



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

T E S I S

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ROBOT RESOLVEDOR DE  
LABERINTOS DE PAREDES

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO

PRESENTA:

MOISES MELENDEZ REYES

DIRECTOR DE TESIS:

M.I. Rubén Anaya García

AGOSTO DE 2011





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



## ***DEDICATORIA***

*A la UNAM*

*A mis padres*



## ***AGRADECIMIENTOS***

Este trabajo ha sido beneficiado de la constante y acertada ayuda de:

El M.I. Rubén Anaya García

Agradezco también a mis sinodales:

Ing. Laura Sandoval Montaña

M.I. Rubén Anaya García

Ing. Román Victoriano Osorio Comparán

M.I. Jorge Valeriano Assem

M.C. Alejandro Velázquez Mena

Y a todos mis familiares y compañeros que siempre se han preocupado e interesado por mí.



## ***RESUMEN***

En este trabajo se presenta el diseño, desarrollo y pruebas de un robot que resuelve un laberinto de paredes, mediante el estudio de diferentes estructuras mecánicas, motores, sensores y algunos sistemas controladores basados en microcomputadoras además del análisis de algoritmos apropiados para hacer que el robot tenga la habilidad de reconocer el laberinto, y navegar hasta la meta.



## INDICE

<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>I</b>
<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>III</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>V</b>
<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>1</b>
Introducción .....	1
1.1 Definición del problema .....	1
1.2 Objetivos de la tesis.....	1
1.3 Metodología de la tesis .....	2
1.4 Estructura de la tesis .....	2
1.5 Relevancia de las competencias de robots móviles .....	3
1.6 Normativas de las competencias de robots de laberinto .....	3
1.6.1 El laberinto.....	4
1.6.2 El robot .....	4
1.6.3 La competencia.....	5
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>7</b>
Antecedentes .....	7
2.1 Historia de los robots móviles .....	7
2.2 Competencias de robots móviles a nivel mundial.....	8
2.2.1 Las competencias de robots de laberinto actuales .....	9
2.2.1.1 Micromouse contest.....	9
2.2.1.2 AAI Mobile Robot Competition.....	10
2.2.1.3 RoboCup .....	11
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>13</b>
Análisis y diseño de estructuras mecánicas de robots.....	13
3.1 Importancia del chasis.....	13
3.2 Estructuras más usuales .....	13

3.3	Materiales de elaboración del chasis, ventajas y desventajas .....	14
3.3.1	PVC.....	14
3.3.2	Sintra.....	14
3.3.3	PCB.....	15
3.4	Formas de tracción .....	16
3.4.1	Configuración diferencial.....	16
3.4.2	Configuración en triciclo.....	18
3.4.3	Configuración Ackerman .....	18
3.4.4	Dirección sincronizada.....	19
3.4.5	Configuración omnidireccional.....	20
3.4.6	Vehículos con múltiples grados de libertad.....	20
3.4.7	Tracción mediante orugas .....	22
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>		<b>23</b>
	Ruedas y motores.....	23
4.1	Tipos, dimensiones y material de las ruedas.....	23
4.2	Motores de corriente directa .....	26
4.3	Motores de corriente alterna.....	28
4.3.1	Motores universales .....	28
4.3.2	Motores síncronos.....	29
4.3.3	Motores de jaula de ardilla.....	30
4.4	Motores a pasos .....	32
4.4.1	Motor a pasos bipolar.....	33
4.4.2	Motores a pasos unipolares .....	34
4.5	Servomotores .....	34
4.6	Control de motores y servomotores .....	37
4.6.1	Control de motores de corriente continua.....	37
4.6.2	Secuencias para manejar motores paso a paso Bipolares .....	38
4.6.3	Secuencias para manejar motores paso a paso Unipolares.....	38
4.6.3.1	Secuencia Normal.....	39
4.6.3.2	Secuencia <i>wave drive</i> : .....	39

4.6.3.3	Secuencia de medio paso .....	40
---------	-------------------------------	----

## **CAPÍTULO 5 .....43**

	Sensores de proximidad y de obstáculos .....	43
5.1	Sensores infrarrojos .....	43
5.1.1	Sensores reflectivos .....	44
5.1.2	Sensores de ranura (Sensor Break-Beam) .....	44
5.1.3	Sensores modulados.....	45
5.1.4	Ventajas de los sensores infrarrojos.....	45
5.1.5	Desventajas de los sensores infrarrojos. ....	46
5.2	Sensores ultrasónicos.....	46
5.2.1	Ventajas y desventajas de los sensores ultrasónicos .....	47
5.3	Sensores de luz.....	48
5.3.1	Ventajas y desventajas de los sensores de luz .....	49
5.4	Sensores seleccionados.....	50

## **CAPÍTULO 6 .....53**

	Fuentes de energía .....	53
6.1	Tecnologías de pilas y baterías empleadas en la robótica .....	53
6.1.1	Baterías Alcalinas.....	54
6.1.2	Pilas alcalinas de magnesio.....	55
6.1.3	Baterías de Ni-Cd .....	55
6.1.3.1	Ventajas y desventajas de la pila de NiCd .....	56
6.1.4	Baterías de Ni-Mh.....	57
6.1.5	Baterías de Litio .....	58
6.1.5.1	Ventajas y desventajas de las baterías de litio.....	59
6.1.5.2	Proceso de recarga de las baterías de litio.....	60
6.1.6	Baterías de Litio polímetro Li-po .....	61
6.1.7	Comparación de tipos de baterías.....	62
6.2	Fuente de alimentación seleccionada.....	63

**CAPÍTULO 7 ..... 67**

Arquitecturas de controladores para robots.....	67
7.1 Tipos de Controladores utilizados en robótica.....	67
7.1.1 Microprocesadores.....	67
7.1.2 Microcontroladores.....	68
7.1.3 PDA .....	72
7.1.4 Computadoras personales.....	73
7.1.5 Sistemas embebidos .....	74
7.2 Controlador seleccionado .....	75

**CAPÍTULO 8 ..... 77**

Análisis de los algoritmos de solución de laberintos.....	77
8.1 Algoritmo de azar .....	77
8.2 Algoritmo de seguidor de paredes .....	78
8.3 Algoritmo de inundación.....	79
8.4 Algoritmo de navegación y solución .....	82

**CAPÍTULO 9 ..... 83**

Montaje y pruebas del robot.....	83
9.1 Etapas de la elaboración de la parte mecánica.....	83
9.2 Montaje de la parte electrónica y ajuste de los sensores de proximidad y distancia. ....	84
9.3 Codificación del algoritmo.....	93
9.4 Aplicación específica para el Torneo Mexicano de Robótica .....	93
9.5 Software necesario para cargar y ejecutar el programa controlador. ....	98
9.6 Pruebas del robot en el Torneo Mexicano de Robótica.....	99

**CAPÍTULO 10..... 101**

Análisis del desempeño del robot .....	101
10.1 Pruebas del robot propuesto .....	101
10.2 Características de los robots de laberinto reales .....	102

10.3 Comparación del comportamiento, tiempos de respuesta y eficiencia de la solución del laberinto.....	103
<b>CAPÍTULO 11 .....</b>	<b>105</b>
Conclusiones.....	105
11.1 Propuesta de mejoras y trabajo futuro .....	107
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>109</b>
<b>CÓDIGO UTILIZADO PARA EL TORNEO MEXICANO DE ROBÓTICA .....</b>	<b>111</b>
<b>GLOSARIO – TERMINOLOGÍA USADA. ....</b>	<b>117</b>
<b>HOJAS DE ESPECIFICACIONES DE LOS COMPONENTES ELECTRÓNICOS SELECCIONADOS.....</b>	<b>119</b>
<b>SOFTWARE EMPLEADO.....</b>	<b>129</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Robots en el evento Robocup.....	11
Figura 2.2 Categoría de robots <i>Small Size</i> .....	12
Figura 3.1 La forma del chasis influye en el comportamiento dinámico del robot.....	14
Figura 3.2 Chasis de un robot de laberinto hecho con PCB .....	15
Figura 3.3 La tracción diferencial en robots .....	17
Figura 3.4 Más de una rueda loca puede provocar la falta de tracción .....	17
Figura 3.5 Disposición de las ruedas en configuración diferencial con una rueda loca al frente.....	17
Figura 3.6 Configuración en triciclo.....	18
Figura 3.7 Configuración Ackerman .....	19
Figura 3.8 Mecánica necesaria para diseñar una configuración sincronizada .....	20
Figura 3.9 a. Rueda omnidireccional b. Ejemplo de configuración omnidireccional...	20
Figura 3.10 Robot serpiente OmniTread .....	21
Figura 3.11 Robot con tracción de orugas.....	22
Figura 4.1 Relación ideal entre desplazamiento angular y lineal .....	23
Figura 4.2 Ruedas lisas.....	24
Figura 4.3 Ruedas todo terreno.....	24
Figura 4.4 Ruedas omnidireccionales.....	24
Figura 4.5 Ruedas locas o resbalones.....	25
Figura 4.6 Ruedas hechas de materiales metálicos.....	25
Figura 4.7 Robot con ruedas de plástico .....	26
Figura 4.8 Estator y rotor de un motor.....	27
Figura 4.9 Motor sin escobillas o brushless.....	27
Figura 4.10 Motor de indicción usando ampliamente para aplicaciones industriales y domésticas.....	29

Figura 4.11 Motor síncrono .....	30
Figura 4.12 Motor jaula de ardilla .....	31
Figura 4.13 Típico motor a pasos.....	32
Figura 4.15 Rotor de un motor a pasos .....	32
Figura 4.15 Circuitos de control para motores a pasos bipolares .....	33
Figura 4.16 Ejemplo de un circuito de control para motores a pasos unipolares.....	34
Figura 4.17 Diagrama esquemático de un servomotor .....	35
Figura 4.18 Señales que se aplican a los servomotores y los efectos sobre el eje del motor .....	36
Figura 4.19 Modificaciones que se realizan los servomotores para lograr la rotación continua.....	36
Figura 4.20 Esquema del funcionamiento de un Puente H para el control del sentido de giro de motores .....	37
Figura 5.1 Figura Fotodiodo y fototransistor comunes .....	44
Figura 5.2 Sensor reflexivo QRD1114 .....	44
Figura 5.3 Sensores de ranura .....	45
Figura 5.4 Sensor modulado IS471F .....	45
Figura 5.5 Sensor de distancia ultrasónico .....	47
Figura 5.6 Sensor comercial Maxbotix LV-EZ3.....	47
Figura 5.7 Sensores LDR que varían su resistencia en función de la luz que les incide ..	48
Figura 5.8 Sensor LDR y su acondicionador de señal .....	49
Figura 5.9 Sensores de distancia que se han empleado en el robot propuesto .....	50
Figura 5.10 Imágenes en el osciloscopio de las señales leídas en los sensores .....	51
Figura 5.11 Imágenes de los sensores en el robot diseñado.....	52
Figura 6.1 Estructura de una batería alcalina .....	54
Figura 6.2 Estructura de una batería de Ni-Cd .....	56
Figura 6.3 Ejemplos de baterías de Ni-Mh .....	58

Figura 6.4 Un simple cargador de baterías de litio.....	60
Figura 6.5 Gráfica que muestra la densidad de carga de los distintos tipos de baterías	63
Figura 6.6 Cargador balanceador empleado .....	63
Figura 6.7 Circuito elevador y regulador de voltaje .....	64
Figura 6.8 Configuración del circuito elevador y regulador de voltaje .....	65
Figura 6.9 Imagen que muestra el aspecto real del circuito elevador y regulador de voltaje.....	65
Figura 6.10 Batería empleada y su ubicación en el robot .....	66
Figura 7.1 Microprocesador y periféricos mínimamente necesarios.....	68
Figura 7.2 Sistema microcontrolador .....	69
Figura 7.3 Una PDA IPaq de HP .....	72
Figura 7.4 Robot controlado por una PDA .....	73
Figura 7.5 Computadora personal <i>fit-PC</i> .....	74
Figura 7.6 Robot embebido Roomba .....	75
Figura 7.7 Periféricos que incluye el microcontrolador utilizado.....	76
Figura 8.1 Laberinto ejemplo.....	80
Figura 8.2 Avance del robot en el laberinto .....	80
Figura 8.3 Ajuste del valor de las celdas.....	81
Figura 9.1 Dimensiones y apariencia de la parte mecánica .....	84
Figura 9.2 Diagrama de uno de los sensores.....	84
Figura 9.3 Ángulos de incidencia y de reflexión .....	86
Figura 9.4 Colocación del encoder sobre cada una de las ruedas.....	86
Figura 9.5 Sistema electrónico de acondicionador de encoders.....	87
Figura 9.6 Circuito del elevador de voltaje regulado .....	88
Figura 9.7 Diagrama electrónico general del robot.....	90
Figura 9.8 Capas inferior y superior de la placa PCB del robot .....	91

Figura 9.9 Vista superior de la colocación de los elementos electrónicos.....	92
Figura 9.10 Algunas imágenes del robot completamente ensamblado.....	92
Figura 9.11 Movimiento del robot en las intersecciones .....	97
Figura 9.12 Laberinto micromouse para la prueba en el TMR 2011 .....	99
Figura 9.13 Muestra de una de las celdas estándares para pruebas micromouse .....	100
Figura 9.14 Algunos de los robots participantes en el TMR micromouse.....	100
Figura 10.1 robot Tetra poseedor del record mundial.....	102
Figura 11.1 Sensor de distancia GP2D120XJ00F.....	105
Figura 11.2 Ejemplos de giroscopios .....	106

## LISTA DE TABLAS

Tabla 4.1 Señales de control en un Puente H y el resultado en el sentido de giro de los motores .....	37
Tabla 4.2 Secuencia de control para los motores a pasos bipolares.....	38
Tabla 4.3 Secuencia normal de control para motores unipolares .....	39
Tabla 4.4 Secuencia <i>wave drive</i> para motores unipolares .....	40
Tabla 4.5 Secuencia de medio paso para motores unipolares.....	41
Tabla 6.1 Comparación entre los distintos tipos de baterías que se utilizan en robótica	62



# Capítulo 1

---

## *Introducción*

### **1.1 Definición del problema**

Se debe diseñar un robot capaz de resolver un laberinto de paredes, que se ajuste a las características definidas por las normas para los robots de laberinto.

Estos robots son dispositivos complejos con tres partes diferenciadas. La parte mecánica es la que soporta todo el robot, por lo tanto la elección de la forma y las dimensiones del chasis determinarán que tan rápido puede moverse el robot, por lo que deben seleccionarse adecuadamente los materiales con los que se realizará la parte mecánica atendiendo a la colocación del centro de gravedad y las formas del robot a fin de que pueda navegar por el reducido espacio de que dispone en el laberinto.

La parte electrónica se compone a su vez de los actuadores, sensores, y controlador que constituyen la capa de hardware que reciben, conducen y procesan las señales.

El software son las instrucciones que procesa el microcontrolador, recibe los datos del exterior por medio de los sensores y produce salidas que son enviadas a los actuadores para producir el comportamiento esperado del robot.

### **1.2 Objetivos de la tesis**

Construir un robot que resuelva un laberinto de paredes mediante el reconocimiento de su entorno. Para poder realizar esta tarea el robot deberá contar con los sensores adecuados que le permitan conocer la distancia del mismo hasta las paredes que conforman cada una de las celdas del laberinto y ser capaz de tomar las decisiones adecuadas mediante los movimientos que le lleven a la meta.

Consiste en analizar diferentes estructuras mecánicas, plataformas electrónicas en cuanto microcontroladores y sensores de proximidad y distancia además de diversos algoritmos de navegación para diseñar, implementar y probar un robot que sea capaz de navegar por un laberinto y encontrar la meta, en uno de los extremos del laberinto.

### **1.3 Metodología de la tesis**

Para obtener los resultados esperados se seguirá el siguiente procedimiento.

- DEFINIR claramente el robot a realizar en cuanto a su estructura mecánica, motores y controlador.
- DISEÑAR EL CIRCUITO FÍSICO, que implementará el proyecto, es decir dibujar el circuito electrónico que va a controlar al robot.
- CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO, en esta fase hay que adquirir todos los componentes que configuran el robot, realizar el circuito físico diseñado en el paso anterior, montándolo en una placa protoboard y posteriormente en la placa de circuito impreso.
- PLANTEAR EL PROGRAMA NECESARIO, utilizando herramientas de diseño, depurando este paso hasta donde sea necesario. Tomando en cuenta que le tiempo que se dedique en ésta fase ahorrará mucho más tiempo en etapas posteriores además de reducir la posibilidad de cometer errores.
- EDITAR EL PROGRAMA, en esta fase se trasladará el diseño de la fase anterior a un lenguaje de programación de alto nivel.
- SIMULAR EL COMPORTAMIENTO, antes de llevarlo a la memoria de controlador del robot, lo que permitirá dentro de ciertos límites, detectar errores.
- COMPROBAR el funcionamiento del prototipo físico. Representará la prueba más decisiva para modificar y depurar el comportamiento del robot.
- DOCUMENTAR cada una de las fases.
- PROPONER mejoras y soluciones para futuras versiones del robot propuesto.

### **1.4 Estructura de la tesis**

Se comienza con una introducción sobre el desarrollo cronológico de las competencias de robots de laberinto, mencionando las mejoras que se han introducido en las diferentes competencias. Luego se hace un análisis de los distintos componentes que se requieren para desarrollar el cuerpo del robot, dentro de los componentes que se estudian tenemos las ruedas, motores, sensores, baterías y microcontroladores.

Luego se analizan los diferentes algoritmos que suelen utilizarse para la resolución del laberinto, de entre los que destacan los algoritmos de lógica de seguimiento de la mano derecha o izquierda y el algoritmo fill flood.

Se pasa posteriormente al desarrollo de prototipo físico que sirvió como base para las pruebas y competencias reales, concretamente se han hecho pruebas en el Torneo Mexicano de Robótica que se realizó en el ITAM, esto incluye un análisis del desempeño del robot propuesto y la comparación con otros robots.

Se concluye la tesis con la propuesta de mejoras futuras tomando en cuenta los resultados de las pruebas del prototipo, además del trabajo futuro para los que encuentren interés en este tipo de robots.

### **1.5 Relevancia de las competencias de robots móviles**

Las competencias de robots móviles han estado en la escena robótica durante los últimos treinta años. Han inspirado a miles de estudiantes, investigadores y muchas otras personas. Realizar robots móviles para competencias requiere de una gran cantidad de tiempo para investigación, elaboración, pruebas, además de ingenio y conocimiento de diversas áreas como la mecánica, electrónica y computación a fin de realizar un prototipo eficiente y competitivo.

A través del tiempo los robots móviles como los *micromouse* han evolucionado desde versiones muy elementales con apenas algunas compuertas lógicas hasta convertirse hoy día en robots muy rápidos e inteligentes con sistemas de navegación y sistemas de visión complejos.

Así también las competencias han cambiado y nuevas competencias han sido propuestas y el desempeño de los robots ha mejorado, requiriendo que los robots se encuentren a la vanguardia en sistemas motrices, sensores y técnicas de inteligencia artificial.

Nuevos y mejores sensores se han incorporado y más rápido puede procesarse la información gracias al incremento en la velocidad de procesamiento de los controladores.

Anteriormente las competencias consistían en robots contra otros, mientras que hoy es común que los robots realicen tareas cooperativas.

### **1.6 Normativas de las competencias de robots de laberinto**

Aunque existen varias competencias de robots de laberinto a nivel mundial, todas ellas siguen normas de competencia similares:

### 1.6.1 El laberinto

- ✓ El laberinto deberá estar compuesto por un arreglo de 16 por 16 cuadros denominados celdas de 18 centímetros x 18 centímetros cada uno. Las paredes que dividen el laberinto deberán tener 5 centímetros de alto por 1.2 centímetros de ancho, la pared exterior debe contener completamente el laberinto.
- ✓ Los lados de las paredes deberán ser blancos y la parte superior de las paredes deberá ser roja. El piso del laberinto deberá ser de madera y pintado con pintura negra no brillante o reflectante.
- ✓ La parte superior y lateral de las paredes deberán seleccionarse de manera que reflejen la luz infrarroja, la base deberá seleccionarse para que absorba la luz infrarroja.
- ✓ El inicio del laberinto podrá colocarse en cualquiera de las cuatro esquinas. El cuadro de inicio deberá tener paredes en tres de sus lados.
- ✓ La orientación del cuadro de inicio debe ser tal que cuando la pared abierta esta hacia el norte las paredes de salida deberán estar hacia el este y el sur.
- ✓ Las dimensiones del laberinto deberán tener una tolerancia de 5 por ciento o 2 centímetros. Los puntos de ensamblaje no deberán tener uniones de más de 1 milímetro, el cambio del nivel de los ensamblados no deberá tener más de 4 grados. Los espacios entre las paredes adyacentes no deberán ser de más de 1 milímetro.
- ✓ Caminos múltiples desde el inicio hasta la meta pueden ser realizados y de hecho se promueve el diseño de laberintos que contengan múltiples caminos.

### 1.6.2 El robot

- ✓ Aunque la estructura del robot puede ser mayor y estar más elevada de la altura del laberinto, deberá restringirse a las siguientes medidas: anchura de 25 centímetros longitud de 25 centímetros, para el caso de robots que utilizan sensores sobre la parte superior de las paredes, no hay límite de peso, el robot deberá ser completamente autónomo y estar completamente autocontenido[1].
- ✓ El robot podrá ser provisto de una parte por la que se la pueda retirar del laberinto.
- ✓ El método de sensado de las paredes depende del constructor, de cualquier manera, el robot no deberá aplicar fuerza o cualquier otra actividad que pudiera causar daños a al laberinto o a las personas.

- ✓ El método de propulsión se deja a consideración del constructor, sin embargo no pueden utilizarse formas de energía que produzcan contaminación o que propicien que otros robots no tengan las condiciones esperadas para la competencia una vez que el robot actual haya pasado, las máquinas de combustión interna probablemente entren en esta categoría.
- ✓ Si los jueces consideran que el robot representa un elevado riesgo para las personas o para el laberinto, no le permitirán competir.
- ✓ El robot no deberá depositar objetos o marcas en el laberinto. El robot no deberá saltar, escalar, dañar o destruir las paredes del laberinto.

### 1.6.3 La competencia

- ✓ El tiempo que le toma navegar desde el cuadro inicial hasta la meta se llama tiempo de recorrido, el navegar desde la meta hasta el cuadro de inicio no se considera tiempo de recorrido. El tiempo total que le toma desde la primera activación hasta el inicio de cada recorrido también es considerado, este es llamado tiempo de laberinto o tiempo de búsqueda. Si el robot requiere de asistencia durante la competencia se considera que ha sido tocado [2].
- ✓ Los puntos son contabilizados según estos tres parámetros:
  - Cada robot tiene 10 minutos para desempeñarse. Este tiempo puede ser reducido a 6 minutos si hay robots muy eficientes. Los jueces tienen la autoridad si a su parecer el robot es inestable y no puede realizar su labor, por ejemplo realizando movimientos erráticos o si está dañando el laberinto.
  - La puntuación del robot será obtenida por medio de contabilizar las máximas puntuaciones de cada una de los tiempos de recorrido. Como sigue:
    - Puntuación de tiempo máxima = Tiempo de recorrido + penalización de búsquedas + penalizaciones por tocar. Dónde:

Penalización de búsqueda =  $\frac{1}{30}$  del tiempo de laberinto o tiempo de búsqueda, en segundos, asociados con cada tiempo de recorrido, y tiempo de penalización por tocar = 3 segundos más  $\frac{1}{10}$  del tiempo de recorrido en segundos, si el robot ha sido tocado en cualquier momento durante el recorrido.

- ✓ Cuando el robot alcanza el cuadro destino, este puede parar o bien puede continuar explorando otras partes del laberinto o bien hacer su propio camino hacia el inicio del laberinto. Si el robot decide quedarse en la meta del laberinto, este puede ser retirado manualmente pero causará una penalización de tocar el robot, lo que se le agregará en los próximos tiempos de recorrido. No puede ser parado manualmente y reiniciado.
- ✓ El tiempo de recorrido deberá ser medido desde el momento en que el robot abandona el primer cuadro o cuadro de inicio hasta que entra al cuadro de finalización o cuadro de meta.
- ✓ El tiempo total de laberinto deberá ser medido desde el instante en que el robot es activado.

## Capítulo 2

---

### ***Antecedentes***

#### ***2.1 Historia de los robots móviles***

Los robots móviles son los más innovadores en el campo de la robótica pues presentan la idea de un robot autónomo que resuelve una tarea compleja con la habilidad de desplazarse, misma tarea que pueden resolver seres vivos como los ratones en un laberinto para encontrar una recompensa o la salida, posteriormente los robots ratones hicieron converger los robots móviles con un tamaño reducido (determinado por el tamaño del laberinto que debía resolver) y la habilidad de resolver un problema sin la intervención directa de los humanos.

Estos robots y las competencias que se realizan con ellos están consideradas excelentes actividades para acercar a los estudiantes a la realización de dispositivos reales donde pueden aplicar los conocimientos teóricos que se adquieren en las aulas, además de resultar en un gran nivel de gratificación para los estudiantes que se acercan por primera vez al campo práctico; estos robots fomentan el trabajo en equipo, pues requieren de diferentes áreas de la ingeniería como la electrónica, mecánica, computación, control y mecatrónica [3].

Los robots tipo ratones mecánicos fueron construidos para un certamen de carreras patrocinado por la revista "*Machine Design*" en 1972. Pero el concepto del robot móvil como un dispositivo que soluciona laberintos fue introducido por la "*IEEE Spectrum Magazine*" que en 1977 anunció un evento denominado "*Amazing Micromouse Maze Contest*" para ser realizado en junio de 1979 en Nueva York. 6000 participantes se inscribieron, pero sólo 15 robots compitieron. El ganador fue *Moonlight Flash*, un robot ratón seguidor de paredes.

En 1977 se presenta el concepto de micromouse por la IEEE, en mayo del mismo año se anuncia la primera competencia que se celebró en 1979 en Nueva York. En 1980 John Bilinsley de la escuela Politécnica de Portsmouth, introdujo la primera competencia europea. En 1981 en la exposición *Micro* de París hubo cinco robots, el ganador alcanzó la meta en menos de tres minutos. En 1985 se realizó la primera competencia mundial de micromouse en Tsukuba Japón. En 1987 se realiza la primera competencia en Singapur, convirtiéndose en una competencia internacional en 1989. En el 2000 se realiza la competencia Alcabot que incluye dentro de una de sus categorías a los robots de laberinto.

Esto demuestra el enorme interés en las primeras competencia de robots móviles, que ha inspirado a innumerable cantidad de entusiasta de la robótica desde estudiantes hasta investigadores de las ramas de la mecánica, electrónica, computación y muchas otras.

Esta competencia ha fomentado la investigación y el aprendizaje de todas las vertientes que confluyen en la robótica, además de generar conocimiento que en su momento es aplicado al mejoramiento de la tecnología de uso cotidiano, industrial o doméstico [4].

## **2.2 Competencias de robots móviles a nivel mundial**

Existe un gran interés en las competencias de robots móviles que compiten dentro en laberinto a nivel mundial sin embargo son especialmente populares en los Estados Unidos, Reino Unido, Singapur, Corea, Japón e India. Y a pesar de que en los inicios las competencias solo se realizaban en los Estados Unidos promovidas por la IEEE, hoy tienen un importante impulso y apoyo en los países orientales, por ejemplo en Japón existen numerosas competencias regionales que incluyen o constituyen completamente eventos sobre robots que resuelven laberintos.

Existen actualmente importantes competencias internacionales que incluyen la categorías de robots de laberinto de paredes, cada una de ellas atraen a competidores de diversas partes de mundo, donde convergen los desarrolladores que comparten ideas que mejoran constantemente los robots móviles.

En 1980, la primera Competencia europea se realizó en Londres. Entre los 100 robots admitidos, sólo 9 compitieron en las finales. Este año, sólo *Sterling*, el robot ratón de Nick Smith, terminó exitosamente la prueba al encontrar el centro del laberinto [5].

En 1981, se realizó la primera competencia en Paris, con 13 competidores. El robot de Smith ganó otra vez, siendo uno de los 8 robots que lograron alcanzar el centro del laberinto. El *Thumpente* de Dave Woodfield ganó el segundo certamen en Wembley UK. Alan Dibley ganó la edición británica de 1982 con su robot *Thezeus* [6].

La primera competencia mundial de robots de laberinto de paredes fue realizada en Tsubuka Japón, en agosto de 1985 y estuvo abierta para los competidores de Europa y Estados Unidos. Los robots eran un poco más sofisticados, usando sensores infrarrojos o ultrasónicos, motores paso-paso o servomotores de corriente directa. El campeón de ese año fue el japonés *Noriko-1*, el mejor concursante no japonés fue el *Enterprise* de Dave Woodfield en la séptima posición [7].

En la edición de 1987, realizada por la IEEE en Londres, con 13 competidores. David Otten, del MIT, gano los dos primeros premios con su *Mitee Mouse I y II* ese año un nuevo reto fue introducido para recompensar a los robots que tuvieran la habilidad de resolver el laberinto completamente independientes.

En Singapur las competencias de micromouse empezaron en 1987, auspiciado por la IES, (Institution of Engineers of Singapore). En 1988, *MIR3* procedente de *Nanyang Technological Institute* quedo en tercer lugar y en julio de 1989 en Londres, el equipo de

Singapur se hizo del 6to y 8vo premio. El robot *Miteell* de David Otten quedo en 2do, mientras el *Enterprise* de Dave Woodfield llego 5to. La diferencia en tiempo entre los tres mejores ratones fue de medio segundo [8].

## **2.2.1 Las competencias de robots de laberinto actuales**

En 1991 en el Campeonato mundial 1991 en Hong-Kong se diseñan y aplican las reglas que están en uso hasta hoy y se centran en la fiabilidad y no sólo en la velocidad.

En 1992 el IEEE realizó en Londres la competencia de robots de laberinto y el victorioso fue el robot llamado Miteell. Posteriormente Royal Holloway organiza su primer evento el año 2000 en Londres, y los ratones aparecen en TV para la BBC (British Broadcasting Corporation) en "Technogames" [9]. En 2001, las escuelas primarias y universidades son patrocinadas por la MMU (Manchester Metropolitan University). Desde entonces, cada año, un evento de este tipo de robots, MINOS (el congreso y la competición se realiza en el "Royal Holloway") se realiza convocando universidades y colegios en la MMU.

En 2004, por primera vez, el campeonato nacional Micromouse es patrocinado en el "Technology Innovation Centre", en Birmingham.

### **2.2.1.1 Micromouse contest**

En 1977 en Nueva York, se realiza la primera competencia de robots micromouse, propuesta por Don Christiansen, con un enorme interés por parte de las personas y de los medios de comunicación, demostrada por la importante cobertura mediática que generó la primera competencia de robots móviles en el mundo, esta competencia reunió a aproximadamente 6000 personas[10].

La tarea que tenía que realizar el primer robot de laberinto era trasladarse desde el inicio hasta la meta en el menor tiempo posible, el inicio y meta estaban colocados en los extremos del laberinto, sin embargo la reglas cambiaron a lo largo de la historia de la competencia para hacer que los robots exploraran todo el laberinto y que utilizaran mejores técnicas de solución de laberintos.

El primer robot construido fue provisto únicamente con sensores de contacto que le permitían detectar las paredes y navegar siguiendo la metodología de la mano derecha o mano izquierda. Posteriormente las reglas fueron mejoradas para que los detectores mecánicos ya no fuesen suficientes, por lo que se requería de técnicas de sensado y navegación más sofisticadas.

Posteriormente John Billingsley hizo que la competencia de micromouse fuera popular en Europa, e introdujo una de las características que se han mantenido hasta ahora, que consiste en que manteniendo el origen en uno de los extremos del laberinto, la meta se trasladó al centro del laberinto.

### 2.2.1.2 AAI Mobile Robot Competition

Fundada por David Kortenkamp, esta competencia se realizó en 1992, en San José, California, donde 10 robots compitieron en tres eventos:

- *Roaming*, donde el robot, en un área de 22 metros x 22 metros esquivaba obstáculos en forma de cajas.
- *Búsqueda* de 10 objetos distintivos (objetos con un diámetro de 3 pulgadas), luego de esto el robot tenía que visitar cada uno de los objetos.
- *Carrera contra tiempo* a tres de los objetos encontrados previamente, y después regresar a la meta.

A pesar de que la competencia AAI de robots creaba nuevos desafíos, no tenía la cobertura mediática de que gozaban otras competencias de robots como la Micromouse Contest [11], básicamente porque las competencias en ésta categoría requerían de 20 minutos aproximadamente para completarse y pocos espectadores podía *ver* las mejoras que se implementaban en estos robots.

Muchas otras competencias fueron propuestas e introducidas a través de los años, con lo que los diseñadores se enfrentaron ante nuevos retos, mientras que otras competencias se mantuvieron debido a que restaba mucho por hacer, muchas mejoras podían aplicarse en lo que se refiere a sensores, controladores, y técnicas de inteligencia artificial.

Por ejemplo, en 1996, en Portland, Oregon, la competencia consistió en:

- *Call a meeting*, en el que los robots actuaban como mensajeros en un laberinto que asemejaba un ambiente de oficina.
- *Clean up the tennis court*, donde los robots tenían que recoger pelotas de golf en un área rectangular y devolverlas en un contenedor.

Las mejoras que estos robots introdujeron fue la capacidad de navegar por medios más cercanos a los ambientes en donde existen humanos, esta tarea que parece trivial no lo es pues requiere que los robots tengan la capacidad de reconocer patrones complejos como puertas o ventanas semiabiertas y obstáculos que cambia constantemente de

posición a velocidades variables. Por lo que fue necesario utilizar más de un tipo de sensores para mejorar la capacidad de detectar el medio ambiente del robot [12].

### 2.2.1.3 RoboCup

La competencia *Robot World Cup Initiative* (RoboCup) promueve la creación de robots inteligentes y rápidos por medio de la investigación de técnicas de inteligencia artificial y robótica por medio de dar un problema estándar en donde una gran cantidad de tecnologías pueden ser integradas y examinadas. Para éste propósito, RoboCup decide hacer juegos robóticos de soccer y así organiza la *RoboCup: The Robot World Cup Soccer Games and Conferencies*; a fin de que un robot desempeñe juegos de soccer, varias tecnologías deben ser incorporadas, incluyendo diseño de agentes autónomos, colaboración entre distintos robots, estrategias de adquisición de datos, procesamiento en tiempo real, robótica y fusión de sensores.

