



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT
MÓVIL PARA RESOLVER LABERINTOS**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO**

PRESENTA

RAFAEL AUGUSTO SOBREVILLA FIGUEROA

DIRECTOR DE TESIS

M. EN I. YUKIHIRO MINAMI KOYAMA



Ciudad Universitaria, México D.F., 2009

Agradecimientos

Este trabajo representa la culminación de un largo camino que costo mucho esfuerzo y desgaste pero puedo decir que todo ha valido la pena. Quiero dedicar esta tesis a mis padres María Teresa de Jesús Figueroa De León y Rafael Sobrevilla González que me acompañaron codo con codo en todo este largo camino alrededor de tantos años que me llevo terminar mis créditos en Ingeniería en Electrónica.

Agradezco a María Teresa Gregorio Hernández, quien con su cariño y comprensión, ha dado luz a mi vida, desde el primer momento en que la conocí.

También quiero agradecer a mis abuelitos Dolores De León Reyes y Juan Figueroa Vázquez que fueron mis confidentes y mi apoyo espiritual en los momentos más difíciles de mi carrera.

Quiero reconocer el excelente trabajo a mi tutor Ing. Yukihiro Minami Koyama cuyo apoyo me formo durante muchos semestres en la carrera y ante todo me ayudo a desarrollar mi disciplina y compromiso, por medio de su ejemplo.

A mi amigo el Lic. Pablo Medida Mora por las largas platicas que sostuvimos alrededor de mi carrera.

Quiero dar gracias a mi alma mater, la Universidad Nacional Autónoma de México, que les dio la oportunidad a mis padres de formarse como profesionistas y especialmente a la Facultad de Ingeniería por darme la oportunidad de formarme como ingeniero.

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN	
1.1 LA ROBÓTICA, PERSPECTIVA ACTUAL	5
1.2 COMPETENCIAS ORIENTADAS A LA PARTICIPACIÓN DE ROBOTS MÓVILES	6
1.3 OBJETIVO	7
1.4 DESCRIPCIÓN DE LA TESIS POR CAPÍTULOS	7
2 ELEMENTOS PARA EL DISEÑO DEL ROBOT	
2.1 DEFINICIÓN DE ROBOT MÓVIL	9
2.2 SENSORES OPTOELECTRÓNICOS	10
2.2.1 Fotodiodo	10
2.2.2 Fototransistor	11
2.2.3 Sensor fotorreflectivo	11
2.3 MOTORES	
2.3.1 Motor de corriente directa	12
2.3.2 Motorreductor	13
2.3.3 Motor de pulsos	13
2.3.4 Servomotor de modelismo	15
2.4 CONFIGURACIONES PARA LA LOCOMOCIÓN DEL ROBOT	
2.4.1 Locomoción síncrona	15
2.4.2 Locomoción de triciclo	16
2.4.3 Locomoción de automóvil o dirección Ackerman	17
2.4.4 Locomoción diferencial	17
2.5 CIRCUITOS LÓGICOS PROGRAMABLES	18
2.6 MICROCONTROLADORES	20
2.7 ASISTENTE PERSONAL DIGITAL	21
2.8 PUERTO SERIAL	22
2.9 ALGORITMOS PARA RESOLVER UN LABERINTO	23

3	DISEÑO Y ANÁLISIS DE LAS POSIBLES DE SOLUCIONES	
3.1	INTRODUCCIÓN	25
3.2	ANÁLISIS DEL TIPO DE SENSORES DEL ROBOT	26
3.3	ANÁLISIS DEL TIPO DE LOCOMOCIÓN DEL ROBOT	28
	3.3.1 Locomoción síncrona	28
	3.3.2 Locomoción de triciclo	32
	3.3.3 Locomoción de automóvil o dirección Ackerman	33
	3.3.4 Locomoción diferencial	33
3.4	ELECCIÓN DEL TIPO DE MOTORES QUE UTILIZARÁ EL ROBOT	34
3.5	ANÁLISIS DEL HARDWARE DE PROCESAMIENTO Y GENERACIÓN DE COMPORTAMIENTOS DEL ROBOT	34
	3.5.1 Procesamiento empleando un PLD	35
	3.5.2 Procesamiento empleando un microcontrolador	35
	3.5.3 Procesamiento empleando un PDA	36
4	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO	
4.1	INTRODUCCIÓN	37
4.2	ADAPTACIÓN DE UN SERVO MOTOR DE MODELISMO	38
4.3	ETAPA DE SENSORES	40
	4.3.1 Consideraciones especiales para la etapa de sensores	42
	4.3.2 Metodología de clasificación de los diferentes nodos con base en las señales de los sensores	45
4.4	RUTINAS DE MOVIMIENTO DEL ROBOT DENTRO DEL LABERINTO UTILIZANDO UNA LOCOMOCIÓN DIFERENCIAL	48
	4.4.1 Rutina para seguir la línea que forma el laberinto	48
	4.4.2 Rutina para tomar un camino a la derecha	49
	4.4.3 Rutina para tomar un camino a la izquierda	50
4.5	DISEÑO DE LA ETAPA DE POTENCIA	50
4.6	SISTEMA DE PROCESAMIENTO	52
4.7	DISEÑO DE LA TARJETA DEL PIC16F877A	53
4.8	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA COMPLETO	54
5	RESULTADOS Y CONCLUSIONES	57
	APÉNDICE	60
	REFERENCIAS	71

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 LA ROBÓTICA, PERSPECTIVA ACTUAL

La ciencia de la robótica se prepara para una transformación similar a la que sufrieron las ciencias de la computación en los años ochenta, es decir, que la tecnología de fabricación y escala de miniaturización de los componentes electrónicos y mecánicos permitieron la producción de la computadora personal, dando como resultado que millones de personas pudieran utilizarla. Actualmente la automatización sólo se desarrolla a gran escala en la industria, pero los avances en el campo de la electrónica, el desarrollo de nuevos materiales y las computadoras personales, conllevarán a que los robots se incorporen a los hogares. Uno de los tipos de agentes inteligentes que se tendrán en los hogares serán los robots móviles, los cuales pueden ser desde pequeños ayudantes que limpien los pisos, hasta enfermeros que asistan a adultos mayores, recordándoles cuándo deben tomarse sus medicamentos, contestar el teléfono, atender a las visitas, abrir puertas, subir escaleras, recoger objetos y realizar llamadas de emergencia. Todo esto se escucha complejo pero actualmente en la Universidad Nacional Autónoma de México existen proyectos multidisciplinarios de investigación que utilizan agentes inteligentes reconocedores de sintaxis de voz y de imágenes, que llevan a cabo las tareas anteriormente mencionadas.

Actualmente, ya se pueden adquirir pequeños robots móviles que ayuden con el aspirado y la limpieza de los pisos del hogar. Estos aparatos poseen sensores, autonomía e inteligencia muy sencilla, sin embargo éstas son las principales características de un robot

móvil autónomo, que pueda responder a su medio ambiente, adaptarse a él y tomar decisiones.

Otro campo de estudio de la robótica es la recreación del comportamiento de pequeños organismos vivientes por medio de modelos reactivos, que imitan a los insectos con la ayuda de robots móviles. Los insectos poseen una cantidad muy limitada de materia cerebral por lo que no les permite recordar, elaborar estrategias y siquiera una planeación. Sin embargo, como en el caso de las hormigas y abejas; y en cualquier colonia estructurada de insectos, pequeños comportamientos sencillos en conjunto permiten realizar tareas complejas.

Estas ideas son las que han originado la inquietud de diseñar y construir un pequeño robot que pueda resolver la tarea propuesta, con una inteligencia muy sencilla contenida dentro de un dispositivo digital.

1.2 LAS COMPETENCIAS ORIENTADAS A LA PARTICIPACIÓN DE ROBOTS MÓVILES

El objetivo de las competencias es que los estudiantes, docentes, ingenieros e investigadores, muestren sus desarrollos en el campo de la robótica. A través de estos eventos se propicia el intercambio de ideas entre los participantes, todas ellas orientadas a resolver una tarea bien establecida por una lista de requerimientos llamada “reglamento”. Es muy interesante observar las diferentes propuestas de solución al mismo problema, situación que propicia la creatividad e inventiva.

En una competencia se aprende a trabajar bajo presión, se desarrolla la responsabilidad, se trabaja en equipo y forma el carácter del involucrado. Tomando en cuenta que el objetivo fundamental es desarrollar un sistema de ingeniería que sea capaz de resistir una o varias contiendas, es necesario poner especial cuidado en el proceso de diseño.

En la mayoría de los casos, se confronta al participante con el sentimiento de frustración que sobreviene, porque el sistema no funciona de manera esperada o implica una reparación contra reloj para poder estar listo en el turno y hora asignados. Actualmente, se realizan competencias orientadas al desarrollo de robots móviles, que resuelvan algunos de los problemas anteriormente citados. Cada una de las competencias tiene un grado de complejidad distinto. Entre más complejo sea el reto, se requiere un equipo de trabajo más grande y los campos de investigación necesitan conocimientos más avanzados.

Algunas de las categorías más populares, ordenadas de menor a mayor complejidad son: seguidor de línea (Line Following), Mini Sumo, robot de laberinto (Line Maze), RoboCup (robots que juegan fútbol), Robo-Magellan (robot que navega asistido por un GPS¹) y RoboCup@Home (robot de servicio).

¹ Sistema de Posicionamiento Global, por las siglas en inglés de Global Positioning System.

1.3 OBJETIVO

La construcción de un robot móvil para resolver laberintos es un reto interesante y formativo. Los laberintos están formados por líneas negras que se intersecan y que están pintadas sobre un fondo blanco, formando varios caminos, de los cuales el robot debe seguir uno de ellos fielmente, y cuando encuentre bifurcaciones que conducen a otros caminos, debe ser capaz de decidir cuál o cuáles ya fueron explorados, de manera que pueda concluir el laberinto en el menor tiempo posible.

En este trabajo de tesis se propone diseñar y construir un robot móvil robusto y eficiente, que sea capaz de resolver laberintos, con un algoritmo de inteligencia muy básico contenido en un sistema digital.

El robot diseñado también deberá cumplir con ciertas restricciones y características establecidas para las diferentes competencias relacionadas; la que toma importancia para el diseño del robot es que éste no debe exceder en sus dimensiones los 150 mm en cualquier eje.

Este robot necesita tener sensores con los que pueda detectar correctamente el camino a seguir, y poseer además una inteligencia artificial primitiva que le permita tomar decisiones, de manera que sea capaz de encontrar el camino para salir del laberinto.

1.4 DESCRIPCIÓN DE LA TESIS POR CAPÍTULOS

La presente tesis consta de cinco capítulos y un apéndice. En el primero se presenta una introducción general al problema planteado, junto con los objetivos del proyecto y un breve resumen del trabajo.

En el segundo capítulo se presenta el resultado de la investigación realizada a los posibles elementos que pueden ser utilizados por el robot, con el fin de extraer las características relevantes de aquéllos.

El tercer capítulo comienza estableciendo las cuatro partes del problema que se consideran relevantes en cuanto al diseño: los sensores que el robot puede usar, el tipo de locomoción que el robot puede emplear, el tipo de motores que conviene escoger, y el análisis del hardware para el sistema de inteligencia del robot. En este capítulo se exploran las opciones planteadas en el análisis realizado en el capítulo anterior, desde una perspectiva abierta y sin restricciones, para posteriormente pasar a la toma de decisiones de la propuesta de solución del robot.

En el cuarto capítulo se hace una descripción detallada de los módulos que constituyen el robot. Se muestran modificaciones realizadas a elementos comerciales con el fin de adaptarlos a la aplicación en cuestión, se plantean propuestas de solución como son la configuración de los sensores, se utiliza una filosofía de construcción modular para un robot móvil, destacando las ventajas de este tipo de diseños, y por último, se pone especial interés en el que la base del robot funcione de manera adecuada.

En el último capítulo se presentan las conclusiones del proyecto, los resultados obtenidos en las pruebas realizadas al prototipo construido, y finalmente se proporcionan recomendaciones para mejorar el diseño final.

Al final se presenta un apéndice, donde se muestran los planos mecánicos del robot, el diagrama esquemático del circuito usado, y el diagrama de flujo del programa del microcontrolador.

CAPÍTULO 2

ELEMENTOS PARA EL DISEÑO DEL ROBOT

2.1 DEFINICIÓN DE ROBOT MÓVIL

Un robot es un sistema formado por una parte mecánica, una parte electrónica y un programa. Estos tres elementos interactúan para resolver una tarea bien definida por lo regular en un ambiente controlado o bien estructurado (Ollero 2001), es decir, las posibles condiciones y decisiones que se pueden presentar al robot deben ser previstas, esto es algo muy importante en los robots, ya que los comportamientos no previstos pueden llegar a ser peligrosos para las personas y para el robot mismo.

Los robots surgen como una necesidad en la industria de la manufactura. En las líneas de producción existen procesos repetitivos e incluso peligrosos que tienen que llevarse a cabo por una o varias personas. Esto es lo que involucra a las universidades en el ámbito mundial a interesarse en resolver la necesidad de automatizar los procesos industriales. En primera instancia surgen los manipuladores, robots anclados que poseen un brazo adecuado a la tarea a realizar, y que son programados por medio de un control remoto manejado por una persona, lo cual fue posible con el desarrollo de las computadoras, en las cuales los procesos repetitivos son convertidos a estados en un programa, surgiendo los manipuladores programables. Posteriormente, se observó que con el paso del tiempo, el desgaste propio de la maquinaria provocaba que estos elementos presentarían posiciones distintas a las deseadas originalmente en su programación, es por esta razón que se incorpora el empleo de sensores en los robots para obtener una retroalimentación.

Los robots autónomos son inconcebibles sin la existencia de los sensores; éstos le proporcionan al robot información importante para interactuar con su medio ambiente y le indican si realiza las tareas correctamente.

Un robot móvil es aquél que posee un tipo de locomoción para trasladarse dentro de un entorno. Esta locomoción puede ser por medio de patas, orugas o ruedas. Actualmente este tipo de robots en su mayoría son autónomos, es decir, no tienen ningún tipo de control externo o cable conectado a una fuente externa de alimentación. Los robots móviles pueden ayudar a estudiar comportamientos y conductas propias de los seres vivos. Entre las tareas que resuelven este tipo de robots se encuentran esquivar obstáculos, navegar desde un punto A hasta un punto B, seguir una fuente luminosa, simular colonias de insectos por medio de multiagentes inteligentes², que en conjunto resuelven una tarea determinada.

2.2 SENSORES OPTOELECTRÓNICOS

Un sensor es un dispositivo físico que genera un cambio en una medida física relacionado con la variación del fenómeno que se pretende medir. Los sensores que se emplearán en este proyecto serán aquéllos conocidos como sensores optoelectrónicos, que son dispositivos que responden a la cantidad de luz que incide sobre la ventana de detección propia del sensor. El espectro de la luz es muy amplio y esto a menudo provoca interferencia o cambios no deseados del estado físico de conducción de los sensores optoelectrónicos. Una manera de limitar esta respuesta es acotando la banda de las frecuencias que entran al sensor, lo cual se logra con un recubrimiento de una película plástica sobre él. Esta película funciona como filtro.

Es muy común trabajar con la parte del espectro que corresponde a la luz infrarroja; si se parte de que la luz es una forma de energía, la única diferencia entre la luz que se puede ver y la radiación infrarroja que no se puede ver se encuentra en la cantidad de energía que transporta. Salvo los objetos que están absolutamente fríos y no emiten ningún tipo de energía, todos los objetos emiten radiación electromagnética. Cuanto más caliente esté el objeto, más radiación emitirá. Las estrellas como el Sol, emiten cantidades enormes de radiación electromagnética en todas las frecuencias (http://spaceplace.nasa.gov/sp/kids/sirtf1/sirtf_action2.shtml), por lo que se le puede considerar como una fuente natural de ruido blanco. El prefijo “infra” se refiere a longitudes de onda que el ser humano no puede escuchar o ver, por ejemplo, la luz infrarroja está por debajo de las longitudes de onda de luz que los seres humanos pueden

2.2.1 Fotodiodo

Este es el más simple de los fotodetectores semiconductores, provisto de una ventana hacia la unión de materiales tipo P y tipo N polarizada en inversa. Toda luz que cae sobre la unión produce pares de hueco–electrón, provocando que la absorción ocurrida en o cerca de la región de agotamiento de la juntura, separe los portadores rápidamente, y por

² Robots que colaboran en conjunto para resolver una tarea utilizando técnicas de inteligencia artificial.

tanto, los fotones son absorbidos en esta zona de agotamiento, es decir, que dicha zona debe ser lo más ancha posible. Esto se consigue haciendo que el lado N de la unión, por ejemplo, esté muy poco dopado. Los pares hueco—electrón se combinan, hasta que la acumulación de carga es suficiente para superar el campo eléctrico en la juntura, propiciando un flujo de corriente. Los dispositivos ordinarios de juntura tipo PN son útiles en las aplicaciones de baja velocidad pero suelen tener una capacitancia muy grande.

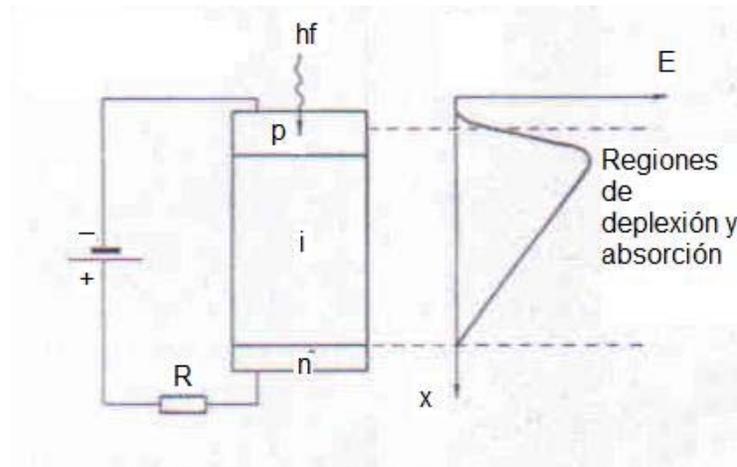


Figura 2.1 Estructura P-I-N de un fotodiodo.

Para que un fotodiodo sea más sensible a mayores longitudes de onda que penetran más profundamente en el semiconductor, la zona N se dopa tan poco que se hace intrínseca, obteniéndose así la estructura P-I-N (Figura 2.1). Este elemento puede iluminarse de forma frontal o lateral. En ambos casos coinciden la zona de absorción y agotamiento, consiguiéndose una eficiencia cuántica elevada, junto con un tiempo de respuesta aceptable. Los valores típicos de espesores para la juntura P-I-N con iluminación frontal están entre 20 y 50 μm , y para iluminación lateral de hasta 500 μm . Tanto las uniones P-N como las P-I-N trabajan generando un par electrón—hueco por cada fotón incidente. Estos dispositivos optoelectrónicos no poseen ganancia interna; para las aplicaciones donde se necesita obtener una amplificación de la señal a medir se utilizan los fototransistores.

2.2.2 Fototransistor

Es esencialmente un transistor bipolar de silicio formado con dos fotodiodos, en la que la ventana hacia la juntura realiza la función de la base del transistor. La luz que cae sobre la juntura de base—emisor provoca una señal eléctrica que se amplifica para proporcionar una corriente alta en el colector. Esto lo hace un dispositivo mucho más sensible que un fotodiodo, y como consecuencia son más propensos al ruido. Estos elementos permiten un tiempo pequeño de conmutación y una rápida recuperación.

2.2.3 Sensor fotorreflexivo

Este tipo de sensores son arreglos, en los cuales se encuentran contenidos en una misma carcasa un diodo emisor de luz infrarroja junto con un fototransistor orientados en una misma dirección (Figura 2.2-b). Esta configuración tiene la finalidad de captar con el

fototransistor el reflejo de la luz emitida por el led sobre una superficie. Se utilizan para la detección de límites, conteo de eventos, alineación de objetos e identificación del contraste de color de una superficie (al medir las variaciones de la cantidad de luz reflejada).



