output Leakage			1	100	nAdc	
f <sub>o</sub>	Center Frequency, F <sub>osc</sub> ÷ 2	RtCt #2, Measure Oscillator Frequency and Divide by 2	V <sub>s</sub> = 2V		98	kHz	
			V <sub>s</sub> = 5V	92	103		113
			V <sub>s</sub> = 9V		105		
Δf <sub>o</sub>	Center Frequency Shift with Supply	$\frac{f_{0 9V} - f_{0 2V}}{7 f_{0 5V}} \times 100$		1.0	2.0	%/V	
V <sub>in</sub>	Input Threshold	Set Input Frequency Equal to f <sub>o</sub> Measured Above, Increase Input Level Until Pin 8 Goes Low.	V <sub>s</sub> = 2V	11	20	27	mVrms
			V <sub>s</sub> = 5V	17	30	45	
			V <sub>s</sub> = 9V		45		
ΔV <sub>in</sub>	Input Hysteresis	Starting at Input Threshold, Decrease Input Level Until Pin 8 goes High.		1.5		mVrms	
V <sub>8</sub>	Output 'Sat' Voltage	Input Level > Threshold Choose RL for Specified I <sub>8</sub>	I <sub>8</sub> = 2 mA	0.06	0.15	Vdc	
			I <sub>8</sub> = 20 mA		0.7		
L.D.B.W.	Largest Detection Bandwidth	Measure F <sub>osc</sub> with Sw. 1 in Pos. 0, 1, and 2; L.D.B.W. = $\frac{F_{osc P2} - F_{osc P1}}{F_{osc P0}} \times 100$	V <sub>s</sub> = 2V	7	11	15	%
			V <sub>s</sub> = 5V	11	14	17	
			V <sub>s</sub> = 9V		15		
ΔBW	Bandwidth Skew	$Skew = \left( \frac{F_{osc P2} - F_{osc P1}}{2 F_{osc P0}} - 1 \right) \times 100$		0	±1.0	%	
f <sub>max</sub>	Highest Center Freq.	RtCt #3, Measure Oscillator Frequency and Divide by 2		700		kHz	
V <sub>in</sub>	Input Threshold at f <sub>max</sub>	Set Input Frequency Equal to f <sub>max</sub> measured Above, Increase Input Level Until Pin 8 goes Low.		35		mVrms	

Note 1: Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. Operating Ratings indicate conditions for which the device is functional, but do not guarantee specific performance limits. Electrical Characteristics state DC and AC electrical specifications under particular test conditions which guarantee specific performance limits. This assumes that the device is within the Operating Ratings. Specifications are not guaranteed for parameters where no limit is given, however, the typical value is a good indication of device performance.

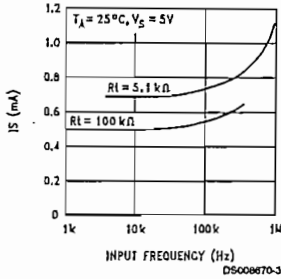
# Test Circuit



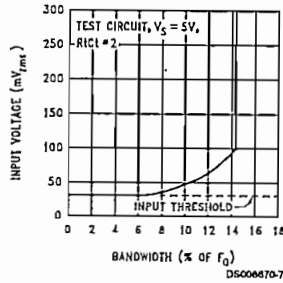
RtCt	Rt	Ct
#1	100k	300 pF
#2	10k	300 pF
#3	5.1k	62 pF

## Typical Performance Characteristics

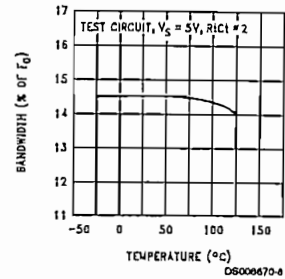
Supply Current vs. Operating Frequency



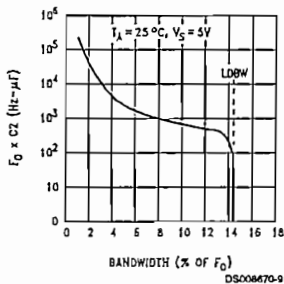
Bandwidth vs. Input Signal Level



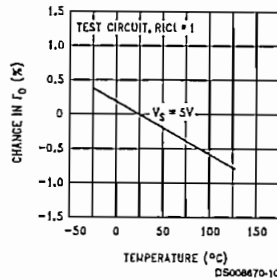
Largest Detection Bandwidth vs. Temp.