RoboCup es un desafío para equipos de múltiples robots en ambientes dinámicos y también ofrece plataformas de software para investigación en el campo de la inteligencia artificial.

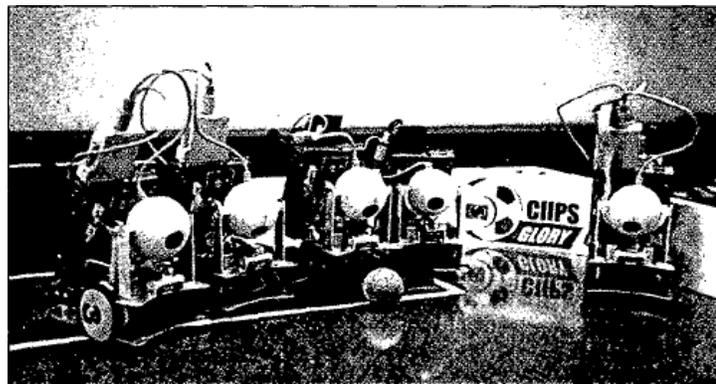


Figura 2.1 Robots en el evento Robocup

Todas estas competencias tienen un importante apoyo de instituciones tan importantes como Euromicro, IEEE, la Universidad de Londres, la Universidad de Manchester, la Universidad de Loughborough, Universidad de Bristol, entre otros.

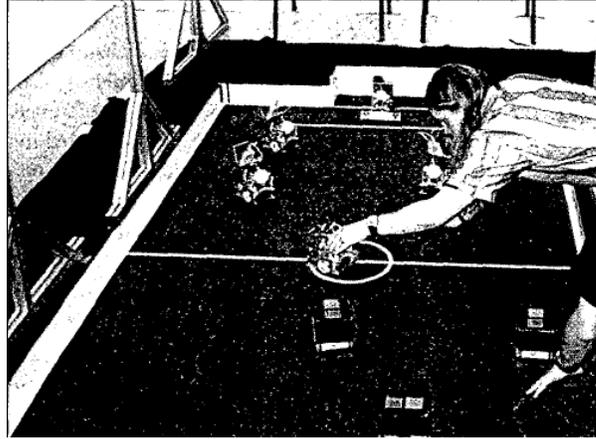


Figura 2.2 Categoría de robots *Small Size*

Una de las Universidades que participan activamente en estas competencias hasta el día de la elaboración del presente trabajo es la UNAM mediante el equipo @Home liderado por el Dr. Jesús Savage.

## Capítulo 3

---

### ***Análisis y diseño de estructuras mecánicas de robots***

#### ***3.1 Importancia del chasis***

El chasis de un robot soporta todos los elementos que son los sensores, motores, controlador y baterías. Idealmente este debería ser ligero, fuerte, pequeño y fácil de construir.

Las dimensiones de del robot estarán limitadas por la parte transitable del laberinto, que para este caso está formada por celdas de 16.8 cm por lado, pero considerando que el robot que tiene que dar vueltas y desplazarse rápidamente, debe tener la suficiente tolerancia para dar eficazmente las vueltas y no chocar con las paredes [13].

Los motores y las ruedas son los elementos que más influyen en las dimensiones finales del robot, debido a esto lo adecuado es que sean de dimensiones reducidas pero con la suficiente fuerza electromecánica para permitir que el robot se desplace con la velocidad que le permita ser competitivo.

Otro de los elementos que determinan la forma y dimensiones del chasis es la fuente de energía, que generalmente tienen forma rectangular o cilíndrica lo que dificulta su colocación y su peso influye negativamente en el desempeño de los robots móviles, se busca entonces que las baterías provean la suficiente potencia pero que al mismo tiempo sean ligeras y sus dimensiones se ajusten al robot.

#### ***3.2 Estructuras más usuales***

Las estructuras que con mayor frecuencia se utilizan dependen de la forma de tracción que emplee el robot, por lo tanto, de acuerdo a la aplicación que se le dará al robot y del medio en que se desempeñará se busca que el robot sea homogéneo en las dimensiones, esto es se prefiere que presente extremos redondeados que cuadrados porque estos últimos reducirían la capacidad de rotar o de alcanzar mayores velocidades sin producir una colisión.

Sin embargo las dimensiones y peso de los motores, ruedas y pilas principalmente hacen que la forma de los robots sea diferente de la forma óptima que como se puede ver debería ser redonda como lo muestra la figura 3.1.

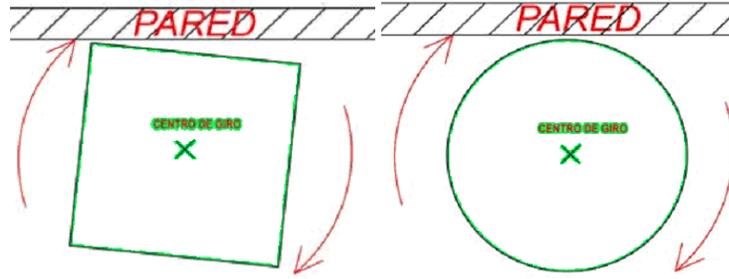


Figura 3.1 La forma del chasis influye en el comportamiento dinámico del robot

### 3.3 Materiales de elaboración del chasis, ventajas y desventajas

Los materiales que se utilizan dependen generalmente de lo que esté disponible en los mercados locales sin embargo también suelen estar hechas del mismo material con el que se realizan los circuitos impreso (PCB, printed circuit board) con lo que reducen el peso al fusionar parte del chasis con el control electrónico.

Existe un gran número de materiales que se emplean en la elaboración de robots, entre los más usuales tenemos el aluminio y los plásticos en sus diversas presentaciones como polímeros, acrílico, PVC, sintra, etc. La decisión de emplear determinado material depende del presupuesto, la importancia de la aplicación, la disponibilidad y si se cuenta con la herramienta que permita la manipulación de estos materiales.

Para la realización del prototipo de este trabajo se analizarán materiales como la sintra, PCB, ya que resultan de fácil manipulación y ofrecen características que los hacen adecuados para la aplicación.

#### 3.3.1 PVC

Es un material plástico que puede aplicarse a la elaboración de robots pues puede adaptarse a la forma que se requiera mediante la aplicación de calor que lo moldea hasta adquirir la forma requerida.

#### 3.3.2 Sintra

Es otro material de fácil manipulación y adquisición ya que resulta ligero y resistente, además de que se le puede dar la forma y dimensiones adecuadas para determinada

aplicación, inclusive muchos robots comerciales o partes para ensamblar robots están fabricados con éste material.

Al ser un material que tiene las ventajas de ser de fácil adquisición se ha seleccionado para la realización del prototipo de ésta tesis.

También, las herramientas para la manipulación de éste material son de fácil adquisición, lo que contribuyó a la decisión de seleccionar éste material.

Una vez que se tenga un chasis que demuestre tener las cualidades requeridas para transmitir eficazmente los comandos de control a los movimientos que permitan al robot ser competitivo, entonces se pasará a la etapa de hacer que el chasis contenga además la parte electrónica que controlará al robot, es decir se fusionará, en la medida de lo posible la parte electrónica con el chasis a fin de reducir las dimensiones y peso del robot, esto se logrará al hacer que el chasis sea realizado con PCB.

### 3.3.3 PCB

Este material es con el que se realizan los circuitos impresos electrónicos una vez que han pasado las etapas de diseño y pruebas, representa la forma que tendrá un producto electrónico final, en esta etapa ya se ha depurado el comportamiento de las variables físicas que rigen el desempeño de un dispositivo que representa la solución de un problema específico presentado.

Esto implica que el robot que se diseñará tendrá como parte integral de su estructura mecánica una placa CPB que posiblemente sostenga otros elementos del robot como los motores y la batería o que de soporte y ayude a la rigidez del sistema robótico completo.

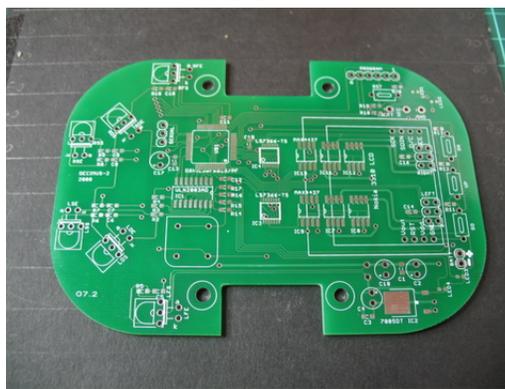


Figura 3.2 Chasis de un robot de laberinto hecho con PCB

Hasta el día de hoy existe una grama cantidad de aplicaciones computacionales que ayudan al diseño y elaboración de piezas mecánicas con extraordinaria precisión, pero su costo suele ser muy alto y solo después de un análisis completo tomando en cuenta la magnitud de un proyecto se pude optar por elaborar un robot empleando las

herramientas mencionadas, se espera que en el futuro estas herramientas tengan mayor accesibilidad para proyectos escolares y académicos.

### **3.4 Formas de tracción**

El primer paso que se da en la construcción del robot es la elección de su configuración del chasis, esto es, definir como estarán distribuidos los motores, las ruedas y los demás elementos del robot. La precisión de las mediciones y la adecuada selección de la forma del chasis definirán sustancialmente el desempeño.

La elección de la plataforma móvil es sin duda la parte fundamental a la hora de diseñar el chasis, dependiendo de las necesidades, buscando principalmente las características de respuesta ante cualquier superficie, velocidad, maniobrabilidad, equilibrio, etc. En relación a las ruedas, existen distintas configuraciones, típicamente utilizadas en robótica móvil que son: diferencial, triciclo, *ackerman*, sincronizada, omnidireccional, con múltiples grados de libertad y movimiento mediante orugas [14].

#### **3.4.1 Configuración diferencial**

La configuración diferencial se presenta como la más sencilla de todas. Consta de dos ruedas situadas diametralmente opuestas en un eje perpendicular a la dirección del robot. Cada una de ellas impulsada por un motor, de forma que los giros se realizan dándoles diferentes velocidades y sentidos de giro. Así, si queremos girar a la derecha, daremos mayor velocidad al motor izquierdo o hacemos girar en sentidos opuestos a las ruedas.

Para girar a la izquierda, será el motor derecho el que posea mayor velocidad. Con dos ruedas es imposible mantener la horizontalidad del robot. Para solventar este problema, se colocan "ruedas locas" o resbalones. Estas ruedas no llevan asociadas ningún motor, giran libremente según la velocidad del robot. Además, pueden orientarse según la dirección del movimiento, de forma análoga a como lo hacen las ruedas traseras de los carritos del supermercado. Dependiendo de las necesidades, se pueden colocar una, dos o más ruedas locas [15].

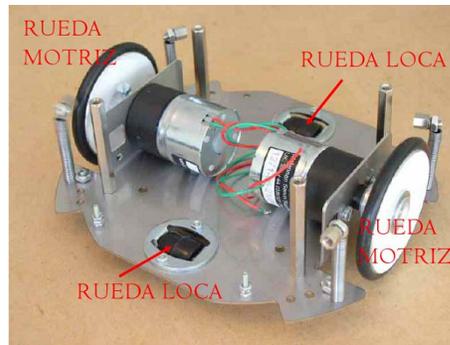


Figura 3.3 La tracción diferencial en robots

Sin embargo, la presencia de más de tres apoyos en el robot (incluidas las dos ruedas de tracción), puede llevar a graves cálculos de odometría en terrenos irregulares, e incluso a pérdida de tracción total. En la figura 3.4 se aprecia cómo la rueda de tracción pierde agarre, haciendo erróneo el avance del robot:

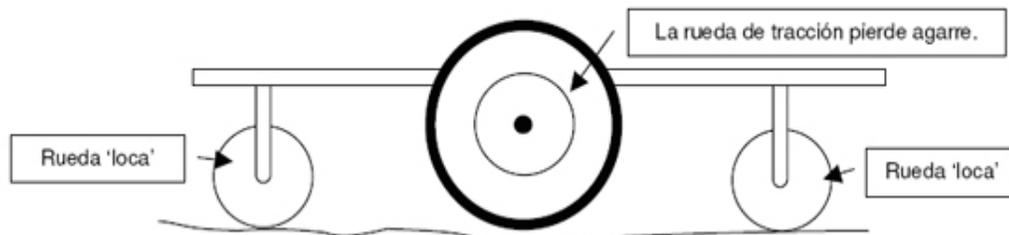


Figura 3.4 Más de una rueda loca puede provocar la falta de tracción

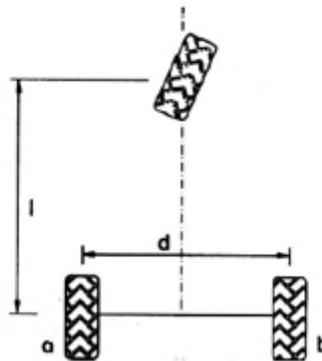


Figura 3.5 Disposición de las ruedas en configuración diferencial con una rueda loca al frente

Para llevar a cabo una navegación por *odometría*, es necesario acoplar a los motores de las ruedas laterales encoders, que son dispositivos que permiten leer la velocidad de cada una de las ruedas de forma que contando los pulsos que avanza cada rueda y teniendo en cuenta el radio de la misma y la reducción del motor, no hay más que aplicar las ecuaciones cinemáticas del robot para hallar la posición exacta en la que se encuentra y el ángulo de desviación respecto a una dirección de referencia [16].

### 3.4.2 Configuración en triciclo

En este caso, se dispone de tres ruedas en el robot, situadas de forma similar a los triciclos de los niños, de ahí su nombre. Tendremos por tanto, dos ruedas traseras, que no llevan acopladas ningún motor. La tracción estará en la rueda delantera, que además, será la que dará la dirección al robot.

En este caso, el cálculo de la odometría es mucho más sencillo. La posición del robot vendrá dada por el número de pulsos que avanza el encoder de la rueda, y la dirección es simplemente la que lleve dicha rueda.

Un problema asociado a esta configuración es que el centro de gravedad tiende a alejarse de la rueda de tracción en superficies inclinadas cuando el robot lleva la dirección de subida. Esto se traduce en una pérdida de la tracción del robot. Al perderse el contacto con el suelo la rueda motora sigue girando, pero el robot no avanza. Esto supone un error grande al hacer el cálculo de la odometría, ya que el robot indica que está en un punto más avanzado, cuando en realidad se encuentra más atrás [17].

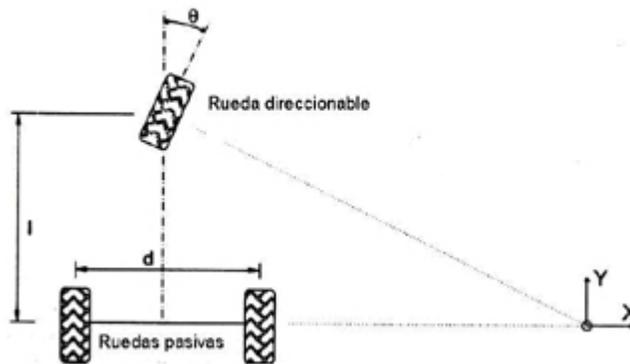


Figura 3.6 Configuración en triciclo

### 3.4.3 Configuración Ackerman

Se usa casi exclusivamente en la industria del automóvil. Es la configuración que llevan los coches: dos ruedas con tracción traseras, y dos ruedas de dirección delanteras. Esta configuración está diseñada para que la rueda delantera interior en un giro tenga un ángulo ligeramente más agudo que la exterior, y evitar así el derrape de las ruedas.

Como se puede apreciar en la figura 3.7, las normales a ambas ruedas se cortan en un punto, que se encuentra sobre la prolongación del eje de las ruedas traseras.

La relación entre los ángulos de las ruedas de dirección viene dada por la ecuación de Ackerman:

$$\cot(\theta_1) - \cot(\theta_2) = d / l$$

Dónde:

$\theta_1$  = ángulo relativo de la rueda interior

$\theta_2$  = ángulo relativo de la rueda exterior

$l$  = separación longitudinal entre ruedas

$d$  = separación lateral entre ruedas

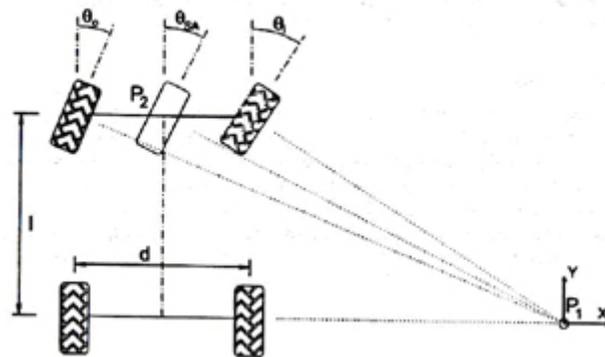


Figura 3.7 Configuración Ackerman

La configuración de Ackerman da una solución bastante precisa para la odometría a la vez que constituye un buen sistema de tracción incluso con terrenos inclinados.

### 3.4.4 Dirección sincronizada

Consiste en tres o más ruedas, todas ellas dotadas de tracción y acopladas mecánicamente, de forma que todas rotan en la misma dirección y a la misma velocidad. Se necesita que todas ellas pivoten de la misma manera al cambiar la dirección. Este sistema necesita de una gran sincronización.

En la figura 3.8 se puede apreciar la complejidad mecánica que requiere una configuración de este tipo.

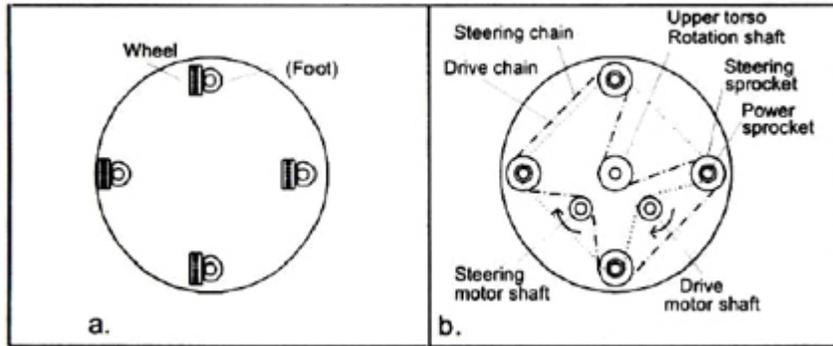


Figura 3.8 Mecánica necesaria para diseñar una configuración sincronizada

### 3.4.5 Configuración omnidireccional

Permiten hacer movimientos de translación, perpendiculares al eje de la rueda, pero también permiten la translación en cualquier otra dirección con respecto al eje de la misma rueda y con la adecuada combinación de movimiento de todas las ruedas el robot se puede desplazar en cualquier dirección en el plano de dos dimensiones. Suponen una enorme complicación en el cálculo de la odometría.

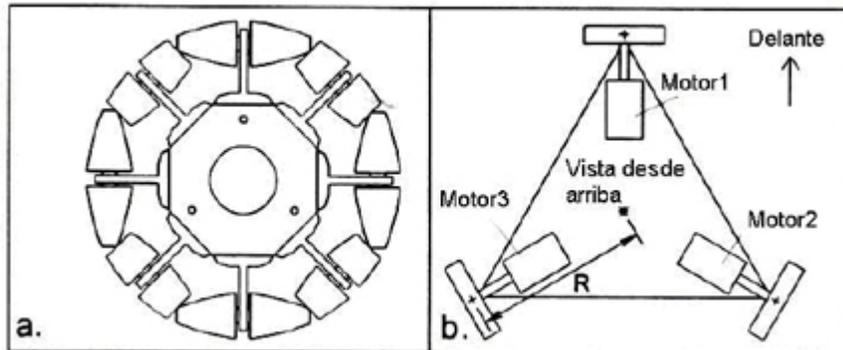


Figura 3.9 a. Rueda omnidireccional b. Ejemplo de configuración omnidireccional

### 3.4.6 Vehículos con múltiples grados de libertad

Este tipo de configuraciones se plantean para mejorar la movilidad del vehículo. Suelen ser robots articulados donde cada una de las articulaciones consiste en módulos con tracción diferencial.

Estos robots están diseñados para poder acceder a lugares donde otros tipos de robots no podrían entrar, por ejemplos los robots tipo serpiente que están diseñados para acceder a zonas estrechas.

Por ejemplo el robot *OmniTread*, que ha sido desarrollado en la Facultad de Ingeniería de La Universidad de Michigan. Puede moverse rodando como un tronco o como serpiente haciendo una analogía con elementos comunes.

Se propulsa moviendo sus apoyos, que cubren el 80% de su cuerpo. Estos evitan que el robot se atasque en lugares difíciles debido a que lo impulsan de la misma manera que una rueda en el pavimento.

El OmniTread está dividido en cinco segmentos conectados por el medio con una especie de columna vertebral que dirige los apoyos de todos los segmentos. Unos fuelles en las uniones que conectan las secciones se inflan y desinflan para hacer que el robot gire o eleve los segmentos. Los fuelles brindan la torsión suficiente para que el OmniTread pueda levantar los dos segmentos delanteros o traseros al escalar objetos.

El robot es ideal para realizar inspecciones de alto riesgo o para la vigilancia en aplicaciones militares o industriales [18].



Figura 3.10 Robot serpiente OmniTread

### 3.4.7 Tracción mediante orugas

Se trata de sustituir las ruedas por orugas. Es un caso particular de la tracción diferencial.

Sin embargo, en esta configuración el deslizamiento en los giros es muy grande, perdiéndose bastante precisión en el cálculo de la odometría. Se emplea en casos en los que el terreno presente irregularidades. Por estas razones, se descarta el uso de orugas para el robot propuesto.



Figura 3.11 Robot con tracción de orugas

Estos robot suelen ser utilizados para construcción o como parte de quipos de maquinaria pesada en donde los ambientes de desarrollo son muy diversos.

## Capítulo 4

---

### *Ruedas y motores*

#### **4.1 Tipos, dimensiones y material de las ruedas**

Las ruedas son el elemento que permite el desplazamiento del robot basados en el principio de fricción por lo que la correcta elección de ésta hará que se logre un mejor control sobre el comportamiento dinámico del robot, las ruedas también posibilitan hacer la medición del desplazamiento realizado por el robot mediante medir la rotación de las ruedas, es decir odometría, la forma más simple consiste en considerar que el desplazamiento lineal está directamente relacionado con la rotación mediante la expresión[19]:

$$L = 2 * \pi * r$$

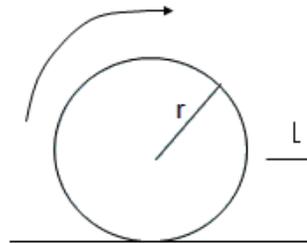


Figura 4.1 Relación ideal entre desplazamiento angular y lineal

Pero debe considerarse que esta relación no es adecuada para casos reales donde en general es difícil estimar el desplazamiento lineal con precisión debido a parámetros como la aceleración, carga, características del terreno, errores acumulados, etc.

El área de contacto entre las ruedas y el suelo para un mismo material de elaboración de la ruedas le permite al robot tener mayor fricción y posibilita que el robot alcance mayor velocidad y mejora la precisión de los movimientos con lo que la odometría se hace más confiable.

Existen diferentes tipos de ruedas destinadas a diferentes aplicaciones y que presentan características que las hacen adecuadas para una determinada aplicación.



Figura 4.2 Ruedas lisas

Para superficies lisas que no presentan irregularidades las ruedas regularmente son lisas, en contraste para superficies irregulares se emplean ruedas de sección transversal grande o todo terreno como se ve en la figura 4.3.



Figura 4.3 Ruedas todo terreno

Existen también ruedas omnidireccionales que dan tracción cuando se les impulsa de forma transversal y que de forma longitudinal no ofrecen resistencia alguna y sirven de soporte, comportamiento que le da al robot la posibilidad de desplazarse en un plano bidimensional sin ninguna restricción [20].

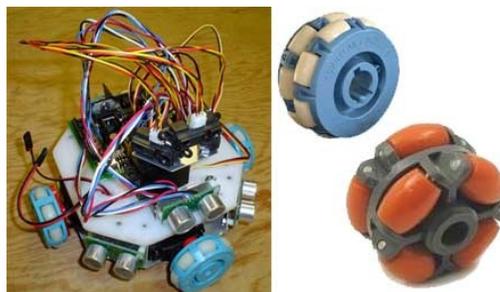


Figura 4.4 Ruedas omnidireccionales

Existen otras ruedas cuya función es la de servir de soporte para el robot, esto significa que estas ruedas no da dirección ni tracción, solamente soporte.



Figura 4.5 Ruedas locas o resbalones

Existen numerosos materiales de elaboración de ruedas como metales, por ejemplo el aluminio y distintas aleaciones, la ventaja de las ruedas metálicas radica en que son resistentes a la deformación y suelen ser más precisas al transmitir la energía mecánica que les proporcionan los motores, en contraparte suponen una carga extra para los motores que requieren mayor cantidad de energía para producir el desplazamiento angular además de que todo el sistema motriz requiere más tiempo en hacer cambios de velocidad o desplazamiento debido a la inercia mayor de éste tipo de ruedas comparadas con los materiales plásticos por ejemplo. Suelen ser muy caras.

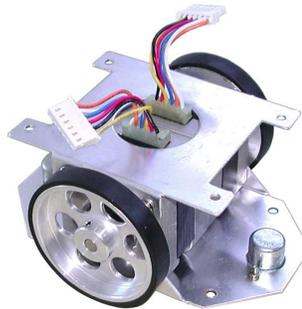


Figura 4.6 Ruedas hechas de materiales metálicos

Las ruedas hechas de materiales plásticos son ligeras y en general más fáciles de hacer e implementar pero presentan deformaciones y son frágiles, sus parámetros cambian más fácilmente con choques o con cargas.



Figura 4.7 Robot con ruedas de plástico

## **4.2 Motores de corriente directa**

Los motores son dispositivos que transforman la energía eléctrica que se les suministra en energía mecánica rotacional con que se logra que los robots se desplacen. Este desplazamiento puede ser transversal como los robots que se mueven siguiendo una trayectoria o bien la energía que los motores proporcionan puede utilizarse para lograr movimientos de extremidades como en los robots manipuladores y de producción industrial.

Los motores de corriente continua tienen las características de poder controlar la posición, el par y la velocidad de forma precisa lo que los hace adecuados para aplicaciones de automatización de procesos, control y robótica desde luego, sin embargo la principal ventaja de los motores de corriente continua es que se les puede controlar la velocidad desde vacío hasta plena carga.

Un motor de corriente continua se compone principalmente de dos partes, una parte fija llamada estator que da forma y soporte al motor, generalmente incluye los polos que pueden ser imanes permanentes como los que se utilizan para robótica o estar hechos por bobinas que se encargan de generar los polos magnéticos.

Tienen una parte interna en la que se coloca una parte móvil llamada rotor que es la que se encarga de transmitir la energía mecánica rotacional fuera del motor, esta es de forma cilíndrica, devanada con conductores eléctricos y con un núcleo que sirve para dirigir el flujo magnético que hace funcionar la máquina, para poder transmitir la corriente eléctrica que necesita el rotor se utilizan escobillas.

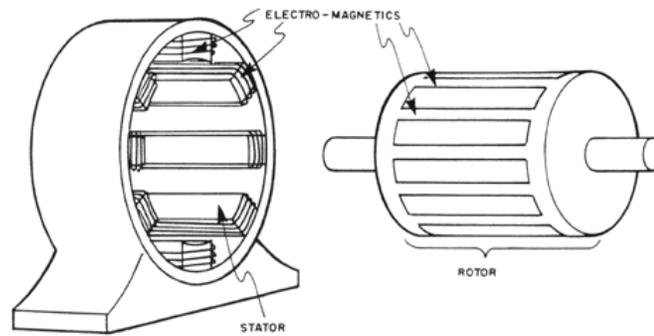


Figura 4.8 Estator y rotor de un motor

Sin embargo también existen motores de corriente directa que tienen los devanados en el estator y los polos en el rotor que ya no requieren escobillas llamados motores *brushless*.

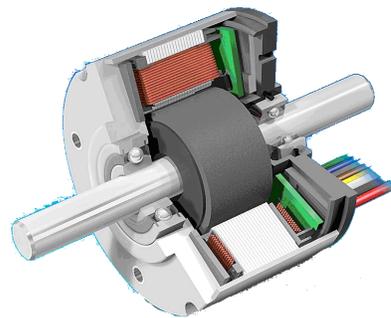


Figura 4.9 Motor sin escobillas o brushless

Los motores sin escobillas carecen de un sistema conmutador que transmita la energía al rotor, en su lugar la configuración tradicional se invierte, es decir que en el estator se produce la conmutación de la energía a través de los elementos magnéticos que produce fuerzas que generan reacciones de atracción o repulsión con un elemento de polaridad magnética fija en el estator. Ésta conmutación se hace de manera electrónica y elimina completamente los efectos electromagnéticos indeseables producidos en la operación de conmutación mecánica del conmutador en los motores tradicionales.

Las ventajas de estos motores frente a los motores tradicionales es que producen menos pérdidas por fricción debido a que solamente contienen dos rodamientos, además de no requerir el conmutador electromecánico. También pueden alcanzar mayor velocidad rotacional pues la conmutación es completamente electrónica [21].

También producen mayor potencia comparados con los motores convencionales de las mismas dimensiones, por lo que se les suele utilizar para aviones radiocontrolados y robos que requieran de levada velocidad y reducido peso, aunque son muy caros y su control es complicado.

Los motores *brushless* tienen muchas ventajas frente a los motores de corriente continua con escobillas y frente a los motores de inducción. Algunas de estas ventajas son:

- Mejor relación velocidad-par motor
- Mayor respuesta dinámica
- Mayor eficiencia
- Mayor vida útil
- Menor ruido
- Mayor rango de velocidad.

Además, la relación par motor-tamaño es mucho mayor, lo que implica que se pueden emplear en aplicaciones donde se trabaje con un espacio reducido.

Por otra parte, los motores brushless tienen dos desventajas, que son las siguientes:

- tienen un mayor costo
- requieren un control bastante más complejo

### **4.3 Motores de corriente alterna**

Aunque los motores de corriente alterna no se usan con frecuencia en la robótica conviene hacer una investigación de las tecnologías de éstos motores y su relación con la robótica.

Estos motores se emplean en aplicaciones donde se requieren potencias elevadas como en la industria de la manufactura donde se utilizan robots manipuladores. Anteriormente el control de las características dinámicas de los motores de corriente alterna como la velocidad y el torque eran difíciles de realizar, pero con el advenimiento de la electrónica de control moderna hoy es posible controlar esas variables por lo que los motores de corriente alterna se están haciendo opciones viables para la robótica donde se requiere por ejemplo manipular objetos pesados para los que las opciones solían ser actuadores hidráulicos o neumáticos.

Los tipos de motores de corriente alterna que se emplean masivamente en la industria son los siguientes:

#### **4.3.1 Motores universales**

Los motores universales trabajan con voltajes de corriente continua o corriente alterna. Se utiliza en la sierra eléctrica, taladro, utensilios de cocina, ventiladores, batidoras y otras aplicaciones donde se requiere gran velocidad con cargas débiles. Se distinguen

por su conmutador devanado y las escobillas. Los componentes de este motor son: Los campos (estator), la masa (rotor), las escobillas (los excitadores) y las tapas (las cubiertas laterales del motor). El circuito eléctrico es muy simple, tiene solamente una vía para el paso de la corriente, porque el circuito está conectado en serie. Tiene mayor flexibilidad en vencer la inercia cuando está en reposo, o sea, tiene un par de arranque excelente, pero tiene una dificultad que es que no está constituido para uso continuo o permanente [22].



Figura 4.10 Motor de indicción usando ampliamente para aplicaciones industriales y domésticas

Una desventaja de los motores universales son las emisiones electromagnéticas. Las chispas del colector (arco eléctrico) junto con su propio campo magnético generan interferencias o ruido en el espacio radioeléctrico. Esto se puede reducir por medio de los condensadores de paso, de 0,001  $\mu\text{F}$  a 0,01  $\mu\text{F}$ , conectados de las terminales de alimentación a la carcasa del motor.

### 4.3.2 Motores síncronos

Los motores síncronos son un tipo de motor eléctrico de corriente alterna. Su velocidad de giro es constante y depende de la frecuencia de la tensión de la red eléctrica a la que esté conectada y por el número de pares de polos del motor, siendo conocida esa velocidad como "velocidad de sincronismo".

La expresión matemática que relaciona la velocidad de la máquina con los parámetros mencionados es:

$$n = (60 * f) / p$$

Dónde:

\* f: Frecuencia de la red a la que está conectada la máquina (Hz)

\* n: Velocidad de sincronismo de la máquina (revoluciones por minuto, rpm)

Por ejemplo, si se tiene una máquina de cuatro polos (2 pares de polos) conectada a una red de 50 Hz, la máquina operará a 1.500 r.p.m.

El rotor de un alternador de dos polos debe hacer una vuelta completa para producir un ciclo de c-a (corriente alterna). Debe girar 60 veces por segundo (si la frecuencia fuera de 60 Hz), o 3.600 revoluciones por minuto (rpm), para producir una c-a de 60 Hz. Si se puede girar a 3.600 rpm tal alternador por medio de algún aparato mecánico, como por ejemplo, un motor de c-c, y luego se excita el inducido con una c-a de 60 Hz, continuará girando como un motor síncrono [23].

Su velocidad de sincronismo es 3.600 rpm. Si funciona con una c-a de 50 Hz, su velocidad de sincronismo será de 3.000 rpm. Mientras la carga no sea demasiado pesada, un motor síncrono gira a su velocidad de sincronismo y solo a esta velocidad. Si la carga llega a ser demasiado grande, el motor va disminuyendo velocidad, pierde su sincronismo y se para. Los motores síncronos de este tipo requieren excitación de c-c (corriente continua) para el campo (o rotor), así como una excitación de c-a para el estator.



Figura 4.11 Motor síncrono

### 4.3.3 Motores de jaula de ardilla

La mayor parte de los motores que funcionan con c-a de una sola fase tienen el rotor de tipo jaula de ardilla.