Figura 2.2 Dispositivos optoelectrónicos.

2.3 MOTORES

2.3.1 Motor de corriente directa

El motor de corriente directa convierte la energía eléctrica en mecánica, se compone principalmente de dos partes, un estator que da soporte mecánico al aparato, en el que se encuentran los polos, que pueden ser de imanes permanentes o devanados con hilo de cobre sobre núcleo de hierro. El rotor es generalmente de forma cilíndrica, también devanado y con núcleo, al que llega la corriente mediante dos escobillas. Las partes de un motor de corriente directa se pueden apreciar en la Figura 2.3: (1) estator o carcasa, (2) núcleo polar de un polo inductor, (3) pieza polar de un polo inductor, (4) núcleo polar de un polo de conmutación, (5) pieza polar de un polo de conmutación, (6) rotor, (7) devanado del rotor, (8) devanado de excitación, (9) devanado de conmutación, (10) colector, (11) escobilla positiva y (12) escobilla negativa.

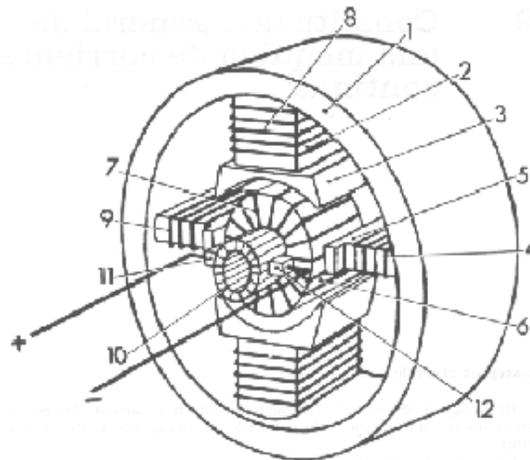


Figura 2.3 Elementos de un motor de corriente directa³.

³ (Universidad Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”).

En el motor de corriente directa, o motor de CD, la energía es aplicada a sus devanados por medio de unas escobillas comúnmente colocadas sobre el rotor; esto ocasiona que el conjunto funcione como un único electroimán que es perturbado por otro campo magnético, producido generalmente por un imán permanente. La velocidad en este motor es medida en revoluciones por minuto (rpm), que resulta ser una función del voltaje, la corriente y la carga en el rotor, y es por esta razón que se requiere de un sistema de control adicional para tener una velocidad precisa o una posición determinada del rotor.

El motor de CD tiene varias propiedades que lo hace ideal para esta aplicación:

- Es pequeño
- Tiene un bajo consumo de corriente
- Puede invertir la dirección en la que gira al cambiar la polaridad en sus terminales
- Tiene una buena relación velocidad–par.

2.3.2 Motorreductor

Un motorreductor es un arreglo formado por un motor al cual se le acopla a su eje un tren de engranes para disminuir la velocidad a la que gira una flecha final. Esto se logra realizando transformaciones de velocidad a par con las diferentes relaciones entre los radios de los engranes que forman el motorreductor.

En un robot móvil con locomoción tipo par diferencial, por ejemplo, cuando se detienen sus motorreductores el arreglo de engranes detiene las ruedas del robot. Los motorreductores permiten, en condiciones invariantes de voltaje, trabajar a una velocidad uniforme.

Los motorreductores que se pueden encontrar en el mercado son muy diversos, pero para la elección de estos elementos se tomaron en cuenta los siguientes criterios:

- Durabilidad
- Velocidad
- Consumo de corriente
- Tamaño
- Costo.

2.3.3 Motor de pulsos

El motor de pulsos tiene considerables ventajas sobre el motor de CD, al permitir el posicionamiento preciso requerido para aplicaciones como son la robótica y la automatización. Opera de manera distinta al de CD, ya que es controlado con secuencias eléctricas de pulsos aplicadas a una etapa sencilla de electrónica de potencia que alimenta independiente los devanados que forman el motor. Cada pulso permite girar al rotor del motor con un incremento en su posición angular, comúnmente llamada “paso del motor” y que también da explicación al otro nombre con que se conoce a este tipo de motor como “motor a pasos”. Cada pulso aplicado al motor permite un preciso incremento angular en la posición del rotor, es por esta razón que la velocidad de estos mecanismos se mide en grados sobre segundo.

El motor de pulsos puede ser fabricado con diferentes incrementos de posición angular por paso, medidos en grados, el cual es una especificación importante de este dispositivo. Está formado por un fuerte imán permanente y una gran cantidad de electroimanes independientes, conformados por los devanados del motor; el imán permanente está ubicado sobre el eje formado por el rotor pero de manera perpendicular a los devanados ubicados en el estator, para que pueda ser afectada la posición del imán permanente por los campos electromagnéticos variables presentes en el estator.

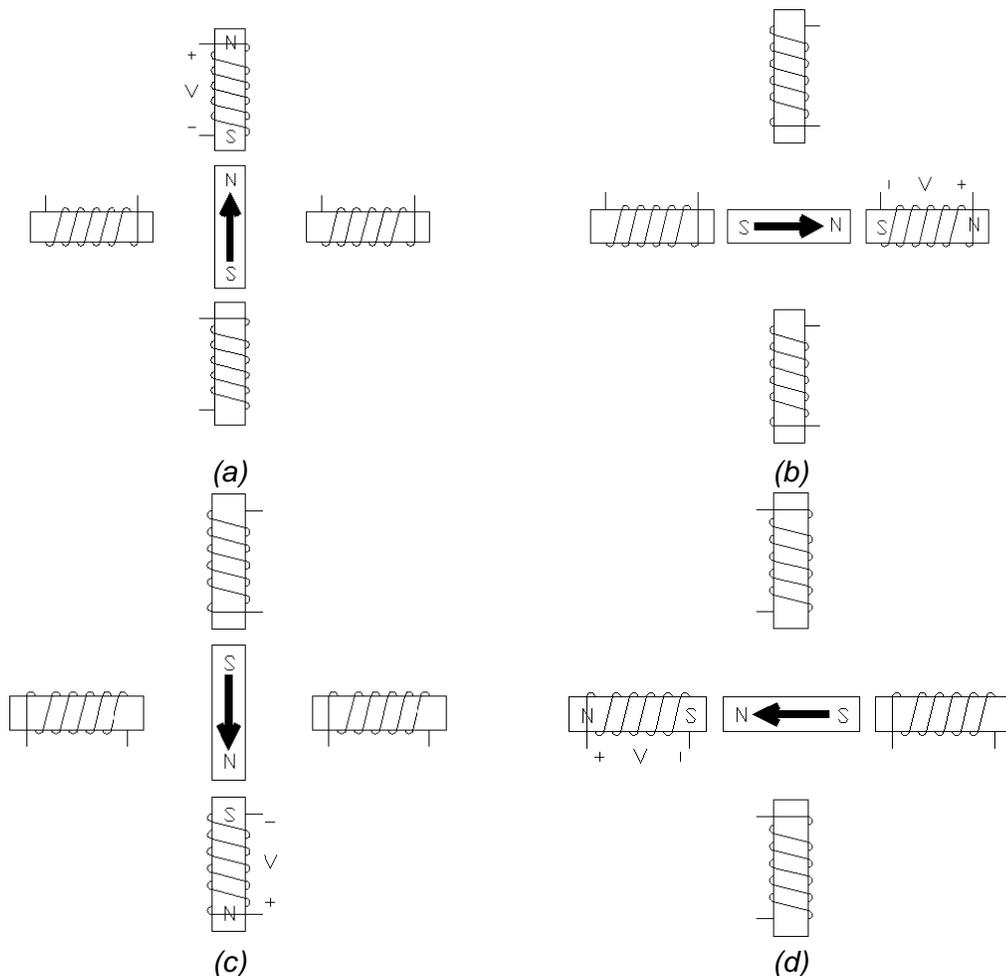


Figura 2.4 Pasos de un motor de pulsos de un solo polo.

- En este esquema simplificado se muestra cómo se mueve un motor de pulsos al polarizar una de las bobinas independientes provocando que el imán permanente del rotor sea forzado a orientarse, dando el primer paso.
- Si la polarización de las bobinas se realiza de forma ordenada y correcta, la siguiente bobina obliga al imán permanente a girar y dar otro paso.
- Al desconectar y conectar las siguientes bobinas, se provoca el tercer paso del motor.
- En esta figura se muestra la última bobina polarizada; para completar el giro sólo se polariza la primera bobina.

2.3.4 Servomotor de modelismo

Este pequeño servomecanismo es utilizado en vehículos de radio control. Tiene un sistema electrónico que realiza control de posición apoyado por un tope físico en su caja de engranes para restringir el movimiento de su eje desde 0° hasta los 180°, comúnmente.

El servomotor posee tres cables de conexión: uno de ellos lleva una señal PWM⁴, que indica al control qué posición debe tomar el servomecanismo; los otros dos conducen el voltaje de alimentación para la electrónica y el motor. Comúnmente el voltaje de alimentación tiene un rango de 5 a 6 V en los vehículos de modelismo.



a) Servomotor de modelismo Futaba.



b) Servomotor de modelismo Hobbico.

Figura 2.5 Servomotores de tamaño estándar para vehículos de modelismo.

2.4 CONFIGURACIONES PARA LA LOCOMOCIÓN DEL ROBOT

La locomoción es el nombre que se le da al proceso con el que un vehículo, como en este caso un robot autónomo, se desplaza de un lugar a otro. El diseño del robot y la colocación de los componentes que lo forman dentro de su estructura, dependen en gran medida del tipo de locomoción utilizado.

2.4.1 Locomoción síncrona

Este tipo de locomoción implica que todas las ruedas sean capaces de orientarse en una misma dirección. En un robot con locomoción síncrona se controla la dirección y la velocidad a la cual giran las ruedas. Este tipo de locomoción es muy sensible a pequeñas variaciones del suelo, provocando que cada rueda se desplace una distancia diferente al perder el contacto con el piso, lo cual origina un error en la posición esperada del robot en el entorno. Cada rueda posee un eje de dirección vertical que le permite orientarse en cualquier dirección; todas las ruedas giran y se orientan simultáneamente. Comúnmente el arreglo mecánico para este tipo de locomoción está formado por dos motores

⁴ Modulación por Ancho de Pulso, por las siglas en inglés de Pulse Width Modulation.

independientes, uno hace girar todas las ruedas en el mismo sentido y el otro motor controla el ángulo de orientación del arreglo que forman las ruedas. Como ejemplo se puede apreciarse en la Figura 2.6 una locomoción síncrona que implica tres ruedas orientadas en una misma dirección, colocadas en los vértices de un triángulo equilátero, que se encuentra inscrito en una plataforma circular.

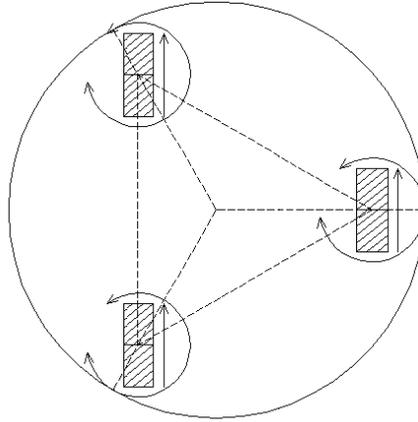


Figura 2.6 Vista inferior de un robot móvil con locomoción síncrona.

2.4.2 Locomoción de triciclo

Este sistema locomoción se ilustra en la Figura 2.7. La rueda frontal es la encargada de la dirección y la locomoción del vehículo. El eje trasero, con dos ruedas laterales, es estático y sus ruedas se mueven libremente. La maniobrabilidad es mayor que en la configuración Ackermann, pero puede presentar problemas de estabilidad en terrenos difíciles. El centro de gravedad tiende a desplazarse cuando el vehículo transita por una pendiente, lo cual puede causar la pérdida de locomoción. Debido a su simplicidad, es bastante frecuente en vehículos robóticos para interiores y exteriores pavimentados (Ollero, 2001).

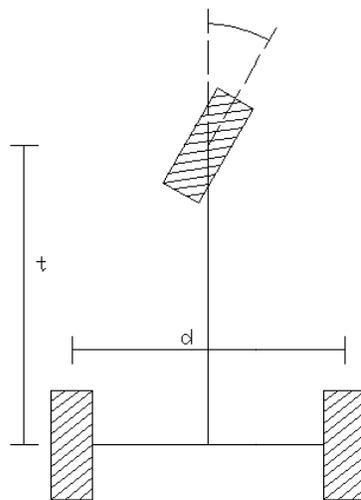


Figura 2.7 Vista inferior de un robot con locomoción de triciclo.

2.4.3 Locomoción de automóvil o dirección de Ackermann

Es el utilizado en vehículos de cuatro ruedas convencionales. De hecho, los vehículos robóticos para exteriores resultan normalmente de la modificación de vehículos convencionales tales como automóviles o incluso vehículos más pesados (Ollero, 2001). Este sistema de locomoción se ilustra en la Figura 2.8. Las ruedas frontales son las encargadas de la dirección del vehículo. En esta configuración las ruedas interiores giran a una menor rapidez angular que las ruedas exteriores cuando se cambia la trayectoria del vehículo en un giro.

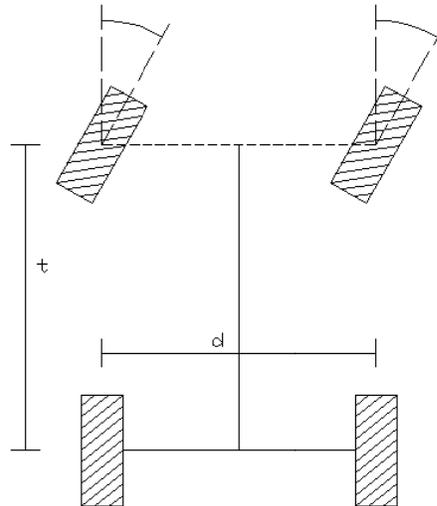


Figura 2.8 Vista inferior de un vehículo con dirección de Ackermann.

2.4.4 Locomoción diferencial

Esta basada en el principio del elemento mecánico llamado diferencial, que permite que la rueda derecha e izquierda de un vehículo giren a revoluciones diferentes. Específicamente una locomoción diferencial está formada por dos ruedas que giran a velocidades y sentidos de giro diferentes, ya sea que se emplee un motor para cada rueda o un motor para mover ambas ruedas.

Es el mecanismo de locomoción más sencillo para los robots que utilizan locomoción con ruedas para moverse por el piso. Se usa frecuentemente en pequeños robots de bajo costo dedicados a navegar en superficies planas. Este tipo de locomoción es muy sensible a la relación de movimiento de las dos ruedas: un pequeño error en la velocidad aplicada a cada rueda, puede provocar un cambio significativo en la trayectoria deseada, independientemente si el robot se desplaza rápido o lento.

La locomoción diferencial utiliza una o dos ruedas de apoyo para equilibrarse. Usualmente consiste en dos ruedas montadas en ejes colineales controladas por dos motores independientes, como lo ilustra la Figura 2.9.

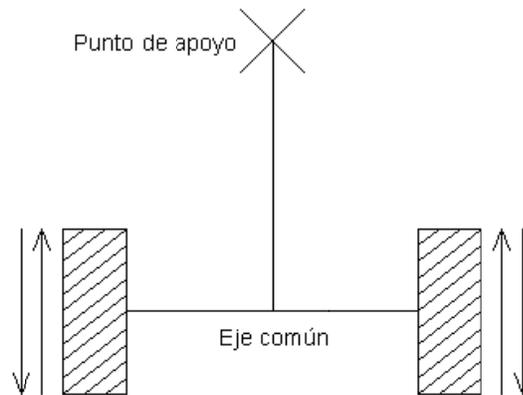


Figura 2.9 Vista inferior de un vehículo con locomoción diferencial.

2.5 CIRCUITOS LÓGICOS PROGRAMABLES

Los circuitos lógicos programables (PLD⁵, por sus siglas en inglés) fueron introducidos a mediados de los años setenta, y surgieron a partir de la idea de construir circuitos lógicos combinacionales que fueran programables. Se basan en el principio que rige cualquier dispositivo lógico programable, que establece que cualquier función booliana puede ser expresada como “una suma de productos”. Sin embargo, contrario a los microprocesadores, que pueden correr un programa pero que poseen un hardware predefinido y fijo, la programación del PLD fue prevista para que se realizara a nivel de hardware. En otras palabras, un PLD es un chip de propósito general cuyo hardware puede ser reconfigurado desde el interior, con base en las especificaciones particulares deseadas.

El primer PLD fue llamado PAL⁶ o PLA⁷ (por sus siglas en inglés, respectivamente); el circuito interno de un PAL consiste en un arreglo, o matriz, de compuertas AND y un arreglo de compuertas OR. El arreglo AND es programable mientras que el OR generalmente es fijo. Mediante una matriz de conexiones se selecciona cuáles entradas serán conectadas al arreglo AND, cuyas salidas son conectadas al arreglo OR y de esta manera obtener una función lógica en forma de “suma de productos” mencionada. Una matriz de conexiones es una red de conductores distribuidos en filas y columnas con un fusible en cada punto de intersección.

Con estos recursos se implementan las funciones lógicas deseadas mediante un software especial y una interfaz de programación. En la Figura 2.10 se ilustra el circuito básico para la mayoría de los PLD.

⁵ Programmable Logic Device

⁶ Programmable Array Logic

⁷ Programmable Logic Array

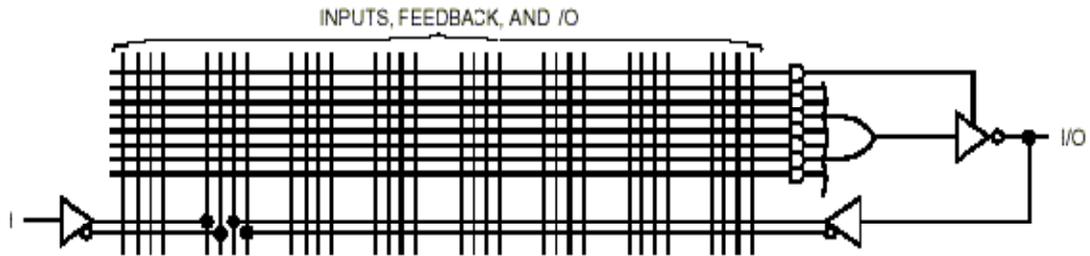


Figura 2.10 Circuito básico de la estructura de un PLD.

Un PAL sólo contiene internamente compuertas lógicas (no posee flip-flops), así que solamente permite la implementación de circuitos combinacionales. Para compensar esta deficiencia, fue desarrollado un modelo, registrado bajo el nombre de PLD, que incluía un flip-flop en cada una de las salidas del circuito; esto conllevó a poder implementar funciones secuenciales simples. Al conjunto formado por un circuito combinacional y elementos que permiten una implementación secuencial en su salida, se le asignó el nombre genérico de “celda”, (cell, por su nombre en inglés).

A principios de los años ochenta, fue agregada circuitería lógica adicional a cada salida del PLD, a esta nueva celda de salida del circuito, se le llamó macrocelda, (macrocell, por su nombre en inglés), que contenía, además de los flip-flops, compuertas lógicas y multiplexores. Por otra parte, la celda en sí misma es programable y permite muchos modos de operación. Adicionalmente, se integró una retroalimentación de señal a las salidas del circuito del arreglo programable, lo cual dio al PLD una mayor flexibilidad. Este nuevo PLD con esta nueva estructura fue conocido como PAL genérico o GAL⁸, que es una denominación que utilizó originalmente la empresa Lattice Semiconductor, y que más tarde se les otorgó la licencia de uso del nombre a otros fabricantes. Un GAL, en su forma básica, es un PLD con una matriz AND reprogramable, una matriz OR fija y una lógica de salida programable mediante una macrocelda. Esta estructura permite implementar cualquier función lógica como “suma de productos” con un número de términos definido.