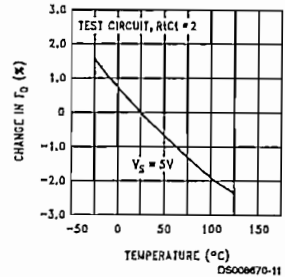
Bandwidth as a Function of C2



Frequency Drift with Temperature



Frequency Drift with Temperature



## Applications Information (refer to Block Diagram)

### GENERAL

The LMC567 low power tone decoder can be operated at supply voltages of 2V to 9V and at input frequencies ranging from 1 Hz up to 500 kHz.

The LMC567 can be directly substituted in most LM567 applications with the following provisions:

1. Oscillator timing capacitor Ct must be halved to double the oscillator frequency relative to the input frequency (See OSCILLATOR TIMING COMPONENTS).
2. Filter capacitors C1 and C2 must be reduced by a factor of 8 to maintain the same filter time constants.
3. The output current demanded of pin 8 must be limited to the specified capability of the LMC567.

### OSCILLATOR TIMING COMPONENTS

The voltage-controlled oscillator (VCO) on the LMC567 must be set up to run at twice the frequency of the input signal tone to be decoded. The center frequency of the VCO is set by timing resistor Rt and timing capacitor Ct connected to pins 5 and 6 of the IC. The center frequency as a function of Rt and Ct is given by:

$$F_{osc} \cong \frac{1}{1.4 R_t C_t} \text{ Hz}$$

Since this will cause an input tone of half  $F_{osc}$  to be decoded,

$$F_{input} \cong \frac{1}{2.8 R_t C_t} \text{ Hz}$$

This equation is accurate at low frequencies; however, above 50 kHz ( $F_{osc} = 100$  kHz), internal delays cause the actual frequency to be lower than predicted.

The choice of Rt and Ct will be a tradeoff between supply current and practical capacitor values. An additional supply current component is introduced due to Rt being switched to  $V_s$  every half cycle to charge Ct:

$$I_n \text{ due to } R_t = V_s / (4R_t)$$

Thus the supply current can be minimized by keeping Rt as large as possible (see supply current vs. operating frequency curves). However, the desired frequency will dictate an RtCt product such that increasing Rt will require a smaller Ct. Below Ct = 100 pF, circuit board stray capacitances begin to play a role in determining the oscillation frequency which ultimately limits the minimum Ct.

To allow for I.C. and component value tolerances, the oscillator timing components will require a trim. This is generally accomplished by using a variable resistor as part of Rt, although Ct could also be padded. The amount of initial frequency variation due to the LMC567 itself is given in the electrical specifications; the total trim range must also accommodate the tolerances of Rt and Ct.

## Applications Information (refer to Block Diagram) (Continued)

### SUPPLY DECOUPLING

The decoupling of supply pin 4 becomes more critical at high supply voltages with high operating frequencies, requiring C4 to be placed as close as possible to pin 4.

### INPUT PIN

The Input pin 3 is internally ground-referenced with a nominal 40 k $\Omega$  resistor. Signals which are already centered on 0V may be directly coupled to pin 3; however, any d.c. potential must be isolated via a coupling capacitor. Inputs of multiple LMC567 devices can be paralleled without individual d.c. isolation.

### LOOP FILTER

Pin 2 is the combined output of the phase detector and control input of the VCO for the phase-locked loop (PLL). Capacitor C2 in conjunction with the nominal 80 k $\Omega$  pin 2 internal resistance forms the loop filter.

For small values of C2, the PLL will have a fast acquisition time and the pull-in range will be set by the built in VCO frequency stops, which also determine the largest detection bandwidth (LDBW). Increasing C2 results in improved noise immunity at the expense of acquisition time, and the pull-in range will begin to become narrower than the LDBW (see Bandwidth as a Function of C2 curve). However, the maximum hold-in range will always equal the LDBW.

### OUTPUT FILTER

Pin 1 is the output of a negative-going amplitude detector which has a nominal 0 signal output of  $7/9 V_s$ . When the PLL is locked to the input, an increase in signal level causes the detector output to move negative. When pin 1 reaches  $2/3 V_s$ , the output is activated (see OUTPUT PIN).