Los conductores longitudinales de la jaula de ardilla son de cobre y van soldados a las piezas terminales de metal. Cada conductor forma una espira con el conductor opuesto conectado por las dos piezas circulares de los extremos. Cuando este rotor está entre dos polos de campos electromagnéticos que han sido magnetizados por una corriente alterna, se induce una fuerza electromotriz (*fem*) en las espiras de la estructura jaula de ardilla, una corriente muy grande las recorre y se produce un fuerte campo que contrarresta al que ha producido la corriente (ley de Lenz). Aunque el rotor pueda

contrarrestar el campo de los polos estacionarios, no hay razón para que se mueva en una dirección u otra y así permanece parado. Es similar al motor síncrono el cual tampoco se arranca solo. Lo que se necesita es un campo rotatorio en lugar de un campo alterno.



Figura 4.12 Motor jaula de ardilla

Cuando el campo se produce para que tenga un efecto rotatorio, el motor se llama de tipo de jaula de ardilla. Un motor de fase partida utiliza polos de campo adicionales que están alimentados por corrientes en distinta fase, lo que permite a los dos juegos de polos tener máximos de corriente y de campos magnéticos con muy poca diferencia de tiempo. Los arrollamientos de los polos de campo de fases distintas, se deberían alimentar por c-a bifásicas y producir un campo magnético rotatorio, pero cuando se trabaja con una sola fase, la segunda se consigue normalmente conectando un capacitor (o resistencia) en serie con los arrollamientos de fases distintas [24].

Con ello se puede desplazar la fase en más de  $20^\circ$  y producir un campo magnético máximo en el devanado desfasado que se adelanta sobre el campo magnético del devanado principal.

Desplazamiento real del máximo de intensidad del campo magnético desde un polo al siguiente, atrae al rotor de jaula de ardilla con sus corrientes y campos inducidos, haciéndole girar. Esto hace que el motor se arranque por sí mismo.

El devanado de fase partida puede quedar en el circuito o puede ser desconectado por medio de un conmutador centrífugo que le desconecta cuando el motor alcanza una velocidad predeterminada. Una vez que el motor arranca, funciona mejor sin el devanado de fase partida. De hecho, el rotor de un motor de inducción de fase partida siempre se desliza produciendo un pequeño porcentaje de reducción de la que sería la velocidad de sincronismo.

## 4.4 Motores a pasos

Los motores paso a paso son ideales para la construcción de mecanismos en donde se requieren movimientos muy precisos.

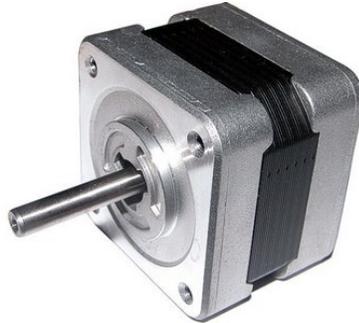


Figura 4.13 Típico motor a pasos

La característica principal de estos motores es el hecho de poder moverlos un paso a la vez por cada pulso que se le aplique. Este paso puede variar desde  $90^\circ$  hasta pequeños movimientos de tan solo  $1.8^\circ$ , es decir, que se necesitarán 4 pasos en el primer caso ( $90^\circ$ ) y 200 para el segundo caso ( $1.8^\circ$ ), para completar un giro completo de  $360^\circ$ .

Estos motores poseen la capacidad de quedar fijos en una posición o bien totalmente libres. Si una o más de sus bobinas están energizadas, el motor estará enclavado en la posición correspondiente y por el contrario quedará completamente libre si no circula corriente por ninguna de sus bobinas.

Básicamente estos motores están constituidos por un rotor sobre el que van aplicados distintos imanes permanentes y por un cierto número de bobinas excitadoras bobinadas en su estator.

Las bobinas son parte del estator y el rotor es un imán permanente. Toda la conmutación (o excitación de las bobinas) deber ser externamente manejada por un controlador.



Figura 4.14 Rotor de un motor a pasos

Existen dos tipos de motores paso a paso de imán permanente, los que se explican en los siguientes párrafos.

### 4.4.1 Motor a pasos bipolar

Estos tienen generalmente cuatro cables de salida. Necesitan ciertas consideraciones para ser controlados, debido a que requieren del cambio de dirección del flujo de corriente a través de las bobinas en la secuencia apropiada para realizar un movimiento. En figura 4.15 podemos apreciar un ejemplo de control de estos motores mediante el uso de un puente H (H-Bridge). Como se aprecia, será necesario un puente H por cada bobina del motor, es decir que para controlar un motor paso a paso de 4 cables (dos bobinas), necesitaremos usar dos puentes iguales al de la figura 4.15. En general es recomendable el uso de puentes integrados como son los casos del L293 para corrientes pequeñas o el L298 para motores que requieren corrientes eléctricas mayores.

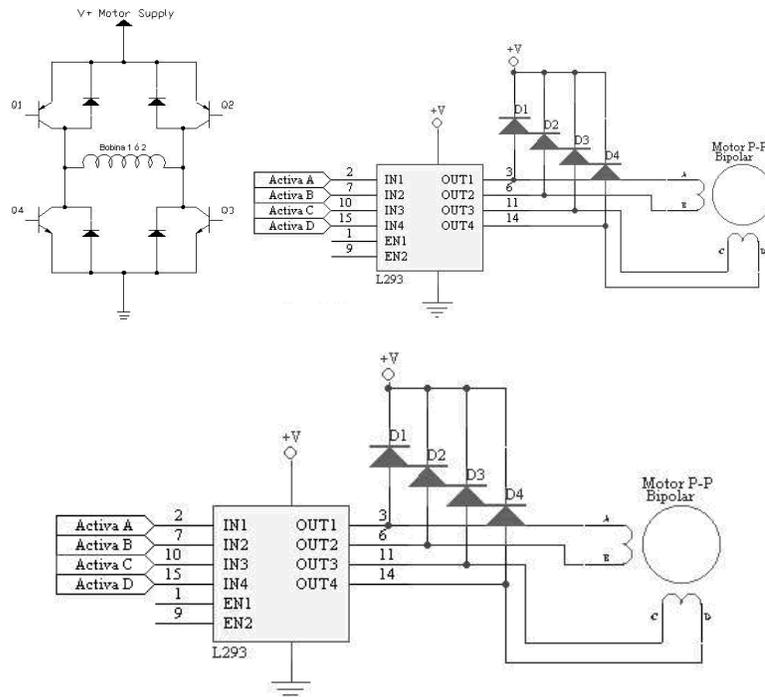


Figura 4.15 Circuitos de control para motores a pasos bipolares

### 4.4.2 Motores a pasos unipolares

Estos motores suelen tener 6 o 5 cables de salida, dependiendo de su conexión interna. El controlador es más simple que en el caso anterior. En la figura 4.17 se puede apreciar un ejemplo del conexionado para controlar un motor paso a paso unipolar mediante el uso de un ULN2803, el cual es un arreglo de 8 transistores tipo Darlington capaces de manejar cargas de hasta 500mA. Las entradas de activación (Activa A, B, C y D) pueden ser directamente manejadas por un microcontrolador.

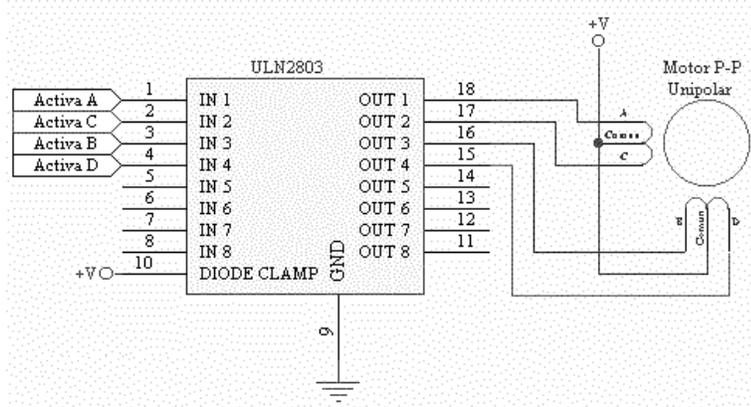


Figura 4.16 Ejemplo de un circuito de control para motores a pasos unipolares

## 4.5 Servomotores

Los servomotores son dispositivos actuadores que tiene la capacidad de ubicarse en cualquier posición dentro de su rango de operación, y de mantenerse estable en dicha posición si se le envía la señal de control adecuada. Está formado por un motor de corriente continua, una caja reductora y un circuito de control.

El control de la posición se realiza de la siguiente manera: el punto de referencia o *setpoint* que es el valor de posición deseada para el motor que se indica mediante una señal de control cuadrada. El ancho de pulso de la señal indica el ángulo de posición: una señal con pulsos más anchos (es decir, de mayor duración) ubicará al motor en un ángulo mayor, y viceversa.

Mediante un amplificador de error se calcula el valor del error de posición, que es la diferencia entre la referencia y la posición en que se encuentra el motor. Un error de posición mayor significa que hay una diferencia mayor entre el valor deseado y el existente, de modo que el motor deberá rotar más rápido para alcanzarlo, la posición del motor está cerca de la deseada por el usuario, así que el motor tendrá que rotar más

lentamente. Si el servo se encuentra en la posición deseada, el error será cero, y no habrá movimiento.

Para que el amplificador de error pueda calcular el error de posición, debe restar dos valores de voltaje analógicos. La señal de control PWM se convierte entonces en un valor analógico de voltaje, mediante un convertidor de ancho de pulso a voltaje. El valor de la posición del motor se obtiene usando un potenciómetro de realimentación acoplado mecánicamente a la caja reductora del eje del motor: cuando el motor gira, el potenciómetro también lo hace, variando el voltaje que se introduce al amplificador de error.

Una vez que se ha obtenido el error de posición, éste se amplifica con una ganancia, y posteriormente se aplica a los terminales del motor.

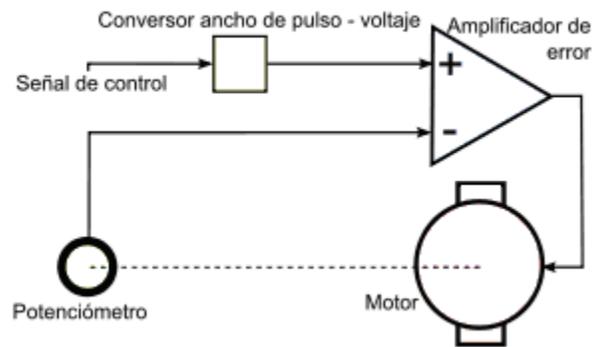


Figura 4.17 Diagrama esquemático de un servomotor

Dependiendo del modelo del servo, la tensión de alimentación puede estar comprendida entre los 4 y 8 voltios. El control de un servo se reduce a indicar su posición mediante una señal cuadrada de voltaje, el ángulo de ubicación del motor depende de la duración del nivel alto de la señal.

Cada servo, dependiendo de la marca y modelo utilizado, tiene sus propios márgenes de operación. Por ejemplo, para algunos servos los valores de tiempo de la señal en alto están entre 1 y 2 ms, que posicionan al motor en ambos extremos de giro (0° y 180°, respectivamente). Los valores de tiempo de alto para ubicar el motor en otras posiciones se halla mediante una relación completamente lineal: el valor 1,5 ms indica la posición central, y otros valores de duración del pulso dejarían al motor en la posición proporcional a dicha duración.

La duración del pulso alto para conseguir un ángulo de posición  $\theta$  estará dada por la expresión en la figura 4.18.

$$t = 1 + \frac{\phi}{180}$$

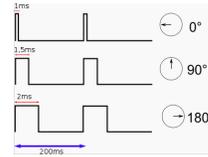


Figura 4.18 Señales que se aplican a los servomotores y los efectos sobre el eje del motor

Los servomotores se limitan a girar dentro de un rango de 180 grados aproximadamente debido a un tope mecánico que le impide al eje trasladarse fuera de éstos límites. El potenciómetro da menos de una vuelta, de modo que no puede dar giros completos en un mismo sentido. Es por esto que los servos tienen una cantidad limitada de giro, y no pueden girar continuamente en un mismo sentido. Es posible, sin embargo, realizar modificaciones al servo, las que se mencionan a continuación. Hay dos tipos de modificación realizables. El primero es la completa eliminación del sistema de control del circuito, para conservar únicamente el motor de corriente continua y el sistema de engranajes reductores. Con esto se obtiene simplemente un motor de corriente continua con caja reductora en un mismo empaquetado, útil para aplicaciones donde no se necesite del control de posición incorporado del servo. La segunda modificación realizable consiste en un cambio en el sistema de control, de modo que se obtenga un sistema de control de velocidad. Para ello, se desacopla el potenciómetro de realimentación del eje del motor, y se hace que permanezca estático en una misma posición. Así, la señal de error del sistema de control dependerá directamente del valor deseado que se ajuste (que seguirá indicándose mediante pulsos de duración variable). Ambos tipos de modificación requieren que se elimine físicamente la pestaña limitadora de la caja reductora.

La modificación es un proceso destructivo, es decir no se podrá recuperar la funcionalidad original. La idea es quitar el tope mecánico y desacoplar el potenciómetro del eje de salida del servomotor, sin embargo se necesita mantener el control sobre la velocidad con la misma señal de pulsos, se coloca otro potenciómetro que servirá para fijar el punto de velocidad nula con una señal de 1.5 ms, de modo que la velocidad de rotación del servomotor será mayor cuanto más se aleje la señal de su punto medio de 1.5 ms, es decir con 2 ms la velocidad será máxima en un sentido de giro y con una señal de 1 ms también será máxima pero en sentido contrario.

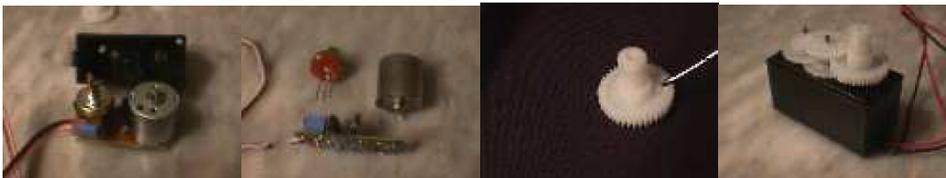


Figura 4.19 Modificaciones que se realizan los servomotores para lograr la rotación continua

## 4.6 Control de motores y servomotores

### 4.6.1 Control de motores de corriente continua

En los motores de corriente continua interesa controlar la velocidad y dirección del eje de rotación. Esta tarea se puede realizar con un dispositivo electrónico denominado puente H. Un puente H es un circuito electrónico que permite a un motor eléctrico girar en ambos sentidos, avance y retroceso. Son ampliamente usados en robótica. Están disponibles como circuitos integrados, pero también pueden construirse a partir de componentes discretos.

El término puente H proviene de la típica representación gráfica del circuito. Se construye con 4 interruptores (mecánicos o mediante transistores). Cuando los interruptores S1 y S4 (ver primera figura 4.20) están cerrados (y S2 y S3 abiertos) se aplica una tensión positiva en el motor, haciéndolo girar en un sentido. Abriendo los interruptores S1 y S4 (y cerrando S2 y S3), el voltaje se invierte, permitiendo el giro en sentido inverso del motor.

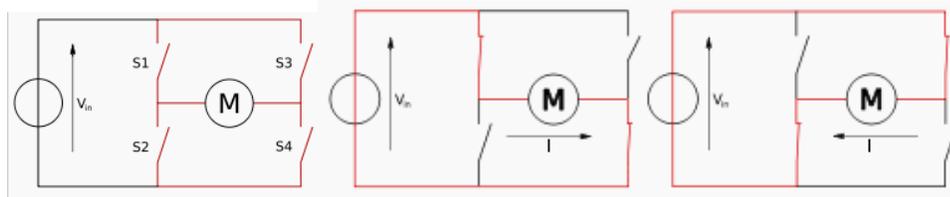


Figura 4.20 Esquema del funcionamiento de un Puente H para el control del sentido de giro de motores

Un puente H también puede usarse para frenar el motor, al hacer un corto entre los bornes del motor, o incluso puede usarse para permitir que el motor frene bajo su propia inercia, cuando desconectamos el motor de la fuente que lo alimenta. En el siguiente cuadro se resumen las diferentes acciones.

Tabla 4.1 Señales de control en un Puente H y el resultado en el sentido de giro del motor

S1	S2	S3	S4	Resultado
1	0	0	1	El motor gira en <i>avance</i>
0	1	1	0	El motor gira en <i>retroceso</i>
0	0	0	0	El motor se detiene bajo su inercia
0	1	0	1	El motor frena ( <i>fast-stop</i> )

Los circuitos de control puente H también pueden aplicar una señal modulada en ancho de pulso lo que permite controlar la velocidad y el par que genera el motor.

### 4.6.2 Secuencias para manejar motores paso a paso bipolares

Estos motores necesitan la inversión de la corriente que circula en sus bobinas en una secuencia determinada. Cada inversión de la polaridad provoca el movimiento del eje en un paso, cuyo sentido de giro está determinado por la secuencia seguida.

A continuación se puede ver la tabla 4.2 con la secuencia necesaria para controlar motores paso a paso del tipo bipolar:

Tabla 4.2 Secuencia de control para los motores a pasos bipolares

PASO	TERMINALES			
	A	B	C	D
1	+V	-V	+V	-V
2	+V	-V	-V	+V
3	-V	+V	-V	+V
4	-V	+V	+V	-V

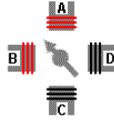
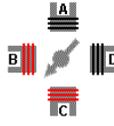
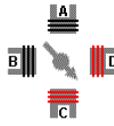
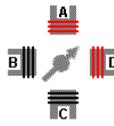
### 4.6.3 Secuencias para manejar motores paso a paso unipolares

Existen tres secuencias posibles para este tipo de motores, las cuales se detallan a continuación. Todas las secuencias comienzan nuevamente por el paso 1 una vez alcanzado el paso final (4 u 8). Para revertir el sentido de giro, simplemente se deben ejecutar las secuencias en modo inverso.

### 4.6.3.1 Secuencia Normal

Esta es la secuencia más usada y la que generalmente recomiendan los fabricantes. Con esta secuencia el motor avanza un paso por vez y debido a que siempre hay al menos dos bobinas activadas, se obtiene un alto torque de paso y de retención.

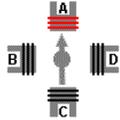
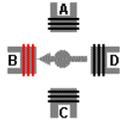
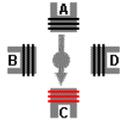
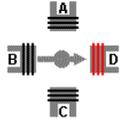
Tabla 4.3 Secuencia normal de control para motores unipolares

PASO	Bobina A	Bobina B	Bobina C	Bobina D	EFEECTO
1	ON	ON	OFF	OFF	
2	OFF	ON	ON	OFF	
3	OFF	OFF	ON	ON	
4	ON	OFF	OFF	ON	

### 4.6.3.2 Secuencia *wave drive*:

En esta secuencia se activa solo una bobina a la vez. En algunos motores esto brinda un funcionamiento más suave. La desventaja es que al estar solo una bobina activada, el torque de paso y retención es menor [25].

Tabla 4.4 Secuencia *wave drive* para motores unipolares

PASO	Bobina A	Bobina B	Bobina C	Bobina D	EFFECTO
1	ON	OFF	OFF	OFF	
2	OFF	ON	OFF	OFF	
3	OFF	OFF	ON	OFF	
4	OFF	OFF	OFF	ON	

### 4.6.3.3 Secuencia de medio paso

En esta secuencia se activan las bobinas de tal forma de brindar un movimiento igual a la mitad del paso estándar. Para ello se activan primero 2 bobinas y luego solo 1 y así sucesivamente. Como vemos en la tabla la secuencia completa consta de 8 movimientos en lugar de 4.

Esto permite tener un mejor control sobre la posición del eje del motor, se utiliza donde es necesario mayor resolución en la posición angular como en equipos instrumentales.

Tabla 4.5 Secuencia de medio paso para motores unipolares

PASO	Bobina A	Bobina B	Bobina C	Bobina D	EFFECTO
1	ON	OFF	OFF	OFF	
2	ON	ON	OFF	OFF	
3	OFF	ON	OFF	OFF	
4	OFF	ON	ON	OFF	
5	OFF	OFF	ON	OFF	
6	OFF	OFF	ON	ON	
7	OFF	OFF	OFF	ON	
8	ON	OFF	OFF	ON	

Cabe destacar que debido a que los motores paso a paso son dispositivos electromecánicos y debe vencer la inercia estática y en movimiento, el tiempo de duración y la frecuencia de los pulsos aplicados es un punto muy importante a tener en cuenta, esto implica que el motor debe alcanzar el paso antes que la próxima secuencia de pulsos comience. Si la frecuencia de pulsos es muy elevada, el motor puede reaccionar en alguna de las siguientes formas:

- Puede que no realice ningún movimiento en absoluto.
- Puede comenzar a vibrar pero sin llegar a girar.
- Puede girar erráticamente.
- puede llegar a girar en sentido opuesto.

Para obtener un arranque suave y preciso, es recomendable comenzar con una frecuencia de pulso baja y gradualmente ir aumentándola hasta la velocidad deseada sin superar la máxima tolerada. El giro en reversa debería también ser realizado previamente bajando la velocidad de giro y luego cambiar el sentido de rotación.

## Capítulo 5

---

### *Sensores de proximidad y de obstáculos*

Los sensores son los elementos más críticos en el desempeño del robot, pues representan la retroalimentación que le indicarán a al microcontrolador si las comandos del algoritmo de control se han efectuado correctamente y en caso de que no sea así realicen las correcciones necesarias para que el desempeño total del robot sea el adecuado.

Los sensores deben de satisfacer una serie de características que los hagan aptos para esta aplicación, deben ser exactos representando fielmente la magnitud que se les ha encomendado medir. El correcto diseño y selección harán que el robot se capaz de transferir efectivamente los comandos del software al comportamiento por medio de la planeación de movimientos y la navegación.

Dentro de la enorme cantidad de sensores que existen para las diferentes aplicaciones hay tres tipos que son especialmente aptos para la implementación en robots de laberinto, estos son los sensores infrarrojos, los sensores ultrasónicos y los sensores de luz o LDR, a continuación se hará un análisis cada uno de estos, mencionado las ventajas y desventajas; se presentan también algunos circuitos electrónicos que se adecuan al robot de laberinto, para finalmente decidir implementar los sensores que tengan el mejor desempeño [26].

#### **5.1 Sensores infrarrojos**

Los sensores infrarrojos son dispositivos que cambian su estado electrónico al incidir parte del espectro electromagnético comprendido entre lo que se conoce como radiación infrarroja, se puede decir que son elementos que cambian su estado de conducción eléctrica dependiendo de la intensidad de radiación infrarroja que incida sobre el dispositivo.

Los rayos infrarrojos entran dentro del fototransistor donde encontramos un material semiconductor, normalmente formando una lámina delgada dentro del nitrato de galio (GaN), nitrato de Cesio (CsNO<sub>3</sub>), derivados de la fenilpirazina, y ftalocianina de cobalto[27].

La forma en que se le suele aplicar a la detección de obstáculos o para la medición de distancias es lanzando un rayo infrarrojo el cual es reflejado por los objetos en los que incide, posteriormente se mide la cantidad de luz que es reflejada con lo que se puede

tener una estimación de la distancia a la que se encuentra el objeto, se tienen un emisor y un receptor, que se les llama fotodiodo y fototransistor.



Figura 5.1 Fotodiodo y fototransistor comunes

### 5.1.1 Sensores reflectivos

Este tipo de sensor presenta una cara frontal en la que encontramos tanto al fotodiodo como al fototransistor. El fototransistor conduce en función de la luz infrarroja emitida por el fotodiodo que se refleja en la superficie.

Se tiene que tener presente que esta configuración es sensible a la luz del ambiente, afectando las medidas y que pueden dar lugar a errores por lo que es necesario la incorporación de circuitos de filtrado o que trabajen en ambientes de luz controlada. Otro aspecto a tener en cuenta es el coeficiente de reflectividad del objeto, el funcionamiento del sensor será diferente según el tipo de superficie.

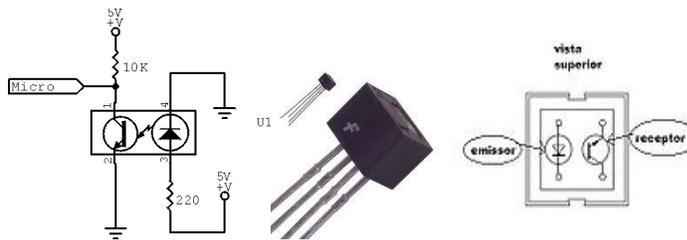


Figura 5.2 Sensor reflexivo QRD1114

### 5.1.2 Sensores de ranura (Sensor Break-Beam)

Este tipo de sensor sigue el mismo principio de funcionamiento que los sensores reflectivos pero la configuración de los componentes es diferente, ambos elementos se encuentran enfrentados a la misma altura. Este tipo se utiliza típicamente para control industrial. Otra aplicación podría ser el control de las vueltas de una rueda de robot.

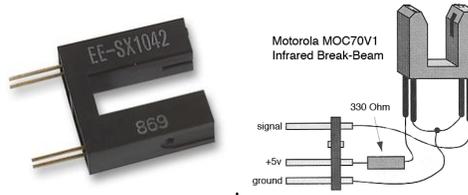


Figura 5.3 Sensores de ranura

### 5.1.3 Sensores modulados

Basado en el sensor reflectivo pero utilizando la emisión de una señal modulada, reduce los efectos no deseables de la influencia de la iluminación ambiental [28]. Son sensores orientados a la detección de presencia, medición de distancias y detección de obstáculos.

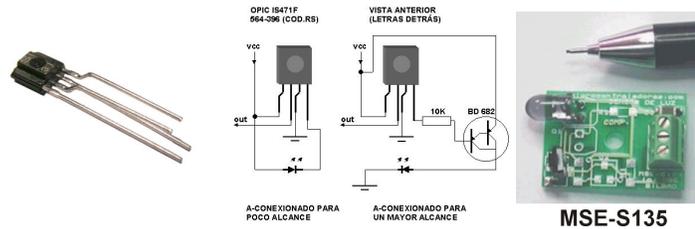


Figura 5.4 Sensor modulado IS471F

### 5.1.4 Ventajas de los sensores infrarrojos

Los sensores infrarrojos son rápidos, de reducido peso, pueden tener suficiente alcance que los hace apropiados para la aplicación en robots de laberinto, el control se puede realizar sin demasiados componentes electrónicos o directamente mediante los periféricos que incorporan los microcontroladores, se consiguen fácilmente y son económicos.

Su reducido peso y dimensiones facilitan el diseño de los dispositivos electrónicos que los contienen.

### **5.1.5 Desventajas de los sensores infrarrojos.**

Los sensores infrarrojos presentan importantes interferencias de elementos externos, especialmente la iluminación de la habitación en donde se desempeñe el robot, esto hace necesario agregar elementos de control y adaptación de señales.

Sin embargo existen en el mercado algunos sensores que implementan todos los elementos de control que permiten la fácil obtención de información sobre distancias o presencia de obstáculos.

Algunos sensores comerciales son difíciles de conseguir en México, además de que resultan muy costosos. Por ejemplo los sensores SHARP de la serie GP solo son comercializados por algunas tiendas de robótica (Robodacta por ejemplo) y solo tienen en sus catálogos uno o dos modelos que no cumplen con las características de rango para la aplicación del robot de laberinto.

## **5.2 Sensores ultrasónicos**

Los sensores ultrasónicos emplean el fenómeno de la piezoelectricidad, esto es, cuando se deforman algunos materiales sólidos generan dentro de ellos una carga eléctrica. Este efecto es reversible, si se aplica una carga, el material se deformará mecánicamente como respuesta. Se aplican en los sistemas sonar para la detección acústica, detección de objetos bajo el agua, en equipos ultrasónicos de pruebas industriales, robots que necesitan detectar obstáculos cuando tienen que navegar por un entorno complejo y otras aplicaciones.

Si al transductor piezoeléctrico de un sensor ultrasónico, se le aplica en sus extremos (electrodos) un voltaje, el cristal sufre cambios de presión en sí mismo y en el medio que lo rodea (el aire es el medio en el que se trabaja), y viceversa, al ser sometido el cristal a un cambio de presión aparecen cargas eléctricas en sus extremos, donde se crea una diferencia de potencial. Por lo que este tipo de transductor puede funcionar como emisor o receptor ultrasónico, este receptor está diseñado para responder ante una determinada vibración, la que es producida por el elemento emisor, así se logra tener una gran inmunidad ante las interferencias del medio ambiente, posteriormente se tienen los elementos de control que están constituidos por filtros, amplificadores y comparadores, aunque algunos sensores pueden tener procesamiento digital de señales lo que mejora las características y la calidad de la medición [29].

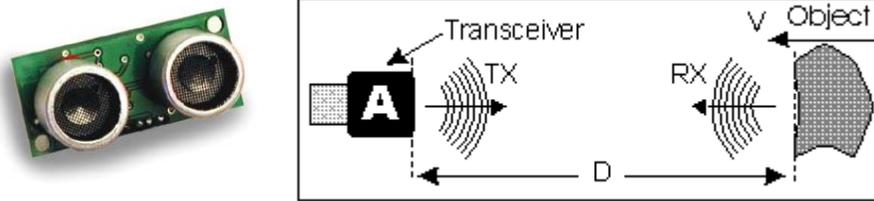


Figura 5.5 Sensor de distancia ultrasónico

### 5.2.1 Ventajas y desventajas de los sensores ultrasónicos

Los sensores ultrasónicos resultan adecuados donde los sensores infrarrojos o de luz fallan, por ejemplo detectando objetos que tienen superficies altamente reflectantes o paredes con espejos.

Por otro lado debido a las características físicas de las señales ultrasónicas estas no pueden aplicarse a medir distancias menores a 10 centímetros lo que las hace imprácticas para la aplicación donde las dimensiones de los robots y de la de pista son del orden de 2 centímetros aproximadamente, como es el caso del robot objeto de esta tesis.

Por otra parte los sensores ultrasónicos requieren de complicados y sofisticados sistemas de control para poder medir efectivamente las distancias, aunque afortunadamente existen módulos comerciales que tienen todos los elementos en un reducido espacio, pero el costo de estos sensores es muy alto.

Por ejemplo los sensores LV-EZx que se venden en algunos establecimientos especializados en robótica tienen un costo de 600 pesos aproximadamente, mientras que un robot de laberinto requiere seis de estos sensores.

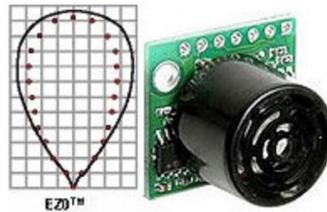


Figura 5.6 Sensor comercial Maxbotix LV-EZ3

### 5.3 Sensores de luz

Los detectores de luz son dispositivos que cambian su resistividad eléctrica en función de la cantidad de luz que incide sobre ellos, por lo que también se les llama LDR (Light Dependent Resistor) o resistencia variables con la luz, fotocelda, fotorresistencia o bien fotorresistor.



Figura 5.7 Sensores LDR que varían su resistencia en función de la luz que les incide

Un fotorresistor está hecho de un semiconductor de alta resistencia eléctrica como el sulfuro de cadmio (CdS). Si la luz que incide en el dispositivo es de alta frecuencia, los fotones son absorbidos por las propiedades del semiconductor dando a los electrones la suficiente energía para saltar la banda de conducción. El electrón libre que resulta, y su hueco asociado, conducen la electricidad, de tal modo que disminuye la resistencia. Los valores típicos varían entre  $1\text{ M}\Omega$ , o más, en la oscuridad y  $100\ \Omega$  con luz brillante.

Las células de sulfuro del cadmio se basan en la capacidad del cadmio de variar su resistencia según la cantidad de luz que incide la célula. Cuanta más luz incide, más baja es la resistencia. Las células son también capaces de reaccionar a una amplia gama de frecuencias, incluyendo infrarrojo (IR), luz visible, y ultravioleta (UV).

La variación del valor de la resistencia tiene cierto retardo, diferente si se pasa de oscuro a iluminado o de iluminado a oscuro. Esto limita a no usar los LDR en aplicaciones en las que la señal luminosa varía con rapidez. El tiempo de respuesta típico de un LDR está en el orden de una décima de segundo. Esta lentitud da ventaja en algunas aplicaciones, ya que se filtran variaciones rápidas de iluminación que podrían hacer inestable un sensor (por ejemplo en un tubo fluorescente alimentado por corriente alterna) [30].

Se fabrican en diversos tipos y pueden encontrarse en muchos artículos de consumo, como por ejemplo en cámaras, medidores de luz, relojes con radio, alarmas de seguridad o sistemas de encendido y apagado del alumbrado de calles y por supuesto en algunos sensores para robótica.

También se fabrican fotoconductores que funcionan dentro de la gama más baja radiación infrarroja.

Un circuito de aplicación es el siguiente. El circuito consta de un divisor de tensión formado por la LDR, una resistencia y un disparador *trigger schmitt* inversor modelo 74F14. Como la LDR varía función de la luz, la señal de salida del divisor también lo hará y cuando pase el umbral de disparo del *trigger schmitt* este cambiara el estado de su salida según corresponda.

Los umbrales de disparo son de 0,9 y 1,7 voltios [31], esto quiere decir que cuando la señal en la entrada del disparador supere los 1,7 voltios se tomara como un 1 lógico en la entrada y la salida al ser inversa tomara el nivel lógico bajo o 0 voltios, si el voltaje de entrada baja por debajo de 0,9 voltios se tomara como un 0 lógico en la entrada con lo que la salida tomara un nivel lógico 1

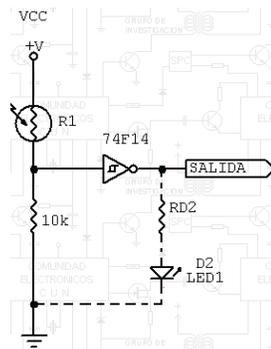


Figura 5.8 Sensor LDR y su acondicionador de señal

Los materiales que intervienen en su construcción son Sulfuro de Cadmio, utilizado como elemento sensible a las radiaciones visibles y sulfuro de plomo se emplean en las LDR que trabajan en el margen de las radiaciones infrarrojas. Estos materiales se colocan en encapsulados de vidrio o resina.

### 5.3.1 Ventajas y desventajas de los sensores de luz

Estos sensores son de reducido peso y fáciles de aplicar a circuitos de medición de distancias y pueden adquirirse a precios bajos en casi todas la tiendas de electrónica, pero presentan interferencias debidas a factores como la luz solar, luz proveniente de fuentes artificiales que provoca que los sensores den lecturas erróneas.