Un dispositivo similar es el llamado PALCE⁹, que está basado en la tecnología CMOS¹⁰. Es básicamente un GAL, pero que en vez de estar formado por una red de conductores ordenados en filas y columnas en las que en cada punto de intersección hay un fusible, el fusible se reemplaza por una celda CMOS eléctricamente borrable (EECMOS). Mediante la programación se activa o desactiva cada celda EECMOS y se puede aplicar cualquier combinación de variables de entrada, o sus complementos, a una compuerta AND para generar cualquier operación producto que se desee. Una celda activada conecta su correspondiente intersección de fila y columna, y una celda desactivada desconecta la intersección.

Todos estos circuitos integrados (PAL, PLA, GAL y PALCE) son conocidos actualmente como Dispositivos Lógicos Programables Simples, (SPLD, por sus siglas en inglés).

⁸ Generic Array Logic, por sus siglas en inglés.

⁹ PAL CMOS Electrically erasable/programmable, por sus siglas en inglés.

¹⁰ Semiconductor de Óxido de Metal Complementario, Complementary Metal Oxide Semiconductor, por sus siglas en inglés.

Tiempo después, varios dispositivos GAL fueron fabricados en el mismo chip, debido a un esquema de creación de rutas más sofisticado, tecnologías más avanzadas para manejar el silicio tales como, la JTAG¹¹, interfaz que soporta a varios dispositivos lógicos, entre muchas otras características. A este nuevo dispositivo se le conoció como PLD complejo (CPLD¹², por sus siglas en inglés), que se forma con múltiples bloques lógicos, cada uno similar a un SPLD. Los bloques lógicos se comunican entre sí utilizando una matriz programable de interconexiones, lo cual hace más eficiente el uso del silicio, y por consiguiente a un mejor desempeño y un menor costo. La matriz de interconexiones programable permite unir las terminales de entrada/salida a las entradas del bloque lógico, o las salidas del bloque lógico a las entradas de otro bloque lógico, o inclusive a las entradas del mismo bloque. Los CPLD son empleados con frecuencia por su alta densidad de circuitos internos, alto desempeño y bajo costo.

Finalmente, a mediados de los años ochenta, la compañía Xilinx introdujo al mercado el FPGA¹³. La arquitectura de un FPGA consiste en arreglos de varias celdas lógicas las cuales se comunican unas con otras mediante canales de conexión verticales y horizontales. Cada celda lógica es similar a los bloques lógicos de un CPLD. La estructura de las celdas lógicas y las formas en que éstas pueden ser interconectadas, tanto las salidas como las entradas de la celda, varían de acuerdo al fabricante. En general, una celda lógica tiene menos funcionalidad que la combinación de “sumas de productos” y macroceldas de un CPLD, pero como cada FPGA tiene una gran cantidad de celdas lógicas, es posible implementar grandes funciones utilizando varias celdas lógicas en cascada. Las características adicionales incluidas en los chips FPGA son: que posee una memoria de acceso aleatorio estática, un multiplicador de la frecuencia de reloj, una interfaz PCI¹⁴, entre muchas otras más, ya que año con año se siguen agregando periféricos a los FPGA, como pueden ser multiplicadores, DSP¹⁵ o microprocesadores. Varias compañías fabrican FPGA; entre las más destacas están Xilinx, Actel, Altera, QuickLogic y Atmel.

PLD	PLD Simple (SPLD)	PAL PLA GAL
	PLD Complejo (CPLD)	
	FPGA	

Figura 2.11 Resumen de la evolución de los PLD (Volnei, 2004).

2.6 MICROCONTROLADORES

Un microcontrolador es una computadora en miniatura de bajo costo que comúnmente se utiliza en pequeños dispositivos electrónicos, destinados a aplicaciones de automatización. Cuenta con una unidad lógica aritmética, memorias internas (RAM¹⁶,

¹¹ Joint Test Action Group, por sus siglas en inglés.

¹² Complex Programmable Logic Device.

¹³ Field – Programmable Gate Array.

¹⁴ Peripheral Component Interconnect.

¹⁵ Digital Signal Processor.

¹⁶ Memoria de acceso aleatorio, Random Access Memory, por sus siglas en inglés.

ROM¹⁷ y EEPROM¹⁸) y una unidad central de procesamiento, y además ya tiene integrados periféricos como son: contadores, convertidores analógico digital, módulos PWM, comparadores, puertos de entrada/salida de información, entre otros.

Su capacidad de almacenar y correr programas los hace extremadamente versátiles, es decir, un microcontrolador puede ser programado para tomar decisiones y ejecutar rutinas basado en situaciones predeterminadas, con base en las señales de entrada o en los mensajes recibidos por sus puertos.

Los microcontroladores, al poseer la capacidad de implementar no sólo funciones de lógica digital sino también complicadas operaciones matemáticas, le permite llevar a cabo el monitoreo de actividades complejas como lo son sistemas de redes neuronales, de control difuso, de verificación de los dispositivos electrónicos conectados, entre muchas otras.

Los microcontroladores surgen como una necesidad del mercado de consumo, pues se requería la integración de ciertas características de procesamiento digital, en conjunto con periféricos sencillos que permitieran la entrada y salida de información, no sólo en forma digital sino utilizando protocolos específicos de comunicación, además de contadores, comparadores y módulos de PWM, es decir, computadoras digitales para aplicaciones particulares que pudieran realizar desde el control de un despliegue de cristal líquido, hasta gestionar las funciones del sintonizador de un radio, pasando por el sistema de control electrónico de los automóviles: aire acondicionado, medidor de gasolina, de temperatura, sistemas de inyección de combustible, control del sistema de enfriamiento, pasadores eléctricos, ventanas eléctricas, entre otros.

2.7 ASISTENTE PERSONAL DIGITAL

El Asistente Personal Digital o PDA, por las siglas en inglés de Personal Digital Assistant, es un término asociado a algunos pequeños dispositivos móviles que pertenecen a una nueva generación de computadoras personales de bolsillo, que se utilizan para tareas tales como almacenar información, llevar una agenda electrónica, cargar un directorio electrónico, navegar en Internet y comunicarse con otros dispositivos digitales para el intercambio de información. Un PDA posee un microprocesador junto con otros periféricos: una pantalla sensible al tacto, puerto IRF¹⁹, puerto USB, puerto serial y módulos de memoria. Dado su pequeño tamaño y poderosa capacidad de procesamiento, su empleo es muy atractivo para la implementación de un sistema de inteligencia artificial para el control del robot. Entre los más populares PDA se encuentran: el modelo IPAQ de la compañía HP, el modelo Pocket PC de la compañía DELL y el modelo Tungsten de la compañía PALM. Algunos PDA ofrecen una pequeña versión del sistema operativo Microsoft Windows llamada Windows CE, lo que hace muy familiar el ambiente gráfico. Otro sistema operativo popular en los PDA es el Palm OS, orientado a sistemas con este nombre.

¹⁷ Memoria de sólo lectura, Read Only Memory, por sus siglas en inglés.

¹⁸ Memoria de sólo lectura eléctricamente programable y borrrable, Electrically Erasable Programmable Read Only Memory, por sus siglas en inglés.

¹⁹ Radio frecuencia infrarroja, Infrared Radio Frequency, por sus siglas en inglés.

Los modelos IPAQ y Pocket PC utilizan Windows CE, en el cual se pueden crear aplicaciones orientadas a objetos en lenguaje C++ y en C#.

Al establecer una comunicación entre el PDA y el microcontrolador por medio de los puertos seriales de estos dispositivos, apoyados en una aplicación gráfica instalada dentro del PDA, se pueden gestionar las acciones del robot, dedicando el microcontrolador a la tarea de leer los sensores y mover los motores, de manera que se liberen los recursos del PDA específicamente dedicados al algoritmo que le dará la inteligencia al robot para poder recordar el laberinto y escoger la mejor ruta a seguir.

2.8 PUERTO SERIAL

El puerto serial surge ante la necesidad de establecer comunicación a mayores distancias que los periféricos anteriores, tales como el puerto paralelo, utilizando un número reducido de líneas o cables. El envío de la información de manera serial implica que los datos representados por bits se encuentran seguidos unos detrás de otros, como si viajaran montados en un tren de pulsos. Esto implica tener reglas bien establecidas para poder indicar cuándo termina o empieza una palabra, o cuándo se está utilizando o no el canal de comunicación. A este conjunto de reglas se le llama protocolo.

El estándar RS-232 para puerto serial fue diseñado para enviar información de manera digital con longitudes de palabra igual a 8 bits, basándose en el código ASCII estándar. Para tener una componente promedio de CD igual a cero, se utiliza un código con no retorno a cero, es decir, la información se representa con tres valores de voltaje, el primero tiene un rango entre $-15V$ y $-3V$ que representa el dígito binario "1", el segundo tiene rango entre $+3V$ y $+15V$ que representa el dígito binario "0" y sólo para establecer una referencia de voltaje entre los dos dispositivos a comunicar, se utiliza una conexión a una tierra común. Estos rangos de voltaje están basados en los comúnmente manejados para la comunicación entre computadoras de hace más de una década.

La mayoría de los sistemas digitales que emplean el estándar RS-232 para comunicarse lo realizan de manera asíncrona con paquetes de información formados por la palabras de 8 bits, sin envío de bit de paridad e incluyendo un bit de paro. Estas características garantizan una buena comunicación entre dispositivos a tasas altas de transferencia.

Las velocidades a las que se puede enviar información por un puerto serial son; 75, 110, 134, 150, 300, 600, 1200, 1800, 2400, 4800, 7200, 9600, 14,400, 19,200, 38,400, 57,600, 115,200 y 128,000 bps (baudios por segundo, es decir la tasa de cambios entre el estado 1 lógico y 0 lógico en un segundo). Las velocidades de los 75 bps hasta los 9600 bps son totalmente arbitrarias; esto se debe a que la velocidad original de datos seriales fue seleccionada para el correcto funcionamiento de los teletipos, aparatos que tenían muchas partes mecánicas necesarias para la impresión de los caracteres. En la actualidad las velocidades menores a 4800 bps ya no se utilizan, más que en aparatos (instrumentos) muy antiguos.

La velocidad más utilizada es 9600 bps, tanto para módems (apócope de modulador y demodulador) externos como de comunicación con periféricos que basen su comunicación en el puerto serial. Las velocidades mayores a los 9600 bps se emplean para comunicar dispositivos en los cuales el procesamiento de información es extensivo,

sea necesario recibir datos a una tasa de transferencia alta y entregar resultados a una tasa similar, como es el procesamiento digital de las señales de varios sensores. Dado que el estándar RS-232 utiliza voltajes entre $\pm 3V$ y ± 15 , es necesaria la construcción de una interfaz para convertir estos niveles a señales del tipo TTL²⁰/CMOS compatibles con un microcontrolador, y cuando éste desea comunicarse con otro dispositivo serial, es necesario convertir de un nivel TTL/CMOS a un voltaje del estándar RS-232.

2.9 ALGORITMOS PARA RESOLVER UN LABERINTO

Es posible resolver un laberinto donde no existan ciclos anidados por medio de una simple regla: al llegar a la intersección de varios caminos, siempre se toma la decisión de dar vuelta a la derecha (o a la izquierda), sin importar que esto lleve a rutas que tengan caminos sin salida, al llegar a estos caminos sólo hay que dar un giro de 180° y regresar por la ruta hasta encontrar otra intersección de caminos, y en ella al momento de decidir qué opción tomar; se debe respetar el dar vuelta a la derecha de nuevo (o izquierda si se están siguiendo los caminos a la izquierda). Este algoritmo de exploración es muy interesante porque permite examinar todo el laberinto sin dejar de lado algún camino válido que conduzca a la salida. Si se respeta esta regla, no se cae en ciclos que eviten llegar a la salida; en caso de cometer un error en una intersección, el robot regresa al origen del laberinto, explora de nuevo el laberinto y al regresar al mismo nodo donde se cometió el error, puede rectificar su decisión. Cabe señalar que este algoritmo permite la exploración del laberinto y salir del mismo, pero no elimina del mapa rutas no validas (nodos terminales) ni tampoco busca una ruta óptima.

²⁰ Lógica transistor-transistor, Transistor-Transistor Logic, por sus siglas en inglés.

CAPÍTULO 3

DISEÑO Y ANÁLISIS DE LAS POSIBLES DE SOLUCIONES

3.1 INTRODUCCIÓN

En este trabajo de tesis se desea diseñar y construir un robot móvil autónomo, que es una combinación de un sistema mecánico de locomoción y un sistema electrónico, controlado por un dispositivo de procesamiento, que gestione sus comportamientos con base en las señales de sus sensores. Este sistema debe ser capaz de elegir entre los diferentes estados de una máquina secuencial, con base en la información que capta de su medio ambiente. El sistema mecánico de locomoción define la estructura general del robot, el número de motores usados y los posibles movimientos para el desplazamiento del robot. Los sensores que se requieren deben ser capaces de ubicar la línea negra que forma los diferentes caminos posibles a la salida del laberinto. El sistema de procesamiento, con base en las señales captadas por el sistema de sensado, debe generar los comportamientos y las decisiones del robot.

Después de un análisis intensivo del planteamiento del problema, se llegó a la conclusión de que las tres partes que requieren un análisis en cuanto al diseño del robot son: los sensores usados por el robot, el tipo de locomoción empleado por el robot, y el sistema de procesamiento y generación de comportamientos del robot.

3.2 ANÁLISIS DEL TIPO DE SENSORES DEL ROBOT

En esta primera etapa, se consideran los diferentes tipos de sensores que pueden ser usados por el robot. Para este análisis, es necesario describir la geometría del laberinto, que debe tener las siguientes características:

- El camino del laberinto consiste en una serie de líneas negras de 6 mm (de aquí en adelante se le llamará “espesor del camino”) que se dibujan sobre un área blanca relativamente opaca. Ninguna línea paralela a otra debe estar a una distancia menor de 150 mm, y debe de existir una distancia mínima de 150 mm entre dos intersecciones.
- Todas las intersecciones de los caminos deben formar ángulos rectos.
- Deben existir ciclos dentro del laberinto formados por los caminos, con el objeto de que existan múltiples rutas de la entrada a la salida del laberinto.
- El nodo final del laberinto, o salida, deberá establecerse con un círculo negro de 150 mm de diámetro.
- El nodo inicial, o entrada, se marca con una intersección formada por el camino y un segmento de línea negra del mismo espesor, con una longitud de 50 mm. El conjunto tiene una forma similar a una pequeña T, y desde este nodo el robot debe comenzar la exploración del laberinto, debiendo tener alguna parte de su estructura sobre esta T.
- No existe ninguna indicación para el final de un camino no valido, sólo termina la línea negra que lo forma.

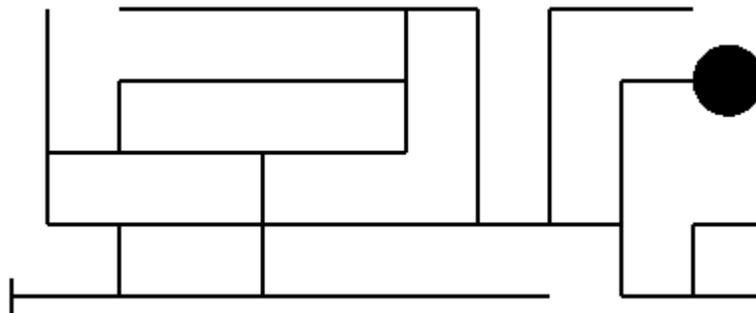


Figura 3.1 Laberinto tomado de la Seattle Robotics Society.

Con base en las características anteriores, se concluye que se necesita un sensor o grupo de sensores, capaz de apreciar la diferencia entre dos colores; blanco y negro. Todos los seres vivos, así como los dispositivos ópticos creados por el hombre, necesitan ver el reflejo de la luz sobre una superficie para apreciar sus colores. Por ejemplo, un cuerpo se ve de color rojo cuando absorbe en casi su totalidad, todas las longitudes de la luz que incide sobre él, menos las de color rojo, las cuales refleja. La luz blanca es una mezcla de las radiaciones de longitudes de onda diferentes, que se extienden desde la luz roja, que tiene la longitud de onda más larga, hasta la luz violeta, que tiene la longitud de onda más corta. Los colores de las cosas que se ven mediante la luz reflejada, dependen del tipo de luz que incide sobre ellas y también depende de sus superficies. Si una superficie refleja toda la luz que cae sobre ella, el color de la superficie será blanco cuando lo ilumine la luz blanca. Una superficie que absorbe toda la luz que le llega, se verá de color negro.

Los fotodetectores ópticos deben reunir una serie de características que les haga adecuados para la conversión de la señal óptica en eléctrica (Albella, 1998). Algunas de las que toman importancia para este proyecto en específico son:

- Alta eficiencia cuántica: conversión de fotones en electrones
- Introducir poco ruido
- De dimensiones pequeñas
- Tensiones de polarización pequeñas
- Gran fiabilidad y bajo costo.

Fototransistor midiendo luz ambiental y fotodiodo midiendo luz ambiental

De acuerdo con lo anterior, se podrían utilizar fototransistores que respondieran al reflejo de la luz ambiental del lugar de la prueba sobre la superficie del laberinto, y que aquéllos cambiaran su estado de saturación y corte con base en la cantidad de luz reflejada por el color blanco, y la cantidad de luz absorbida por el color negro. La luz del medio ambiente varía demasiado, sobre todo cuando hay ventanas en la habitación. Incluso las sobras de las personas, objetos y hasta la del mismo robot influirían en las lecturas de los elementos fotorreflektivos. Esta situación implica una constante calibración de los sensores para poder distinguir entre los umbrales de los colores blanco y negro. La utilización de un fotodiodo en lugar de un fototransistor implicaría los mismos elementos externos que el fototransistor, pero se perderían las propiedades de amplificación, por sólo tener idealmente umbrales de saturación y corte en aquel elemento optoelectrónico.

Led infrarrojo en conjunto con un fototransistor

Cuando la luz del ambiente fuera muy tenue, se necesitaría de una fuente luz que fuera uniforme para iluminar el camino del robot, y pueda estar restringida en su longitud de onda, para calibrar a los sensores de manera que sólo respondan a esta pequeña sección del espectro. El led infrarrojo que se muestra en la Figura 3.2 (<http://www.jameco.com>) sólo emite luz con una longitud de onda de 940 nm, utilizado en conjunto con un fototransistor como el mostrado en la Figura 3.3 (<http://www.jameco.com>), el cual posee una capa de plástico que es un filtro que sólo permite pasar la luz con dicha característica y detectar condiciones uniformes de iluminación. Al colocarlos cerca uno del otro, pueden ser orientados correctamente ya que el led infrarrojo tiene un ángulo de dispersión del haz de 12°. Al utilizar un fototransistor, se puede aumentar la sensibilidad, ya que éste proporciona un voltaje proporcional a la luz recibida en su base, haciendo que el umbral de calibración sea mayor que en un fotodiodo.



Figura 3.2 Diodo de luz infrarroja.



Figura 3.3 Fototransistor con filtro de luz.

Sensor fotorreflexivo

Los sensores deben ser pequeños, para poderlos agrupar de manera compacta cuando se realicen arreglos para su colocación dentro del robot, e idealmente se puede utilizar un par formado por un led infrarrojo que emita sólo una longitud de onda en particular, y un fototransistor sensible específicamente a ese tipo de luz. Esto eliminaría las interferencias externas provocadas por otras frecuencias de luz infrarroja. Comercialmente existen sensores fotorreflexivos, que cumplen con estas condiciones; son arreglos que se encuentran contenidos en una misma carcasa, formados por un led infrarrojo junto con un fototransistor, orientados en una misma dirección (Figura 3.4). Esta configuración tiene la finalidad de captar con el fototransistor el reflejo de la luz emitida por el led sobre una superficie. Se utilizan para la detección de límites, conteo de eventos, alineación de objetos e identificación de contraste de color de una superficie, que es justamente para lo que serían usados en el robot.