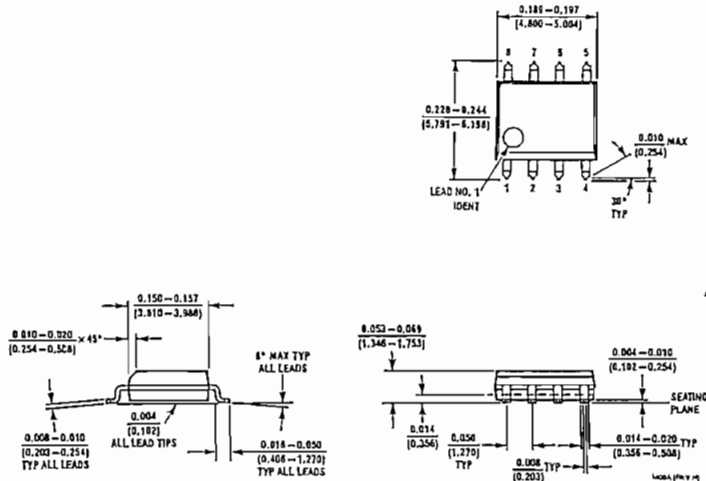
Capacitor C1 in conjunction with the nominal 40 k $\Omega$  pin 1 internal resistance forms the output filter. The size of C1 is a tradeoff between slew rate and carrier ripple at the output comparator. Low values of C1 produce the least delay between the input and output for tone burst applications, while larger values of C1 improve noise immunity.

Pin 1 also provides a means for shifting the input threshold higher or lower by connecting an external resistor to supply or ground. However, reducing the threshold using this technique increases sensitivity to pin 1 carrier ripple and also results in more part to part threshold variation.

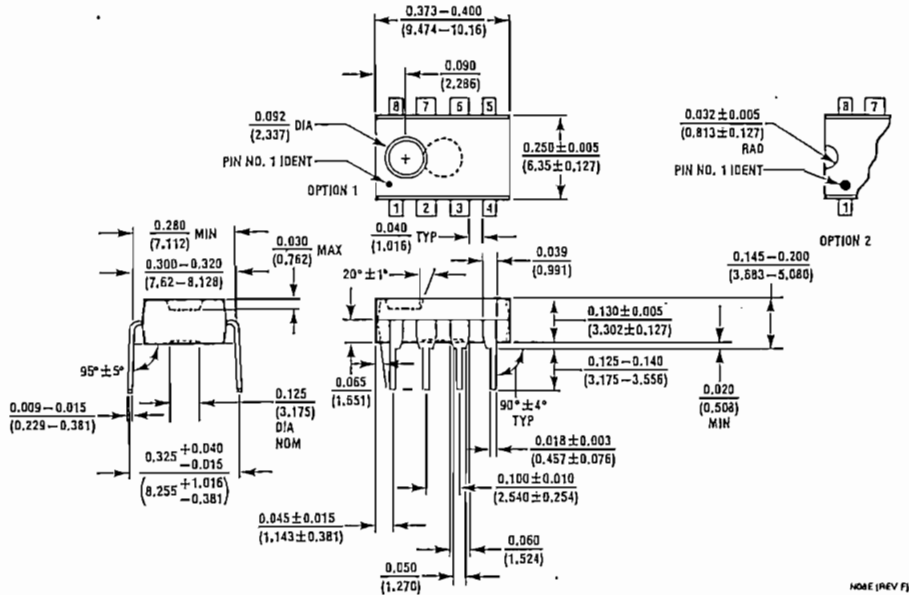
### OUTPUT PIN

The output at pin 8 is an N-channel FET switch to ground which is activated when the PLL is locked and the input tone is of sufficient amplitude to cause pin 1 to fall below  $2/3 V_s$ . Apart from the obvious current component due to the external pin 8 load resistor, no additional supply current is required to activate the switch. The on resistance of the switch is inversely proportional to supply; thus the "sat" voltage for a given output current will increase at lower supplies.

Physical Dimensions Inches (millimeters) unless otherwise noted



Molded Small Outline (SO) Package (M)  
Order Number LMC567CM  
NS Package Number M08A



Molded Dual-In-Line Package (N)  
Order Number LMC567CN  
NS Package Number N08E