## 5.4 Sensores seleccionados

Tomando en cuenta las características eléctricas, costos, circuitos de aplicación de los sensores presentados anteriormente se puede considerar que se tendrán que implementar mediante emisores y receptores de luz infrarrojos con los elementos electrónicos adicionales que den una señal representativa de la distancia a la que se encuentran las paredes del laberinto al robot. Estos sensores ya se han empleado en otros robots y han demostrado ser adecuados para la aplicación de robots de laberinto.

Los sensores están basados en una configuración que es ampliamente utilizada para este tipo de robots, llamados *side looking sensors* que tienen las características de presentar alta inmunidad a la intensidad de la luz ambiental además de tener buena resolución y exactitud en las lecturas que devuelven.

Uno de los problemas que se presentan en los sensores de distancia por medio de luz infrarroja es que la lectura que devuelve el sensor suele depender del ángulo de incidencia sobre la superficie por lo que el valor de la distancia suele estar distorsionado en función de la orientación del robot en el laberinto, característica que no puede conocerse con certeza a menos que se tengan sensores de orientación o giroscopios, que agregan carga de procesamiento al sistema controlador y que no pueden adquirirse fácilmente.

Los sensores que se utilizan compensan esa situación y resultan relativamente inmunes a la dependencia de ángulo de incidencia.

El diagrama de los sensores se muestra en la figura 5.9.

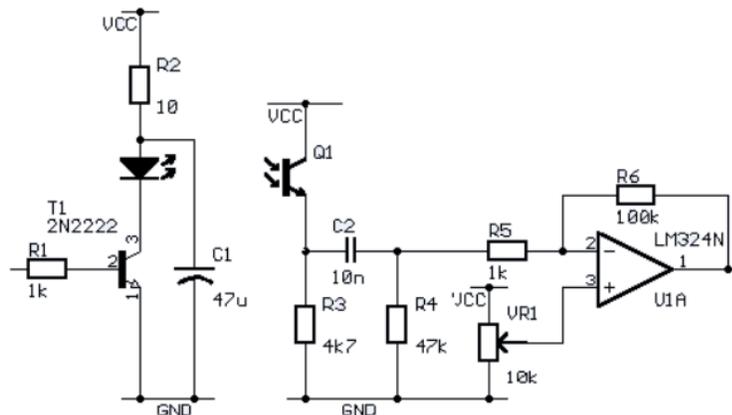


Figura 5.9 Sensores de distancia que se han empleado en el robot propuesto

El circuito de los sensores está compuesto por los siguientes elementos. Por el lado del emisor se tiene un diodo infrarrojo controlado por el transistor T1 que a su vez es

activado por un pin del microcontrolador a través de la resistencia R1, el capacitor C1 sirve para proveer la corriente eléctrica cuando el transistor pone en modo de conducción al diodo, logrando mayor luminosidad, además reduce el efecto instantáneo de la carga sobre los demás componentes electrónicos conectados a la misma línea de alimentación que se reflejan en una súbita e instantánea caída en la tensión, la resistencia limita la corriente de carga de capacitor C1, también reduce la corriente que fluye a través del diodo cuando por alguna causa fuera del funcionamiento previsto, el transistor T1 queda permanentemente en estado de conducción.

El fototransistor Q1 recibe la luz infrarroja reflejada, se comporta como un semiconductor que varía su resistencia en función de la luz que le incide y en conjunto con la resistencia R3 forman un divisor de tensión, luego se coloca el capacitor C2 que es insensible a esta tensión por ser un voltaje constante y que depende de la condiciones de luminosidad ambientales, este capacitor en conjunto con la resistencia R4 forman un filtro paso alto que permite el paso de las variaciones de tensión producidas por la luz incidente en el fototransistor y *contenida* en la amplitud de esta variación esta la distancia del objeto que refleja la luz, luego simplemente se coloca un amplificador inversor con una ganancia de 100 en el que se puede hacer variar el valor de la referencia de tensión mediante VR1. La salida del amplificador operacional se conecta directamente al uno de los canales de convertidor analógico digital del microcontrolador.

El modo de funcionamiento es el siguiente, para obtener la lectura del sensor correspondiente el algoritmo controlador envía una señal digital que activa el fotodiodo, luego espera 10 microsegundos, hace la lectura del canal analógico correspondiente, apaga al fotodiodo para evitar que se quemé y así se tiene un valor que representa la distancia a la que se encuentra el sensor correspondiente de la pared en la que incide.

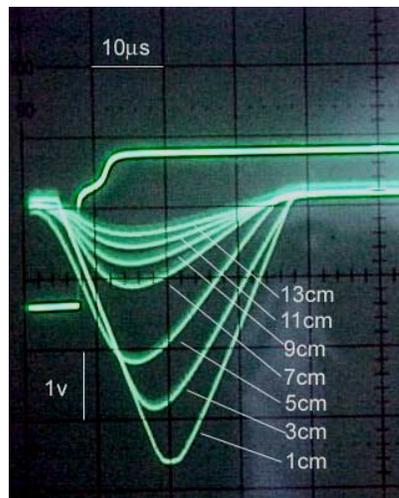


Figura 5.10 Imágenes en el osciloscopio de las señales leídas en los sensores

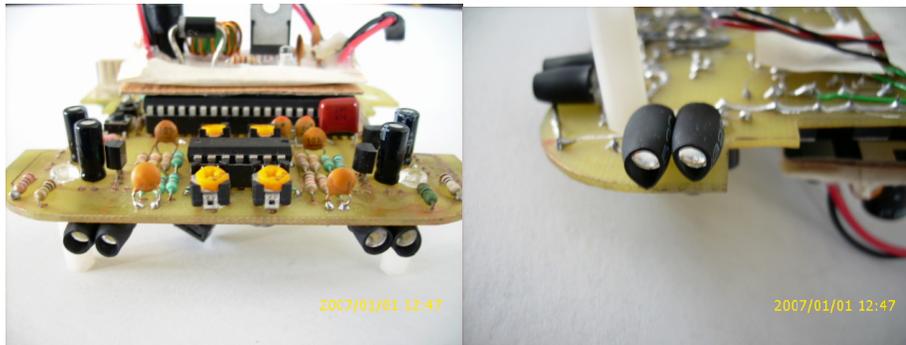


Figura 5.11 Imágenes de los sensores en el robot diseñado

De esta manera se tienen un valor que mediante operaciones aritméticas elementales representa linealmente la distancias del robot a la pares correspondiente o también se puede trabajar con umbrales de valores que determinen si el robot está dentro de un rango de distancias hacia la pared.

## Capítulo 6

---

### *Fuentes de energía*

#### **6.1 Tecnologías de pilas y baterías empleadas en la robótica**

La fuente de energía es el dispositivo que le permite al sistema de tracción, a los sensores y al sistema de control realizar sus funciones, debido a esto la fuente de alimentación debe cumplir las características que le permitan a los dispositivos funcionar adecuadamente, es decir que debe tener la capacidad de proporcionar la potencia eléctrica, lo que está directamente relacionado con el tamaño de la fuente de alimentación, pero se espera también que esta fuente de alimentación sea reducida en peso, por lo tanto se debe llegar a un acuerdo en cuanto al tamaño de la fuente de alimentación y la potencia requerida.

Existen varias tecnologías de las fuentes de alimentación que tienen distintas características como la capacidad específica de energía que es la cantidad de energía que pueden proporcionar por unidad de masa.

Las características de calidad que debe de presentar la fuente de alimentación son:

Disponibilidad, la energía debe estar disponible por el tiempo que la necesitemos para hacer las pruebas y más aún para una competencia.

Tensión, la batería debe mantener la tensión durante la mayor parte del tiempo del proceso de descarga.

Existen varios tipos de baterías que dependen de la tecnología que tenga el elemento productor de la energía, todas las baterías generan la energía por medio reacciones químicas que pueden ser reversibles en el caso de las pilas recargables o bien no reversibles en el caso de las baterías alcalinas, que no suelen emplearse en la robótica debido al costo. Así tenemos que existen los siguientes tipos de baterías.

Una batería recargable (también llamada acumulador) es un grupo de una o más celdas electroquímicas reversibles.

Cuando la reacción transcurre en un sentido, se agotan los materiales de la pila mientras se genera una corriente eléctrica.

Cuando la reacción transcurre en sentido inverso, es necesaria una corriente eléctrica para regenerar los materiales consumidos.

### 6.1.1 Baterías Alcalinas

También denominada de ferróníquel, sus electrodos son láminas de acero en forma de rejilla con panales rellenos de óxido níqueloso (NiO), que constituyen el electrodo positivo, y de óxido ferroso (FeO) el negativo, estando formado el electrolito por una disolución de potasa cáustica (KOH). Durante la carga se produce un proceso de oxidación anódica y otro de reducción catódica, transformándose el óxido níqueloso en níquelico y el óxido ferroso en hierro metálico. Esta reacción se produce en sentido inverso durante la descarga.

En 1866, Georges Leclanché inventa en Francia la pila Leclanché, precursora de la pila seca (Zinc-Dióxido de Manganeso), sistema que aún domina el mercado mundial de las baterías. Las pilas alcalinas (de "alta potencia" o "larga vida") son similares a las de Leclanché, pero en vez de cloruro de amonio, llevan cloruro de sodio o de potasio. Duran más porque el zinc no está expuesto a un ambiente ácido como el que provocan los iones amonio en la pila convencional. Como los iones se mueven más fácilmente a través del electrolito, produce más potencia y una corriente más estable.

Su mayor costo se deriva de la dificultad de sellar las pilas contra las fugas de hidróxido. Casi todas vienen blindadas, lo que impide el derramamiento de los constituyentes. Sin embargo, este blindaje no tiene duración ilimitada. Tienen las siguientes características:

El electrolito es básico (alcalino), porque contiene KOH.

La superficie interior del recipiente de Zn es áspera; esto proporciona un área de contacto mayor.

Las baterías alcalinas tienen una vida media mayor que las de las celdas secas comunes y resisten mejor el uso constante.

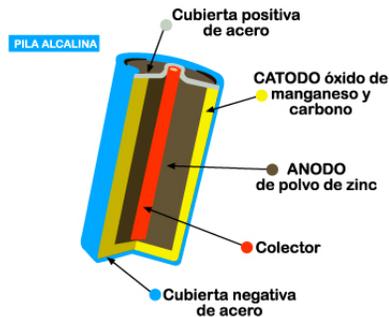


Figura 6.1 Estructura de una batería alcalina

### 6.1.2 Pilas alcalinas de magnesio

Con un contenido de mercurio que ronda el 0,1% de su peso total, es una versión mejorada de la pila anterior, en la que se ha sustituido el conductor iónico cloruro de amonio por hidróxido de potasio. El recipiente de la pila es de acero, y la disposición del zinc y del óxido de manganeso (IV) (o dióxido de manganeso) es la contraria, situándose el zinc, ahora en polvo, en el centro. La cantidad de mercurio empleada para regularizar la descarga es mayor. Esto le confiere mayor duración, más constancia en el tiempo y mejor rendimiento. Por el contrario, su precio es más elevado. También suministra una fuerza electromotriz de 1,5 V. Se utiliza en aparatos de mayor consumo como: grabadoras portátiles, juguetes con motor, flashes electrónicos, etc.

El ánodo es de zinc amalgamado y el cátodo es un material polarizador compuesto en base a dióxido de manganeso, óxido de mercurio (II) mezclado con grafito, y en casos raros, óxido de plata  $Ag_2O$  (estos dos últimos son muy costosos, peligrosos y tóxicos), a fin de reducir su resistividad eléctrica. El electrolito es una solución de hidróxido potásico (KOH), el cual presenta una resistencia interna muy baja, lo que permite que no se tengan descargas internas y la energía pueda ser acumulada durante mucho tiempo. Este electrolito, en las pilas comerciales se endurece con gelatinas o derivados de la celulosa.

Contiene un compuesto alcalino, llamado Hidróxido de Potasio. Su duración es seis veces mayor que la de la pila de zinc-carbono. Está compuesta por dióxido de manganeso,  $MnO_2$ , hidróxido de potasio (KOH), pasta de zinc (Zn), amalgamada con mercurio (Hg, en total 1%), carbón o grafito (C). Según la Directiva Europea del 18 de marzo de 1991, este tipo de pilas no pueden superar la cantidad de 0,025% de mercurio.

### 6.1.3 Baterías de Ni-Cd

Comúnmente abreviadas NiCd o NiCad son un tipo de baterías recargables que utiliza hidróxido de níquel y cadmio metálico como electrodos. La abreviatura NiCad es una marca registrada de la corporación SAFT. Hay dos tipos de pilas de NiCd, selladas y ventiladas, pero la mayor parte de las pilas que se utilizan en robótica son del tipo selladas.

Las pilas de NiCd pueden ser utilizadas individuales o ensambladas dentro de paquetes de baterías que contienen dos o más baterías. Las baterías pequeñas de NiCd son utilizadas para dispositivos electrónicos portátiles o juguetes además de otras aplicaciones como electrodomésticos.

Utilizan un cátodo de hidróxido de níquel y un ánodo de un compuesto de cadmio. El electrolito es de hidróxido de potasio. Su densidad de energía es de 50 Wh/kg, lo que hace que tengan poca capacidad. Admiten sobrecargas. Admiten un gran rango de

temperaturas de funcionamiento. Voltaje proporcionado: 1,2V. Capacidad usual: 0.5 a 1.0 Amperios (en pilas tipo AA). Tienen un efecto de memoria que consiste que la batería pierde capacidad de almacenar energía dependiendo del nivel de descarga a la que se recarga la energía, es decir mientras la batería no se descargue totalmente esta perderá parte de su capacidad total de almacenamiento de energía.

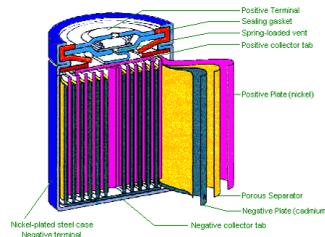


Figura 6.2 Estructura de una batería de Ni-Cd

Estas baterías se recargan haciendo pasar un corriente eléctrica en sentido opuesto al sentido de la corriente al momento de la descarga normal, un parámetro que permite saber cuándo una batería está siendo cargada o descargada dentro de los límites de operación el factor C que se mide en A\*h (ampere-hora) o mA\*h (miliamperes-hora). Una batería que tiene por ejemplo C=500 quiere decir que puede suministrar una corriente de 500 mA durante una hora (250 mA durante 2 horas, 125 mA durante 4 horas... etc.)

El término C se utiliza también para definir la corriente de carga. Una corriente de 1C significa que la batería se cargará con la misma corriente que puede suministrar durante una hora. Normalmente las baterías se cargan a 0,1C durante 14 horas. La mayoría de los fabricantes recomienda cargar éste tipo de pilas con una corriente directa pulsante en vez de una corriente directa constante, esto para prolongar la vida útil de las baterías.

### 6.1.3.1 Ventajas y desventajas de la pila de NiCd

Las baterías de NiCd presentan una serie de ventajas frente a las normales:

- Pueden recargarse
- Son mucho más robustas en construcción y por tanto menos propensas que las pilas normales a perder el electrolito.
- Tienen una resistencia interna extremadamente baja

- Mantienen la tensión prácticamente constante durante casi el 90% del ciclo de descarga.

Las dos últimas características son importantes. La baja impedancia interna permite asociar varios elementos en serie y la poca variabilidad del voltaje permite el control sobre la potencia que se entrega a determinados componentes como los motores.

Los inconvenientes de las NiCd son:

- Su tensión es 1,2V frente a 1,5V de las pilas normales. Esto supone un 20% menos de tensión
- Debido a su baja impedancia interna no se pueden cargar a tensión constante ya que se generarían corrientes muy elevadas que producen el calentamiento de la pila y su destrucción.

#### **6.1.4 Baterías de Ni-Mh**

Las pilas de NiMh o níquel e hidruro metálico utilizan un ánodo de hidróxido de níquel y un cátodo de una aleación de hidruro metálico. Este tipo de baterías se encuentran menos afectadas por el llamado efecto memoria.

No admiten bien el frío extremo, reduciendo drásticamente la potencia eficaz que puede entregar. Voltaje proporcionado: 1,2V Densidad de energía: 80 W/Kg Capacidad usual: 0.5 a 2.8 Amperios (en pilas tipo AA). El efecto memoria que presentan es muy bajo.

Una batería de níquel-hidruro metálico es un tipo de batería recargable que utiliza un ánodo de hidróxido oxido de níquel (NiOOH), como la batería de níquel cadmio, pero su cátodo es de una aleación de hidruro metálico.

Esto permite eliminar el costoso (y ambientalmente peligroso) cadmio a la vez que presenta una mayor capacidad de carga (entre dos y tres veces la de una pila de NiCd del mismo tamaño y peso) y un menor efecto memoria. Por contra, presentan una mayor tasa de autodescarga que las de NiCd (un 30% mensual frente a un 20%).

Los ciclos de carga de estas baterías oscilan entre las 500 y 700 cargas, algunos de sus inconvenientes son las altas temperaturas que alcanzan en las cargas o en los usos.



Figura 6.3 Ejemplos de baterías de Ni-Mh

La forma de recargar estas baterías es muy parecida a la forma en que se recargan las baterías de NiCd, pero estas baterías admiten también cargas rápidas. La recarga es el proceso por el cual se restablece la energía que ha sido descargada de la batería. La vida útil de una batería depende de los ciclos de carga y descarga a la que sea sometida.

Los principales criterios para una carga efectiva son: limitar la temperatura y seleccionar una técnica apropiada para la terminación de la carga.

Las características de recarga de las baterías de NiMh son generalmente similares a las de NiCd. Sin embargo, existen algunas diferencias particularmente en los requerimientos para el control de carga, dado que las baterías de NiMh son más

Las baterías de NiMh pueden cargarse rápidamente en periodos de 1 hora con razones de carga de 1C, sin embargo para evitar el deterioro de las baterías, debe utilizarse para ello equipos cargadores especialmente diseñados que protejan la batería las sobrecargas y los excesos de temperatura.

### 6.1.5 Baterías de Litio

Las baterías de iones de litio (Li-ion) utilizan un ánodo de grafito y un cátodo de óxido de cobalto, trifilina (LiFePO<sub>4</sub>) u óxido de manganeso. Su desarrollo es más reciente, y permite llegar a altas densidades de capacidad. No admiten descargas excesivas, por lo que suelen llevar acoplados circuitos de control adicional para conocer el estado de la batería, y evitar así tanto la carga excesiva, como la descarga completa. Apenas sufren el efecto memoria y pueden cargarse sin necesidad de estar descargadas completamente. No admiten bien los cambios de temperatura.

Proporcionan 3.7 volt por celda además de que la densidad de carga es mayor que en la baterías de NiMh o NiCd. Su uso se ha popularizado en aparatos como teléfonos móviles, agendas electrónicas, computadoras portátiles y lectores de música.

### 6.1.5.1 Ventajas y desventajas de las baterías de litio

Entre las ventajas de estas pilas tenemos.

Una elevada densidad de energía: Acumulan mucha mayor carga por unidad de peso y volumen.

Poco peso, a igualdad de carga almacenada, son menos pesadas y ocupan menos volumen que las de tipo Ni-MH y mucho menos que las de Ni-Cd y Plomo.

Poco espesor, se presentan en placas rectangulares, con menos de 5 milímetros de espesor. Esto las hace especialmente interesantes para integrarlas en dispositivos portátiles.

Alto voltaje por célula: Cada batería proporciona 3,7 voltios, lo mismo que tres baterías de Ni-MH o Ni-Cd (1,2 V cada una).

Descarga lineal durante todo el ciclo de trabajo, el voltaje de la batería varía poco, lo que evita la necesidad de circuitos reguladores. Esto es una ventaja, ya que hace muy fácil saber la carga que almacena la batería.

Facilidad para saber la carga que almacenan. Basta con medir, en reposo, el voltaje de la batería. La energía almacenada es una función del voltaje medido.

Muy baja tasa de autodescarga, en el caso de las baterías de Ni-MH, esta puede ser de un 20% mensual. En el caso de Li-Ion es de menos un 6% en el mismo periodo. Muchas baterías, tras seis meses en reposo, pueden retener un 80% de su carga.

Dentro de las desventajas que encontramos en esta pila tenemos:

A pesar de todas sus ventajas, esta tecnología no es el sistema perfecto para el almacenaje de energía, pues tiene varios defectos, como pueden ser:

Duración media, depende de la cantidad de carga que almacenen, independientemente de su uso. Tienen una vida útil de unos 3 años o más si se almacenan con un 40% de su carga máxima. En realidad, cualquier batería, independientemente de su tecnología, si se almacena sin carga se deteriora.

Soportan un número limitado de cargas, entre 300 y 1000, menos que una batería de NiCd e igual que las de Ni-MH.

Son costosas, la fabricación es más difícil que las de NiCd e igual que las de Ni-MH, si bien actualmente el precio baja rápidamente debido a su gran aceptación en el mercado, con el consiguiente abaratamiento. Se puede decir que se utilizan en todos los

teléfonos móviles y computadoras portátiles del mundo y continúa extendiendo su uso a todo tipo de herramientas portátiles de baja potencia.

Pueden sobrecalentarse hasta el punto de explotar, están fabricadas con materiales inflamables que las hacen propensas a detonaciones o incendios, por lo que es necesario dotarlas de circuitos electrónicos que controlen en todo momento la batería.

Poca capacidad de trabajo en bajas temperaturas, tienen un rendimiento inferior a las baterías de NiCd o Ni-MH a bajas temperaturas, reduciendo su duración hasta en un 25 por ciento.

### 6.1.5.2 Proceso de recarga de las baterías de litio

Las baterías de litio no pueden recargarse mediante la aplicación de una corriente directa en sentido inverso, más bien requieren de un proceso especial, el que generalmente es realizado por circuitos integrados que se encargan del proceso de carga.

Las pilas de litio se cargan en una tercera parte del tiempo con respecto a un pack de Ni-MH o a una sexta parte que una igual de cadmio. Pero para esto se necesita proveer de relativamente alta corriente a la celda durante el proceso de carga y debe ser provisto en trenes de pulsos controlados.

En este tipo de baterías la carga por goteo descontrolada (habitual en sistemas de alarma, por ejemplo) o la carga por resistor en serie con la fuente llevan, sin excepción, a la destrucción de la misma.

Pero han surgido una serie de componentes activos, semiconductores, capaces de efectuar la carga, control y mantenimiento de estas celdas con casi ningún componente externo adicional.

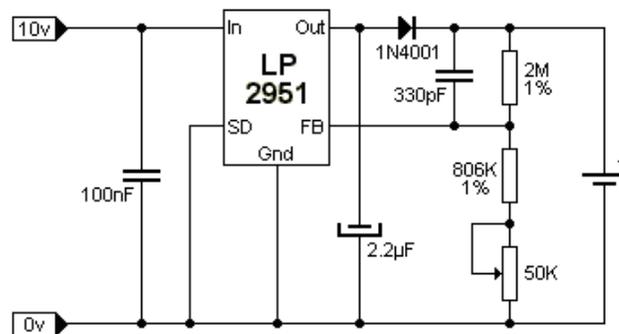


Figura 6.4 Un simple cargador de baterías de litio

En la figura 6.4 observamos un circuito típico de cargador de baterías de Li-Ion, donde se comprueba que es más fácil de realizar que un sistema de similares prestaciones con electrónica discreta. El chip se encarga tanto de medir el estado de la batería (a través de su terminal *feedback*) como de controlar la tensión a mandarle por la terminal de salida. Los capacitores actúan como filtros de posibles interferencias de RF y el potenciómetro de 50 permite ajustar el sistema según la tensión de trabajo de la celda.

Este circuito puede ser alimentado por una tensión continua de entre 6 y 10v con una corriente igual a 1.5 veces la capacidad de la celda a cargar.

Al encenderse o al colocar una batería el circuito verifica el estado de carga de la misma y de ser necesario, efectúa la carga. Una vez completada la carga el circuito entra en modo de espera, controlando periódicamente el estado de la celda por si debe continuar cargando.

El circuito está pensado para una batería con una única celda de Li-Ion. Es importante destacar que este tipo de baterías no pueden ser cargadas ni en serie ni en paralelo.

### 6.1.6 Baterías de Litio polímetro Li-po

Las baterías de litio polímero son la evolución de la tecnología de las baterías de litio, tienen las características de ser de mayor duración que las baterías de litio, además de tener mayor capacidad específica de energía, lo que significa que pueden tener mayor duración que el resto de las pilas en un determinado volumen. Tienen mayor capacidad de descarga.

Estas baterías tienen una densidad de energía de entre 5 y 12 veces las de Ni-Cd o Ni-MH, a igualdad de peso.

La gran desventaja de estas baterías es que requieren un trato mucho más delicado, bajo riesgo de deteriorarlas irreversiblemente o, incluso, llegar a producir su ignición o explosión. En general, precisan una carga mucho más lenta que las de NiCd, en general igual o inferior a 1C (donde C es su capacidad; una batería de 1000 mAh deberá cargarse, como mucho a 1 A, lo que implica períodos de carga de, típicamente, una hora). Además, la carga de las baterías de Li-Po no produce el pico de tensión característico de las de Ni-Cd o NiMH al alcanzar la máxima carga, por lo que se requieren cargadores especiales para Li-Po; bajo ningún concepto se pueden cargar con cargadores diseñados para Ni-Cd o Ni-MH. No se pueden descargar tan profundamente como es posible hacerlo con las de Ni-Cd o Ni-MH, bajo riesgo de deteriorar su capacidad de carga irreversiblemente.

Un elemento de Li-Po tiene un voltaje nominal de 3.7 V. Nunca se debe descargar una batería por debajo de 3.0 V por elemento y nunca se les debe cargar más allá de 4.3 V. Los elementos de Li-Po se pueden agrupar en serie, para aumentar el voltaje total, o en paralelo, para aumentar la capacidad total. El código 3S indica tres elementos

conectados en serie ( $3 \times 3.7 = 11.1 \text{ V}$ ), el código 4S2P indica 2 grupos en paralelo de 4 elementos en serie ( $4 \times 3.7 = 14.8 \text{ V}$  con capacidad duplicada). Como referencia, un pack 2S equivale aproximadamente, en voltaje de salida, a uno de 7 elementos de NiMH y un pack 3S equivale aproximadamente a uno de 10 elementos de NiMH. Los cargadores que recargan la energía de las pilas de litio también pueden ser utilizados para recargar este tipo de pilas pues su comportamiento eléctrico es similar.

### 6.1.7 Comparación de tipos de baterías

Una tabla de comparación entre algunos de los tipos de baterías mostradas, donde se puede observar el voltaje que proporcionan por celda, la densidad de energía en diferentes unidades, la potencia por kilogramo, la eficiencia en los procesos de carga y descarga, además de los ciclos de descarga y descarga aproximados si se les utiliza dentro de las especificaciones.

Tabla 6.1 Comparación entre los distintos tipos de baterías que se utilizan en robótica

TIPO	Voltaje	Densidad de energía			Potencia	Eficiencia	Descarga	Ciclos
	(V)	(MJ/kg)	(Wh/kg)	(Wh/L)	(W/kg)	(%)	(%/mes)	(carga descarga)
Plomo y ácido	2.1	0.11-0.14	30-40	60-75	180	70%-92%	3%-4%	500-800
Alcalina	1.5	0.31	85	250	50	99.90%	<0.3	100-1000
Ni-Hierro	1.2	0.18	50		100	65%	20%-40%	
Ni-Cadmio	1.2	0.14-0.22	40-60	50-150	150	70%-90%	20%	1500
NiMH	1.2	0.11-0.29	30-80	140-300	250-1000	66%	20%	1000
ión Li	3.6	0.58	160	270	1800	99.90%	5%-10%	1200
polímeros Li	3.7	0.47-0.72	130-200	300	3000+	99.80%		500-1000

La grafica 6.5 nos muestra la densidad de carga de varios tipos de baterías.

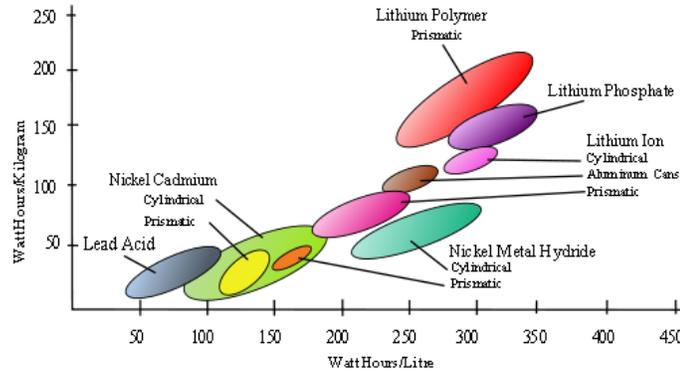


Figura 6.5 Gráfica que muestra la densidad de carga de los distintos tipos de baterías

Para efecto de poder utilizar las baterías de litio dentro de las especificaciones, se ha adquirido un cargador y balanceador que cumple con las características que se requieren para asegurar la calidad de la fuente de alimentación, el modelo del cargador y balanceador es THP610C de la marca *Thunder Power RC*.



Figura 6.6 Cargador balanceador empleado

## 6.2 Fuente de alimentación seleccionada

Tomando en cuenta las características de todas las tecnologías de baterías seleccionadas se ha optado por utilizar baterías de litio por las características de relación peso potencia, además de tener otras características que las hacen adecuadas para la aplicación, la forma y dimensiones de estas baterías permiten colocarlas en un espacio reducido, lo que se ajusta a las dimensiones del robot.

El voltaje que se requiere para las distintas partes del robot son las siguientes.

- Para la parte de los sensores y controlador se utilizarán 5 V
- Para la parte motriz se empleará 9 V para permitir que los motores giren a mayor velocidad.

Pero tomando en cuenta que el voltaje de una batería de litio convencional proporciona aproximadamente 3.7 volts, se necesitan dos baterías de diferentes tensiones para alimentar los elementos mencionados.

Esta solución incrementaría sustancialmente el peso del robot, por lo que es necesario aplicar una solución que nos permita tener la potencia necesaria sin tener que cargar con una gran cantidad de baterías. Esta solución consiste en poner la electrónica necesaria para disponer del voltaje para las distintas partes del robot, así que se colocará una fuente elevadora de voltaje para proporcionar los 5 V para la parte de control y los 9 volts para los motores.

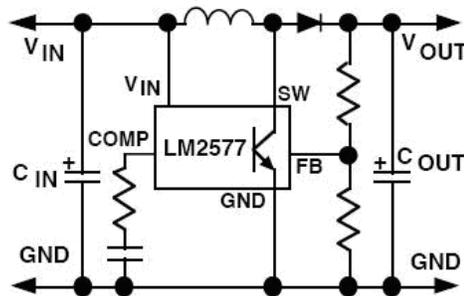


Figura 6.7 Circuito elevador y regulador de voltaje

La fuente de voltaje elevadora consiste en una fuente de alimentación conmutada del tipo *booster*, es decir que mediante la aplicación de una señal modulada en frecuencia a un sistema electrónico conformado por un diodo, un conmutador y un inductor. El funcionamiento es el siguiente: se permite que conmutador conduzca la corriente eléctrica a través del inductor, una vez que se corta la conducción de la corriente eléctrica por medio de abrir el circuito del conmutador la energía que se ha almacenado el inductor se libera a través del diodo hacia el capacitor de salida conectado en paralelo, la energía que se almacena en el inductor eleva el voltaje a fin de mantener el flujo de la corriente que se ha cortado instantáneamente por el conmutador generando un sobretensión que es controlada mediante una señal modulada en frecuencia. Este principio de transformación de la energía es aplicado a numerosos procesos, desde los sistemas de encendido de combustible en los automóviles hasta aviones donde se requiere que los sistemas de alimentación sean de peso contenido.

El diagrama de la fuente elevadora de voltaje se puede ver en la figura 6.8.

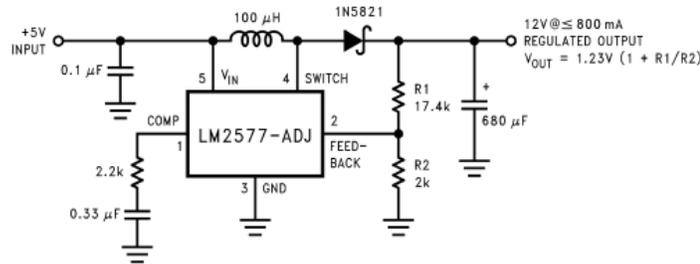


Figura 6.8 Configuración del circuito elevador y regulador de voltaje



Figura 6.9 Imagen que muestra el aspecto real del circuito elevador y regulador de voltaje

La aplicación de éstos sistemas electrónicos tienen la ventaja de reducir notablemente el peso, una sola batería de dimensiones reducidas puede alimentar a todas las partes electrónicas del robot, por otra parte toda la potencia que se requiere para las distintas partes tiene que provenir de esta única fuente de alimentación que debe tener la capacidad de poder proporcionar la suficiente corriente eléctrica para que esta pueda transformarse a diferentes voltajes, con lo que la duración de ésta se ve reducida.

Otra de las características de que debe considerarse es la interferencia que resulta del funcionamiento de la parte motriz que genera armónicos de alta frecuencia que pueden interferir de manera negativa en los sensibles sistemas de control, generando por ejemplo reinicios inesperados. Esto implica que se deben agregar sistemas de filtrado de señales a fin de reducir los efectos mencionados encareciendo y haciendo más complejo el sistema que sería innecesario de haber utilizado sistemas de energía independientes.

En el sistema que se ha implantado en el robot, se puede observar que el sistema de control lo realiza un circuito integrado que se encarga de generar la señal modulada en frecuencia y que el dispositivo conmutador es interno al circuito integrado por lo que solo es necesario agregar unos pocos elementos para hacer que el sistema elevador de voltaje trabaje adecuadamente, este circuito en particular puede entregar una corriente

máxima en su salida de 800 miliamperios lo que lo hace adecuado para la aplicación del robot de laberinto.

Dentro de los cuidados que deben tenerse al utilizar las baterías de litio es no exponerlas a descargas excesivas so pena de dejarlas completamente inutilizables, por lo tanto se deberá colocar un sistema que monitoree la descarga de la batería a fin de evitar la mencionada descarga excesiva.