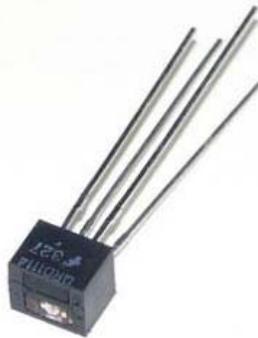


Figura 3.4 Sensor fotorreflexivo.

3.3 ANÁLISIS DEL TIPO DE LOCOMOCIÓN DEL ROBOT

El robot de este proyecto debe ser capaz de detenerse en los nodos encontrados, girar en las intersecciones para retomar el recorrido, y permitir un seguimiento fiel de la línea negra que forma el laberinto. Para ello, la utilización de extremidades en este robot fue descartada porque el control necesario para lograr movimientos precisos en trayectorias simples es muy complejo. La opción más sencilla y eficiente es la utilización de ruedas; la mayoría de los robots móviles utilizan ruedas en su locomoción porque permiten desplazamientos precisos. Ésta es una parte muy importante del robot, pues define los posibles movimientos del mismo dentro del laberinto, así como los comportamientos en los distintos nodos que el robot tendrá al encontrarlos, ya que los giros del robot en el seguimiento de la línea son en ángulos múltiplos de 90°, y el desplazamiento en tramos de 150 mm o más, por lo que el análisis de las posibilidades de locomoción se aborda bajo estos criterios.

3.3.1 Locomoción síncrona

En el capítulo anterior se describieron las características generales de una locomoción síncrona. Si el robot de este proyecto empleara este tipo locomoción, podría explorar el laberinto sin rotar todo el cuerpo del robot, sino únicamente las ruedas que se orientan simultáneamente en la misma dirección; al terminar de orientar sus ruedas comenzaría el

avance del robot para seguir el nuevo camino, que lo llevará al siguiente nodo. Este tipo de exploración sin rotar el cuerpo del robot, le permitiría estar siempre orientado en la misma dirección con respecto al laberinto, pero esto exige que el sistema de sensores sea capaz de seguir la línea negra hacia cualquiera de los cuatro cuadrantes del robot: anterior (Figura 3.5–a), izquierdo (Figura 3.5–b), derecho (Figura 3.5–d), y posterior (Figura 3.5–c). Los desplazamientos dentro del laberinto para este tipo de locomoción serían: avanzar hacia la izquierda, avanzar hacia la derecha, avanzar hacia atrás y avanzar hacia adelante. En la misma Figura 3.5 se ilustran las diferentes direcciones de giro de las ruedas en una locomoción síncrona, y en la Figura 3.6 se muestra cómo se colocaría inicialmente el robot en el laberinto, el cual contiene todos los nodos posibles que el robot puede encontrar en su exploración.

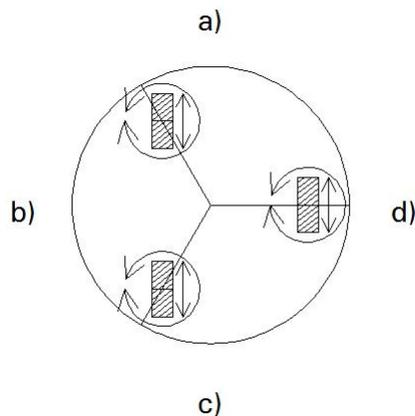


Figura 3.5 Direcciones y movimientos de las ruedas en una locomoción síncrona.

En la Figura 3.7 se ilustra cuál sería el primer movimiento de las ruedas dentro del laberinto si se propone como posición inicial la mostrada en la Figura 3.6. Posteriormente, en la Figura 3.8 se ilustra cómo continúa en su movimiento frontal siguiendo la línea negra que forma el camino del laberinto; este desplazamiento del robot continúa hasta llegar al primer nodo propuesto para este ejemplo, que es una vuelta izquierda forzada; en la Figura 3.9 se ilustran los siguientes movimientos que tienen que realizar las ruedas del robot, que son una rotación de 90° en sentido en contra de las manecillas del reloj y a continuación avanzar al frente por la trayectoria que se encuentra a la izquierda del robot, Figura 3.10. A continuación, el siguiente nodo visitado es un “nodo cruz”, en el cual, por la lógica básica empleada de seguir los caminos a la izquierda, las ruedas girarían nuevamente 90° en sentido antihorario, y a continuación avanzaría al frente; lo cual se ilustra en las Figuras 3.11 y 3.12.

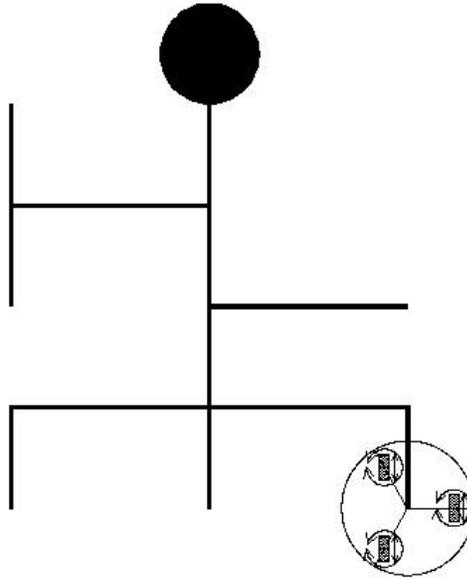


Figura 3.6 Laberinto que contiene todos los nodos posibles que puede encontrar el robot.

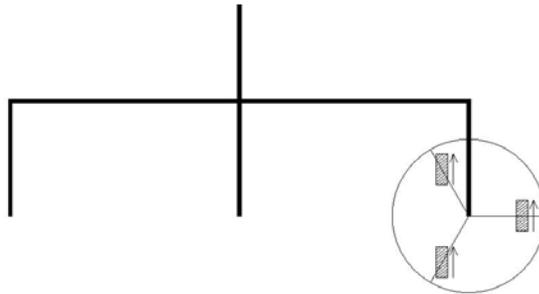


Figura 3.7 Posición inicial del robot dentro del laberinto propuesto.

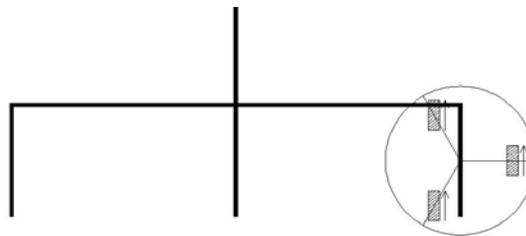


Figura 3.8 Primer movimiento de las ruedas del robot para seguir la línea negra que forma el laberinto.

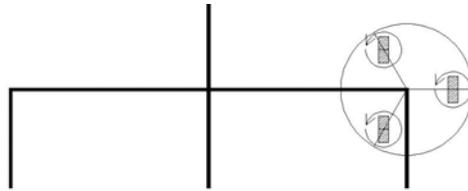


Figura 3.9 Cuando el robot arriba al primer nodo “vuelta izquierda forzada”, las ruedas del robot giran 90°.

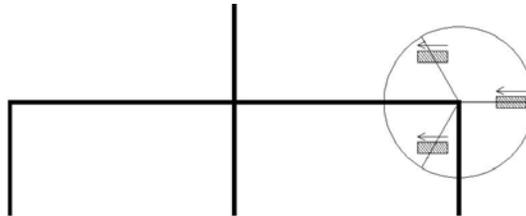


Figura 3.10 El siguiente movimiento es seguir la nueva trayectoria encontrada.

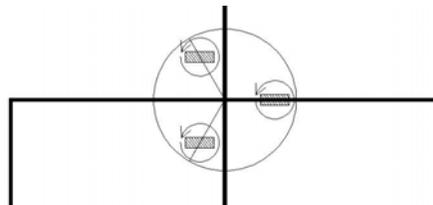


Figura 3.11 Cuando el robot arriba al siguiente nodo (nodo cruz), las ruedas del robot giran 90°.

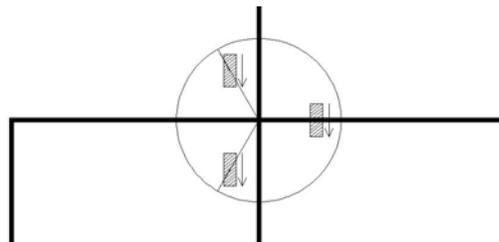


Figura 3.12 El siguiente movimiento, es seguir el nuevo camino encontrado.

Sin embargo, el sistema mecánico de locomoción síncrona es complejo, y debe estar bien diseñado para garantizar un buen funcionamiento del sistema. Se requiere una precisa sincronía en la orientación de las ruedas y que la velocidad aplicada en cada una de ellas al momento del avance sea la misma, de no ser así, el robot constantemente perdería el camino y tendría que hacer correcciones para regresar a él.

3.3.2 Locomoción de triciclo

La locomoción tipo triciclo permite dar giros de 90° en los nodos del laberinto y al momento de hacerlo no se perdería el punto de referencia inicial y final del robot. En este tipo de configuración la dirección es controlada por un actuador y la locomoción del móvil por un motor; esto le permitiría al robot llegar a los nodos, clasificarlos y frenar eficientemente en ellos (sin deslizamiento para no perder la referencia al nodo). Este tipo de locomoción implica la construcción de diferentes tipos de mecanismos para la locomoción y dirección. En la Figura 3.13 y 3.14 se ilustra la barra (a) en donde se montaría el motor para la dirección (c), el motor para la locomoción (d), la rueda que da dirección y locomoción al vehículo (b); las ruedas que se encuentran en la parte posterior del móvil marcadas con la letra (e), tal como se describió en el Capítulo 2, giran libremente. Todo el conjunto, como se puede apreciar en la Figura 3.13, deja poco espacio para la etapa de procesamiento, baterías y tarjetas electrónicas, tomando en cuenta que el tamaño reglamentario para el robot es reducido. El mecanismo para este tipo de locomoción es complicado de construir y conducir.

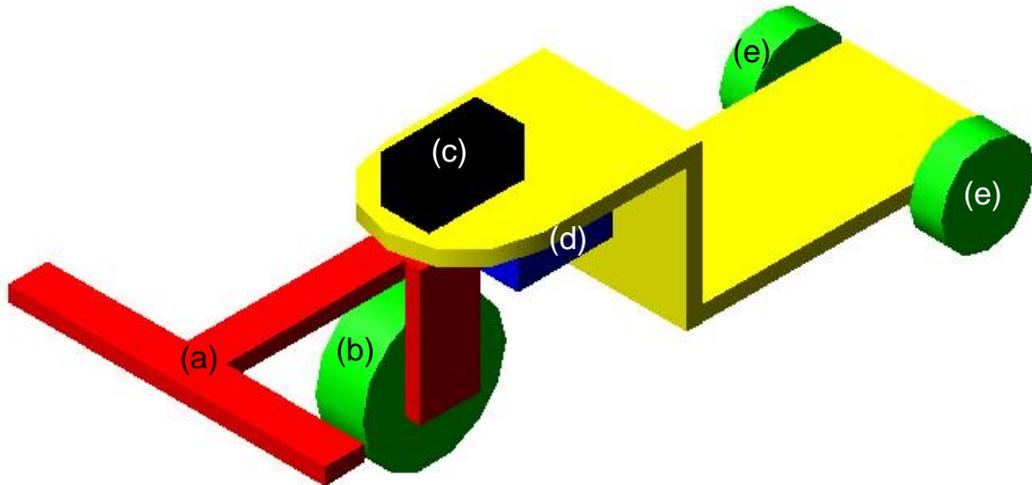


Figura 3.13 Dibujo isométrico de la locomoción tipo triciclo.

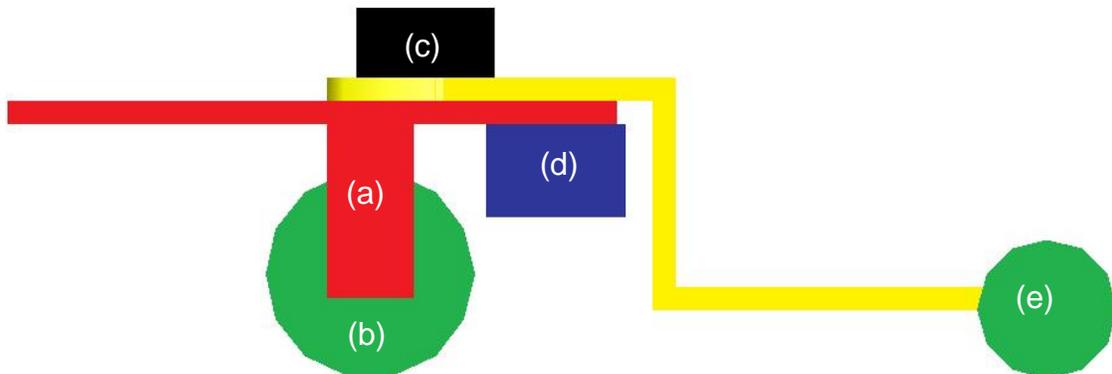


Figura 3.14 Locomoción tipo triciclo, proyección de perfil.

3.3.3 Locomoción de automóvil o dirección de Ackermann

La locomoción de automóvil o dirección de Ackermann tiene la ventaja de ser una de las configuraciones más estables, funciona muy bien en caminos donde las trayectorias son sinuosas. Como ya se mencionó anteriormente, el laberinto a resolver no tiene esta característica. Si el robot utilizara una dirección de Ackermann, para poder navegar en un laberinto con las características anteriormente mencionadas se requeriría que el robot fuera pequeño, en relación con la dimensión mínima de un tramo del camino (150 mm), como se ilustra en la Figura 3.15; un pequeño mecanismo de Ackermann podría hacer virar al robot al encontrar un nodo del laberinto y colocarse de manera suave en la línea negra que forma el nuevo camino a explorar, pero para hacerlo de manera eficiente, necesitaría anticiparse a la nueva dirección que el vehículo desee tomar antes de llegar al nodo.

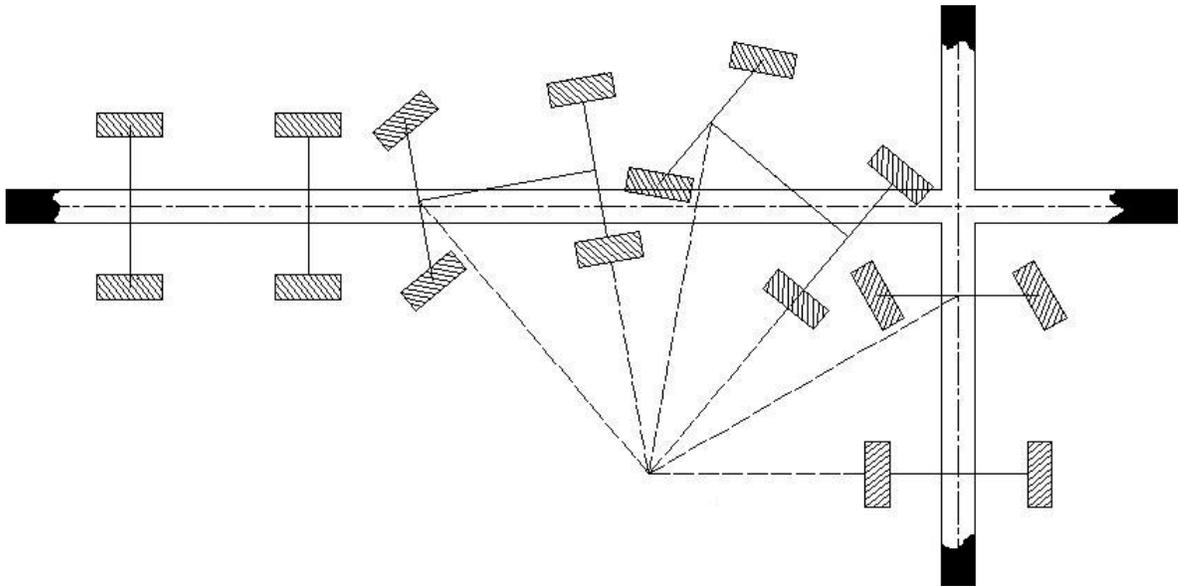


Figura 3.15 Robot con un mecanismo de Ackermann cambiando la trayectoria del robot dentro del laberinto.

3.3.4 Locomoción diferencial

La locomoción diferencial es la más sencilla de construir y de conducir, sólo se tienen como variables para su control las velocidades de cada motor. Al poder cambiar el sentido de giro de los motores, se pueden realizar los giros descritos con anterioridad. Si los motores poseen una caja de engranes, al momento de detener el motor se permite un frenado relativamente rápido, al encontrar un nodo dentro del laberinto. Este tipo de locomoción es la que presenta mayores ventajas, permite girar eficientemente y el mecanismo para su construcción es de los más sencillos. Por estas razones y con base en el análisis de las opciones de locomoción contempladas, se decidió que el robot utilice la locomoción diferencial para su movimiento.

3.4 ELECCIÓN DEL TIPO DE MOTORES QUE UTILIZARÁ EL ROBOT

Después de elegir el tipo de locomoción a emplear, se determinó el tipo de motores que utilizará el robot para su operación.

Motores de pulsos

Estos motores son muy precisos y la generación de las señales que se aplican a los devanados para que gire el motor es muy sencillo. Dado que están contruidos con varios devanados que mueven un imán permanente colocado en el rotor, el arreglo final es pesado y de dimensiones considerables, comparados con motores de CD, pues cada paso del motor está determinado por dos devanados. En la estructura de un vehículo, éstos agregarían peso y ocuparían mucho espacio interior. Como se mencionó en el análisis, los motores de pulsos son ampliamente utilizados en aplicaciones donde el control de posición y los movimientos tengan que ser extremadamente precisos. Para el robot propuesto, dos aspectos importantes son la velocidad y el no exceder las dimensiones permitidas. Por tanto, un motor demasiado grande consumiría el espacio que podría ser necesario para la electrónica interna, baterías y sensores del robot.

Motor de corriente directa

El consumo de energía de los motores de corriente directa es bajo, por lo que hacen un uso eficiente de la carga de las baterías. Estos motores se diseñan para girar a una velocidad angular elevada, su fácil control de velocidad lo hace una buena opción para mover un pequeño robot. Para realizar el control de la velocidad de giro de un motor de CD, se requiere poder variar el voltaje aplicado a sus terminales. Adicionalmente, si se transforma la relación de la velocidad del motor y el par en el rotor por medio de una caja de engranes, se obtiene un par suficiente para poder mover al robot.

Servomotor de modelismo

Comercialmente existen diferentes motorreductores, pero para la elección del motor se tomó en cuenta su durabilidad; en este caso, los motorreductores que poseen los servomotores de modelismo presentan pocas fallas al transcurrir el tiempo de operación, gracias a su buen diseño. Otro aspecto importante para el desplazamiento del robot relacionado con sus motores, es la velocidad a la que gira el vástago final del motorreductor, donde se conecta la llanta del robot: si la velocidad a la que gira el conjunto es muy alta, el control del robot al seguir la línea, la podría perder por no detectarla correctamente; en cambio, si la velocidad es muy lenta, el robot emplearía mucho tiempo para explorar el laberinto. Además, conviene que el motorreductor sea compacto, y por supuesto el dispositivo elegido debe ser económico. El servomotor de modelismo cumple con todas estas características deseables, siempre y cuando se le hagan ciertas modificaciones. Estas últimas se describen en el siguiente capítulo.

3.5 ANÁLISIS DEL HARDWARE DE PROCESAMIENTO Y GENERACIÓN DE COMPORTAMIENTOS DEL ROBOT

El sistema de procesamiento es el encargado de tomar las decisiones del robot, con base en la detección de nodos por el sistema sensorial. Los comportamientos que debe tener robot son: seguir la línea que forma el laberinto, virar para recorrer un camino a la

izquierda, virar para recorrer un camino a la derecha, regresar por el camino recorrido al llegar a un punto terminal no válido, y determinar cuándo ha llegado a la salida del laberinto. Los comportamientos son rutinas en las que se generan señales de control que son enviadas al sistema electrónico de potencia que energiza los motores del robot. Adicionalmente, se pretende conectar este pequeño robot a dispositivos que tengan una mayor capacidad de procesamiento y almacenamiento con el fin de poder utilizar algoritmos más complicados y eficientes para resolver un laberinto.

3.5.1 Procesamiento empleando un PLD

En principio, este sistema de procesamiento podría ser implementado con un CPLD o un FPGA. La clasificación de los nodos a partir de las señales de los sensores se puede realizar con un circuito combinatorial, y posteriormente los comportamientos del robot ante los diferentes nodos que encuentre en su camino pueden ser generados por máquinas secuenciales. Estos dispositivos pueden ser programados con el lenguaje de programación VHDL, que es la combinación de las siglas de VHSIC y HDL, donde VHSIC se refiere a Very High Speed Integrated Circuit y HDL es el acrónimo para Hardware Description Language.

Desgraciadamente, un CPLD no permite la implementación de un hardware complejo, como el del sistema de un puerto digital, en conjunto con los circuitos combinatoriales y las máquinas secuenciales de comportamientos de este robot. En cambio, un FPGA permite la generación de un sistema tan complejo como el descrito para el robot, empleando el entorno de desarrollo integrado MAXPLUS II, desarrollado por Altera, con el que no sólo se puede diseñar el sistema de procesamiento, sino incluso realizar su simulación. Esta opción permite diseñar, a nivel de hardware, muchos circuitos digitales para el robot. El FPGA permite generar un sistema diseñado especialmente para la aplicación a resolver.

3.5.2 Procesamiento empleando un microcontrolador

La propiedad más notable de los microcontroladores es su generalidad. Es capaz de seguir una secuencia de instrucciones, llamada programa, que opera con ciertos datos. El usuario puede especificar y modificar el programa o los datos, según sus necesidades determinadas. Gracias a esta flexibilidad, estas pequeñas computadoras digitales son capaces de realizar tareas de procesamiento de información que cubren una amplia gama de aplicaciones. Para posicionarse en el mercado, la compañía Microchip, desarrolló microprocesadores de ocho bits muy económicos y con la capacidad de ser programados utilizando un puerto serial. Las características citadas hicieron a los microcontroladores fabricados por esta compañía, muy atractivos para los estudiantes de las universidades en el ámbito mundial. Para estos microcontroladores existe un entorno de desarrollo integrado, IDE²¹, en el que se pueden programar en lenguaje ensamblador y se distribuye gratuitamente por Internet. Por si todo lo anterior fuera poco, algunos modelos de microcontroladores PIC²² cuentan con memoria de programa tipo FLASH, que poseen un menor tiempo de acceso, que las EEPROM.

²¹ Integrated Development Environment, por sus siglas en inglés.

²² Peripheral Interface Controller, por sus siglas en inglés.

3.5.3 Procesamiento empleando un PDA

El PDA permite implementar algoritmos que den “inteligencia” artificial al robot para encontrar la ruta óptima para resolver el laberinto, con base en algoritmos tales como búsqueda profunda o Dijkstra²³. Es posible generar una aplicación para el dispositivo móvil, pues actualmente este tipo de desarrollos se emplea para teléfonos celulares u organizadores personales. El PDA, al tener una pantalla sensible al tacto y botones, permite monitorear al robot, verificar el valor de calibración de los sensores, y hasta observar de manera gráfica el resultado de la correcta clasificación de los nodos encontrados en el camino del robot. Además, el PDA puede conectarse a la Internet usando WiFi, e incluso colocar un módulo GPS al robot, para que con base en él, se gestionen sus movimientos.

Un PDA podría controlar al robot directamente; sólo sería necesario implementar una interfaz para comunicarse con el robot, con objeto de introducir la información de los sensores y una etapa de potencia para que los motores respondan a los comandos enviados.

3.5.4 Elección del final del sistema de procesamiento

A partir del análisis realizado a las tres diferentes opciones planteadas, se puede concluir que con un FPGA se puede construir un circuito digital a la medida para el robot; sin embargo, para la implementación de estos dispositivos se requiere dedicar tiempo, y tanto el software como la interfaz para su programación son costos.

Implementar el sistema de control con un PDA sería una opción que daría ventajas sustanciales al robot, en cuanto a manejo de información y memoria, y la comunicación con el robot puede ser muy interactiva, por la capacidad que tiene el PDA de presentar la información de forma gráfica. Sin embargo, sería necesaria una interfaz de comunicación entre el PDA y el robot.

En cambio, el microcontrolador fue creado para implementar este tipo de interfaces y controlar sistemas automatizados de manera económica. Por esta razón, se seleccionó el microcontrolador para implementar el sistema de inteligencia de bajo nivel del robot, pues sus periféricos permiten que su programa se dedique solamente a gestionar el control de sus comportamientos. El robot podría resolver el laberinto sin necesidad de una inteligencia más compleja; mas sin embargo, gracias a los periféricos de comunicación del microcontrolador, se podría controlar al robot desde un PDA, y en el cual sería factible incluir la “inteligencia” de alto nivel, que sería lo más adecuado para esta aplicación, debido a la mayor capacidad de procesamiento y almacenamiento con respecto al microcontrolador, así como por la factibilidad de montarlo en el robot debido a su tamaño. Si esto se desea implementar, el envío de comandos al robot se puede realizar por medio de interrupciones.

²³ Algoritmo de búsqueda que permite encontrar la ruta mas corta dentro de una estructura de árbol, propuesto por Edsger Dijkstra en 1959.

CAPÍTULO 4

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO

4.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se describe el sistema propuesto para el robot que resuelve laberintos con base en el análisis realizado en el capítulo anterior. Primero se abordará al sistema de locomoción elegido y los movimientos necesarios para que el robot se desplace dentro del laberinto. A continuación se describe el sistema de sensores usados, el acondicionador de señal implementado para discretizar las señales de los sensores, así como el arreglo en el que están colocados y las diferentes combinaciones de señales digitales que se envían al sistema de procesamiento. Al final, se describe a detalle las decisiones que tiene que tomar el sistema de procesamiento, las rutinas de calibración y pruebas de los sistemas de manera independiente.

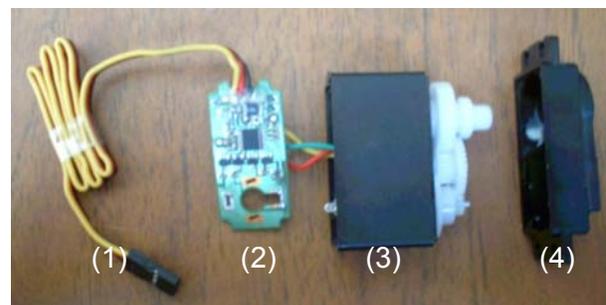
Los robots autónomos que interactúan con su medio ambiente y toman decisiones a partir de las señales presentes en sus sensores, son sistemas complejos que son propensos a tener fallas en algunas de sus partes, provocadas por el uso y desgaste normal de las partes del robot. Es por esta razón que es conveniente tener una estructura modular; en caso de que dos o más partes requieran mantenimiento, se podría determinar de manera rápida qué componente está fallando. Esta es una característica relevante del diseño, pues en caso del mal funcionamiento de alguna parte del robot, ésta puede ser remplazada al ser independiente de las demás partes. Otra ventaja es que se puede seguir empleando al robot en tareas que dependan sólo de los sistemas que se encuentren funcionando correctamente.

4.2 ADAPTACIÓN DE UN SERVOMOTOR DE MODELISMO

Los servomotores utilizados en los vehículos de modelismo sólo pueden girar de 0 a 180°, como se mencionó en el Capítulo 2, pues están diseñados para trabajar en aplicaciones de control de posición. Haciendo unas pequeñas modificaciones se puede hacer que éstos giren 360° como lo requiere el robot. Para explicar estas modificaciones se subdividirá al servomotor en cuatro partes, como se aprecia en la Figura 4.1; la primera parte es el cable de tres líneas descrito en el Capítulo 2 (Figura 4.1 b-1), la segunda parte es la tarjeta electrónica (Figura 4.1 b-2), la tercera parte es la carcasa que contiene el motor y el potenciómetro (Figura 4.1 b-3) y por último la cuarta parte; que corresponde a la carcasa que contiene el tren de engranes de reducción, como se aprecia en (Figura 4.1 b-4).



a) Servomotor de modelismo ensamblado



b) Partes de Servomotor de modelismo

Figura 4.1 Partes mecánicas y electrónicas de un servomotor de modelismo.

En la parte de la electrónica interna del conjunto (Figura 4.1 b-2), se desolda el cable de tres vías, el potenciómetro y el motor de corriente directa. De estos elementos sólo se conserva el motor y el cable. El motor se coloca en su lugar dentro de la carcasa de plástico, del cable de tres vías se toman dos y éstas se sueldan al motor. Esto permite alimentarlo con voltajes mayores a 5 V; si no es retirada la tarjeta electrónica, al aplicar voltajes mayores la inutilizarían. Lo anterior se aprecia en la Figura 4.2.



a) Desoldado del motor



b) Cables para la alimentación del motor

Figura 4.2 Modificaciones electrónicas.

El paso siguiente para la adaptación del servomotor, es quitar el tope físico de la carcasa que contiene la caja de engranes del servomotor (Figura 4.4 a) y el tope físico del engrane terminal de la caja de engranes (Figura 4.3 a).

En cuanto al engrane, con una navaja se corta este tope mecánico, teniendo cuidado de no dañar los dientes del engrane (Figura 4.3 b); posteriormente el remanente de plástico que no puede ser rebajado con la navaja, es lijado para evitar algún rozamiento que provoque que el motor no gire de manera uniforme (Figura 4.3 c).



a) Engrane con el tope de plástico



b) Corte del tope de plástico



c) Engrane sin el tope de plástico

4.3 Figuras corte del tope del engrane.

Para la carcasa donde están contenidos los engranes, se sigue un procedimiento similar: con una punta de corte montada en una rectificadora, se elimina el tope de plástico limándolo. Como ya se mencionó en el párrafo anterior, esta acción es fundamental para que el engrane gire de manera uniforme y sin restricciones.



a) Carcasa con topes de plástico



b) Limado de los topes



c) Carcasa sin topes de plástico

Figura 4.4 Limado de la carcasa.

Finalmente, se vuelve ensamblar todo el conjunto, y aunque se ha perdido el control de posición del servomotor, todavía se conserva la pequeña caja de engranes con una reducción ideal y acorde a los requisitos establecidos.

4.3 ETAPA DE SENSORES

El correcto diseño del sistema de sensores, responsable de seguir y analizar los caminos recorridos, es crucial para el robot. Todos los comportamientos serán gestionados con base en las condiciones presentes en ellos; si los sensores no realizan las lecturas correctas, el robot se perderá al no percibir los caminos válidos. Es importante mencionar que al captar lecturas incorrectas de los sensores, la inteligencia del robot entregará resultados erróneos. Las líneas que componen el laberinto son de color negro y tienen un grosor de 6 mm. Esto limita el tamaño de los sensores que tienen que ser pequeños para que puedan reaccionar adecuadamente a la diferencia entre el color blanco y el negro de una línea tan delgada. Los sensores, además, deben ser capaces de identificar los diferentes nodos de manera correcta y en todo momento guiar al robot en el seguimiento de la línea.

Los distintos nodos posibles que se puede encontrar el robot en su camino son los que se ilustran en la Figura 4.5.

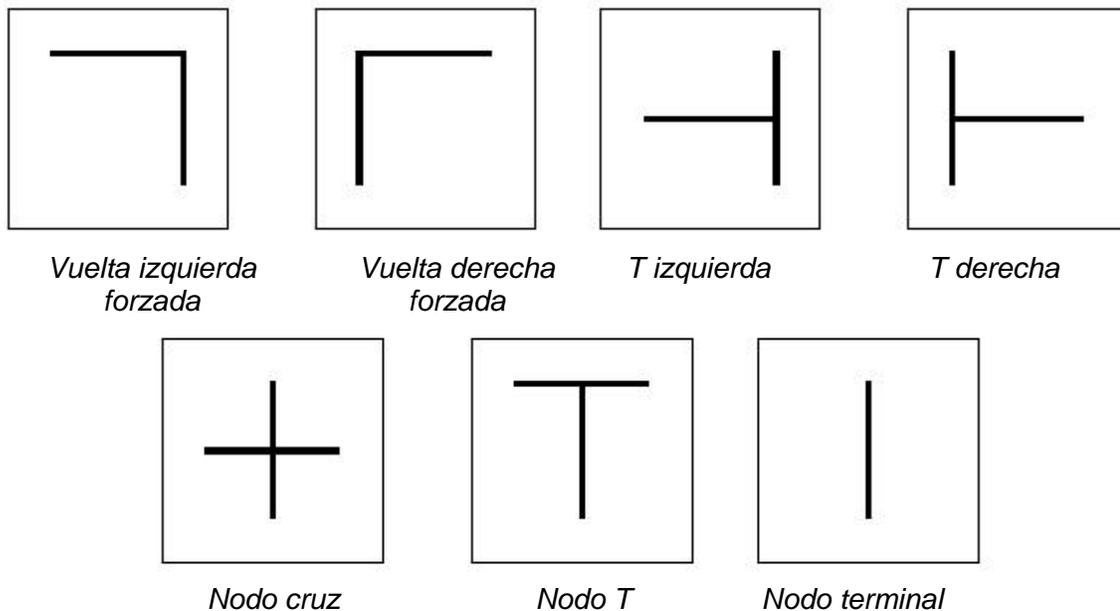


Figura 4.5 Nodos del laberinto.

Para la etapa de los sensores, en el capítulo anterior se analizaron tres propuestas; de éstas la más económica es adquirir por separado los diodos infrarrojos y fototransistores y armar los conjuntos para que se pueda observar el reflejo de la luz infrarroja sobre el color blanco de la pista del laberinto. Sin embargo, debido al tamaño de estos sensores, no se pueden construir arreglos suficientemente pequeños, necesarios para seguir la línea de 6 mm de grosor y clasificar correctamente los nodos que forman el laberinto.

Al utilizar un sensor fotorreflectivo, se optimiza el tamaño de la placa donde se encuentra el arreglo de los sensores (desde este momento llamado solamente "sensores"), porque en un pequeño encapsulado se encuentran contenidos el fototransistor, el diodo infrarrojo y las terminales necesarias para su conexión.

Este arreglo tiene un costo algo elevado en comparación con la primera propuesta, pero tiene la ventaja de poder colocar más próximos los sensores y la cantidad de luz reflejada por el sensor, al ser más pequeño, es un poco más puntal que en los sensores de reflexión discretos. Éstas son las razones por las que se opta por un arreglo de sensores formado por sensores fotorreflectivos, soldados sobre una placa fenólica perforada.

El sensor fotorreflectivo elegido es el QRD1114, posee un diodo infrarrojo junto con un fototransistor con su respectivo filtro de luz en un pequeño empaquetado de plástico cuyas medidas son 4.39 mm ancho, 6.10 mm de largo y 4.65 mm de altura. En este arreglo el haz de luz infrarrojo del diodo se encuentra desenfocado del fototransistor, esto le permite tener una distancia variable a la superficie donde se reflejará la luz. Típicamente se utiliza para el seguimiento de líneas y detección de límites. Este sensor se muestra en la Figura 4.6.



Figura 4.6 QRD1114.

Después de un análisis de diferentes configuraciones de sensores, se optó por ocho con el arreglo mostrado en la Figura 4.7. La posibilidad de que los sensores S0 y S1 estuvieran fuera de la línea negra provocaba que el robot perdiera fidelidad en el seguimiento de la línea negra.

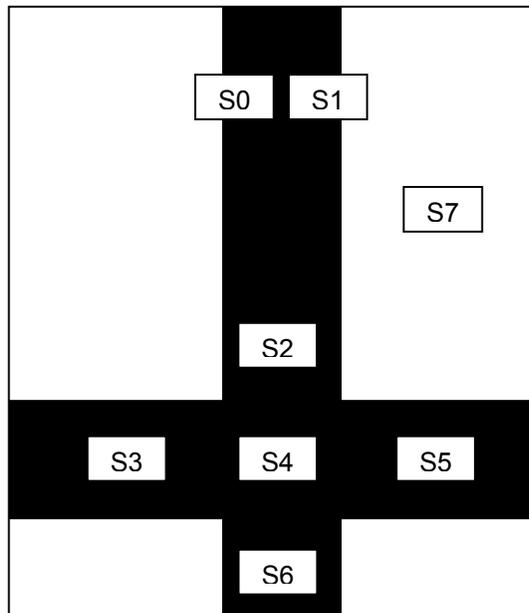


Figura 4.7 Configuración de sensores.

También se observó que el robot al llegar a los nodos, lo haría con un pequeño error de orientación del cuerpo del robot con respecto a la línea del camino explorado, y como consecuencia se tenía una mala clasificación del nodo encontrado.

En cuanto a la posibilidad de utilizar tres sensores para seguir la línea, esta configuración se descartó con base en las pruebas realizadas a diferentes combinaciones de sensores, ya que los sensores presentaban un punto ciego en donde la línea quedaba oculta; esta zona se forma entre un sensor y otro. Otra posibilidad de solución implicaba que el robot recordara cuál fue el último sensor que vio la línea, situación que complicaba la programación y análisis de las señales de los sensores.

Las funciones de cada sensor son:

- S0 y S1 son los encargados de seguir la línea, y controlan el avance del robot cuando avanza en línea recta, sin la presencia de intersecciones de otros caminos
- S2 tiene la tarea de diferenciar el nodo cruz del nodo T, así como las vueltas izquierda y derecha de los nodos llamados T izquierda y T derecha
- S3 y S5 son los encargados de identificar si existe algún camino válido del laberinto a la izquierda o a la derecha, le indican al robot en qué momento interrumpir el seguimiento de la línea, y provocan que éste cambie de camino
- S4 y S6 tienen la tarea de identificar los nodos terminales. En caso de que S6 salga de la línea pero S4 no, la lectura se clasifica como un error de la posición del sensor. Solamente cuando S6 es el único sensor que ve una línea se considera como un nodo terminal
- El sensor S7, sirve para verificar cuándo se llegó al final del laberinto. Ya que la salida del laberinto se marca con un círculo negro de 150 mm de diámetro; cuando los ocho sensores están sobre este círculo, se establece que se resolvió el laberinto. De no existir el S7, se podría provocar una confusión entre el nodo cruz y el final del laberinto.

Se tomó la decisión de utilizar ocho sensores como máximo para que el manejo de la información y las operaciones dentro del microcontrolador fuera más sencillo, aunque cabe mencionar que configuraciones con un mayor número de sensores proporcionarían más información. Al utilizar ocho sensores en un microcontrolador de ocho bits, la información de las lecturas de los sensores puede ser almacenada en sólo un registro, y recibida solamente por un puerto del microcontrolador. Podría realizar operaciones o comparaciones de la información almacenada en un registro, y dado que la ALU es de ocho bits, los resultados serían de ocho bits; estas razones justifican la decisión del número de sensores utilizados.

4.3.1 Consideraciones especiales para la etapa de sensores

La posición de los sensores en la placa de montaje está definida por cuatro distancias d_1 , d_2 , d_3 y d_4 (Figura 4.8). Para determinar estas distancias, la principal consideración es que los sensores se encuentren el mayor tiempo posible sobre la línea negra que forma el laberinto, pues esto ayuda a disminuir las lecturas erróneas al explorarlo.

La distancia del sensor S4 a la línea que une a los sensores S0 y S1 a la cual se denominará d_2 , debe ser lo más grande posible, respetando las dimensiones máximas del

robot (cubo de 150 mm por arista). Como se puede apreciar en la Figura 4.9, cuando d_2 es pequeña, el cuerpo del robot tiene que girar más, pues el ángulo que se requiere ajustar para regresar a la línea negra es mayor. En la Figura 4.10 se puede apreciar que cuando la distancia d_2 es más grande, el ángulo que el robot tiene que girar es más pequeño. Del análisis anterior se decidió que el valor de d_2 fuera de 50 mm.