Para el caso de que se tengan motores que requieran más potencia lo ideal es hacer que cada una de las etapas tengan diferentes fuentes de alimentación, pero manteniendo la tierras eléctricas o puntos de cero potencial común a fin de que las señales de control mantengan la misma referencia.



Figura 6.10 Batería empleada y su ubicación en el robot

La batería que se ha seleccionado es del tipo lipo de 900 mAh que alimenta a todos los elementos del robot, el voltaje de 7.4 volts es elevado por la fuente conmutada que eleva la tensión hasta 9 volts los que son aplicados directamente al controlador de los motores y también, por medio de un regulador de 5 volts se alimenta al resto de los circuitos electrónicos como el microcontrolador y los sensores.

## Capítulo 7

---

### *Arquitecturas de controladores para robots*

#### **7.1 Tipos de Controladores utilizados en robótica**

En la robótica se emplean numerosos tipos de controladores desde grandes equipos cómputo que controlan robots de producción hasta equipos embebidos que realizan una tarea específica con recursos computacionales muy limitados.

##### **7.1.1 Microprocesadores**

Los microprocesadores fueron los primeros dispositivos empleados en robots que requerían hacer procesamiento de información, un sistema con microprocesador consiste en un procesador central y todos los dispositivos necesarios para adquirir información y entregarla, así tenemos que un sistema con microprocesador requiere de memorias, puertos, y dispositivos que le sirvan de interface con el exterior además de la electrónica de control que administre todos los dispositivos.

Un sistema microprocesador no puede ser aplicado tan fácilmente a un robot móvil pues la cantidad de elementos necesarios para tener un sistema funcional requieren de mucho espacio, por lo que quedan descartados para la aplicación en cuestión.

Un sistema con microprocesadores sirve más bien para un sistema de propósito general como una computadora personal donde las tareas para las que se destina son variadas y de diferentes tipos y prioridades.

Una de las grandes desventajas de los sistemas con microprocesadores es que pasa una importante cantidad del tiempo procesando comandos de control lo que reduce la cantidad de trabajo efectivo sobre la información de interés.

Un diagrama de bloque sobre las partes constitutivas de un sistema basado en microprocesador se muestra a continuación

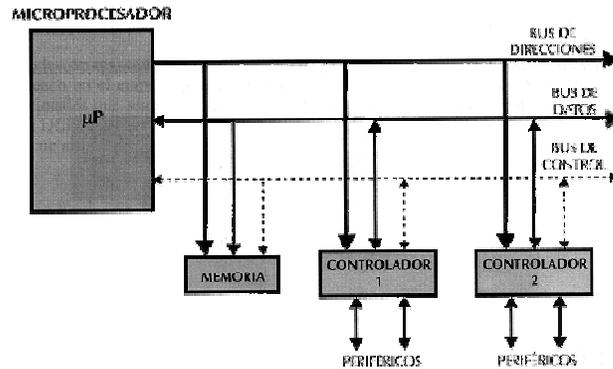


Figura 7.1 Microprocesador y periféricos mínimamente necesarios.

Se puede observar en la figura 7.1 que el microprocesador dedica varias líneas de comunicación y control con las diferentes partes a fin de mantener la coordinación entre los diferentes sistemas como la memoria y los controladores de los distintos periféricos que se necesiten a fin de realizar la tarea que se les ha encomendado en la etapa de diseño.

Desde el punto de vista funcional, un microprocesador es un circuito integrado que incorpora en su interior una unidad central de proceso (CPU) y todo un conjunto de elementos lógicos que permiten enlazar otros dispositivos como memorias y puertos de entrada y salida (I/O), formando un sistema completo para cumplir con una aplicación dentro del mundo real. Para que el sistema pueda realizar su labor debe ejecutar paso a paso un programa que consiste en una secuencia de números binarios o instrucciones, almacenándolas en uno o más elementos de memoria, generalmente externos al mismo.

## 7.1.2 Microcontroladores

Los microcontroladores son sistemas que incluyen en un solo encapsulado todos los elementos de un sistema de control específico, de manera que la aplicación de los sistemas basados en microcontroladores resulta muy adecuada en dispositivos de precio contenido, dimensiones reducidas y que requieran realizar de forma efectiva una determinada tarea, son los dispositivos que se utilizan la mayoría de las veces para la realización de sistemas de propósito específico e embebidos que se estudiarán más adelante.

La figura 7.2 muestra un diagrama esquemático de un microcontrolador que incluye numerosos dispositivos como CCP, timers, ADC, etc.

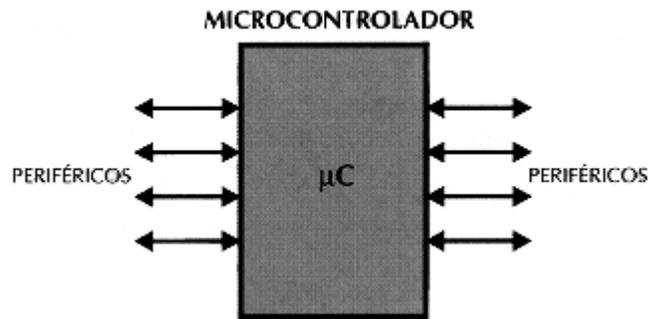


Figura 7.2 Sistema microcontrolador

Los microcontroladores además de tener el sistema mínimo de procesamiento de la información tienen numerosos periféricos integrados cuyas salidas y entradas comparte con los puertos de propósito general, de esta manera tenemos que los microcontroladores incluyen.

#### Puertos de Entrada y Salida

La principal utilidad de los pines que posee la cápsula que contiene un microcontrolador es soportar las líneas de Entrada/Salida (E/S) que comunican al computador interno con los periféricos exteriores. Suelen ser interfaces de señales digitales.

Según los controladores de periféricos que posea cada modelo de microcontrolador, las líneas de E/S se destinan a proporcionar el soporte a las señales de entrada, salida y control.

#### Reloj principal

Todos los microcontroladores disponen de un circuito oscilador que genera una onda cuadrada de alta frecuencia, que configura los impulsos de reloj usados en la sincronización de todas las operaciones del sistema.

Generalmente, el circuito de reloj está incorporado en el microcontrolador y sólo se necesitan unos pocos componentes exteriores para seleccionar y estabilizar la frecuencia de trabajo. Dichos componentes suelen consistir en un cristal de cuarzo junto a elementos pasivos o bien un resonador cerámico o una red R-C.

Aumentar la frecuencia de reloj supone disminuir el tiempo en que se ejecutan las instrucciones pero conlleva un incremento del consumo de energía.

#### Otros periféricos

Cada fabricante oferta numerosas versiones de una arquitectura básica de microcontrolador. En algunas amplía las capacidades de las memorias, en otras incorpora nuevos recursos, en otras reduce las prestaciones al mínimo para aplicaciones muy simples, etc. La labor del diseñador es encontrar el modelo mínimo que satisfaga todos los requerimientos de su aplicación. De esta forma, minimizará el coste, el hardware y el software.

Los principales recursos específicos que incorporan los microcontroladores son:

- Temporizadores o "Timers".
- Perro guardián o "Watchdog".
- Protección ante fallo de alimentación o "Brownout".
- Estado de reposo o de bajo consumo.
- Conversor A/D.
- Conversor D/A.
- Comparador analógico.
- Modulador de anchura de impulsos o PWM.
- Puertas de E/S digitales.
- Puertas de comunicación.

#### Temporizadores o Timers

Se emplean para controlar periodos de tiempo (temporizadores) y para llevar la cuenta de acontecimientos que suceden en el exterior (contadores).

Para la medida de tiempos se carga un registro con el valor adecuado y a continuación dicho valor se va incrementando o decrementando al ritmo de los impulsos de reloj o algún múltiplo hasta que se desborde y llegue a 0, momento en el que se produce un aviso mediante una interrupción la que puede ser atendida o ignorada dependiendo de la habilitación de las interrupciones o de la carga de trabajo del microcontrolador, por ejemplo si la CPU se encuentra dentro de una rutina de atención a interrupción no puede atender una nueva petición de atención a interrupción aún si ésta última tiene mayor prioridad.

Cuando se desean contar acontecimientos que se materializan por cambios de nivel o flancos en alguna de las pines del microcontrolador, el mencionado registro se va incrementando o decrementando al ritmo de dichos impulsos.

#### Perro guardián o Watchdog

Cuando el microcontrolador se bloquea por un fallo del software u otra causa, se pulsa el botón del reset y se reinicia el sistema o bien un microcontrolador funciona sin el control de un supervisor y de forma continuada las 24 horas del día. El perro guardián consiste en un temporizador que, cuando se desborda y pasa por 0, provoca un reset automáticamente en el sistema.

Se debe diseñar el programa de trabajo que controla la tarea de forma que refresque o inicialice al perro guardián antes de que provoque el reset. Si falla el programa o se bloquea, no se refrescará al perro guardián y al completar su conteo provocará el reset.

### Protección ante fallo de alimentación o "Brownout"

Se trata de un circuito que resetea al microcontrolador cuando el voltaje de alimentación (VDD) es inferior a un voltaje mínimo ("brownout"). Mientras el voltaje de alimentación sea inferior al de brownout el dispositivo se mantiene reseteado, comenzando a funcionar normalmente cuando sobrepasa dicho valor.

### Estado de reposo o de bajo consumo

Son abundantes las situaciones reales de trabajo en que el microcontrolador debe esperar, sin hacer nada, a que se produzca algún acontecimiento externo que le ponga de nuevo en funcionamiento. Para ahorrar energía (factor clave en los aparatos portátiles), los microcontroladores disponen de una instrucción especial (SLEEP en los PIC), que les pasa al estado de reposo o de bajo consumo, en el cual los requerimientos de potencia son mínimos. En dicho estado se detiene el reloj principal y se "congelan" sus circuitos asociados. Al activarse una interrupción ocasionada por el acontecimiento esperado, el microcontrolador se despierta y reanuda su trabajo.

### Convertor Analógico/Digital (CAD)

Los microcontroladores que incorporan un Convertor A/D (Analógico/Digital) pueden procesar señales analógicas, tan abundantes en las aplicaciones reales. Suelen disponer de un multiplexor que permite aplicar a la entrada del CAD diversas señales analógicas desde los pines del circuito integrado.

### Convertor Digital/Analógico (CDA)

Transforma los datos digitales obtenidos del procesamiento del computador en su correspondiente señal analógica que saca al exterior por una de los pines.

Este periférico solamente se encuentra en algunas versiones avanzadas de microcontroladores.

### Comparador analógico

Algunos modelos de microcontroladores disponen internamente de un amplificador operacional que actúa como comparador entre una señal fija de referencia y otra variable que se aplica por uno de los pines. La salida del comparador proporciona un nivel lógico 1 ó 0 según una señal sea mayor o menor que la otra.

También hay modelos de microcontroladores con un módulo de tensión de referencia que proporciona diversas tensiones para los comparadores.

### Modulador de anchura de impulsos o PWM

Son circuitos que proporcionan en su salida impulsos de anchura variable. Este periférico resulta especialmente útil en el control de motores de corriente directa ya que permite controlar la velocidad y el torque que puede generar un motor de corriente directa.

Con objeto de dotar al microcontrolador de la posibilidad de comunicarse con otros dispositivos externos se suelen incluir algunos de los siguientes periféricos.

UART, adaptador de comunicación serie asíncrona.

USART, adaptador de comunicación serie síncrona y asíncrona

Puerta paralela esclava para poder conectarse con los buses de otros microprocesadores.

USB (Universal Serial Bus), que es un moderno bus serie para las computadoras.

Bus I2C, que es un interfaz serie de dos hilos desarrollado por Philips.

CAN (Controller Area Network), para permitir la adaptación con redes de conexión multiplexado desarrollado conjuntamente por Bosch e Intel para el cableado de dispositivos en automóviles. En EE.UU. se usa el J1850.

### 7.1.3 PDA

Los PDA *Personal Digital Assistant* (Asistente Digital Personal) son dispositivos de mano originalmente diseñado como agenda electrónica (calendario, lista de contactos, bloc de notas y recordatorios) con un sistema de reconocimiento de escritura.



Figura 7.3 Una PDA IPaq de HP

Hoy en día estos dispositivos, pueden realizar muchas de las funciones que hace una computadora de escritorio (ver películas, crear documentos, juegos, correo electrónico, navegar por Internet, reproducir archivos de audio, etc.) pero con la ventaja de ser portátil.

De esta manera es posible dedicar un PDA al procesamiento de la información requerida en la aplicación de la robótica aprovechando la creciente capacidad de procesamiento de estos dispositivos y sus reducidas dimensiones.

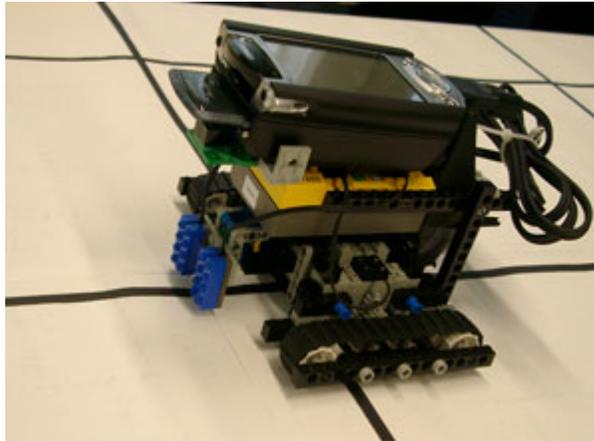


Figura 7.4 Robot controlado por una PDA

Algunas de las características con las que cuentan las modernas PDA son las siguientes.

- Procesadores de más de 500 MHz
- Memorias de varios MB, que para aplicaciones portátiles resultan más que suficientes
- Conectividad alambica e inalámbrica
- Servicio de sistemas operativos que permiten correr aplicaciones de alto nivel con pantallas gráficas inclusive.

Dentro de los sistemas operativos que se utilizan para los sistemas PDA se encuentran

- Palm OS.
- Pocket PC.
- Symbian OS.
- Varias distribuciones de Linux.

#### **7.1.4 Computadoras personales**

Las computadoras personales representan los dispositivos más ampliamente utilizados para el procesamiento de la información. Su popularidad y diversidad de presentaciones las hacen accesibles para la mayoría de las personas.

Mediante técnicas de la teoría de control digital se puede aplicar fácilmente los postulados de la inteligencia artificial.

Las computadoras personales también facilitan el desarrollo y ejecución de varias tareas al mismo tiempo permitiendo lo que se conoce como ejecución multiprocesos, es decir la realización de diferentes tareas que mejoran el comportamiento general del robot, así por ejemplo, un hilo puede dedicarse al procesamiento de la información proporcionada por los sensores mientras que otro puede planear la navegación, mientras que otro hilo se encarga de controlar los actuadores, etc.

Las modernas computadoras personales disponen de recursos que permiten una elevada capacidad de procesamiento que hasta hace algunos años no era posible.

De esta manera se tiene que las limitaciones de los microcontroladores con sus reducidos recursos de hardware se eliminan debido a la creciente cantidad de elementos como memoria RAM, memoria de almacenamiento de programas y datos, la velocidad de procesamiento de los procesadores, los periféricos como la comunicación inalámbrica, etc. Que al ser administrados por sistemas operativos hacen que los servicios sean transparentes para las aplicaciones y los diseñadores.

El avance de la tecnología de las computadoras personales permitirá su mayor aplicación en el campo de la robótica móvil. Por ejemplo la computadora *fit-PC* es una completa computadora con conectividad inalámbrica inclusive, en un tamaño que cabe en la palma de la mano. Esta computadora personal tiene todos los elementos de una computadora personal de escritorio con un procesador Intel ATOM, 1 GB de memoria RAM, disco duro de 80 GB, tarjeta de video integrada que permite la ejecución de aplicaciones de control con todas las ventajas que ofrece una computadora personal.



Figura 7.5 Computadora personal *fit-PC*

### 7.1.5 Sistemas embebidos

Los sistemas embebidos son dispositivos que han sido diseñados para realizar eficientemente una sola tarea bien definida y delimitada.

Algunos robots de propósito específico son los robots industriales que han sido diseñados para labores de manufactura como ensamblado de piezas y soldadura, estos robots solo son útiles para un trabajo específico y se les puede utilizar para otras labores solo dentro de ciertos límites.

Un sistema embebido resulta cuando se tiene un robot que está listo para salir al mercado, como es el caso del robot limpiador Roomba, que se muestra en la figura 7.6.



Figura 7.6 Robot embebido Roomba

## **7.2 Controlador seleccionado**

Considerando la familiaridad con los microcontroladores PIC de Microchip se decidió emplear uno de sus microcontroladores más conocidos, el PIC16F877A, el diagrama de los elementos con que cuenta el microcontrolador se muestra en la figura 7.7.

Los periféricos que se utilizaron para la realización del robot son los siguientes.

- CAD, convertidores analógicos digitales para la lectura de los 4 sensores de distancia.
- CCP para el control de la velocidad de las ruedas.
- USART para depuración.

En la figura 7.7 se muestra todos los elementos con los que cuenta el microcontrolador, además de la cantidad de memoria RAM y ROM.

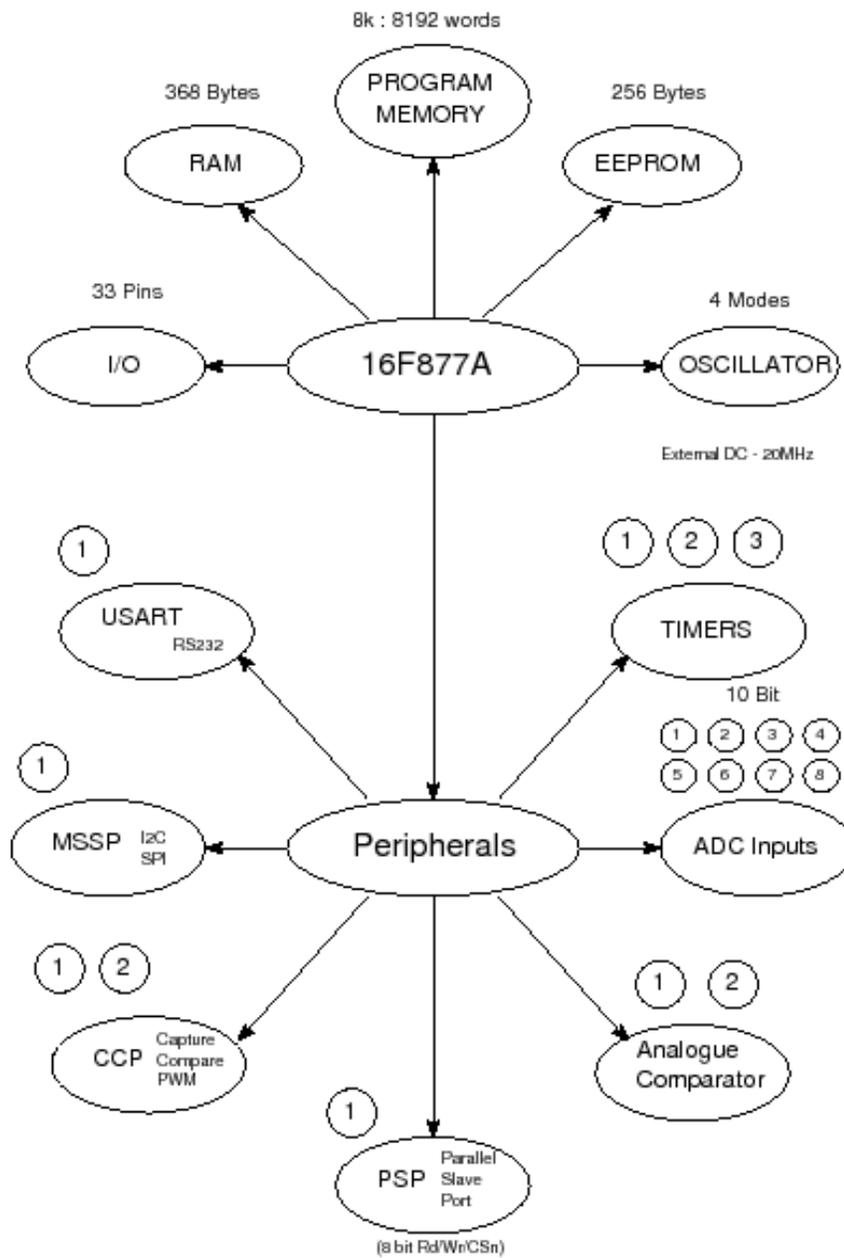


Figura 7.7 Periféricos que incluye el microcontrolador utilizado

## Capítulo 8

---

### ***Análisis de los algoritmos de solución de laberintos***

La solución de laberintos ha sido estudiada por muchos años en el campo de las matemáticas, por lo que existen numerosos algoritmos que pueden ser aplicados.

Un algoritmo es una serie de instrucciones que instruyen paso a paso a una máquina para la solución de un problema específico, la solución en nuestro caso es la ruta que le toma al robot navegar desde el inicio hasta la meta, para lo que requiere conocer información sobre la presencia de las paredes [32].

Aunque existen una gran variedad de algoritmos de solución de laberintos que pueden aplicarse a los robots micromouse, se analizarán tres que resultan especialmente aptos para el robot objeto de ésta tesis, estos son:

Algoritmo de azar o *random algorithm*.

Algoritmo de seguidor de paredes.

Algoritmo de inundación o fill flood algorithm.

#### **8.1 Algoritmo de azar**

Este algoritmo consiste en que el robot toma arbitrariamente la dirección en cada uno de los nodos que corresponden a las celdas que tienen más de una posible dirección [36], de esta manera el robot tienen altas posibilidades de llegar a la meta entre otras ventajas como las que se numeran a continuación:

- No se requiere de mucha capacidad de procesamiento por parte del controlador.
- Se simplifica el diseño del sistema electrónico.
- Al requerir de menos elementos de control se reduce el peso y se pueden colocar sistemas de alimentación de más duración.

Por otro la implementación de este algoritmo tiene las siguientes desventajas:

- Ausencia total de inteligencia.
- No se puede saber en ningún momento la posición u orientación dentro del laberinto.
- Así tampoco el robot sabe en qué momento ha llegado a la meta.
- No se puede estimar el tiempo que le tomará al robot completar la tarea de encontrar la solución del laberinto por lo que puede llevarse más de la cantidad de tiempo límite que se tiene respecto al reglamento de las competencias.

Por las razones anteriores el algoritmo de azar representa una elección poco adecuada.

## **8.2 Algoritmo de seguidor de paredes**

Este algoritmo se basa en la regla de que siguiendo siempre por la derecha o por la izquierda se encontrará invariablemente la salida de una laberinto.

El algoritmo se aplica de la siguiente manera [33]:

Basados en el seguidor de paredes por la izquierda se aplican los pasos en la secuencia que se enlista enseguida:

Paso 1: Checa la presencia de la pared izquierda.

Paso 2: Si la pared izquierda está presente entonces se hace la bandera  $flagl = 1$ , si no está presente, entonces se hace que el valor de la bandera tenga valor 0, esto es  $flagl=0$ .

Paso 3: Si  $flagl = 1$  entonces se pasa al paso 4, caso contrario,  $flagl = 0$  hacer un giro izquierdo de 90 grados.

Paso 4: Comprobar la presencia de la pared frontal.

Paso 5: Si la pared frontal está presente se hace que la bandera  $flagf = 1$ , si no,  $flagf = 0$ .

Paso 6: Si la bandera  $flagf = 0$ , el robot se moverá hacia adelante en línea recta, si la bandera tiene el valor complementario entonces se mueve hacia delante.

Ventajas de este algoritmo

No se necesitan controladores complejos como los procesadores, microcontroladores, DSP, etc.

Pueden utilizarse solo algunos sensores y estos pueden ser tan simples como los detectores mecánicos de contacto.

Se puede simplificar el sistema de control electrónico lo que lo hace menos propensos a fallas.

Suele ser el primer algoritmo de solución de laberintos en la etapa de pruebas ya que permite la solución efectiva de determinados laberintos y permite la depuración de sensores y otros elementos electrónicos para pasar a algoritmos más sofisticados con mejores prestaciones en cuanto a velocidad e inteligencia.

Por el lado de las desventajas tenemos que:

No representa una técnica de inteligencia artificial.

El robot solo resuelve el laberinto, no tiene la habilidad de aprender o reconocer la ruta más corta o que lo lleve lo más rápido posible desde el inicio hasta la meta.

### **8.3 Algoritmo de inundación**

Se basa en la comparación física de que se dejamos fluir agua desde el inicio hasta la meta esta lo hará por la ruta más eficiente que generalmente es el camino de menor distancia desde el punto de inicio hasta la meta.

Ventajas

Este algoritmo puede valerse de la representación matricial de las celdas del laberinto, lo que es factible a su vez representarse eficientemente en la memoria de un sistema digital como una computadora o un microcontrolador. De esta manera el algoritmo de control representará características como la posición y la orientación mediante vectores de números [34].

Desventajas

El algoritmo debe depurarse hasta ser contenido espacio limitado que suelen tener los controladores para sistemas embebidos además debe tenerse en cuenta la cantidad de datos que puede procesar un sistema embebido para permitir la operación en tiempo real que se requiere para tener posibilidades de hacer una puntuación que permita ganar.

El robot utiliza los valores de las distancias para moverse a través del laberinto. El valor de las distancias, que representan que tan lejos se encuentra la celda de destino, se enumera en orden descendente hasta que el robot alcanza el final.

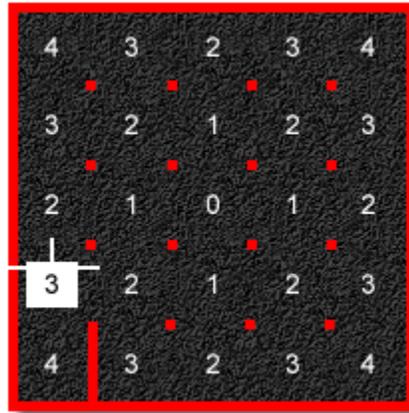


Figura 8.1 Laberinto ejemplo

Mientras el robot encuentra nuevas paredes durante su exploración, los valores de las distancias necesitan ser actualizados. En vez de llenar el laberinto entero con valores, solo se cambia los valores que necesitan ser actualizados. Por ejemplo si el robot se encuentra en la posición que se muestra en la siguiente figura 8.2 y se mueve hacia adelante una celda y descubre una pared.

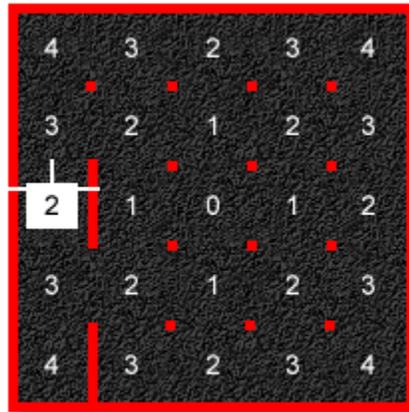


Figura 8.2 Avance del robot en el laberinto

El robot no puede ir a su derecha ni a su izquierda, pero ir hacia adelante o hacia atrás significa aumentar los valores de las distancias, lo que no nos interesa hacer, así que los valores necesitan ser actualizados, cuando nos encontramos con éste escenario, deberemos de seguir la regla:

Si la celda actual no es la celda de destino, este valor deberá actualizarse de la forma: uno más el mínimo valor de sus vecinos abiertos.

En el ejemplo que nos ocupa, el mínimo valor de las celdas vecinas abiertas es 3. Agregando 1 a este valor resulta en  $3 + 1 = 4$ . El laberinto tiene entonces el siguiente aspecto de la figura 8.4.

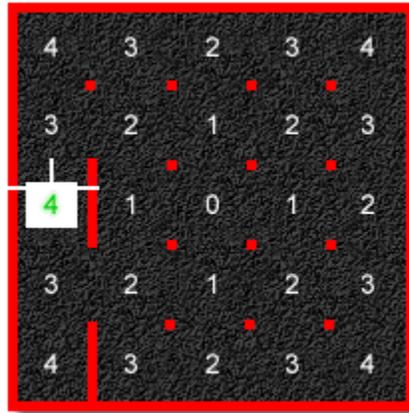


Figura 8.3 Ajuste del valor de las celdas

Hay veces cuando actualizando el valor de las celdas causará que el valor de las celdas vecinas no sigan la regla "1 + el mínimo valor", así que deberán ser actualizadas también. Podemos ver en la figura 8.4 que la celda de arriba y la de abajo tienen celdas vecinas en las cuales el mínimo valor es 2. Agregando 1 es este valor obtenemos el valor correspondiente así que las celdas de arriba y abajo no violan la regla y la actualización de valores se ha realizado de la manera correcta y sin problemas [35].

Ahora que el valor de las celdas ha sido actualizado, el robot puede una vez más seguir por las celdas en orden descendente.

El procedimiento para este algoritmo es como sigue

Actualización del valor de las celdas (si es necesario)

Asegurarse que el stack está vacío

Colocar el valor de la celda actual en el stack

Repetir el siguiente set de instrucciones hasta que el stack este vacío:

{

Leer el valor de la celda en el stack

¿Es el valor de ésta celda 1 + el valor mínimo del valor de sus vecinos abiertos?

No- Cambie el valor de la celda a 1 + el mínimo valor de sus vecinos abiertos y coloque en el stack todas las celdas vecinas abiertas en el stack para ser analizadas

Si- No hacer nada

}

La mayor parte del tiempo el robot es relativamente rápido porque solo actualiza los valores que requieren ser actualizados y así el robot puede hacer su próximo movimiento de forma más rápida.

Cada vez que el robot llega a una celda, el robot debe hacer lo siguiente

- 1) Actualizar el mapa de las paredes
- 2) Actualizar el valor de las distancias (solo en caso de ser necesario)
- 3) Decidir cuál de las celdas tienen el menor valor de distancia
- 4) Moverse hacia la celda vecina que tenga el menor valor de distancia

#### **8.4 Algoritmo de navegación y solución**

El laberinto de la competencia consiste en múltiplos de un cuadrado de 18 cm por 18 cm, pero como las paredes tienen un espesor de 1.2 cm las dimensiones de cada una de las celdas son 16.8 x 16.8, la meta está colocada en uno de los extremos del laberinto al igual que el inicio del laberinto.

La odometría puede realizarse a través del hardware adecuado, por medio de un análisis de las posibilidades que se encuentran disponibles en el mercado local se ha decidido por sistemas adaptados de sistemas encoder, pero estos sistemas tienen la desventaja de no ser muy precisos y de desajustarse frecuentemente [36].

Otra opción sería de optar por motores con sistemas reductores de velocidad que permitan adaptar el torque y con sistemas de medición de la velocidad o mejor aún que puedan cuantificar la distancia de manera confiable.

Debido a la imposibilidad de conseguir motores con las características necesarias se colocaron sensores para poder medir aproximadamente las revoluciones de las ruedas de manera que se pueda tener la medición de la distancia que se ha recorrido. La utilidad de estos elementos se evaluará en las pruebas reales.

Por otro lado la adición de nuevos sensores requiere agregar más elementos electrónicos que puedan adaptar las señales que generan estos, de manera que puedan ser conducidas al controlador que requiere de señales con características específicas de voltaje especialmente.

Se ha seleccionado el algoritmo de la lógica de seguimiento de paredes pues se pudo participar en el Torneo Mexicano de Robótica que se realizó en el ITAM y el reglamento de la competencia micromouse se adaptó para que se utilizara esta metodología de solución.

## Capítulo 9

---

### *Montaje y pruebas del robot*

#### **9.1 Etapas de la elaboración de la parte mecánica**

La primera etapa del desarrollo de robot fue el diseño de la parte mecánica, al ser limitada por las dimensiones del laberinto, y de acuerdo al reglamento para las competencias de robots de laberinto que especifica que el espacio para cada celda es de 16.8 cm por lado por lo que el primer límite en las dimensiones del robot es justamente esta medida pero debe tomarse en cuenta que el robot deberá tener las condiciones de maniobrabilidad y rapidez requeridas en la competencia, de esta manera podemos decir que mientras el robot tenga las menores dimensiones tendrá un mayor margen de maniobrabilidad pero por otro lado mientras más pequeño es el robot se requieren de componentes de menores dimensiones, de difícil manipulación y disponibilidad en el mercado nacional, también la autonomía del robot se ve reducida ya que no se pueden colocar fuentes de energía suficientes para la realización completa de la competencia y de etapa de pruebas previas a la competencia.

Posiblemente los componentes más importantes para la forma de la parte mecánica son los motores, pues estos ocupan la parte central ya que se ha optado por la configuración diferencial, dejando el espacio adecuado para los restantes componentes cuyas dimensiones han sido tomadas en cuenta para la forma y dimensiones finales del chasis.

Se optó colocar los motores y la fuente de alimentación en una base, acoplado por medio de postes de poliéster un placa electrónica controladora de la mismas dimensiones de la base de manera que se tiene una estructura modular parecida a la configuración de un sándwich, con los motores y la batería de litio polímero en la base inferior y la placa controladora que además incluye la fuente de alimentación constituida por un elevador de voltaje y un regulador de voltaje.

Las dimensiones que representan la mejor maniobrabilidad para el robot están contenidas dentro de un cuadrado de 9 x 9 centímetros, pero debido a la disponibilidad de tablas fenólicas de 10 x 10 centímetros se decidió por contener las dimensiones del robot dentro de un cuadrado de estas últimas dimensiones para el controlador electrónico.