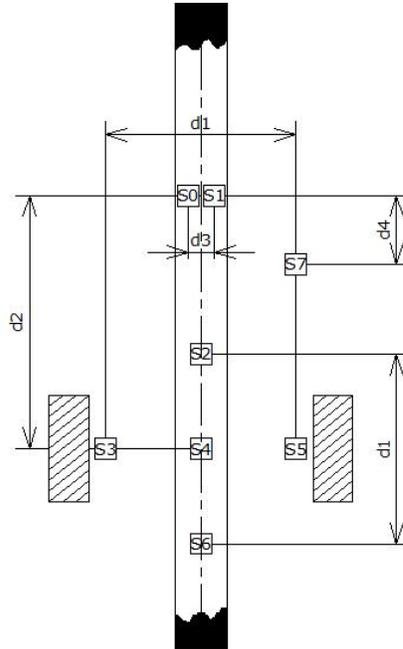


Figura 4.8 Dimensiones de las posiciones de los sensores.

El criterio de decisión utilizado para definir la distancia d_1 es similar al empleado para d_2 .

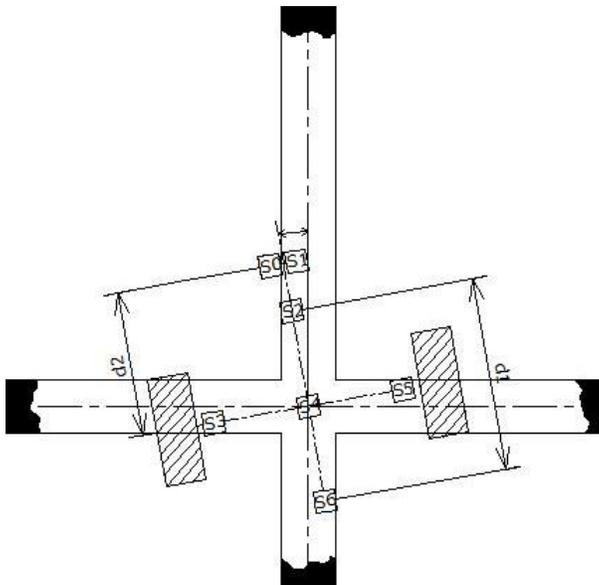


Figura 4.9 Análisis cuando d_2 es pequeña.

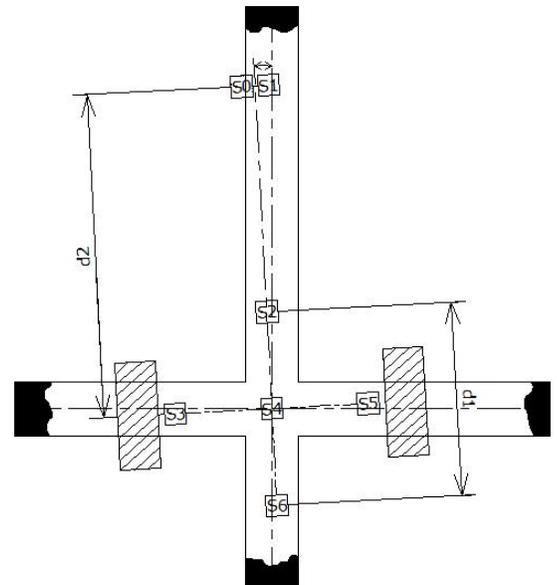


Figura 4.10 Análisis cuando d_2 es más grande.

En la Figura 4.8 se puede observar que esta distancia define la posición de los sensores S2, S3, S5 y S6. También se puede apreciar en las Figuras 4.9 y 4.10 que la distancia $d1$ al ser mayor permite, cuando el robot avanza hacia adelante, que los sensores S2, S3, S5 y S6 tengan una menor desviación respecto a las líneas que forman bifurcaciones hacia otros caminos.

Esta condición ayuda a la exploración del laberinto, pues asegura que el robot llegue a estos nodos en la mejor posición posible. Cabe señalar que esta distancia está limitada por las ruedas de tracción del robot. Tomando en cuenta lo anterior, se define una distancia de 30 mm para $d1$.

Para especificar la distancia $d3$, la cual define la colocación de los sensores más importantes del robot, S0 y S1, que están encargados de seguir el camino del laberinto, se establece que estos estén el mayor tiempo posible dentro de la línea negra, por lo que uno de los elementos que puede definir esta distancia es el grosor de la línea negra que forma el laberinto la cual mide 6 mm. Otras cuestiones a considerar son el tamaño del encapsulado del sensor QRD1114 y la orientación que S0 y S1 tendrán dentro de la placa de sensores. En el inicio del apartado 4.3 se detallaron las dimensiones del sensor QRD1114 tomando en consideración que es de 4.39 mm, se colocaron los sensores dentro de la placa de sensado a una distancia de 5 mm, medida desde el centro de un sensor al del otro, respetando la separación de la placa fenólica perforada donde van montados, y que se ilustra en la Figura 4.11.

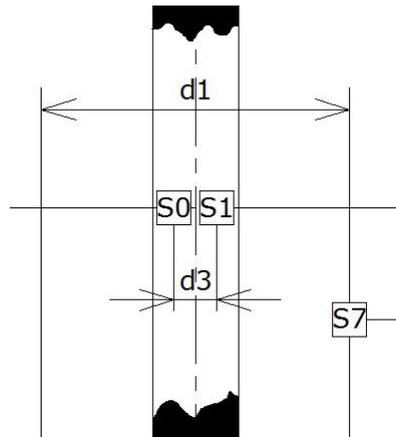


Figura 4.11 Distancia $d3$.

La señal de cada sensor es digitalizada por medio de un comparador de voltaje LM339. Este integrado, en particular, está diseñado para utilizarse como un comparador de voltaje de precisión, pues permite comparar voltajes hasta con una precisión de 0.2 V. Este integrado no requiere una alimentación tipo dual, como la mayoría de los amplificadores operacionales, pues con una sola fuente, polariza correctamente sus elementos internos. Al alimentar el LM339 con una fuente de 5 V y trabajar como comparador, proporciona como resultado de la comparación una conmutación entre un voltaje aproximadamente de 5 V y otro de aproximadamente 0 V, lo cual es otra ventaja del integrado, pues se puede acoplar directamente a circuitos de la familia TTL.

El circuito mínimo para interconectar un sensor infrarrojo a una entrada digital del microcontrolador PIC se muestra en la Figura 4.12.

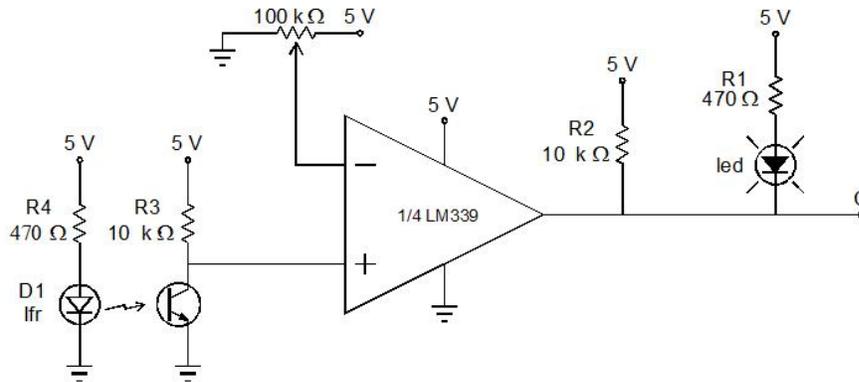


Figura 4.12 LM339 como comparador de voltaje.

El circuito mostrado en la Figura 4.12 permite ajustar individualmente cada sensor utilizando un pequeño potenciómetro, y en caso de un cambio de la iluminación poder realizar una rápida calibración. El diodo D1 emite luz infrarroja que es captada por el fototransistor, el cual tiene a R3 para limitar la corriente que circula en él cuando éste tiene una corriente fluyendo de su colector hacia su emisor provocada por la saturación de fotones en su zona intrínseca en la que es captada la luz. Se toma la terminal del colector del fototransistor porque en esta configuración se puede aprovechar la amplificación de la señal captada en la ventana del fototransistor reflejada en dicho colector. La señal amplificada es comparada en el LM339 con un voltaje de referencia fijado con un resistor variable de 100 kΩ aplicado a la terminal inversora del LM339. El resistor de pull-up R2 es necesario ya que el integrado tiene una salida tipo colector abierto y polariza al último transistor del mismo. El led es usado como testigo del resultado de la comparación. La terminal C de la Figura 4.12 es la que se acopla directamente al microcontrolador, que varía su estado entre 0 y 5 V.

Después de que cada sensor es calibrado individualmente, se tienen dos casos: cuando un sensor se encuentra sobre una línea el color negro no refleja la luz infrarroja y su estado es "1" lógico; en caso contrario, cuando un sensor se encuentra sobre la superficie blanca (fuera de una línea) su estado lógico es "0".

4.3.2 Metodología de clasificación de los diferentes nodos con base en las señales de los sensores

Al ser ocho sensores, esto indica que se pueden tener $2^8 = 256$ combinaciones de lecturas posibles en los sensores, las que son enviadas al puerto B del microcontrolador PIC; el puerto B es un puerto a ocho bits que sólo puede trabajar como entrada o salida digital. El análisis de las combinaciones posibles de las señales en los sensores es el siguiente:

Las señales de los sensores S0 y S1 son comunes a todas las combinaciones, se toman en cuenta cuando el robot está siguiendo una línea en una trayectoria recta; esta condición se cumple la mayor parte del tiempo que el robot recorre el laberinto, y solamente es interrumpida por la detección de un nodo.

Tabla 4.1 Condiciones posibles de los sensores S0 y S1.

S0	S1	Evento	Comportamiento del robot
0	0	Esta condición se presenta en las siguientes situaciones: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Que se está en los extremos de la línea negra y por tanto la línea se encuentra entre los dos sensores, para que se dé este caso, la calibración debe ser incorrecta y necesita ajuste ▪ Que ya se dejó atrás un nodo T, una vuelta izquierda, derecha o un nodo terminal y se espera una combinación del sensado que clasifique correctamente de qué nodo se trata 	El robot avanza hacia el frente
0	1	Esta condición indica que el robot se encuentra abandonando la línea por el lado izquierdo	El robot detiene el motor derecho y el motor izquierdo gira hacia el frente, provocando que el robot rote a la derecha usando la rueda derecha como pivote
1	0	Esta condición indica que el sensado se encuentra abandonando la línea por el lado derecho	El robot detiene el motor izquierdo y el motor derecho gira hacia el frente, provocando que el robot rote a la izquierda usando la rueda izquierda como pivote
1	1	Esta es la condición buscada y de inicio del robot, pues indica que se encuentra el sensado sobre la línea negra y siguiendo la línea	El robot avanza hacia el frente.

Las combinaciones de lecturas de los sensores del robot, que se muestran a continuación, son las que llaman a las subrutinas de movimiento o comportamientos, en las cuales se interrumpe el seguimiento de la línea que forma el laberinto; los valores de S0 y S1 están señalizados como valor no importa "X", debido a lo expuesto con anterioridad. Los datos obtenidos de las señales de los sensores fueron decodificados en comportamientos que resolvieran el laberinto, con base en el algoritmo de seguimiento del camino hacia la izquierda.

Nodo terminal

S7	S6	S5	S4	S3	S2	S1	S0
0	1	0	0	0	0	X	X

Esta combinación indica que se llegó a un nodo terminal, y activa una rutina de movimiento donde el robot gira 180° hasta volver a encontrar la línea para regresar por el camino que lo llevó hasta el nodo terminal. Al principio de la rutina "punto muerto" se

envía el carácter ASCII "l" por el puerto serial, para indicar al sistema monitor el hallazgo de dicho nodo terminal.

Vuelta derecha

S7	S6	S5	S4	S3	S2	S1	S0
0	1	1	1	0	0	X	X

Esta combinación indica que se llegó a un nodo vuelta derecha, en el que el único camino válido es dar vuelta a la derecha. En este caso se llama a la rutina llamada "vuelta derecha" en la que se gira 90° a la derecha hasta encontrar la línea negra continuación del laberinto. En este caso se envía el carácter ASCII "r".

T derecha

S7	S6	S5	S4	S3	S2	S1	S0
0	1	1	1	0	1	X	X

En este caso los sensores detectaron que el robot encontró un nodo "T derecha" en su camino. Al estar explorando el laberinto siguiendo el algoritmo de tomar los caminos a la izquierda, este nodo no provoca una salida del comportamiento que sigue la línea, pero sí se envía el carácter ASCII "/" para que el dispositivo conectado por puerto serial vaya armando el mapa del laberinto.

Vuelta izquierda

S7	S6	S5	S4	S3	S2	S1	S0
0	1	0	1	1	0	X	X

Los sensores indican que se está en un nodo vuelta izquierda donde el único camino válido es hacia la izquierda. Por lo tanto, el robot rota a la izquierda 90° hasta encontrar de nuevo la línea negra. Se envía por el puerto serial el carácter ASCII "a".

T izquierda

zS7	S6	S5	S4	S3	S2	S1	S0
0	1	0	1	1	1	X	X

En esta condición los sensores detectaron que el robot encontró un nodo "T izquierda" en su camino. Al estar explorando el laberinto siguiendo el algoritmo de tomar los caminos a la izquierda se llama a una rutina que hace girar el robot 90° a la izquierda hasta encontrar la línea negra para continuar explorando el laberinto. Esta condición es importante para armar el mapa del laberinto por el sistema monitor pues representa dos caminos. Se envía el carácter ASCII "\" por el puerto serial, para colocar este nodo en el mapa del laberinto por medio del sistema de inteligencia.

Nodo T

S7	S6	S5	S4	S3	S2	S1	S0
0	1	1	1	1	0	X	X

En este caso los sensores indican que el robot encontró un "nodo T" en su camino. En este nodo hay dos caminos válidos uno es a la derecha y el otro es a la izquierda, pero

con base en el sistema de inteligencia básico del robot, éste elige seguir por el camino de la izquierda. En este caso se envía el carácter ASCII "T".

Nodo cruz

S7	S6	S5	S4	S3	S2	S1	S0
0	1	1	1	1	1	X	X

Para un "nodo cruz" los sensores del S2 al S6 se encuentran detectando líneas negras del laberinto. En esta intersección existen tres posibles caminos válidos; seguir de frente, seguir por el camino de la derecha o seguir por el camino de la izquierda. Como ya se mencionó con anterioridad, el camino elegido es el de la izquierda (inteligencia de bajo nivel). El no identificar este nodo correctamente, afecta al sistema de inteligencia de alto nivel, pues al mapa le faltarían caminos válidos hacia la salida del laberinto. Se envía al sistema de inteligencia de alto nivel el carácter ASCII "+".

Final del laberinto

S7	S6	S5	S4	S3	S2	S1	S0
1	1	1	1	1	1	X	X

Cuando el sensor S7 y el conjunto de sensores del S2 al S6 se encuentran sobre una superficie negra, se establece que se ha salido del laberinto. Se llama a una rutina que detiene al robot, por el puerto serial se envía el carácter ASCII "@", y el robot queda en espera de una orden del sistema de inteligencia de alto nivel por el puerto serial, para volver a explorar el laberinto, o ejecutar comandos de movimiento enviados por la inteligencia de alto nivel.

4.4 RUTINAS DE MOVIMIENTO DEL ROBOT DENTRO DEL LABERINTO UTILIZANDO UNA LOCOMOCIÓN DIFERENCIAL

La locomoción diferencial permite generar varias combinaciones de movimientos, de aquí en adelante "rutinas de movimiento", que requiere el robot para navegar dentro del laberinto con un simple cambio de dirección del sentido en que giran los motores del robot.

4.4.1 Rutina para seguir la línea que forma el laberinto

La principal actividad que el robot tiene que realizar es el seguimiento de la línea negra. Si estos comportamientos no son eficientes, el robot perderá constantemente el camino, consumirá tiempo buscándolo, y por tanto, no logrará salir del laberinto. Las rutinas propuestas para el seguimiento de la línea negra utilizando una locomoción diferencial mediante dos sensores infrarrojos son las siguientes:

A la condición en que los dos sensores encargados del seguimiento de la línea se encuentran dentro de la misma, se le llamará de aquí en adelante "estado inicial del robot". Toda la lógica de seguimiento de caminos y la construcción del mapa del laberinto en el robot parten de este estado. Si el robot se encuentra en el "estado inicial", debe avanzar al frente; esto se logra teniendo la misma velocidad y sentido de giro diferente en cada rueda, tal como se puede apreciar en la Figura 4.13.a.

Aunque se les proporcione la misma cantidad de voltaje a los dos motores, éstos sean del mismo tipo y tengan la misma caja de engranes de reducción de velocidad, existirá una pequeña diferencia de velocidades entre ellos.

Esto provocará que el robot salga de la línea negra; en esta situación se necesita que el robot regrese al camino y vuelva al “estado inicial”. Para el caso en que el sensor izquierdo S0 sale de la línea, el robot detendrá su motor derecho y el izquierdo continuará avanzando; esto provocará un giro en el robot, cuyo eje de rotación será la rueda derecha que se encuentra estática al no aplicarse energía al motor derecho, como se puede observar en la Figura 4.13.b. Si el sensor derecho S1 abandona la línea negra, el robot detendrá su motor izquierdo y el derecho continuará con su avance, provocando un giro hacia la izquierda que regresará al robot al “estado inicial”, como se puede apreciar en la Figura 4.13.c.

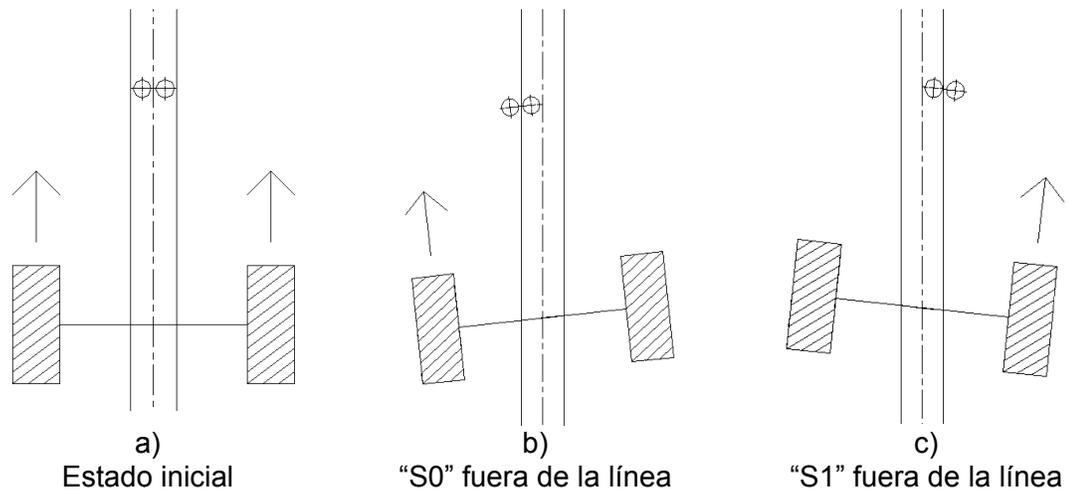


Figura 4.13 Seguimiento de la línea.

4.4.2 Rutina para tomar un camino a la derecha

Además de las rutinas para seguir la línea que forma el laberinto, es necesario describir las rutinas de movimiento del robot para cambiar la dirección de su desplazamiento; esto le permitirá en una intersección explorar un nuevo camino que se encuentre ya sea a la derecha, a la izquierda, o al frente. Por ejemplo, para tomar un nuevo camino al lado derecho del robot, se utilizan las dos ruedas de tracción del robot. La rueda izquierda del robot avanza hacia adelante y la rueda derecha cambia su sentido de giro para avanzar hacia atrás, lo que provoca que el robot rote a la derecha usando como centro de rotación el punto medio del eje formado por las ruedas de tracción.

El final de esta acción se determina por medio de los sensores que siguen la línea que se encuentran en la parte frontal del robot, S0 y S1: cuando estos dos vuelven a entrar a la línea negra se puede asegurar que el robot se encuentra en la “posición inicial”, y que le indicará la posibilidad de seguir esta nueva trayectoria para su exploración, hasta que se vuelva a encontrar otro entronque de caminos. Los movimientos anteriormente descritos se ilustran en la Figura 4.14.

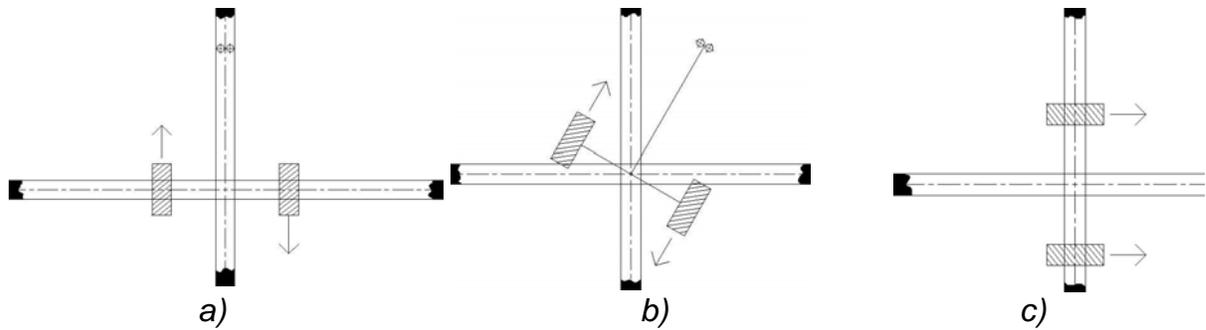


Figura 4.14 Vuelta a la derecha.

4.4.3 Rutina para tomar un camino a la izquierda

Para poder tomar un camino a la izquierda, la rueda derecha de tracción del robot avanza hacia adelante y la rueda izquierda avanza hacia atrás, lo que provoca que el robot rote a la izquierda usando nuevamente como centro de giro el punto medio del eje formado por las dos ruedas de tracción. Nuevamente el final de esta acción se determina por medio de los sensores que siguen la línea que se encuentran en el frente del robot S0 y S1, asegurando que el robot se encuentra en la “posición inicial” que permite seguir este nuevo camino para su exploración, hasta que se vuelva a encontrar otro entronque de caminos. La ilustración de esta rutina se puede observar en la Figura 4.15.

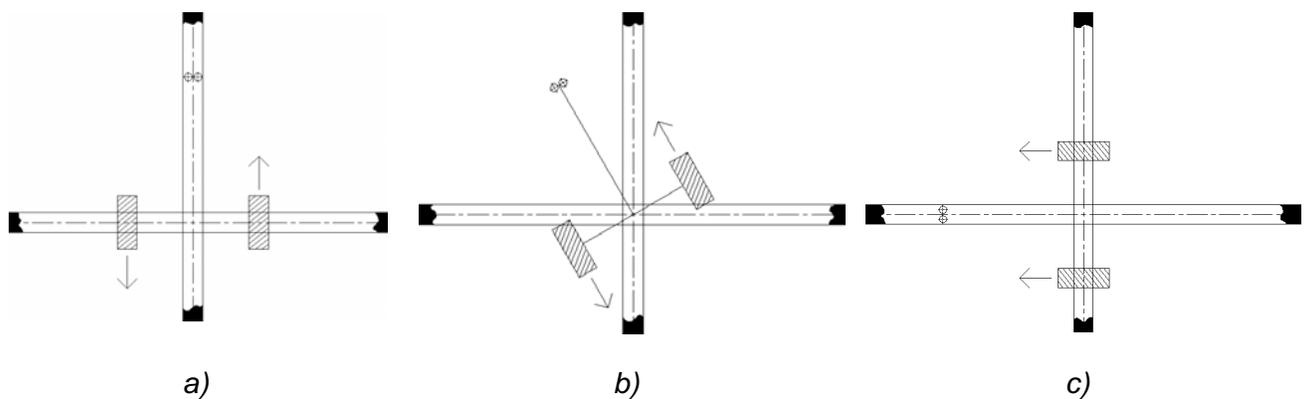


Figura 4.15 Vuelta a la izquierda.

4.5 DISEÑO DE LA ETAPA DE POTENCIA

Para poder satisfacer los requerimientos de voltaje y corriente de los motores del robot, y aislar esta etapa de electrónica de potencia del microcontrolador, se utilizó un arreglo de transistores llamado “puente H”. Este arreglo permite por medio de dos valores lógicos diferentes, controlar el sentido de giro de los motores del robot.

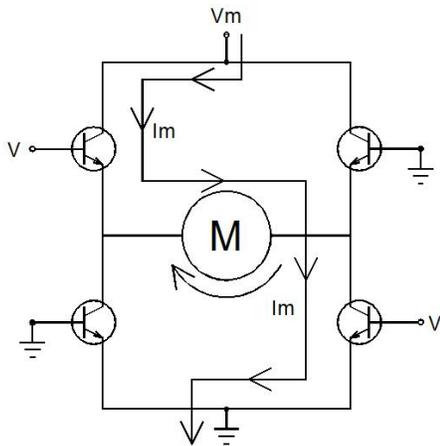


Figura 4.16 Puente H polarizado para girar en sentido horario.

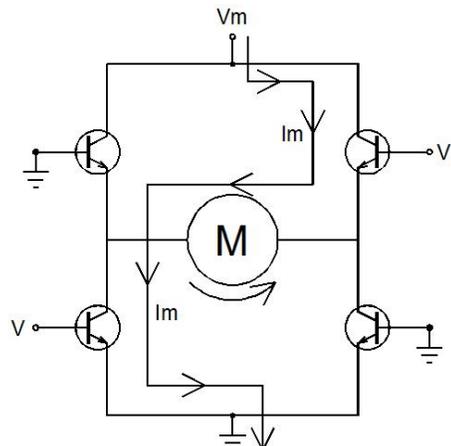


Figura 4.17 Puente H polarizado para girar en sentido antihorario.

Como se puede apreciar en los diagramas esquemáticos simplificados de las Figuras 4.16 y 4.17, básicamente un puente H consta de cuatro interruptores de estado sólido que conmutan del encendido al apagado, para cambiar el sentido de giro.

Este tipo de arreglo ya existe comercialmente; uno de ellos es un circuito integrado tipo DIP16, el L293D que posee dos puentes H, es decir, con este integrado se pueden polarizar dos motores de corriente directa. Por cada puente H se posee un bit de habilitación, que permite energizar los motores. Este bit de habilitación es muy importante en este robot, porque en esas terminales se aplicó la señal PWM particular para controlar la velocidad de cada motor. El L293D tiene la característica de poseer internamente dos diodos protección, que evita el retorno de corriente de los motores al circuito.

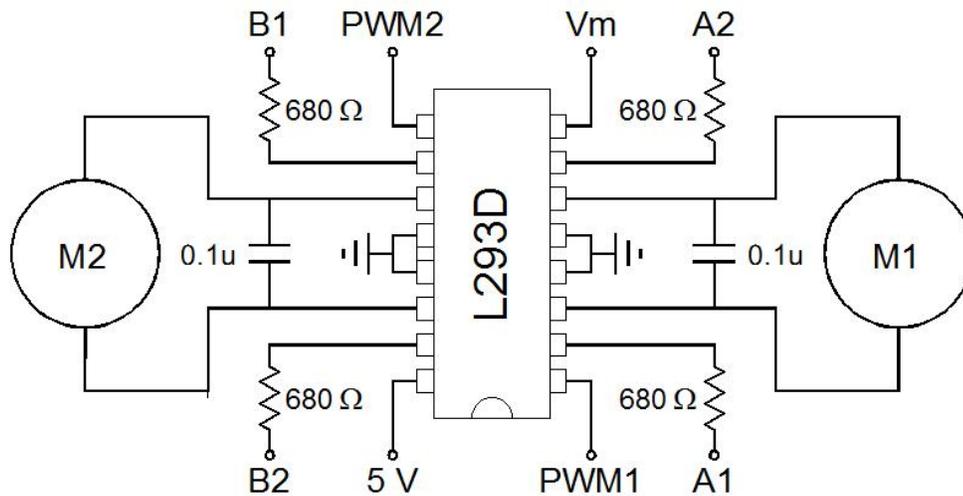


Figura 4.18 Arreglo propuesto para el circuito integrado L293D.

Descripción de componentes

El arreglo propuesto para este integrado se muestra en la Figura 4.18, en la que se pueden apreciar las bornes marcados como A1 y A2, que son las terminales de control

que permiten energizar al puente H y definir la polaridad del voltaje en las terminales del motor 1 (con base en V_m y tierra). Asimismo, los bornes marcados como B1 y B2, son las terminales de control que permiten energizar al motor 2. Los resistores de 680Ω son para limitar la corriente demandada al microcontrolador que se conecta a estas terminales; en caso de alguna falla del puente H. Las terminales de habilitación, aparecen rotuladas como PWM1 y PWM2; éstas se conectaron a las salidas de los dos módulos PWM del microcontrolador, lo que permitió tener un control de velocidad independiente de cada motor. Los condensadores de $0.1 \mu F$ conectados en paralelo a los motores, ayudan a filtrar el ruido generado por el motor, para que no interfiera con el funcionamiento del microcontrolador; gracias a estos condensadores, todo el sistema electrónico puede conectarse a una sola fuente de alimentación, lo que permitió que el robot fuera más ligero y por tanto más eficiente en el consumo de energía.

4.6 SISTEMA DE PROCESAMIENTO

Para explicar el funcionamiento del sistema de procesamiento del robot, que resolverá el laberinto, se dividió a este sistema en dos bloques: inteligencia artificial de bajo nivel e inteligencia artificial de alto nivel.

Inteligencia artificial de bajo nivel

Su objetivo es monitorear el estado de los sensores que en este robot son un encóder y los ocho sensores fotorreflectivos que detectan la línea negra que forman los caminos del laberinto. Sólo se usa un encóder para el motor izquierdo, debido a que para la construcción de una estructura de datos que represente al mapa del laberinto, se requiere conocer la distancia entre los nodos; dicho encóder no tiene la finalidad de controlar la velocidad ni la posición de la rueda donde está colocado. En este sistema de inteligencia de bajo nivel, estarán las rutinas básicas de movimiento del robot; todas estas rutinas de movimiento son las que tiene que efectuar el robot para poder navegar dentro del laberinto. Esta inteligencia es la encargada de clasificar los diferentes nodos que vaya encontrando a su paso el robot, con base en las lecturas de los sensores, así como de llevar el cálculo de la distancia entre nodos. Cada vez que se encuentre un nodo nuevo dentro del laberinto, se envía a la inteligencia de alto nivel el nodo encontrado y la distancia recorrida para que sea almacenada por dicha inteligencia.

Inteligencia artificial de alto nivel

Es la encargada de recibir la información sobre los nodos y la distancia entre ellos del microcontrolador, y construir el mapa del laberinto. El puerto de comunicaciones elegido es el serial, ya que los dos dispositivos, microcontrolador y PDA, cuentan con este periférico, y se trabaja por medio de una interrupción en el microcontrolador al recibir un carácter por puerto serial. Esto permite que la inteligencia de alto nivel arranque el robot, lo detenga, o bien, le envíe órdenes codificadas con caracteres ASCII que son capturados por el microcontrolador para identificar la orden enviada y ejecutar la acción requerida.

Características comunes de los dos sistemas de inteligencia

- Controlan al robot
- Pueden resolver el laberinto
- Permiten visualizar la calibración de los sensores y la velocidad de los motores
- Ordenan al robot el inicio de la exploración del laberinto
- Pueden mover y detener al robot.

Estructura general del programa de la inteligencia de bajo nivel

Inicialmente, esta gran máquina secuencial, a la que se denomina inteligencia artificial de bajo nivel, entra en un ciclo en el que el robot está detenido. En este estado se pueden realizar dos acciones importantes para el robot, la primera es el permitir calibrar los sensores individualmente, con ayuda de una tarjeta de leds que están colocados en la misma configuración de los sensores, y la segunda es acomodar al robot en el punto inicial del laberinto para comenzar el recorrido. Estas acciones se realizan cuando todos los sensores se encuentran en una superficie negra, color que se desea calibrar para que los sensores lo detecten, o bien, el robot esté colocado en la entrada del laberinto (condición inicial). Terminadas las dos acciones anteriores, por medio del reinicio del microcontrolador, se arranca propiamente el algoritmo de inteligencia de bajo nivel, basado en el algoritmo de seguir los caminos a la izquierda.

Esta inteligencia permite salir del laberinto, pero no busca la ruta más corta ni realiza un mapa del laberinto; sólo marca los nodos e informa las distancias recorridas entre cada nodo a través del puerto serial. Esto tiene las siguientes ventajas: no es necesario el PDA para arrancar el robot y resolver el laberinto, y cada uno de los subsistemas del robot pueden ser probados sin la necesidad del PDA. Algunas fallas en la inteligencia contenida en el PDA o en el programa del microcontrolador pueden ser clasificadas y encontradas por el usuario al realizar una prueba del robot, pues los sistemas de inteligencia son independientes.

El diagrama de flujo del programa contenido en el microcontrolador se puede consultar en el Apéndice.

4.6 DISEÑO DE LA TARJETA DEL PIC16F877A

Para la inteligencia de bajo nivel del robot se escogió un microcontrolador de ocho bits, debido a que permite recibir directamente las señales digitalizadas de los ocho sensores propuestos para el robot, y analizar los datos de entrada para su clasificación y asignación al estado correspondiente, dentro de una máquina secuencial de 256 posibilidades. Dado que el microcontrolador posee una ALU (unidad lógica y aritmética, por sus siglas en inglés) de ocho bits, toda la arquitectura interna del microcontrolador óptima el procesamiento de los estados de los sensores.

El microcontrolador elegido es el PIC16F877A que opera a una velocidad de 5 MIPS, siglas de Millones de Instrucciones Por Segundo. Posee dos módulos PWM, los cuales son suficientes para controlar la velocidad de los dos motores que conforman una locomoción de par diferencial. Por otro lado, este microcontrolador es capaz de proveer cuatro líneas de control tipo TTL para definir la dirección de giro de los motores, y generar los diferentes comportamientos del robot, y además posee diversos puertos digitales con terminales bidireccionales.

También se cuenta con un contador de eventos externos de ocho bits con el que se implementó un encóder, para medir las distancias que el robot avanza entre un nodo y otro. El citado encóder fue necesario para que la inteligencia de alto nivel conociera las distancias entre los diferentes nodos que forman el laberinto para determinar la ubicación exacta de cada uno de ellos y construir el mapa del laberinto. A partir de este mapa, dicha

inteligencia establece la ruta a seguir empleando un procedimiento llamado “búsqueda profunda”.

El PIC16F877A posee un puerto serial que es la base de la comunicación entre el dispositivo que maneja la inteligencia de alto nivel y el robot, por medio de una interrupción por recepción de un carácter por el puerto serial. En una competencia, la estrategia de solución de la tarea, con base en los tres intentos proporcionados, es el siguiente: en el primer intento, recorre el laberinto y el robot (inteligencia de bajo nivel) enviará el nodo encontrado y la distancia recorrida, para que la inteligencia de alto nivel arme el mapa del laberinto. El algoritmo de “búsqueda profunda” determina la ruta más corta al último nodo visitado. En el segundo intento, el robot podrá llegar al último nodo visitado en el intento anterior en un tiempo mínimo, y en caso de no haber resuelto el laberinto, puede seguir con la exploración. El tercer intento, se guarda como reserva para ser utilizado en caso de una falla del mapa o del robot, o bien, mejorar el registro de tiempo en la competencia.

El PIC16F877A posee una memoria de programa de tipo FLASH, por lo que puede ser reprogramado de manera rápida al grabarse y borrarse. Esto permite cambiar el código del microcontrolador de manera rápida y realizar ajustes en la competencia, usando solamente un dispositivo que cuente con un puerto USB²⁴. La posibilidad de reprogramación del microcontrolador del robot permite realizar tareas como: búsqueda de errores en el código del robot paso a paso, actualización del programa que controla el robot, almacenamiento de información de las lecturas de los sensores, recuperación de la información del mapa explorado para su almacenamiento en un sistema alternativo de memoria, entre otras.

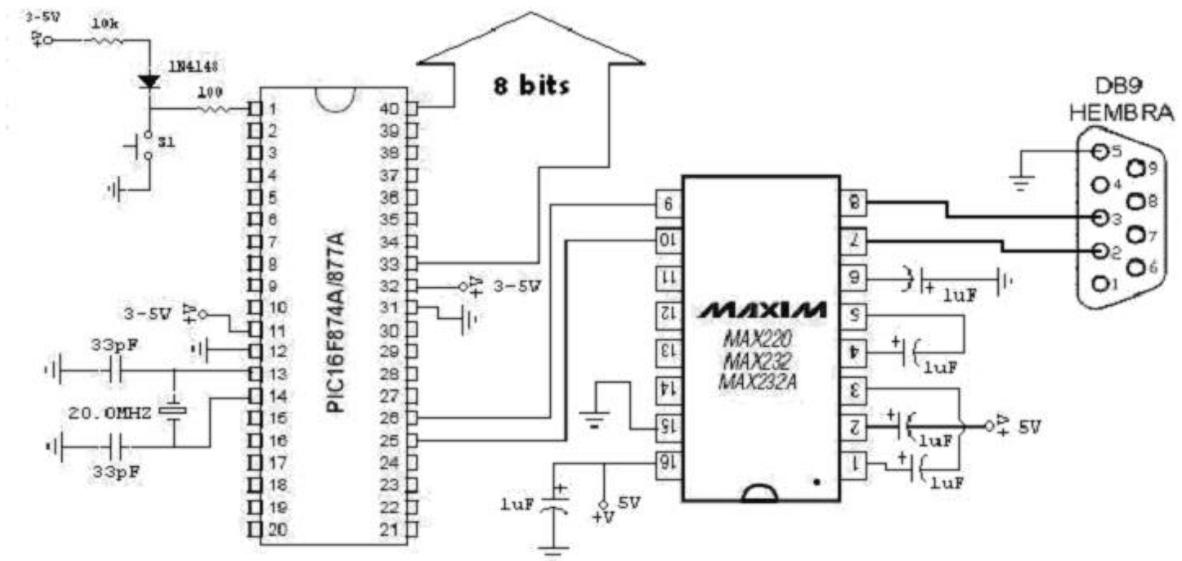


Figura 4.19 Sistema mínimo para el PIC16F877A.

²⁴ Bus Serial Universal, Universal Serial Bus, por sus siglas en inglés.

4.7 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA COMPLETO

Posterior a la descripción de los componentes del sistema, se presenta un esbozo de todo el conjunto, con el objetivo de aclarar cómo se conectan los diferentes módulos que forman al robot.

Componentes del robot

- Ocho sensores para analizar las líneas que forman el laberinto
- Un encóder acoplado directamente a una de los motores, para medir las distancias recorridas
- Dos servomotores modificados para girar libremente, a los que se acoplaron dos ruedas para desplazamiento
- Una rueda de apoyo
- Un microcontrolador PIC16F877A
- Una tarjeta de electrónica de potencia
- Ocho baterías tipo AA recargables
- Tres tarjetas para los sensores basadas en el LM339 (dos para los ocho sensores y una para el encóder)
- Un chasis con tres niveles, en los cuales se colocaron, de abajo hacia arriba:
 - Primer nivel: montaje de sensores, motores, rueda de apoyo, baterías
 - Segundo nivel: tarjetas de los sensores, tarjeta del microcontrolador PIC
 - Tercer nivel: un PDA, al cual se le trasmite la información con la que se construye el mapa del laberinto.

En la Figura 4.20, se muestra un diagrama de las interacciones de los módulos del sistema completo.