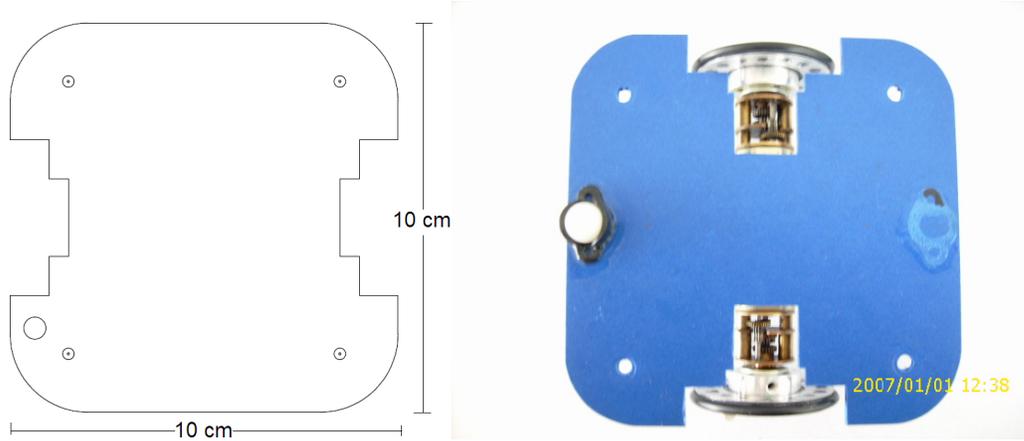


Figura 9.1 Dimensiones y apariencia de la parte mecánica

## 9.2 Montaje de la parte electrónica y ajuste de los sensores de proximidad y distancia.

Se decidió utilizar sensores de distancia infrarrojos con la configuración que muestra la figura 9.2, estos sensores ya han sido utilizados en algunos de los robots que han participado en previas competencias de robots de laberinto. Se puede observar del lado izquierdo la etapa del emisor y del lado derecho la parte del receptor.

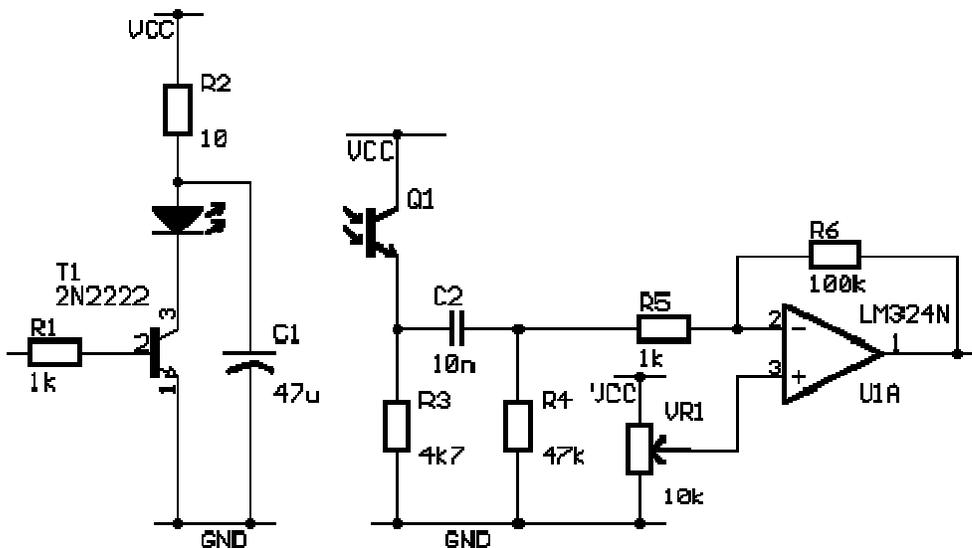


Figura 9.2 Diagrama de uno de los sensores

Por el lado del emisor tenemos un diodo infrarrojo IR333C que es un diodo emisor infrarrojo muy común y sin filtro de luz externa pero que se adapta al receptor PT331C, tiene un ángulo de emisión de aproximadamente 27 grados por lo que cubre un área suficiente como para ser reflejada y recibida por el fototransistor receptor. Por otro lado para que la intensidad de la radiación sea suficiente para compensar las pérdidas por dispersión y absorción de las paredes del laberinto se requiere la aplicación de una corriente eléctrica relativamente intensa por el diodo emisor lo que explica el bajo valor de la resistencia limitadora y además la presencia del capacitor que ayuda a proveer la corriente eléctrica necesaria cuando se activa el transistor y se carga cuando el transistor está en estado de corte que es la mayor parte del tiempo como se explicará en la parte donde se detalla el funcionamiento del sistema completo de sensores.

Por el lado del receptor se tiene como elemento sensor un fototransistor de las características que a continuación se mencionan: 5 mm de diámetro, transparente y con un ángulo de captación de 32 grados como máximo, en número de parte es PT331C.

Los dispositivos C2, R3 y R4 constituyen un filtro de la componente ambiental de luz, que contiene en algún grado luz infrarroja que puede interferir en las mediciones de forma que la lectura de los valores puede ser diferente dependiendo de las condiciones de la luminosidad ambiental, entonces estos elementos electrónicos eliminan la componente ambiental representadas como una corriente constante en el fototransistor, de esta manera el sistema solo es sensible a los cambios de intensidad como por ejemplo cuando el emisor emite luz infrarroja al momento de requerirse la medición de la distancia.

Funcionamiento del sistema de medición de distancia:

En el momento en que se requiere saber la distancia a la que se encuentra el robot de las paredes el sistema de software encargado del control de los sensores emite una señal de activar el emisor infrarrojo correspondiente a través del transistor asociado, señal que sale directamente por uno de los pines del microcontrolador configurado como salida digital, esta señal es llevada a la base del transistor por medio de la resistencia limitadora R1 o equivalente cuando se trata de otro de los sensores, una vez que se ha realizado esto se llama a una subrutina de retardo que espera 10 micro segundos, tiempo que le toma al conjunto sensor hacer una lectura adecuada, una vez que se ha tomado la lectura por medio del convertidor analógico digital se envía la señal de corte al transistor para evitar que el diodo emisor infrarrojo se dañe por causa de la sobre corriente a la que es sometido.

De entre las ventajas con que cuenta este sistema de sensado se tiene la inmunidad a los diferentes ambientes luminosos, la relativa independencia del ángulo de incidencia sobre la superficie de las paredes del laberinto y sobre el ángulo de reflexión con el que la luz reflejada regresa al sensor.

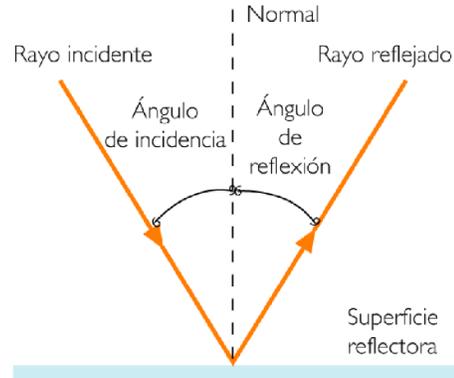


Figura 9.3 Ángulos de incidencia y de reflexión

Las anteriores consideraciones resultan importantes porque los sistemas sensores deben compensar los efectos de dicho fenómeno que produce diferentes valores de distancia dependiendo de los ángulos de incidencia y de reflexión, por lo tanto para evitar estos efectos se coloca como primera etapa el filtro que solo permite el paso de las señales variantes ajustadas al ancho de banda y luego un circuito amplificador con una configuración seguidora que aumenta la sensibilidad a las pequeñas señales que son generadas por fototransistor debidas a la limitada cantidad de energía que es captada por este componente.

Los resultados de las previas pruebas de estos sensores muestran que son aptos para la aplicación de cuantificar la distancia a la que se encuentran las paredes del robot, lo que en conjunto con los restantes sistemas de control le permitirán al robot navegar por el laberinto que constituye el ambiente de desempeño del robot.

Montaje de los sistemas sensores de odometría. Estos sistemas son importantes para la medición de la distancia que se ha trasladado el robot. Debido a que se tienen motorreductores que no cuentan con sistemas de medición de la velocidad o con encoders que permitan conocer el desplazamiento de cada una de las ruedas y por lo tanto también conocer la distancia acumulada del robot.

Los encoders que se tienen implementados tienen las siguientes características. Están directamente montados sobre las ruedas motrices y están conformados por 16 *ticks* por vuelta como se puede observar en la figura 9.4. Como elemento sensor que detecta el cambio de reflectancia entre cada uno de los ticks se tiene un emisor y fototransistor encapsulados con el número de parte QRE1113GR.

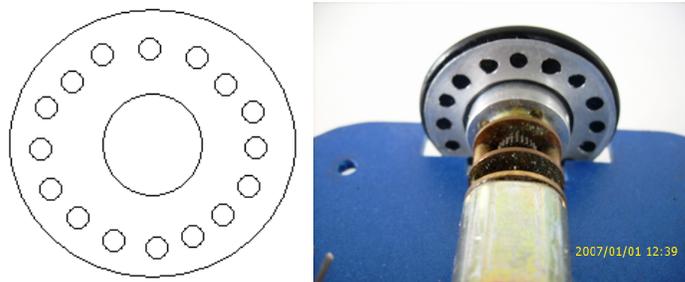


Figura 9.4 Colocación del encoder sobre cada una de las ruedas

Además de los sensores reflectivos se requiere de un circuito acondicionador de señales que adapte los valores analógicos que suelen entregar este tipo de sensores y los coloque en un nivel de tensión que puedan aplicarse directamente a los módulos contadores del microcontrolador empleado, esto implica que la señal que se aplica a estos módulos debe de tener la forma de un tren de pulsos que sea directamente proporcional al número de ticks que pasan por sensor reflectivo, de esta manera se puede conocer la distancia que ha recorrido cada una de la ruedas. El sistema de encoders se puede ver en la figura 9.5.

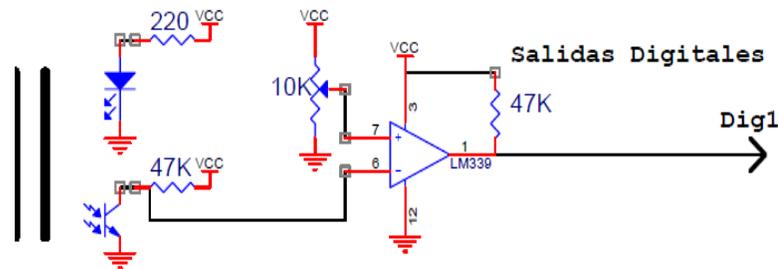


Figura 9.5 Sistema electrónico de acondicionador de encoders

El funcionamiento del circuito electrónico anterior se explica a continuación, se tiene la emisión constante de luz infrarroja por medio del fotoemisor limitado por la resistencia de 220 ohms, esta luz es reflejada en distinta magnitud dependiendo de la reflectividad de la superficie del encoder acoplado a cada una de las ruedas, provocando que el fototransistor varíe su conductividad dependiendo de la cantidad del luz infrarroja reflejada, esta conductividad permite variar el nivel del voltaje que llega a la entrada inversora del amplificador operacional que está configurado como un comparador cuyo nivel de tensión es fijado por la entrada no inversora conectada al divisor de voltaje conformado por el potenciómetro de 10 kilo ohms y como la alimentación es de 5 V entre Vcc y tierra, el voltaje de comparación puede variar desde 0 volts hasta 5 volts, la resistencia a la salida es para proporcionar el voltaje de *pull up* ya que la salida del circuito integrado utilizado (LM339) es de colector abierto.

En cuanto a la etapa de la fuente de alimentación. Debido a que se cuenta con una batería de litio polímero con un voltaje variable entre 6 y 8 volts dependiendo de la carga que tenga, se colocó un circuito elevador y regulador de voltaje que asegura que los motores cuenten con un nivel de voltaje constante lo que facilita el control de los movimientos de las ruedas, de ésta manera se pueden realizar movimientos controlados mediante el tiempo, entre otros medios de control. El diagrama del circuito elevador se muestra en la figura 9.6.

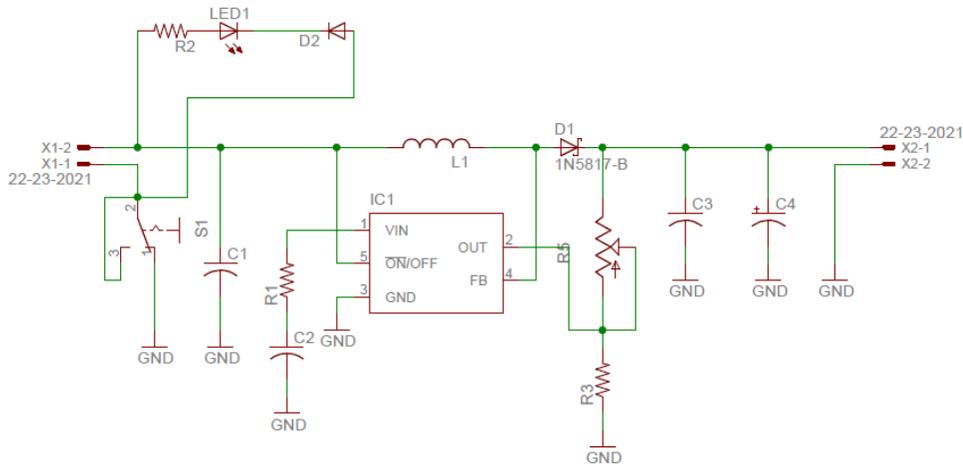


Figura 9.6 Circuito del elevador de voltaje regulado

Este circuito elevador y regulador de voltaje se encuentra justo entre la batería de litio polímero y la entrada de alimentación del sistema robótico general.

La batería que se ha seleccionado es una batería de litio polímero de 7.4 V formada por dos celdas de 3.7 volts cada una y 900 mAh, pero como ya se ha mencionado no mantiene un nivel de voltaje constante durante el ciclo de descarga.

El rango del voltaje de entrada del circuito elevador y regulador va desde los 3.5 hasta los 8.9 volts para la configuración que se muestra, se ha agregado además un circuito monitor del voltaje que consiste en la resistencia R2, el LED1 y el diodo zener D2 de 5.6 volts que hacen que el LED1 permanezca encendido mientras el voltaje de la batería proporcione un voltaje mayor de 6 volts.

El funcionamiento de la fuente elevadora se basa en el circuito integrado LM2577 que es un controlador para fuente conmutada de voltaje que sensa el nivel de voltaje requerido y lo ajusta según lo configuración de los componentes periféricos externos especialmente el potenciómetro R5 en la figura 9.6. La fuente elevadora es una fuente conmutada booster que conmuta el paso de la corriente que pasa a través de un inductor que eleva la tensión, entonces se hace pasar por un diodo de alta velocidad con lo que se obtiene a la salida un nivel de tensión de 9 volts pulsantes y como la frecuencia de esta tensión es relativamente alta se requiere de un capacitor electrolítico de capacitancia contenida (unos 100 microfaradios) para obtener un voltaje que puede proporcionar hasta aproximadamente 0.8 ampere de corriente.

Debido a que la inclusión de la fuente elevadora de voltaje se realizó en una etapa posterior al diseño del resto de los elementos de control y no se muestra en el diagrama que forma parte de la estructura del chasis, sino más bien como un elemento accesorio externo en la parte superior del robot como se puede apreciar en la figura 9.10.

En figura 9.10 se muestran también los apagadores que se requieren como parte de la seguridad, cuando sea necesario apagar completamente todos los sistemas del robot cortan completamente el flujo de la corriente que proporciona la batería. Estos apagadores son comunes e incluso obligatorios en muchas de las categorías del robots como la categoría *@home* de la división Robocup Senior, donde los robots podrían causar daños a las personas si estos salen del control de los diseñadores debido a fallas electrónicas o de inteligencia.

En la categoría de robots micromouse no se establece que los robots tengan estos apagadores pero su implementación resulta ventajosa porque si se tiene por lo menos dos apagadores uno general y otro que aplique solamente a los sistemas motrices se pueden hacer pruebas con la parte del controlador y los sensores sin tener habilitados los motores y depurar los distintos elementos antes de hacer las pruebas el sistema robótico completo así como corregir los posibles errores que se puedan presentar en la etapa de desarrollo o inclusive en la mismas competencias.

Etapa de controlador o *driver* de los motores

Este subsistema está formado por un circuito integrado dedicado a la tarea del controlar los dos motores. Está compuesto internamente por dos puentes H cuyo funcionamiento se ha detallado en el capítulo dedicado a las ruedas y motores.

Para el control de la dirección y la velocidad el circuito integrado tiene tres líneas de control para cada uno de los motores, dos de estas líneas determinan la dirección de giro del eje del motor asociado mientras que la última de las líneas habilita o deshabilita la salida de potencia hacia el motor, esta línea suele ser utilizada como en este caso para controlar la velocidad mediante la aplicación de una señal con modulación de ancho de pulso o PWM.

Existente también la posibilidad de utilizar solamente dos líneas de control, pero para hacer que el eje del motor gire en un sentido se debe hacer que las líneas que controlan la dirección tengan valores complementarios, así que se puede colocar una compuerta lógica que complementa una de las señales y la aplique a la otra línea que controla el sentido de giro del motor pero de esta manera no se cuenta con una de las combinaciones que resulta de utilidad en el comportamiento dinámico del robot, esta es la de hacer que el motor se detenga más rápidamente que solamente cortar el flujo de la corriente hacia los motores, si se produce un cortocircuito en las terminales de alimentación de los motores estos reducen más fácilmente la velocidad y alcanzan más rápidamente el estado de paro.

El sistema electrónico del robot, que no incluye la parte de la fuente elevadora, que como se ha mencionado antes se incorporó en una etapa posterior, se muestra en la figura 9.7.

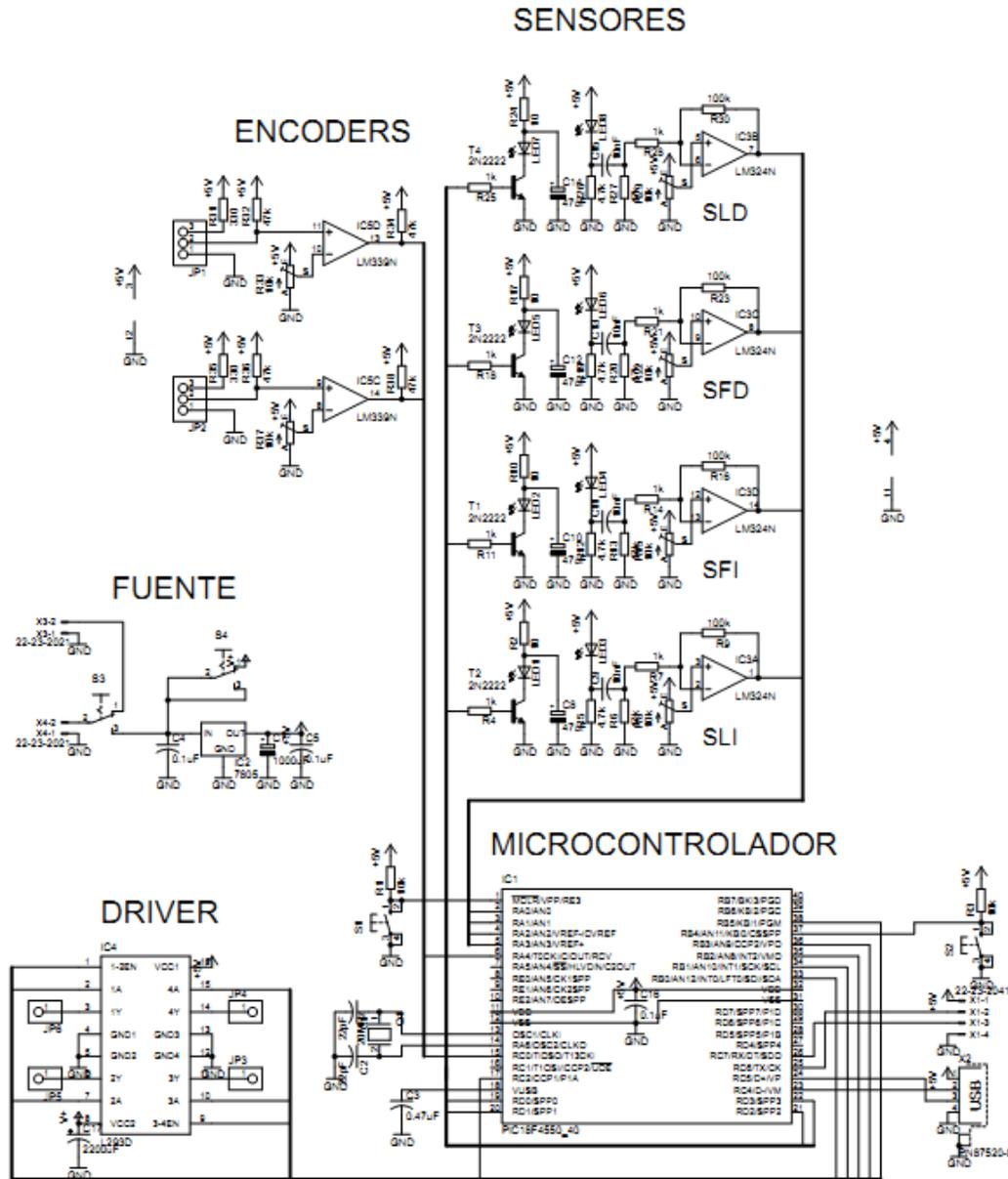


Figura 9.7 Diagrama electrónico general del robot

Se aprecia como elemento controlador a un microcontrolador PIC16F877, con 8 kB de memoria flash, que resulta suficiente para el programa.

Se observa también que se utiliza la comunicación serial asíncrona para poder depurar los programas de control y como vía de comunicación entre el robot y la computadora lo que permite, entre otras cosas, la visualización de los valores de algunas de las variables que guardan datos del proceso.

La placa de circuito impreso forma parte integral del chasis de la estructura del robot, con la adición posterior de la fuente elevadora de voltaje, por lo que las dimensiones de

la altura total de robot se han incrementado pero aún se ajustan a las dimensiones especificadas en el reglamento de las competencias de la categoría de robots de laberinto.

Se puede ver además la inclusión de varios capacitores que reducen el efecto que producen algunos subsistemas al funcionar y que requieren de picos de corriente intensos que pueden afectar sensiblemente el funcionamiento del controlador digital, que a pesar de tener los filtros de desacoplo no pueden proteger de las caídas importantes de tensión que suelen producir el funcionamiento del controlador de los motores y los sensores que requieren de pulsos de corriente elevados.

Una solución más efectiva sería la colocación de todos los elementos sobre la misma placa de circuito impreso y los restantes elementos sobre la placa. La forma más compacta que representa menor peso y que tiene mejor comportamiento dinámico es aquella donde lo placa controladora es parte de la misma estructura que sostiene a los demás elementos como los motores, lo sensores y la batería, pero este enfoque requiere de componentes más pequeños y precisos que suelen ser más caros y de difícil adquisición.

El diagrama electrónico del robot se diseñó en el entorno de desarrollo EAGLE, el esquema de PCB se muestra en la figura 9.8.

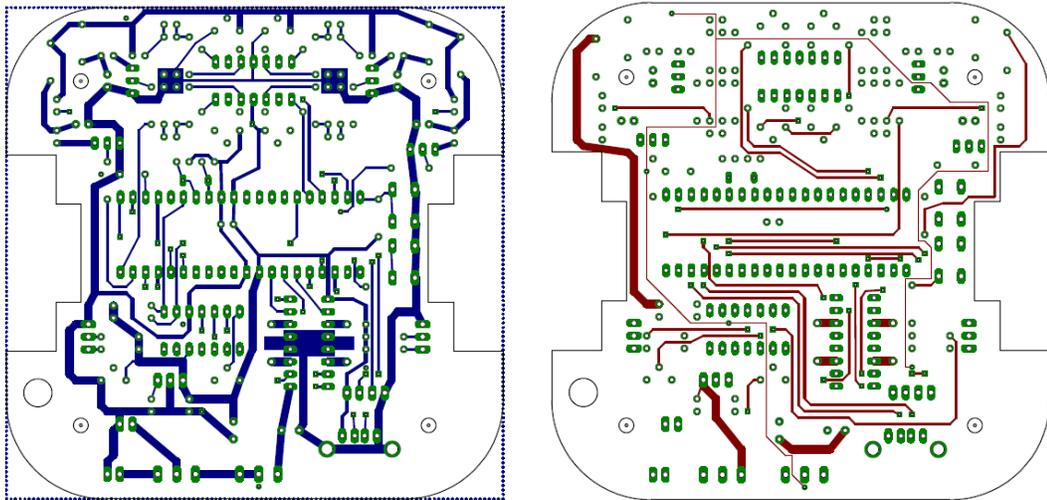


Figura 9.8 Capas inferior y superior de la placa PCB del robot

Se muestran en la figura 9.9 la colocación de los elementos electrónicos:

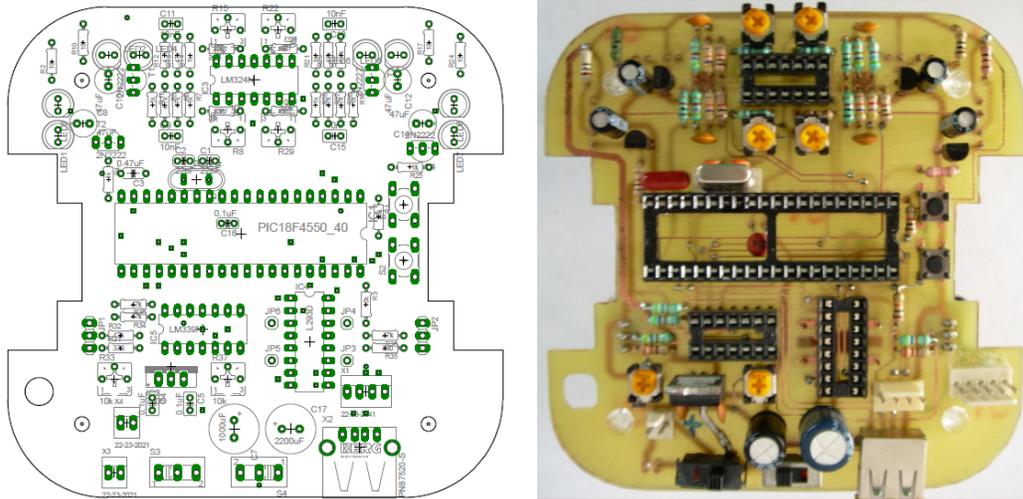


Figura 9.9 Vista superior de la colocación de los elementos electrónicos

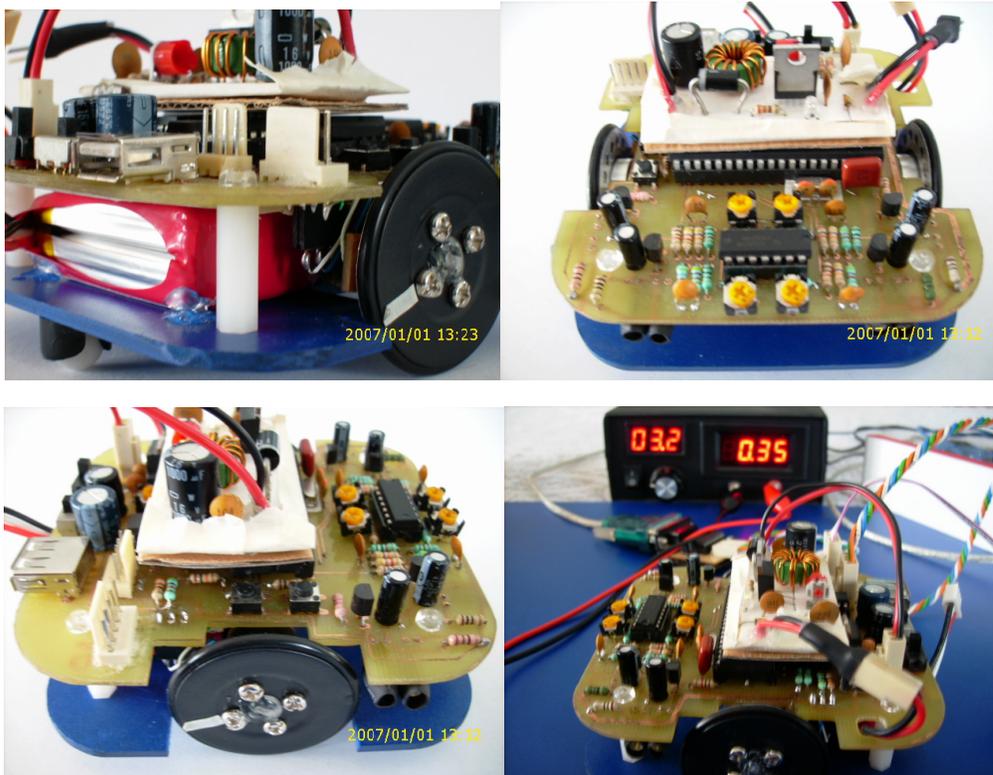


Figura 9.10 Algunas imágenes del robot completamente ensamblado

### **9.3 Codificación del algoritmo**

Se decidió implementar el algoritmo de lógica de seguimiento de la mano derecha o izquierda, especialmente porque se ajusta a la competencia de robots micromouse en el Torneo Mexicano de Robótica 2011.

Algoritmo de la lógica de seguimiento de la pared izquierda o derecha.

Se basa en la regla de que estando dentro de un laberinto se puede encontrar la solución del mismo si se sigue siempre por la derecha o por la izquierda. La aplicación en los robots de laberinto consiste en que este robot deberá sentir la presencia de la pared derecha o izquierda dependiendo si ha programado el algoritmo de la mano derecha o el algoritmo de la mano izquierda.

La aplicación específica de este algoritmo con los pasos detallados, para el caso del seguimiento la pared de se muestra a continuación.

### **9.4 Aplicación específica para el Torneo Mexicano de Robótica**

La siguiente metodología se ha empleado para la aplicación específica en la competencia del Torneo Mexicano de Robótica, en donde se ha modificado el laberinto para hacer posible la aplicación de la metodología de solución de laberintos mediante el seguimiento de paredes.

El primer paso que se ha realizado es la parte de los controladores que establecen la interface entre la parte principal de software controlador y los periféricos que obtienen la información de los sensores de distancia o de la velocidad a la que rotan las ruedas en determinado momento o que generan las señales que controlan a algunos de los periféricos como el módulos CCP que aplican una señal PWM para controlar la velocidad de los dos motores.

El diagrama de la figura 9.7 se puede observar la conexión de cada uno de los periféricos que se utilizan, los cuatro sensores de distancia, los dos sistemas de encoders y las conexiones que se emplean para el control de la dirección y la velocidad de los motores. De esta manera ha sido posible la generación de macros (equivalencias entre instrucciones y etiquetas) que facilitan el modelo de programación.

Tomando en cuenta los puertos que se han utilizado para el control de los motores se hacen las siguientes instrucciones.

```
#define STOP          output_b(0x00)
#define FORWARD      output_b(0x05)
#define BACKWARD     output_b(0x22)
#define LEFTTURN     output_b(0x21)
#define RIGHTTURN    output_b(0x06)
```

Estos macros establecen el sentido de movimiento del robot, para el que el robot se desplace o que tenga un comportamiento dinámico se debe enviar la señal PWM que es generada por medio del código que se muestra a continuación:

```
setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL);
setup_adc_ports(ALL_ANALOG);
setup_ccp1(CCP_PWM);
setup_ccp2(CCP_PWM);
setup_timer_2(T2_DIV_BY_16, 156, 1);
```

Y una vez que se ha configurado esta señal se coloca la que configura el módulo CCP:

```
set_pwm1_duty(PORCENTAJE DE CICLO DE TRABAJO*625/100);
set_pwm2_duty(PORCENTAJE DE CICLO DE TRABAJO *625/100);
```

Considerando que la velocidad de la rueda derecha es controlada por el módulo CCP1 y la rueda izquierda es controlada por el módulo CCP2.

Por el lado de los sensores se utilizan los pines del microcontrolador que se muestran en el diagrama de la figura 9.7.

La activación y lectura de cada sensor se realiza utilizando el convertidor analógico digital por medio de la siguiente función.

```
unsigned int8 ReadSLI(void)
{
    unsigned int8 ADCvalue;
    set_adc_channel(0);
    delay_us(20);
    output_high(PIN_D3);
    delay_us(TIMEsensor);
    ADCvalue=read_adc();
    output_low(PIN_D3);
    return ADCvalue;
}
```

El valor obtenido representa la distancia del robot a cada una de las paredes de la celda en la que se encuentra el sensor. La decisión de la dirección que ha de seguir el robot la determina la presencia de las paredes de la celda en que se encuentra en ese momento. Esta función determina la presencia de las paredes por medio al hacer las llamar a las funciones de lectura de los sensores, luego hace la comparación con un valor que representa la presencia o no de las mismas y regresa un valor de 8 bits.

La función que comprueba la presencia de las paredes es la siguiente:

```

unsigned int WallCheck()
{
    //walls es una variable entera no signada que representa la presencia de las paredes
    //es equivalente a "paredes"
    unsigned int SLI, SFI, SFD, SLD, walls=0;
    SLI=ReadSLI();
    SFI=ReadSFI();
    SFD=ReadSFD();
    SLD=ReadSLD();
    if(SLI<WallExist) walls = walls | 8;
    if(SFI<WallExist || SFD<WallExist) walls = walls | 6;
    if(SLD<WallExist) walls = walls | 1;
    return walls;
}

```

Ya que se tiene la variable que representa las paredes de cada una de las celdas se llama a la función que decide el próximo movimiento, específicamente se llama a esta función cuando se detecta que se ha llegado al centro de cada una de las celdas, este control se hace tomando como base de tiempo.

La función correspondiente es la siguiente:

```

void RightHand()
{
    Forward_();

    if(ReadSFI)<35 || ReadSFD)<35)
    {
        TurnRight90();
        TurnRight90();
    }

    else
    {
        Forward_();

        if(ReadSLD)>100 || ReadSLI)>100)
        {
            unsigned int wall;
            Forward_();
            delay_ms(TimeToReachCenter);
            wall = WallCheck();
            switch(wall){
                case 6 : ToRightCell(); break;
                case 14: ToRightCell(); break;
            }
        }
    }
}

```

```

    case 8 : ToRightCell(); break;
    case 0 : ToRightCell(); break;
    case 7 : ToLeftCell() ; break;
    case 1 : Forward_() ; break;
    case 15: Turn180() ; break;}
}

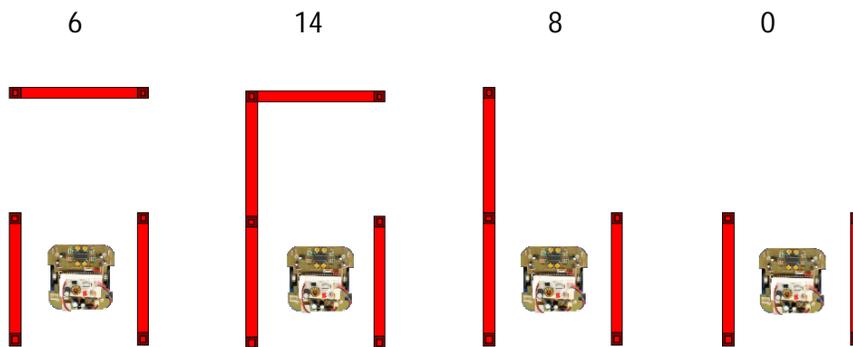
else Avoid();
}
}

```

Los valores que regresa la función WallCheck() corresponden a la configuración de las paredes, este valor está dado por medio de la variable *wall*, luego esta variable es procesada en un *switch case* que determina la siguiente función que será llamada como próximo movimiento que realizará el robot. Cada una de la funciones es controlada mediante tiempo porque se tiene una fuente de voltaje constante que permite que los motores tengan un comportamiento conocido.

Los posibles valores que tomará la variable *wall* corresponde a las combinaciones de la presencia de las paredes siguiendo la siguiente lógica de movimientos (moverse hacia...)

paredes:



Siguiente movimiento:

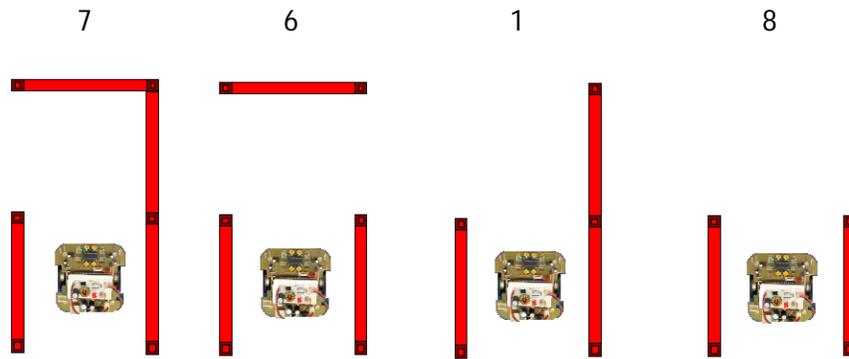
Derecha

Derecha

Derecha

Derecha

paredes:



Siguiente movimiento:

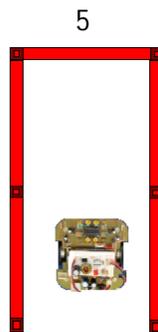
Izquierda

Derecha

Adelante

Derecha

paredes:



Siguiente movimiento:

Gira 180 grados

Figura 9.11 Movimiento del robot en las intersecciones

Cuando el robot pasa de una celda a otra utiliza la función `Avoid()` que se encarga de llamar a las funciones de lectura de los sensores laterales, una vez que se tiene los valores de las distancias de estos sensores se introducen de manera diferencial a los controladores de la velocidad por medio de las funciones que controlan las señales PWM para cada uno de los motores.

```
void Avoid()
{
  unsigned int SLI, SLD;
  SLI=ReadSLI();
  SLD=ReadSLD();
  if(SLI<BIAS && SLD<BIAS){
    set_pwm1_duty((BIAS-SLD)*(625/100));
    set_pwm2_duty((BIAS-SLI)*(625/100));
  }
  else
  {
    set_pwm1_duty(50*625/100);
    set_pwm2_duty(50*625/100);
  }
  FORWARD;
  delay_ms(TIMEms);
}
```

Si el robot se encuentra a la misma distancia de las paredes su velocidad es máxima hacia adelante, si se desvía hacia cualquiera de los dos lados entonces hace las correcciones necesarias que le lleven de nuevo hacia el medio de las celdas del laberinto.

### ***9.5 Software necesario para cargar y ejecutar el programa controlador.***

Para la edición del código se ha empleado el compilador CCS para microcontroladores PIC, también se utilizó el simulador PROTEUS para depurar algunos de los componentes como la parte de los sensores y la configuración del generador de señales PWM para el control de la velocidad de los motores. Para cargar el programa compilado al microcontrolador se utilizó el programador de código libre GTP USB LITE SUMMER.

## 9.6 Pruebas del robot en el Torneo Mexicano de Robótica

Las pruebas más importantes realizadas en el robot se llevaron a cabo en el Torneo Mexicano de Robótica (TMR 2011) realizado en el Instituto Tecnológico Autónomo de México ITAM.

La pista fue modificada para ser resuelta por medio de las técnicas de lógica de seguimiento de paredes, la pista se muestra en la figura 9.12.

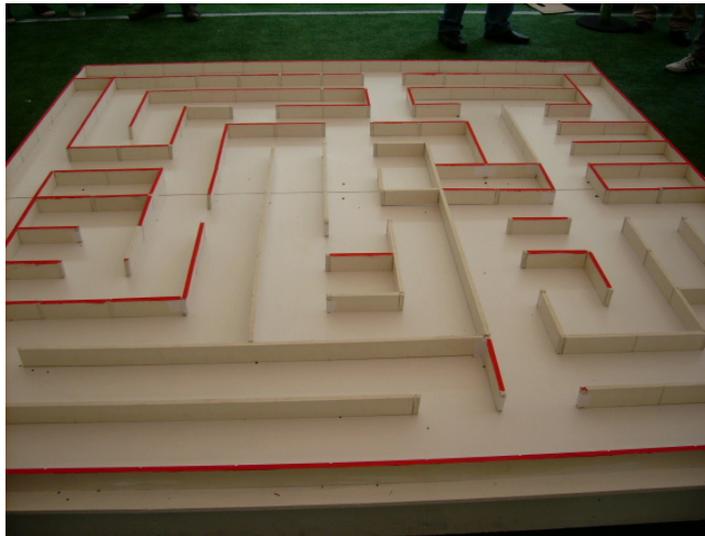


Figura 9.12 Laberinto micromouse para la prueba en el TMR 2011

Este laberinto fue construido con materiales diferentes a los utilizados en las competencias estándares, que son como los que se muestran en la siguiente figura, y con los cuales se hicieron las pruebas preliminares, las diferencias principales estuvieron en la reflectividad de las superficies de las paredes y la enorme variación de esta característica de una parte de laberinto hacia otra, lo que no se apreciaba a la vista de ojo humano pero que era detectada por los sensores del robot, tomando en cuenta el comportamiento reiterado del robot en ciertas partes identificadas del laberinto, situación además agravada por los efectos de la luz ambiental incidente.

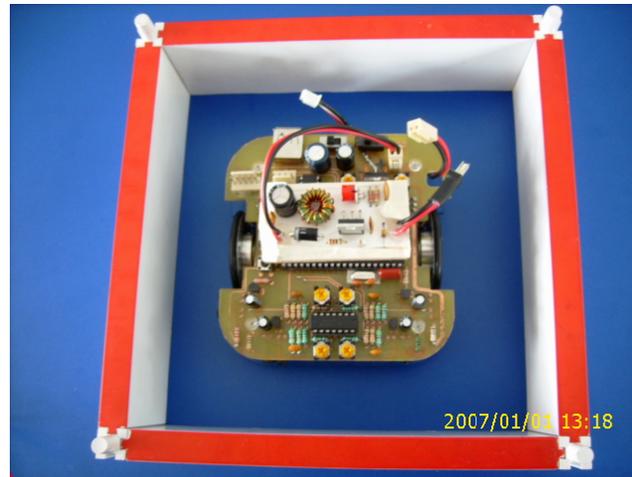


Figura 9.13 Muestra de una de las celdas estándares para pruebas micromouse

Aún con las condiciones de luz ambientales poco favorables el robot propuesto se desempeñó de manera notable de entre todos los robots participantes (véase la figura 9.14)

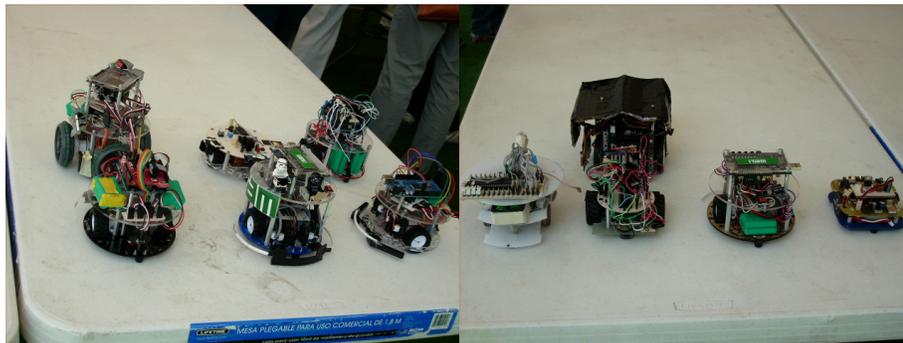


Figura 9.14 Algunos de los robots participantes en el TMR micromouse

Es importante mencionar que el robot, a pesar de las altas probabilidades de obtener un excelente resultado en la competencia presentó problemas electrónicos que le impidieron participar en la última etapa de la eliminatoria, a la que tenía acceso al puntuar satisfactoriamente en las etapas eliminatorias previas.

## Capítulo 10

---

### *Análisis del desempeño del robot*

#### *10.1 Pruebas del robot propuesto*

Las pruebas se han realizado en laberintos con las especificaciones que establecen las reglas, pero debido a la gran cantidad de elementos que se requieren para armar un laberinto oficial se ha optado por hacer las pruebas en un laberinto reducido, de ésta manera se pueden probar todos los elementos del robot como un sistema único, de los resultados de éstas pruebas se puede inferir el comportamiento que tendrá en un laberinto de las dimensiones establecidas en las competencias.

La prueba más importante es la competencia en un torneo real, por lo que el robot deberá ajustarse a las nuevas reglas como ha sucedido en el Torneo Mexicano de Robótica donde se han modificado a fin de hacer la implementación de los robots y el software más accesible.

Análisis de los resultados obtenido en el torneo mexicano de robótica.

Para esta prueba se ha modificado el reglamento de competencia con las características que se mencionan a continuación. Se permite que el robot pueda resolver el laberinto mediante el algoritmo de la lógica de seguimiento de paredes ya sea derecha o izquierda, para lo que se ha modificado el laberinto en cuanto a la colocación de la meta. Además de no contener zonas del laberinto que pudieran causar que los robots entraran en un ciclo del cual no pudieran salir.

Las restantes características se han mantenido invariantes. Cada robot tiene derecho a tres intentos con un máximo de cinco minutos.

Una de las características destacables es la habilidad del robot de desplazarse por la parte central de las celdas además de hacer giros precisos gracias a la fuente de alimentación constante que permite controlar la potencia que se aplica a los motores por medio de señales PWM.

Sin embargo en algunos momentos el robot se acercó demasiado a las paredes laterales o la pared de enfrente, así resulta necesaria la inclusión de los sensores de contacto que funcionarían en el momento en que el robot se acercara demasiado a las paredes del laberinto, en este momento debería entrar un estado de control que retorne al robot al centro de la celda para que pueda retomar la navegación del laberinto.

## 10.2 Características de los robots de laberinto reales

Como parte de los elementos de comparación se deben tomar en cuenta los robots que participan en las numerosas competencias que se llevan a cabo en algunos países que tienen especial interés en este tipo de robots como el Reino Unido y Japón. En estos países los robots tienen desempeños destacables producto del tiempo de investigación que han invertido (treinta años aproximadamente) y de los componentes que suelen estar en los mercados locales, inclusive se han creado competencias variantes como *half size micromouse* en donde el número de celdas se incrementa al doble manteniendo las dimensiones del laberinto de 16 x 16 celdas es decir 32 x 32 celdas, éste caso de debe diseñar y construir un robot que sea a la vez pequeño, inteligente, autónomo y rápido, estos robots requieren de una construcción compleja con componentes precisos que solamente pueden encontrarse en los mercados estadounidense, europeo y japonés.

Así estos robots suelen resolver el laberinto, es decir encontrar la solución de manera eficiente mediante algoritmos que provienen de técnicas de inteligencia artificial y una vez que se ha solucionado el laberinto navegar desde el inicio hasta la meta en aproximadamente en segundos, el record mundial está en este momento en 4.766 segundos, este robot micromouse es llamado Tetra y se obtuvo el record en la competencia *Japan Micromouse Contest*.

La configuración del chasis de estos robots suele variar de la forma tradicional e innovar en configuraciones que presentan características ventajosas en cuanto al desempeño general del robot como lo presenta el robot Tetra poseedor del record mundial, se puede apreciar en la figura 10.1.

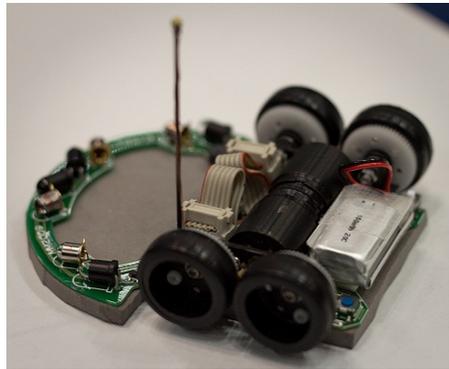


Figura 10.1 robot Tetra poseedor del record mundial

Se creía hace algunos años que la tarea que tiene que realizar este tipo de robots estaba resuelta y que ya no resultaba de interés pero se ha demostrado en los recientes años que la mejora de estos robots puede representar una importante fuente de tecnologías que pueden aplicarse a diversas áreas como el sector automotriz entre otras, además del desarrollo de nuevos sistemas sensores para la detección de obstáculos que junto

con los algoritmos de sensado de éstos robots pueden aplicarse a numerosos dispositivos que requieran de sensar de manera eficiente para los propósitos que cada uno este diseñado.

### ***10.3 Comparación del comportamiento, tiempos de respuesta y eficiencia de la solución del laberinto***

Debido a que se cuenta con una fuente de alimentación constante se puede estimar los tiempos que le toma al robot realizar los distintos movimientos que son:

\*Rotaciones de determinados ángulos, 90 y 180 especialmente.

\*Traslación de una celda hasta otra.

Una vez que se tienen los tiempos se puede hacer una comparación de los diferentes algoritmos para decidir la eficiencia de los distintos algoritmos en el caso particular que nos ocupa.

En el caso específico de la competencia de Laberinto micromouse del Torneo Mexicano de Robótica hubo una adaptación del tamaño del laberinto que en vez de ser de 16 x 16 fue de 13 x 13 y además de que se permitió la aplicación de la técnica de seguimiento de paredes por lo que los algoritmos debieron ser adaptados.

Sin embargo solo se muestra el algoritmo de seguimiento de paredes pues fue el único que pudo ponerse a prueba en el Torneo Mexicano de Robótica en la primera parte de la competencia pues se presentaron problemas técnicos antes de la competencia final que impidieron al robot competir a pesar de la tener las cualidades para poder ganar la competencia.



## Capítulo 11

---

### *Conclusiones*

Ponderando los resultados que se han obtenido de las diversas pruebas a los que se ha sometido el robot, tomando en cuenta la competencia del Torneo Mexicano de Robótica principalmente se tienen los resultados siguientes:

Se debe poner especial énfasis en la selección de los sensores pues estos determinarán la habilidad del robot para obtener la información precisa de las paredes del laberinto y de ésta manera tener los elementos necesario que permitan al algoritmo controlador dar órdenes precisa y exactas para que el robot tenga el comportamiento adecuado.

Es importante señalar la relevancia que tienen los sensores y la confiabilidad que puedan ofrecer, tomando en cuenta la experiencia con los sensores que se probaron y se incluyeron en el robot se obtiene que los sensores deben tener las siguientes características:

Inmunidad a la luz ambiental, especialmente la componente de la luz infrarroja y a los distintos tipos de luz. Por lo que los sensores deben seleccionarse de manera que incluyan filtros de luz o que incluyan elementos electrónicos que eliminen el efecto de ésta luz. O bien puede optarse por elementos sensores integrados que incluyen todos los dispositivos para hacer lecturas relativamente confiables como los sensores comerciales GP2D120XJ00F 4-30 cm de la marca Sharp.



Figura 11.1 Sensor de distancia GP2D120XJ00F

Al momento de diseñar el robot micromouse objeto de ésta tesis no se tenían en el mercado estos sensores pero en éste momento ya se encuentran disponibles en la tiendas Sandorobotics y Robodacta, por lo que ya es una posibilidad tangible para el desarrollo de versiones posteriores como parte de las mejoras del robot.

También ya se ha mencionado que se colocaron sistemas de encoders que sin embargo no se utilizaron debido a las enormes variaciones que presentaban y a la poca exactitud y precisión. En las mejoras que se proponen se deberá tener un sistema con encoders precisos y confiables, con esto se podrá crear un proceso que controle la navegación de una celda a otra y así informar al proceso central de la ubicación y orientación en el laberinto en todo momento para decidir el siguiente movimiento de ha de realizar el robot.

Se requiere de un componte adicional para saber la orientación del robot en todo momento, este es una brújula electrónica o compás o giroscopio, suelen ser caros pero que agregan al robot el potencial de poder implementar comportamientos más sofisticados. Algunos ejemplos de estos son HMC6352 y Philips KMZ51 que se muestran en la figura 11.2.

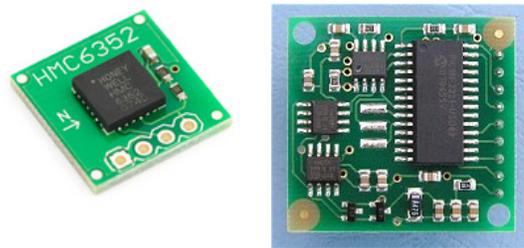


Figura 11.2 Ejemplos de giroscopios

Siguiendo con las mejoras propuestas se concluye que la mejor estructura es la que fusiona el chasis con el circuito impreso con todos los elementos del robot.

Se concluye en cuanto a la fuente de alimentación que se debe mantenerla constante y regulada con las siguientes mejoras:

Debe tener la capacidad de proporcionar la tensión constante para el funcionamiento de todos los elementos del robot, además de proveer la corriente necesaria para los dispositivos que requieren picos de corriente muy elevados como los motores y los sensores de distancia, esta corriente puede ser proporcionada por capacitores electrolíticos instalados cerca de estos dispositivos que junto con conductores del calibre adecuado pueden reducir los efectos sobre los demás componentes (caída momentánea del nivel de voltaje) son especialmente sensibles como los microcontroladores y en general todos los dispositivos digitales, también se recomienda la colocación de capacitores cerámicos de 0.1 microfaradios los más cercano posible a los pines de alimentación de estos circuitos.

La comparación del comportamiento del robot de laberinto (robot prototipo) que se ha construido en este trabajo con el comportamiento de los robots que participan en las competencias más importantes a nivel mundial muestra que los movimientos individuales realizados por el robot prototipo se asemejan en cuanto a precisión y exactitud a los movimiento que realizan los robots de dichas competencias.

Una de las conclusiones más importantes es la necesidad de contar con una plataforma precisa y exacta que pueda obtener la información adecuada del entorno y que pueda responder a los comandos que la parte de software le indique. Una vez que se cuenta con la información precisa de las paredes y de la distancia a la que se encuentran, la distancia que el robot ha navegado desde el inicio hasta su posición actual y la habilidad de determinar en qué celda del laberinto se encuentra lo que implica detectar o asumir cuando pasa de una celda a otra, capacidad que depende de la odometría y de algunos sensores como el giroscopio, entonces se pueden aplicar los algoritmos que decidirán la dirección que ha de tomar el robot y mediante otro algoritmo encontrar la solución del laberinto cuando se tenga la información suficiente.

El robot que se ha diseñado y construido tiene el potencial para competir de acuerdo a los reglamentos de las competencias.

El diseño e implementación del robot me ha exigido aprender nuevas habilidades y adquirir nuevos conocimientos que a continuación enlisto.

Conocimiento de numerosos tipos de sensores, su utilización, funcionamiento, aplicación e inclusive en algunos casos el diseño de algunos de éstos sensores y las ventajas y desventajas de los mismos.

El aprendizaje de los populares microcontroladores PIC y de las herramientas para compilar y programarlos, la comprensión y capacidad de diseñar, depurar y realizar sistemas embebidos, sistemas que resultan de enorme aplicación comercial y se espera que en el futuro cercano estos dispositivos tengan en papel fundamental en la electrónica de consumo, industrial y médica inclusive como dispositivos que realicen alguna función específica dentro de las personas, etc.

Finalmente espero que este trabajo resulte útil a las personas que estén interesadas en este tipo de robots o que resulte en el primer paso para la entrada en el gratificante campo de la robótica que tanto potencial tiene para el desarrollo tecnológico de México.

### ***11.1 Propuesta de mejoras y trabajo futuro***

Debido al desempeño del robot en las pruebas del TMR, se considera que el robot cuenta con los elementos necesarios para ser competitivo, en futuras versiones del robot se deberá compensar los defectos encontrados en esta primera versión, estas mejoras principalmente se refieren a la construcción de robot con motores con encoders que permitan medir la distancia que recorre el robot para que tenga información confiable para navegar por el laberinto, además se deberá mejorar el sistema microcontrolador a uno que tenga más memoria de programa como los controladores de la serie Orangután de la marca Pololu, o a controladores que permitan el procesamiento paralelo, estos controladores tienen además la posibilidad de ejecutar sistemas operativos que controlen los diferentes procesos que trabajando de forma

cooperativa y paralela hagan que el robot pueda implementar comportamientos complejos.

Por otra parte se requieren de más sensores que obtengan más información de las variables para que el controlador pueda ordenar a los respectivos actuadores movimientos más precisos.

Las competencias representan una de las actividades más importantes que pueden interesar a los estudiantes y fomentar cualidades fundamentales para el desarrollo profesional, como el trabajo en equipo debido a la convergencia de disciplinas de las diferentes ingenierías, además promueven la investigación y la solución creativa a problemas muy afines a los problemas a los que se enfrentan los ingenieros profesionales.

Espero que este trabajo resulte de utilidad para todos los interesados en el apasionante mundo de la robótica así como para provocar el interés en la profundización por medio de la investigación.

## **Referencias**

- [1] Review of Mobile Robot COIDpetitions. Thomas Briunl. The University of Western Australia, Nedlands. Perth WA 6907. Australia
- [2] Research Relevance of Mobile Robot Competitions. Thomas Braunl. IEEE Robotics and Automation Magazine. December 1999.
- [3] MICROMOUSE MINI-PROJECT. Niall O’Keeffe. Embedded Systems.
- [4] Programación de Robots Móviles. José M. Cañas, Vicente Matellan, Rodrigo Monrúfar. Universidad Rey Juan Carlos, España. Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica, México.
- [5] MY EXPERIENCE IN PROGRAMMING AVR MICROCONTROLLER USING WINAVR/AVRGCC. BIBIN JOHN
- [6] Formula Flowcode User's manual. Guide to getting started
- [7] MicroMouse Design The Intellimouse Explorer. Viola Fucsko, Bijan Houle, Henis Mitro, Mikel Olson, 2005
- [8] 2006 IEEE Region 1 Student Conference Micromouse Competitions Rules
- [9] Senior Design Micromouse. Faton Avdiu, Andy Zhou, Redwan Ahmed, Emmanuel Hereira, Allen Gutierrez, Mohammad M. Hossain. City College of New York – CCNY
- [10] Robots de Laberinto. Díaz Collazo, Adrián Marcelo; Echeandía Sánchez, Carlos; Espejo Gómez. Víctor; García Castilla, Fernando; Gude Rodríguez, Isaac; Lázaro Rubio, Carlos; Muñoz Babiano, Federico; Pérez Couso, Alberto. Universidad de Alcalá
- [11] CONSTRUCCIÓN DEL MICROBOT: Estructura mecánica y Motores. Andrés Prieto-Moreno Torres
- [12] Theseus: A Maze-Solving Robot. C. Scott Ananian and Greg Humphreys. . Department of Electrical Engineering at Princeton University. May 1997
- [13] Micromouse Handbook. Tak Auyeung, Ph.D. 2005
- [14] Programación de Robots Móviles. José M. Cañas, Vicente Matellan, Rodrigo Monrúfar. Universidad Rey Juan Carlos, España. Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica, México.
- [15] MICROMOUSE MINI-PROJECT. Niall O’Keeffe. Embedded Systems.
- [16] Laberinto. Xavier Ugarte Pedrero. España License de Creative Commons.
- [17] Micromouse Handbook. Tak Auyeung, Ph.D. 2005
- [18] Mobile Robot Positioning & Sensors and Techniques J. Borenstein, H.R. Everett, L. Feng, and D. Wehe. Invited paper for the Journal of Robotic Systems, Special Issue on Mobile Robots. Vol. 14 No. 4, pp. 231 – 249.

- [19] Using infrared sensors for distance measurement in mobile robots. G. Benet, F. Blanes, J.E. Simón Pérez. Departamento de Informática de Sistemas, Computadores y Automática, Universidad Politécnica de Valencia, P.O. Box 22012, 46080 Valencia, Spain. 2002.
- [20] Robots de Laberinto. Díaz Collazo, Adrián Marcelo; Echeandía Sánchez, Carlos; Espejo Gómez . Víctor; García Castilla, Fernando; Gude Rodríguez, Isaac; Lázaro Rubio, Carlos; Muñoz Babiano, Federico; Pérez Couso, Alberto. Universidad de Alcalá
- [21] MICROMOUSE MINI-PROJECT. Niall O'Keeffe. Embedded Systems.
- [22] MicroMouse Design The Intellimouse Explorer. Viola Fucsko, Bijan Houle, Henis Mitro, Mikel Olson, 2005
- [23] [www.microchip.com](http://www.microchip.com)
- [24] Programación de Robots Móviles. José M. Cañas, Vicente Matellan, Rodrigo Monrúfar. Universidad Rey Juan Carlos, España. Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica, México.
- [25] A Method for Solving Arbitrary Wall Mazes by computer. Ivan E. Sutherland. IEEE Transactions on Computers. Vol. C-18, No12, December 1999
- [26] Algorithms for Micro-mouse. Manoj Sharma, Kaizen Robeonics. 2009 International Conference on Future Computer and Communication
- [27] Robotic Maze Solvers. Marissa Justan, Ph.D; Roger Reyes; Russel Diona, AMA University, AMA Computer College-Makati, AMA Education System
- [28] Robot Path Planning for Maze Navigation. Dimitris C. Dracopoulos; Brunel University; Department of Computer Science. London, UK
- [29] Micromouse Handbook. Tak Auyeung, Ph.D. 2005
- [30] MicroMouse Design The Intellimouse Explorer. Viola Fucsko, Bijan Houle, Henis Mitro, Mikel Olson, 2005
- [31] Integration of Micromouse Project with Undergraduate Curriculum: A Large-scale Student Participation Approach. Ning Chen, Hwang Chung, Member, IEEE, and Young K. Kwon, Member, IEEE. IEEE TRANSACTIONS ON EDUCATION, VOL. 38, NO. 2. MAY 1995
- [32] Review of Mobile Robot COIDpetitions. Thomas Briunl. The University of Western Australia, Nedlands. Perth WA 6907. Australia
- [33] CONSTRUCCIÓN DEL MICROBOT: Estructura mecánica y Motores. Andrés Prieto-Moreno Torres
- [34] Formula Flowcode User's manual. Guide to getting started
- [35] Laberinto. Xabier Ugarte Pedrero. España License de Creative Commons.

## ***Código utilizado para el Torneo Mexicano de Robótica***

Código utilizado en robot que participó en el Torneo Mexicano de Robótica, que se realizó del 4 al 6 de mayo de 2011 en el Instituto Tecnológico Autónomo de México, que le proporciona al robot el comportamiento de solución de laberinto mediante la técnica de la lógica de seguimiento de la mano izquierda o derecha. El reglamento para esta competencia cambió para el efecto de facilitar la solución del laberinto.

### main.c

```
#include <header.h>
void main(void)
{
    configura();
    set_pwm1_duty(626);
    set_pwm2_duty(625);
    FORWARD;
    delay_ms(20);

    //if(input(PIN_E0))
    //    while(TRUE){ManoDerecha();}
    //else
    //    while(TRUE){ManoIzquierda();}

    while(TRUE)
    {
        ManoDerecha();
    }
}
```

### header.c

```
#include <16F877A.h>
#fuses HS, NOWDT, NOPROTECT, NOLVP
#device ADC=8
#use delay(clock=2000000)
#use rs232(baud=9600, xmit=PIN_C6, rcv=PIN_C7)
#use fast_io(D)
#include <config.h>
#include <sensors.h>
#include <motors.h>
#include <behavior.h>
```

### config.h

```
void configura()
{
    setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL);
    setup_adc_ports(ALL_ANALOG);
    setup_ccp1(CCP_PWM);
    setup_ccp2(CCP_PWM);
    setup_timer_2(T2_DIV_BY_16, 156, 1);

    set_tris_d(0x00);
    output_d(0x00);
    set_tris_b(0x00);
    output_b(0x00);

    //botón de inicio
```

```
    output_e(PIN_E0);
    set_tris_e(0x01);

    delay_ms(1000);
}
```

#### sensors.h

```
#define TIMEsensor 10//
#define WallExist 100

unsigned int8 ReadSLI(void)
{
    unsigned int8 ADCvalue;
    set_adc_channel(0);
    delay_us(20);
    output_high(PIN_D3);
    delay_us(TIMEsensor);
    ADCvalue=read_adc();
    output_low(PIN_D3);
    return ADCvalue;
}

unsigned int8 ReadSFI(void)
{
    unsigned int8 ADCvalue;
    set_adc_channel(1);
    delay_us(20);
    output_high(PIN_D2);
    delay_us(TIMEsensor);
    ADCvalue=read_adc();
    output_low(PIN_D2);
    return ADCvalue;
}

unsigned int8 ReadSFD(void)
{
    unsigned int8 ADCvalue;
    set_adc_channel(2);
    delay_us(20);
    output_high(PIN_D1);
    delay_us(TIMEsensor);
    ADCvalue=read_adc();
    output_low(PIN_D1);
    return ADCvalue;
}

unsigned int8 ReadSLD(void)
{
    unsigned int8 ADCvalue;
    set_adc_channel(3);
    delay_us(20);
    output_high(PIN_D0);
    delay_us(TIMEsensor);
    ADCvalue=read_adc();
    output_low(PIN_D0);
    return ADCvalue;
}

unsigned int WallCheck(){
```

```

//walls en un entero no signado que representa la presencia de las
//paredes derecha, izquierda y hacia el frente, el bit se coloca a 1
//si la pared correspondiente está presente
unsigned int SLI, SFI, SFD, SLD, walls=0;
SLI=ReadSLI();
SFI=ReadSFI();
SFD=ReadSFD();
SLD=ReadSLD();
if(SLI<WallExist) walls = walls | 8;
if(SFI<WallExist || SFD<WallExist) walls = walls | 6;
if(SLD<WallExist) walls = walls | 1;
return walls;}

```

#### motors.h

```

#define STOP      output_b(0x00)
#define FORWARD  output_b(0x05)
#define BACKWARD  output_b(0x22)
#define LEFTTURN  output_b(0x21)
#define RIGHTTURN output_b(0x06)

#define BIAS 100
#define TIMEms 10
#define TIME_90 290

//La velocidad de la rueda derecha está controlada por el Puerto pwm1
//La velocidad de la rueda izquierda está controlada por pwm2

void TurnRight90()
{
    set_pwm1_duty(55*625/100);
    set_pwm2_duty(55*625/100);
    RIGHTTURN;
    delay_ms(TIME_90); //300 FOR 9 VOLTS, 400 for 7.4 v
    STOP;
}

void TurnLeft90()
{
    set_pwm1_duty(55*625/100);
    set_pwm2_duty(55*625/100);
    LEFTTURN;
    delay_ms(TIME_90); //300 FOR 9 VOLTS, 400 for 7.4 v
    STOP;
}

void Forward_()
{
    set_pwm1_duty(45*625/100);
    set_pwm2_duty(45*625/100);
    FORWARD;
    delay_ms(TIMEms); //delay_ms(840); //Tiempo para moverse de celda a
    //celda
}

void Avoid()
{
    unsigned int SLI, SLD;
    SLI=ReadSLI();
    SLD=ReadSLD();
    if(SLI<BIAS && SLD<BIAS){

```

```

        set_pwm1_duty((BIAS-SLD)*(625/100));
        set_pwm2_duty((BIAS-SLI)*(625/100));
    }
    else
    {
        set_pwm1_duty(50*625/100);
        set_pwm2_duty(50*625/100);
    }
    FORWARD;
    delay_ms(TIMEms);
}

```

#### behavior.c

```

#define TimeToCellToCell 590//basis 600
#define TimeToReachCenter 430//basis 450

void GoReturn()
{
    Forward_();
    if(ReadSFI(<40 || ReadSFD(<40)
    {
        TurnRight90();
        TurnRight90();
    }
    else Avoid();
}

voidToLeftCell()
{
    TurnLeft90();
    Forward_();
    delay_ms(TimeToCellToCell-30);
}

voidToRightCell()
{
    TurnRight90();
    Forward_();
    delay_ms(TimeToCellToCell);
}

voidTurn180()
{
    TurnRight90();
    TurnRight90();
    Forward_();
    delay_ms(TimeToCellToCell);
}

voidRightHand()
{
    Forward_();
    if(ReadSFI(<35 || ReadSFD(<35)
    {
        TurnRight90();
        TurnRight90();
    }
    else
    {
        Forward_();
        if(ReadSLD(>100 || ReadSLI(>100)

```

```

    {
        unsigned int wall;
        Forward_();
        delay_ms(TimeToReachCenter);
        wall = WallCheck();
        switch(wall){
            case 6 : ToRightCell(); break;
            case 14: ToRightCell(); break;
            case 8 : ToRightCell(); break;
            case 0 : ToRightCell(); break;
            case 7 : ToLeftCell() ; break;
            case 1 : Forward_() ; break;
            case 15: Turn180() ; break;}
        }
    }
}

void LeftHand()
{
    Forward_();
    if(ReadSFI(<35 || ReadSFD(<35)
    {
        TurnRight90();
        TurnRight90();
    }
    else
    {
        Forward_();
        if(ReadSLD(>100 || ReadSLI(>100)
        {
            unsigned int wall;
            Forward_();
            delay_ms(TimeToReachCenter);
            wall = WallCheck();
            switch(wall){
                case 6 : ToLeftCell(); break;
                case 14: ToRightCell(); break;
                case 8 : Forward_(); break;
                case 0 : ToLeftCell(); break;
                case 7 : ToLeftCell(); break;
                case 1 : ToLeftCell(); break;
                case 15: Turn180(); break;}
            }
        }
        else Avoid();
    }
}

```



## ***Glosario – Terminología usada.***

Existen muchas palabras que se utilizan frecuentemente el lenguaje técnico que no se encuentran en el lenguaje cotidiano o que tienen significado diferente. Para el caso del español estas palabras técnicas surgen principalmente de la traducción de términos en inglés o translaciones literales que han venido a formar parte del lenguaje técnico que se emplea en la industria y en el ámbito educativo.

Para la correcta comprensión de un texto eminentemente científico y técnico como éste es necesario dejar claro cómo deben entenderse algunos términos que se emplean para describir partes del robot, su diseño y programación.

Los términos han sido explicados tomando en cuenta los diccionarios técnicos de algunas de las editoriales que publican diccionarios sobre tecnicismos, así como diccionarios electrónicos que explican términos computacionales y matemáticos.

### **Colector abierto**

Es un sistema electrónico donde el colector del transistor de salida se deja sin conexión de manera que se puedan colocar elementos que manejen mayor corriente eléctrica mediante la adición de otros transistores de mayor potencia, sin embargo para el manejo se señalen que requieren la definición precisa de los niveles de tensión como las señales TTL se requiere la adición de una resistencia de pull up que permita la transición de los niveles entre cero y uno.

### **Encoder**

Es un sistema electrónico que sirve para cuantificar el número de veces que ocurre un evento, se coloca en eje del sistema mecánico rotacional que se quiere medir de manera que se tenga una medida reflejo de la cantidad de vueltas que realiza el sistema por unidad de tiempo, con lo que se puede medir la velocidad de con la que rota el sistema mecánico o se puede saber la distancia que ha recorrido si el sistema sobre el que se coloca está directamente conectado a las ruedas, este es el sensor principal que se utiliza para hacer la medición de la distancia o desplazamiento que ha realizado el robot, es decir es el sensor para el sistema de odometría.

### **Exactitud**

Es la diferencia entre la magnitud que nos proporciona un instrumento o sensor con la magnitud que es considerada real, es decir la magnitud que es inherente al objeto del que obtenemos la lectura. Esta característica depende de la calidad de los elementos que constituyen al instrumento o sensor y de las consideraciones que se hacen sobre los factores que pueden afectar la calidad de la medición.

**Precisión**

Diferencia que existe entre las diferentes lecturas que son realizadas con el mismo instrumento en diferentes momentos sobre una misma magnitud con las mismas condiciones de medición, es decir es la confiabilidad en la repetibilidad de las lecturas.

**PWM**

Es la modulación de las señales donde teniendo una señal cuadrada de una frecuencia constante se hace variar el tiempo que la señal se encuentra el alto o bajo es decir que se varía el ciclo útil de la señal con los que se logra que el nivel promedio de la señal pueda controlar, mediante un dispositivo de potencia, la energía que se aplica a un motor, es decir que la aplicación de la potencia a nivel de voltaje constante puede comportarse como si de corriente a voltaje variable se tratara, lo que resulta adecuado para los motores de corriente directa en los cuales se tiene el control casi total de la velocidad y el torque que entrega el motor mediante la variación del voltaje que se aplica al mismo.

**Resistencia de pull up**

Es la resistencia que se coloca entre la salida de los sistemas electrónicos en colector abierto de manera que se puedan distinguir los niveles de cero y uno en la lógica digital.

**Sistema embebido**

Es un dispositivo de aplicación específica, es decir que está diseñado para realizar una tarea concreta y que resuelva una o varias tareas bien definidas, como suelen ser dispositivos portátiles suelen ser muy eficientes en el uso de la energía además de tener la característica de ser de reducido tamaño. Algunos ejemplos de estos dispositivos son: computadoras de automóviles, teléfonos móviles, sistemas de control de lavado en las lavadoras modernas.

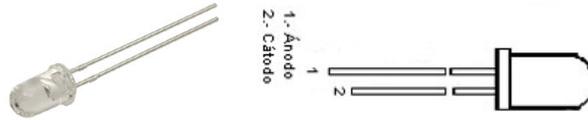
**Tick**

Se refiere al elemento básico con el que el encoder determina la transición entre lecturas se determina en número de ticks por vuelta del elemento mecánico al que el encoder esté acoplado. El número de ticks por vuelta hace referencia la resolución que presente el sistema encoder, a mayor número de ticks por vuelta se suelen tener lecturas más confiables de la magnitud de la distancia recorrida o velocidad de rotación del sistema mecánico rotacional que implementa el encoder.



### Led infrarrojo emisor utilizado en los sensores de distancia.

#### IR333C



**Descripción:** Diodo emisor de luz infrarrojo de 5 mm transparente.

**Rangos Máximos (Ta = 25° C)**

Parámetro	Símbolo	Valores	Unidad
Corriente continua en sentido directo	$I_F$	100	mA
Corriente pico en sentido directo (ancho de pulso= 10 $\mu$ S)	$I_{FP}$	1.0	A
Tensión inversa	$V_R$	5	V
Rango de temperatura de operación	$T_{opr}$	-40 ~ +85	°C
Rango de temperatura almacenaje	$T_{stg}$	-40~ +85	°C
Temperatura de soldado	$T_{sol}$	260	°C
Potencia de disipación a (o abajo) de 25°C	$P_d$	150	mW

### Características radiantes y eléctricas

Características	Símbolo	Condición de prueba	Min	Tipo	Máx.	Unidad
Longitud de onda espectral pico	$\lambda_p$	$I_F = 100mA$	-	940	-	nm
Voltaje en sentido directo espectral	$V_F$	$I_F = 200mA$	=	1.2	1.5	Nm
		$I_F = 100mA$	-	1.4	1.8	V
Angulo para alta intensidad	$2\theta_{1/2}$	$V_R = 5V$	-	25	-	Grados
Corriente de fuga inversa	$I_R$	$V_R = 5V$	-	-	10	$\mu$ A
Potencia	$P_D$	$I_F = 100mA$	6	10	-	mW

## Motores de corriente directa utilizados

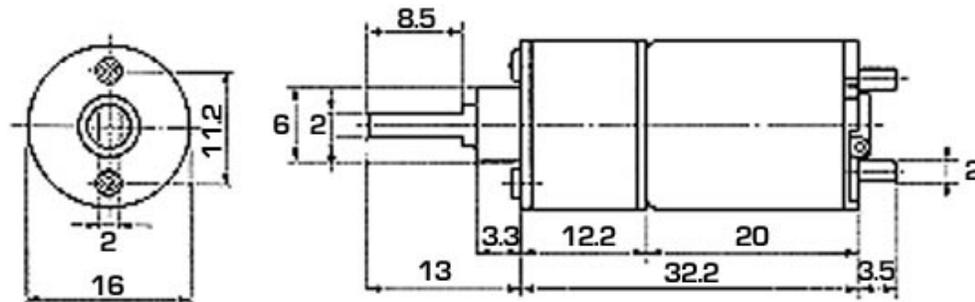
### Low Cost Mini Geared Motor -- LA16G-324VE

#### SPECIFICATIONS

This little motor takes the Copal line another step further with its all-metal gears at a ratio of 50 to 1. We've tested this motor extensively, and were extremely impressed at its performance.

There are now TWO different versions of this motor- one with a 6V motor, and one with a 12V motor. Since we know many builders will opt to overvolt these motors anyway to 12+ volts, we had Copal develop a new 6V version of this motor, just for the Robot MarketPlace. Both motor models have wire leads soldered onto the back. Check out the stats below.

Note that this motor's gearbox is exposed, so it's best for use in a bot where it is enclosed. If you need to, you could wrap a layer of thin CF or foil around the gearbox if you're worried about grit getting inside, or better yet, check out our Lexan Mounts made just for this motor, which also keep the gearbox enclosed.



#### Performance Specifications

DC Voltage (VDC) 12.0  
 Shaft Speed (rpm) 270  
 Continuous Current (amps) 0.1000  
 Continuous Torque (In-lbs) 1.47  
 Output Power (HP) 2.24E-4  
 Torque Constant (in-oz/amp)  
 Rotor Inertia (oz-in-sec<sup>2</sup>)

#### Motor Type

DC Construction Permanent Magnet  
 Commutation Brush  
 Shaft Orientation In-line; Single-ended

#### Gearing Options

Gearing Gearmotor  
 Gearhead Model  
 Gear Type  
 Gearbox Ratio (: 1) 49.73  
 Gearing Efficiency (%)

#### Housing / Enclosure

Units Metric  
 Motor Shape Cylindrical Body  
 Diameter / Width (inch)  
 Length (inch) 1.27  
 NEMA Frame  
 Options  
 Extreme Environment

#### Other Specifications

Feedback  
 Features

#### Environment

Operating Temperature (F)  
 Shock Rating (g)  
 Vibration Rating (g)  
 Environment

**Notes** Mini DC geared motor

Voltage:	4.8-14.8V
Output Speed:	500rpm @ 12V 280rpm @ 6V
Stall Torque:	58.9 oz-in (4241 g-cm) @ 12V 48.43 oz-in (3487 g-cm) @ 6V
Size:	1.3" (32.2mm) long, 5/8" (16mm) diameter
Weight:	0.71oz (20.1g)
Gear Ratio:	Metal Spur gear 50:1
Stall Current:	Stall at 1.5a
Shaft Info:	4mm D Shaft with 1 flat

**Driver de potencia para el control de los motores**

## L293, L293D QUADRUPLE HALF-H DRIVERS

SLR5008B – SEPTEMBER 1986 – REVISED JUNE 2002

- Featuring Unijunction L293 and L293D Products Now From Texas Instruments
- Wide Supply-Voltage Range: 4.5 V to 36 V
- Separate Input-Logic Supply
- Internal ESD Protection
- Thermal Shutdown
- High-Noise-Immunity Inputs
- Functional Replacements for SGS L293 and SGS L293D
- Output Current 1 A Per Channel (600 mA for L293D)
- Peak Output Current 2 A Per Channel (1.2 A for L293D)
- Output Clamp Diodes for Inductive Transient Suppression (L293D)

### description

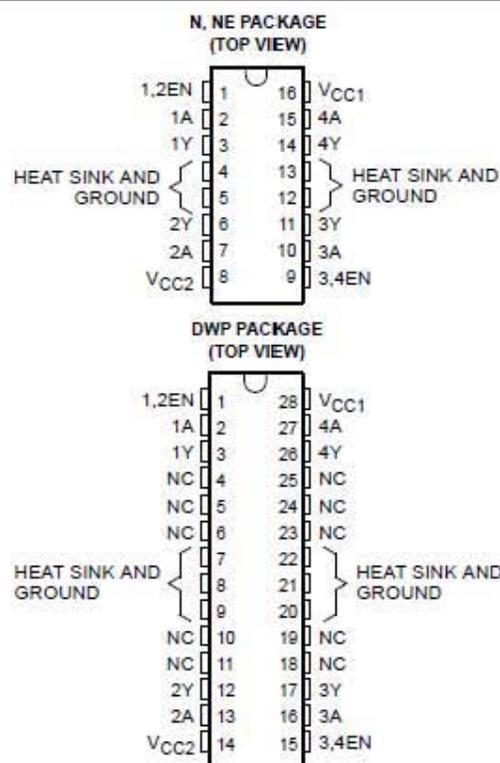
The L293 and L293D are quadruple high-current half-H drivers. The L293 is designed to provide bidirectional drive currents of up to 1 A at voltages from 4.5 V to 36 V. The L293D is designed to provide bidirectional drive currents of up to 600-mA at voltages from 4.5 V to 36 V. Both devices are designed to drive inductive loads such as relays, solenoids, dc and bipolar stepping motors, as well as other high-current/high-voltage loads in positive-supply applications.

All inputs are TTL compatible. Each output is a complete totem-pole drive circuit, with a Darlington transistor sink and a pseudo-Darlington source. Drivers are enabled in pairs, with drivers 1 and 2 enabled by 1,2EN and drivers 3 and 4 enabled by 3,4EN. When an enable input is high, the associated drivers are enabled and their outputs are active and in phase with their inputs. When the enable input is low, those drivers are disabled and their outputs are off and in the high-impedance state. With the proper data inputs, each pair of drivers forms a full-H (or bridge) reversible drive suitable for solenoid or motor applications.

On the L293, external high-speed output clamp diodes should be used for inductive transient suppression.

A  $V_{CC1}$  terminal, separate from  $V_{CC2}$ , is provided for the logic inputs to minimize device power dissipation.

The L293 and L293D are characterized for operation from 0°C to 70°C.



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

**TEXAS  
INSTRUMENTS**

POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

Copyright © 2002, Texas Instruments Incorporated

Amplificadores operacionales LM324 empleados en la etapa de acondicionamiento de la señal se lo sensores de distancia.



August 2000

## LM124/LM224/LM324/LM2902

### Low Power Quad Operational Amplifiers

#### General Description

The LM124 series consists of four independent, high gain, internally frequency compensated operational amplifiers which were designed specifically to operate from a single power supply over a wide range of voltages. Operation from split power supplies is also possible and the low power supply current drain is independent of the magnitude of the power supply voltage.

Application areas include transducer amplifiers, DC gain blocks and all the conventional op amp circuits which now can be more easily implemented in single power supply systems. For example, the LM124 series can be directly operated off of the standard +5V power supply voltage which is used in digital systems and will easily provide the required interface electronics without requiring the additional  $\pm 15V$  power supplies.

#### Unique Characteristics

- In the linear mode the input common-mode voltage range includes ground and the output voltage can also swing to ground, even though operated from only a single power supply voltage
- The unity gain cross frequency is temperature compensated
- The input bias current is also temperature compensated

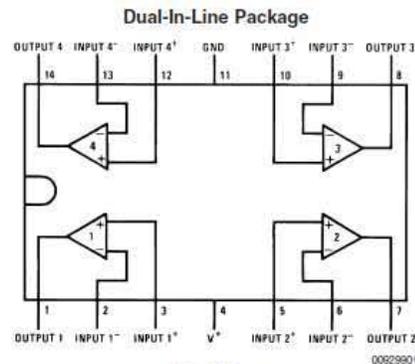
#### Advantages

- Eliminates need for dual supplies
- Four internally compensated op amps in a single package
- Allows directly sensing near GND and  $V_{OUT}$  also goes to GND
- Compatible with all forms of logic
- Power drain suitable for battery operation

#### Features

- Internally frequency compensated for unity gain
- Large DC voltage gain 100 dB
- Wide bandwidth (unity gain) 1 MHz (temperature compensated)
- Wide power supply range:
  - Single supply 3V to 32V
  - or dual supplies  $\pm 1.5V$  to  $\pm 16V$
- Very low supply current drain (700  $\mu A$ )—essentially independent of supply voltage
- Low input biasing current 45 nA (temperature compensated)
- Low input offset voltage 2 mV and offset current: 5 nA
- Input common-mode voltage range includes ground
- Differential input voltage range equal to the power supply voltage
- Large output voltage swing 0V to  $V^+ - 1.5V$

#### Connection Diagrams



Order Number LM124J, LM124AJ, LM124J/883 (Note 2), LM124AJ/883 (Note 1), LM224J, LM224AJ, LM324J, LM324M, LM324MX, LM324AM, LM324AMX, LM2902M, LM2902MX, LM324N, LM324AN, LM324MT, LM324MTX or LM2902N LM124AJRQML and LM124AJRQMLV (Note 3)  
See NS Package Number J14A, M14A or N14A

LM124/LM224/LM324/LM2902 Low Power Quad Operational Amplifiers

Amplificadores operacionales LM339 utilizados en el acondicionamiento de la señal proveniente de los encoders.



March 2004

## LM139/LM239/LM339/LM2901/LM3302 Low Power Low Offset Voltage Quad Comparators

### General Description

The LM139 series consists of four independent precision voltage comparators with an offset voltage specification as low as 2 mV max for all four comparators. These were designed specifically to operate from a single power supply over a wide range of voltages. Operation from split power supplies is also possible and the low power supply current drain is independent of the magnitude of the power supply voltage. These comparators also have a unique characteristic in that the input common-mode voltage range includes ground, even though operated from a single power supply voltage.

Application areas include limit comparators, simple analog to digital converters; pulse, squarewave and time delay generators; wide range VCO; MOS clock timers; multivibrators and high voltage digital logic gates. The LM139 series was designed to directly interface with TTL and CMOS. When operated from both plus and minus power supplies, they will directly interface with MOS logic— where the low power drain of the LM339 is a distinct advantage over standard comparators.

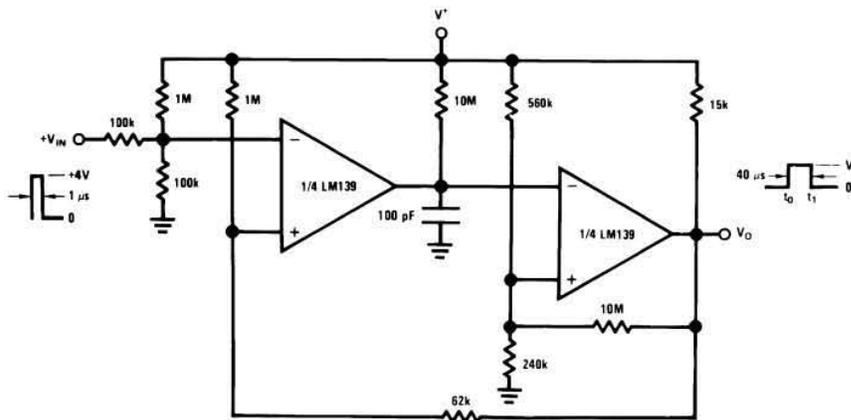
### Features

- Wide supply voltage range
- LM139/139A Series 2 to 36  $V_{DC}$  or  $\pm 1$  to  $\pm 18 V_{DC}$
- LM2901: 2 to 36  $V_{DC}$  or  $\pm 1$  to  $\pm 18 V_{DC}$
- LM3302: 2 to 28  $V_{DC}$  or  $\pm 1$  to  $\pm 14 V_{DC}$
- Very low supply current drain (0.8 mA) — independent of supply voltage
- Low input biasing current: 25 nA
- Low input offset current:  $\pm 5$  nA
- Offset voltage:  $\pm 3$  mV
- Input common-mode voltage range includes GND
- Differential input voltage range equal to the power supply voltage
- Low output saturation voltage: 250 mV at 4 mA
- Output voltage compatible with TTL, DTL, ECL, MOS and CMOS logic systems

### Advantages

- High precision comparators
- Reduced  $V_{OS}$  drift over temperature
- Eliminates need for dual supplies
- Allows sensing near GND
- Compatible with all forms of logic
- Power drain suitable for battery operation

### One-Shot Multivibrator with Input Lock Out



00570612

LM139/LM239/LM339/LM2901/LM3302 Low Power Low Offset Voltage Quad Comparators

## Microcontrolador de 8 bits



# PIC16F87XA

## 28/40/44-Pin Enhanced Flash Microcontrollers

### Devices Included in this Data Sheet:

- PIC16F873A
- PIC16F874A
- PIC16F876A
- PIC16F877A

### High-Performance RISC CPU:

- Only 35 single-word instructions to learn
- All single-cycle instructions except for program branches, which are two-cycle
- Operating speed: DC – 20 MHz clock input  
DC – 200 ns instruction cycle
- Up to 8K x 14 words of Flash Program Memory,  
Up to 368 x 8 bytes of Data Memory (RAM),  
Up to 256 x 8 bytes of EEPROM Data Memory
- Pinout compatible to other 28-pin or 40/44-pin  
PIC16CXXX and PIC16FXXX microcontrollers

### Peripheral Features:

- Timer0: 8-bit timer/counter with 8-bit prescaler
- Timer1: 16-bit timer/counter with prescaler, can be incremented during Sleep via external crystal/clock
- Timer2: 8-bit timer/counter with 8-bit period register, prescaler and postscaler
- Two Capture, Compare, PWM modules
  - Capture is 16-bit, max. resolution is 12.5 ns
  - Compare is 16-bit, max. resolution is 200 ns
  - PWM max. resolution is 10-bit
- Synchronous Serial Port (SSP) with SPI™ (Master mode) and I<sup>2</sup>C™ (Master/Slave)
- Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter (USART/SCI) with 9-bit address detection
- Parallel Slave Port (PSP) – 8 bits wide with external RD, WR and CS controls (40/44-pin only)
- Brown-out detection circuitry for Brown-out Reset (BOR)

### Analog Features:

- 10-bit, up to 8-channel Analog-to-Digital Converter (A/D)
- Brown-out Reset (BOR)
- Analog Comparator module with:
  - Two analog comparators
  - Programmable on-chip voltage reference (VREF) module
  - Programmable input multiplexing from device inputs and internal voltage reference
  - Comparator outputs are externally accessible

### Special Microcontroller Features:

- 100,000 erase/write cycle Enhanced Flash program memory typical
- 1,000,000 erase/write cycle Data EEPROM memory typical
- Data EEPROM Retention > 40 years
- Self-reprogrammable under software control
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) via two pins
- Single-supply 5V In-Circuit Serial Programming
- Watchdog Timer (WDT) with its own on-chip RC oscillator for reliable operation
- Programmable code protection
- Power saving Sleep mode
- Selectable oscillator options
- In-Circuit Debug (ICD) via two pins

### CMOS Technology:

- Low-power, high-speed Flash/EEPROM technology
- Fully static design
- Wide operating voltage range (2.0V to 5.5V)
- Commercial and Industrial temperature ranges
- Low-power consumption

Device	Program Memory		Data SRAM (Bytes)	EEPROM (Bytes)	I/O	10-bit A/D (ch)	CCP (PWM)	MSSP		USART	Timers 8/16-bit	Comparators
	Bytes	# Single Word Instructions						SPI	Master I <sup>2</sup> C			
PIC16F873A	7.2K	4096	192	128	22	5	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2
PIC16F874A	7.2K	4096	192	128	33	8	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2
PIC16F876A	14.3K	8192	368	256	22	5	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2
PIC16F877A	14.3K	8192	368	256	33	8	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2

## Circuito integrado para fuente conmutada elevadora de voltaje



April 200

# LM1577/LM2577 SIMPLE SWITCHER® Step-Up Voltage Regulator

## General Description

The LM1577/LM2577 are monolithic integrated circuits that provide all of the power and control functions for step-up (boost), flyback, and forward converter switching regulators. The device is available in three different output voltage versions: 12V, 15V, and adjustable.

Requiring a minimum number of external components, these regulators are cost effective, and simple to use. Listed in this data sheet are a family of standard inductors and flyback transformers designed to work with these switching regulators.

Included on the chip is a 3.0A NPN switch and its associated protection circuitry, consisting of current and thermal limiting, and undervoltage lockout. Other features include a 52 kHz fixed-frequency oscillator that requires no external components, a soft start mode to reduce in-rush current during start-up, and current mode control for improved rejection of input voltage and output load transients.

## Features

- Requires few external components
- NPN output switches 3.0A, can stand off 65V
- Wide input voltage range: 3.5V to 40V
- Current-mode operation for improved transient response, line regulation, and current limit
- 52 kHz internal oscillator
- Soft-start function reduces in-rush current during start-up
- Output switch protected by current limit, under-voltage lockout, and thermal shutdown

## Typical Applications

- Simple boost regulator
- Flyback and forward regulators
- Multiple-output regulator

## Connection Diagrams

Straight Leads  
5-Lead TO-220 (T)

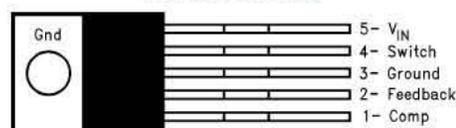


01146804

Top View

Order Number LM2577T-12, LM2577T-15,  
or LM2577T-ADJ  
See NS Package Number T05A

Bent, Staggered Leads  
5-Lead TO-220 (T)



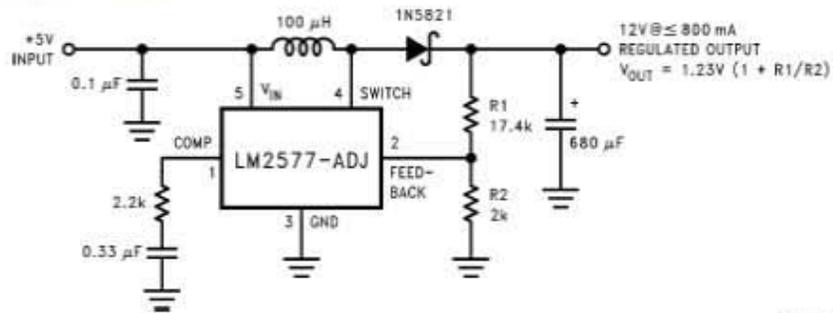
01146805

Top View

Order Number LM2577T-12 Flow LB03, LM2577T-15  
Flow LB03, or LM2577T-ADJ Flow LB03  
See NS Package Number T05D

Ordering Information						
Temperature Range	Package Type	Output Voltage			NSC Package Drawing	Package
		12V	15V	ADJ		
-40°C ≤ T <sub>A</sub> ≤ +125°C	24-Pin Surface Mount	LM2577M-12	LM2577M-15	LM2577M-ADJ	M24B	SO
	16-Pin Molded DIP	LM2577N-12	LM2577N-15	LM2577N-ADJ	N16A	N
	5-Lead Surface Mount	LM2577S-12	LM2577S-15	LM2577S-ADJ	TS5B	TO-263
	5-Straight Leads	LM2577T-12	LM2577T-15	LM2577T-ADJ	T05A	TO-220
	5-Bent Staggered Leads	LM2577T-12 Flow LB03	LM2577T-15 Flow LB03	LM2577T-ADJ Flow LB03	T05D	TO-220
-55°C ≤ T <sub>A</sub> ≤ +150°C	4-Pin TO-3	LM1577K-12/883	LM1577K-15/883	LM1577K-ADJ/883	K04A	TO-3

Typical Application



Note: Pin numbers shown are for TO-220 (T) package.

01146201

## Software empleado

### CCS.

El entorno de desarrollo integrado CCS para PICS es un paquete de cómputo constituido por un editor de código, un compilador, depurador y programador diseñado para obtener el código en lenguaje de máquina específica para la variada familia de microcontroladores de la marca PIC de Microchip.

Pueden encontrarse abundante información en la página web del fabricante o en la web en general al ser el compilador de C para pics más utilizados para le realización de proyectos de diferentes magnitudes desde los proyectos de aficionados hasta productos comerciales de utilización masiva.

### WinPIC800

Este programa es la interface de programación para pics que acepta varios tipos de programadores físicos de microcontroladores pic, es el programa por medio del cual se programa la memoria de programa del microcontrolador cada vez que se hacen modificaciones y se espera ver el resultado en el comportamiento del robot, la interfaz de programa se muestra en la siguiente figura.

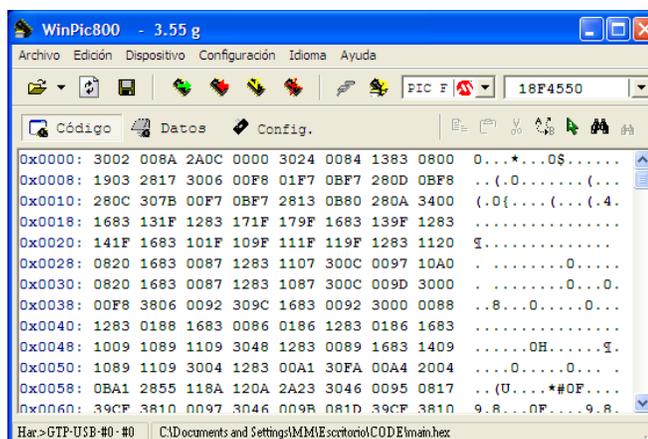


Figura A. Software de programador GTP USB

Se pueden ver los elementos típicos de los programadores de dispositivos que corresponden a las acciones que se pueden realizar a los circuitos electrónicos programables como comprobar si el dispositivo está limpio, leerlo, borrarlo o programarlo, etc.

En conjunción con este programa se tiene el programador electrónico que es el que sirve de puente entre el software y el pic, este programador es un GTPUSBlite que por el

lado de microcontrolador establece el protocolo ICSP (*In-Circuit Serial Programming* por sus siglas en inglés o programación serial en el circuito) que es un sistema de programación creado por microchip para hacer posible la programación de sus microcontroladores en sistemas finales sin la necesidad de remover el componente del sistema electrónico completo, por el lado de la comunicación con la computadora cuenta con un puerto USB facilitando el uso con computadoras que no cuenta con puertos obsoletos como el rs232 que sin embargo siguen siendo utilizados ampliamente en electrónica para la programación y depuración de sistemas electrónicos para robótica e investigación.

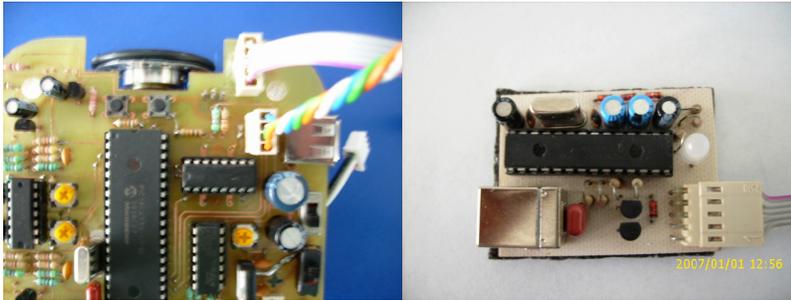


Figura B. Programador GTP USB y su conexión al robot

Para poder recibir la realimentación de los datos de algunos de los periféricos del robot y realizar tareas de depuración se colocó un adaptador TTL a puerto rs232, que se muestra:

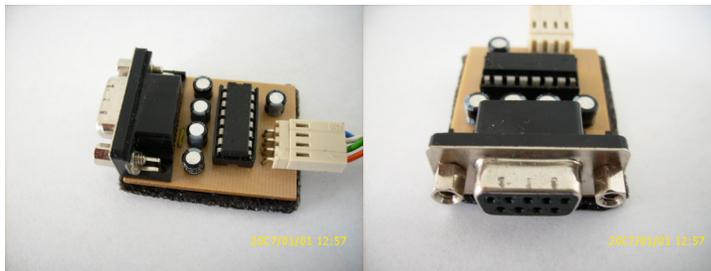


Figura C. Interfaz RS232 utilizada para depuración

## EAGLE

Para el diseño de la tarjeta PCB que contiene todos los elementos electrónicos del robot se ha utilizado el programa EAGLE DE la empresa Cadsoft, este en un paquete de programas que permiten hacer diagramas electrónicos y el diseño de las pistas una vez que se ha decidido la colocación de los componentes.

El uso de este paquete de programas coloca a los diseños dentro de los estándares propuestos por uno de los programas más difundidos y aceptados en el mundo de la electrónica.

El software para el diseño de placas electrónicas ofrece una gran cantidad de herramientas que resultan de utilidad para realizar proyectos estudiantiles hasta tarjetas electrónicas tan complejas como los componentes de computadoras, por ejemplo las tarjetas motherboard que suelen tener varias capas de conductores.

EAGLE ofrece también la posibilidad de agregar nuevos componentes electrónicos o de diseñar componentes electrónicos que sean poco comunes o adaptarlos a prototipos en proyectos donde se utilizan componentes propios.

Se puede encontrar información detallada y tutoriales en la página del fabricante.

<http://www.cadsoft.de/>

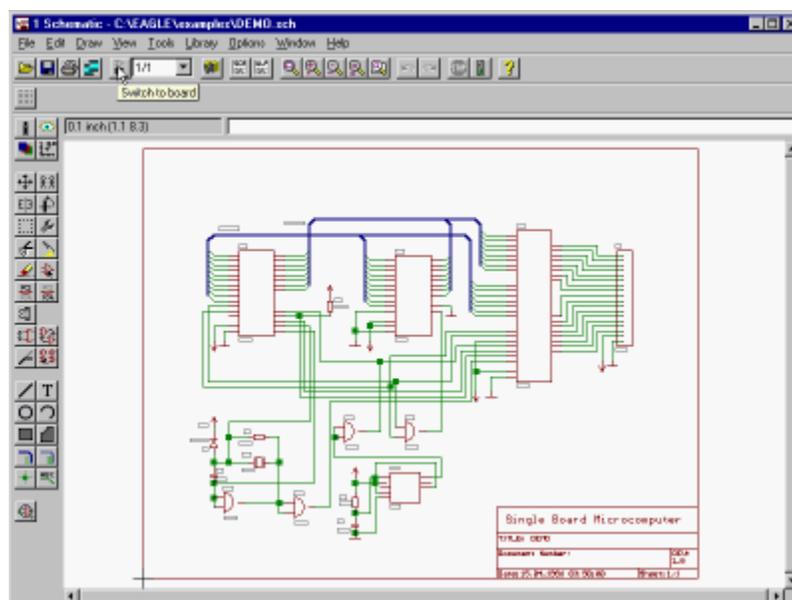


Figura D. Entorno de diseño EAGLE

## Proteus VSM

El programa Proteus es una aplicación CAD (aplicación de diseño) que se compone de tres módulos:

ISIS (Intelligent Schematic Input System): módulo de captura de esquemas

ARES (Advanced Routing Modelling): para realización de circuitos impresos

VSM (Virtual System Modelling): el módulo de simulación

Se puede encontrar información detallada y tutoriales en la página del fabricante

[www.labcenter.com/](http://www.labcenter.com/)

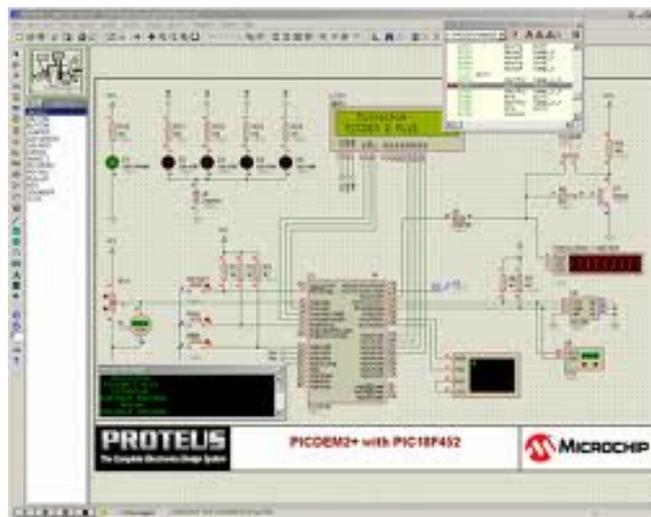


Figura E. Entorno de simulación ISIS de Proteus