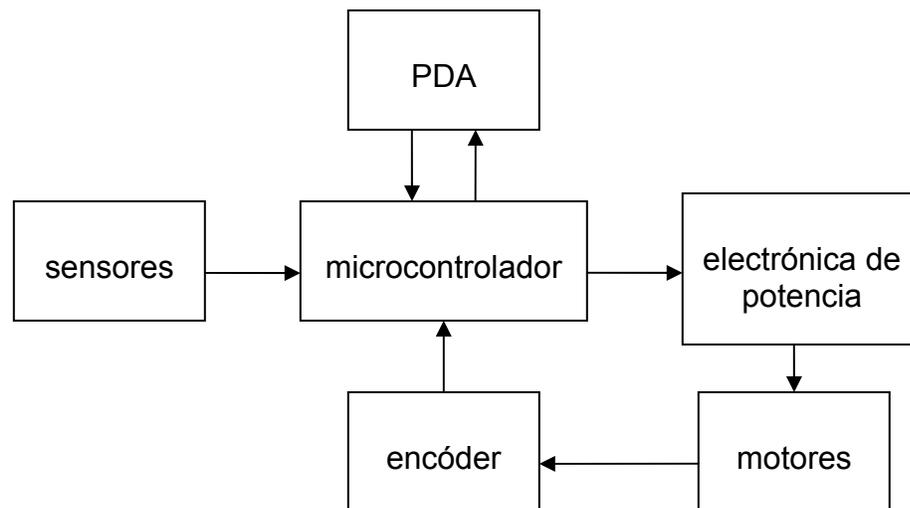


Figura 4.20 Esquema del robot.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Después de terminar de construir el diseño propuesto, el robot se utilizó en diferentes ocasiones para resolver laberintos, comprobando que era un sistema robusto y eficiente. El robot construido cumplió con las restricciones y características establecidas. Se logró verificar el funcionamiento adecuado del sistema, tomando en cuenta los aspectos relacionados con los elementos seleccionados para su construcción.

Con respecto a la metodología establecida para el desarrollo de este proyecto, se puede comentar que si no se hubiera aplicado, algunas de las opciones surgidas para la resolución del problema no se hubieran considerado, propiciando un diseño poco funcional, al descartar factores significativos en la toma de decisiones que en principio no parecían tener importancia, como el tamaño de los sensores y la colocación del arreglo de los sensores, entre otros; mas sin embargo, resultaron cruciales para el buen desempeño del robot.

Para el diseño de este sistema, fue necesario aplicar contenidos de varias de las asignaturas del plan de estudios de la carrera de Ingeniería Eléctrica Electrónica, tales como Análisis Gráfico, Cinemática, Dinámica, Estructuras de Datos, Análisis de Circuitos Eléctricos, Diseño Digital, Microprocesadores y Microcontroladores, por citar algunas. Por esta razón se puede considerar que dicho plan de estudios (de 1994) permitió abordar con eficacia la resolución del problema propuesto, aunque fue necesario ampliar los conocimientos por medio de investigaciones y lecturas relacionadas con dicho problema.

Los laboratorios y proyectos propuestos durante la carrera fueron de gran ayuda para implementar el sistema físico que cubrió el objetivo preestablecido, lo que puede considerarse como una parte fundamental en la formación de los futuros profesionales del área.

Sin embargo, como toda aplicación tecnológica en ingeniería, este robot puede mejorarse, y por consiguiente optimizar los resultados obtenidos. Es por esta razón que en estas conclusiones se proponen algunas ideas experimentales, con objeto de mejorar el desempeño del robot que resuelve laberintos.

Como se mencionó en el capítulo 2, una parte importante del robot es la etapa de sensado que detecta la línea negra que forma el laberinto, pues si sus lecturas son incorrectas, la inteligencia de bajo nivel hace que el robot se pierda, y por su parte la inteligencia de alto nivel no puede construir correctamente el mapa del laberinto, y mucho menos encontrar la ruta óptima para salir de él. El diseño propuesto permite calibrar individualmente cada uno de los ocho sensores fotorreflectivos, ya que se requiere un voltaje particular para la calibración de cada sensor. El procedimiento de calibración se realiza manualmente con unos pequeños resistores variables en la tarjeta del LM339. En las pruebas efectuadas, se observó que las condiciones de luz en el transcurso del día son muy cambiantes, ya que los sensores son muy sensibles a la luz infrarroja del medio ambiente, aunque cuenten con un filtro de luz, por lo que se tenía la necesidad de recalibrarlos continuamente, teniendo como consecuencia una pérdida de tiempo considerable.

Por esta razón, se propone cambiar el procedimiento de adquisición de datos de los sensores, de manera que sean medidos con el convertidor analógico digital del microcontrolador. Al utilizar el convertidor analógico digital se podría colocar al robot en un punto del laberinto donde se puede almacenar el valor de voltaje de cada sensor al estar en una superficie de color negro por medio de un botón, y posteriormente en una zona blanca, y tomar como base los valores capturados para ser comparados con las lecturas obtenidas durante el recorrido del laberinto.

Con respecto a la interferencia de la luz solar, la cual contiene frecuencias infrarrojas que confunden a los sensores, se proponen dos opciones: una es colocar una cubierta sobre la placa de sensado, con la finalidad de disminuir el paso de luz no deseada. La otra opción es diseñar un modulador conectado al diodo emisor de luz y un demodulador para las señales captadas por el fototransistor del arreglo fotorreflectivo, con objeto de discriminar la señal del ruido ambiental. Estas propuestas no funcionarían en el caso extremo de que el laberinto se encuentre colocado directamente bajo la luz solar, situación en la que los fototransistores se encontrarían totalmente saturados; no sería el caso de un laberinto con interferencia lumínica moderada.

En cuanto a la configuración par diferencial usada para la locomoción, un aspecto de interés que no fue considerado en el diseño es el tener una buena adherencia con el piso del laberinto, ya que esto ayuda al robot a desplazarse más rápido y a que las respuestas enviadas por el sistema de inteligencia de bajo nivel a las señales del sensado, fueran ejecutadas rápidamente. Por el tipo de motorreductores usado (servomotor de modelismo) se optó por usar unas ruedas que ya poseen un acoplamiento especial dentado para ser montadas en el vástago final del servomotor: estas ruedas de plástico usan una llanta que cumple con la adherencia necesaria con el piso, pero no tienen buena duración lo que afectaba el desempeño del robot, en las pruebas. Aunque se pueden reemplazar estas

llantas, son muy costosas y no se fabrican en el país. Se intentó probar con materiales como globos, partes de una cámara de bicicleta y guantes de plástico, pero ninguno cumplió con el requisito de adherencia. Por consiguiente, se propone sustituir las llantas para mejorar el desempeño del robot.

Los motorreductores usados en este robot (servomotores de modelismo modificados) poseen el sistema de engranes de reducción de plástico y el encóder utilizado es de construcción sencilla, pues utiliza un sensor infrarrojo de reflejo y un círculo de cartón pintado con el patrón que se acopla directamente en la rueda del robot. Existen motores de CD para aplicaciones industriales acordes a las especificaciones de voltaje y corriente que poseen un encóder acoplado de fábrica directamente al rotor, es decir, se puede medir la rotación del motor antes de pasar a los engranes reductores; además, el sistema de reducción posee engranes de metal que soportan mejor el desgaste mecánico normal de este tipo de piezas.

En las competencias de robot que resuelve laberintos, se obtuvieron resultados sobresalientes: el más significativo fue un segundo lugar en la categoría "Line Maze" en el Robothon 2005, encuentro que se organiza año con año en la ciudad de Seattle, WA. Por ello, se puede afirmar que se alcanzaron plenamente los objetivos planteados, ya que el robot finalmente obtenido tuvo un diseño, robusto y eficiente. Este robot es capaz de resolver diferentes laberintos propuestos, siempre que se realice una correcta calibración de los sensores por medio de la placa de verificación de leds, y se tenga una velocidad moderada que permita al sistema mecánico responder en un intervalo de tiempo adecuado a las señales procedentes del sistema de procesamiento.

APÉNDICE

En este apéndice se ilustra el diagrama esquemático de los circuitos empleados por el robot, que ya fueron descritos en esta tesis. Posteriormente se incluyen los planos mecánicos del robot y finalmente se ilustra el diagrama de flujo del programa contenido dentro del sistema de inteligencia de bajo nivel.

A.2 PLANOS.

1

2

3

4

A

A

B

B

C

C

D

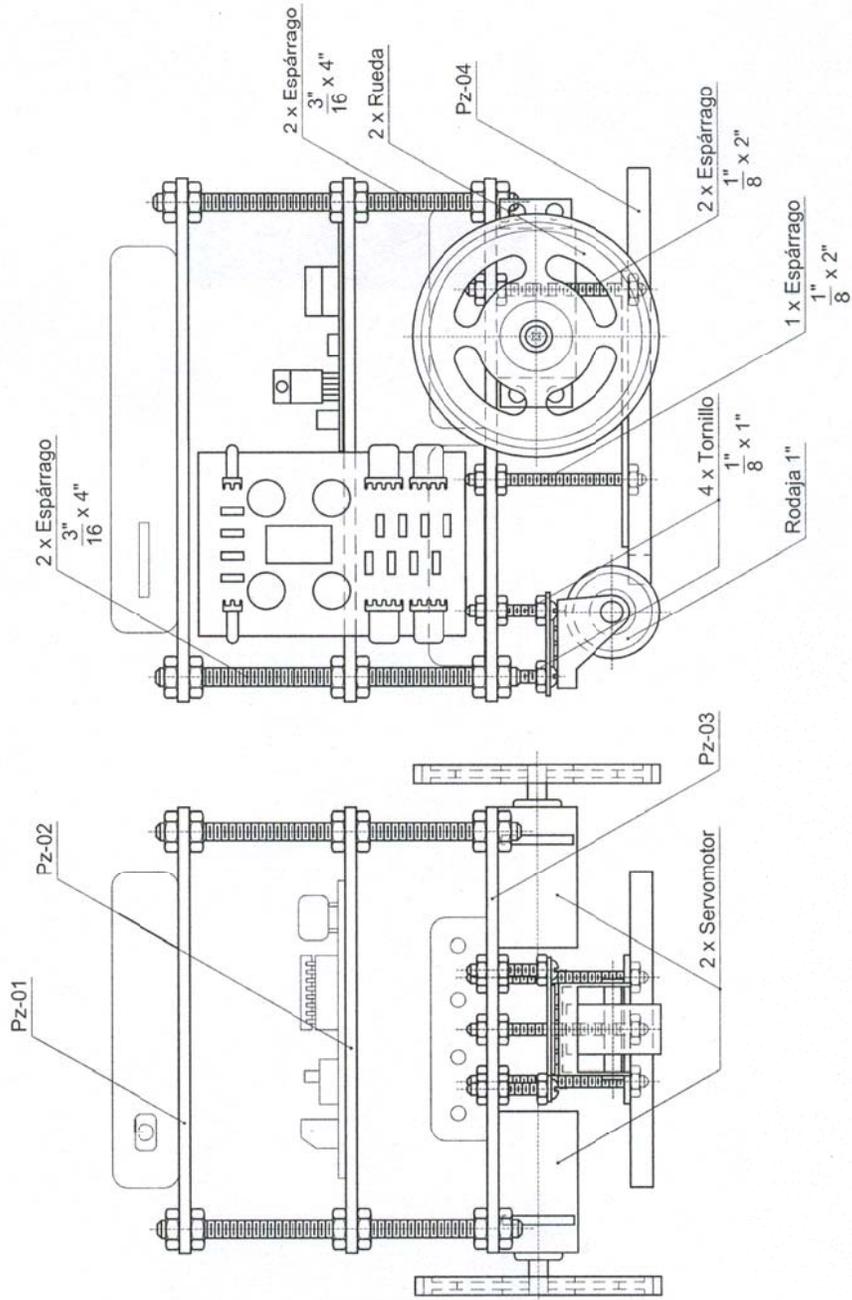
D

E

E

F

F



MDF t=3 mm MATERIAL	PROCESO		
MODIFICACIONES		Plano de ensamble CONTENIDO	1:2 ESCALA
2009.07.21 FECHA	REVISÓ	R. Sobrevilla F. DIBUJÓ	milímetros DIMENSIONES, EN
			PLANO 65

1

2

3

4

1

2

3

4

A

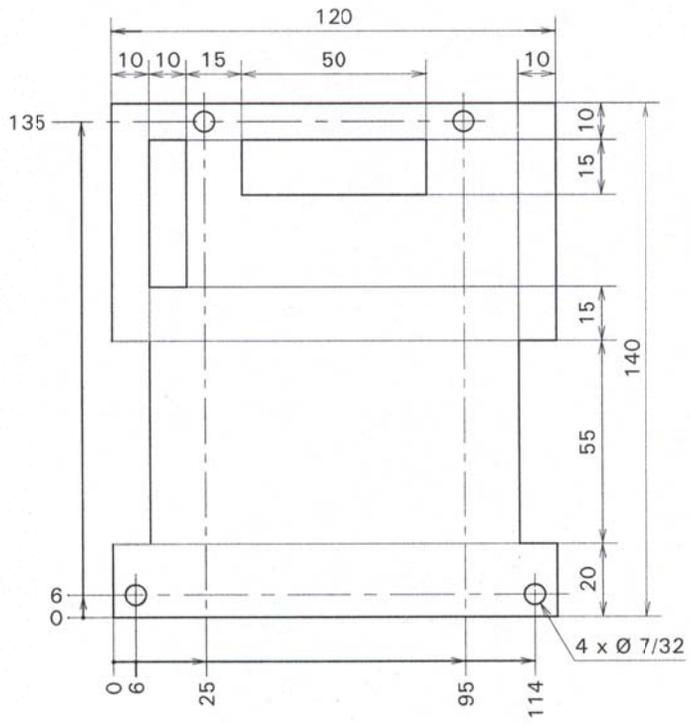
B

C

D

E

F



MDF t=3 mm MATERIAL		PROCESO			
MODIFICACIONES			Plano Pz-01		1:1 ESCALA
2009.07.21			R. Sobrevilla F.		milímetros DIMENSIONES, EN
FECHA		REVISÓ		PLANO	

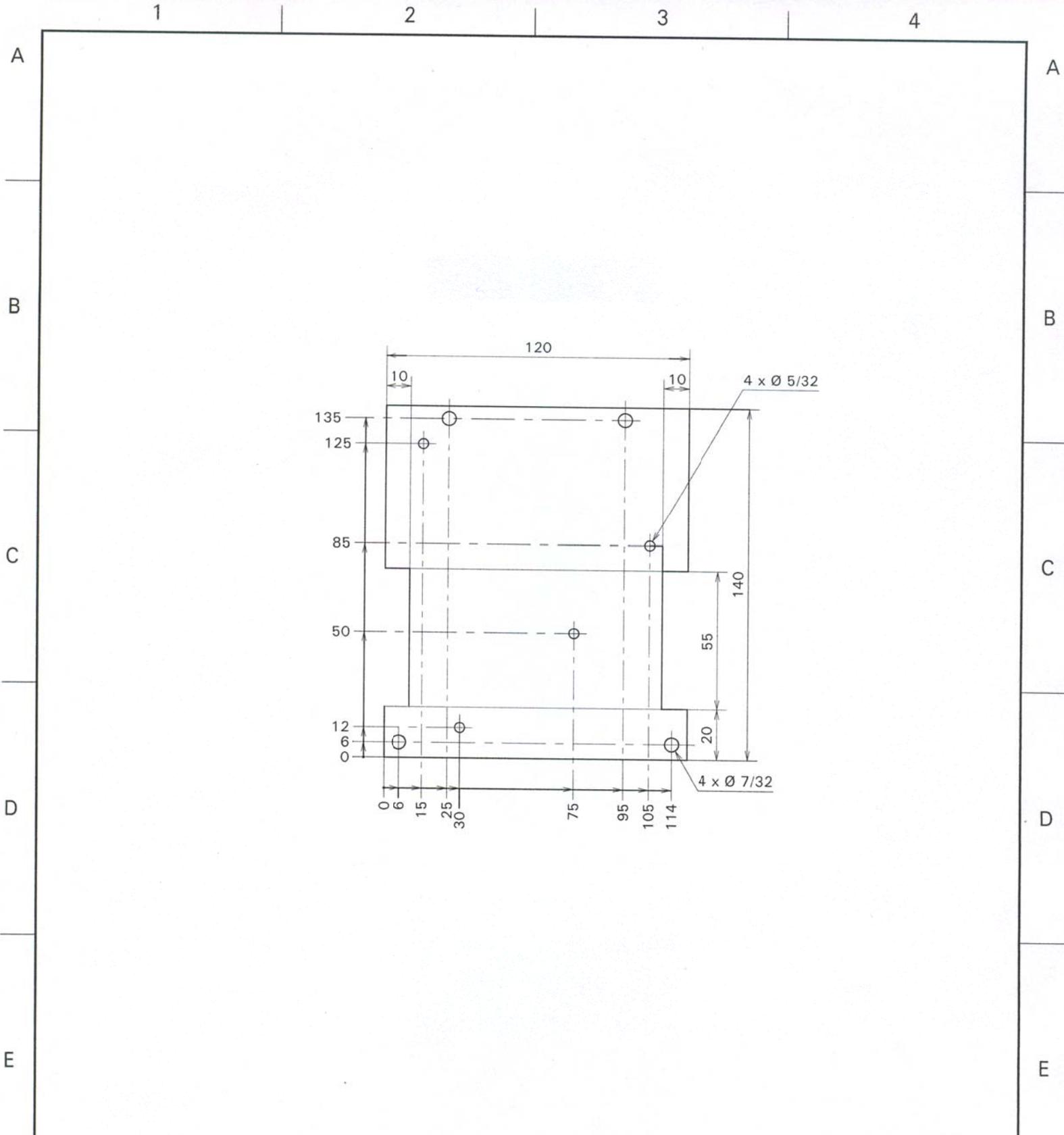
66

1

2

3

4



MDF t=3 mm		 
MATERIAL	PROCESO	
MODIFICACIONES		Plano Pz-02
2009.07.21		ESCALA 1:2
FECHA		milímetros
REVISÓ		DIMENSIONES, EN
DIBUJÓ		PLANO 67

1

2

3

4

A

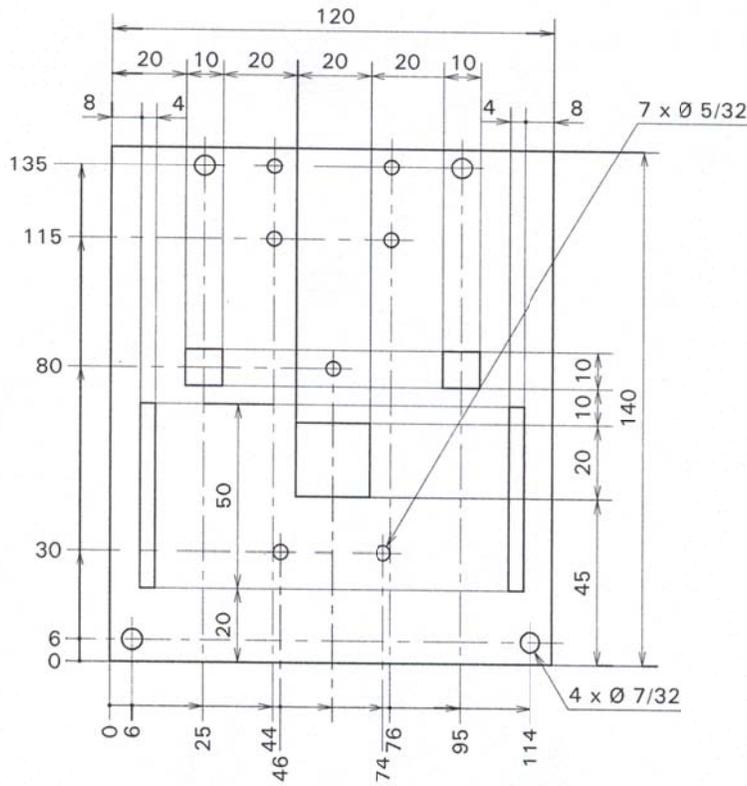
B

C

D

E

F



MDF t=3 mm MATERIAL	PROCESO	Plano Pz-03 CONTENIDO	 
MODIFICACIONES	2009.07.21 FECHA		1:2 ESCALA
REVISÓ	R. Sobrevilla F. DIBUJÓ	milímetros DIMENSIONES, EN	PLANO

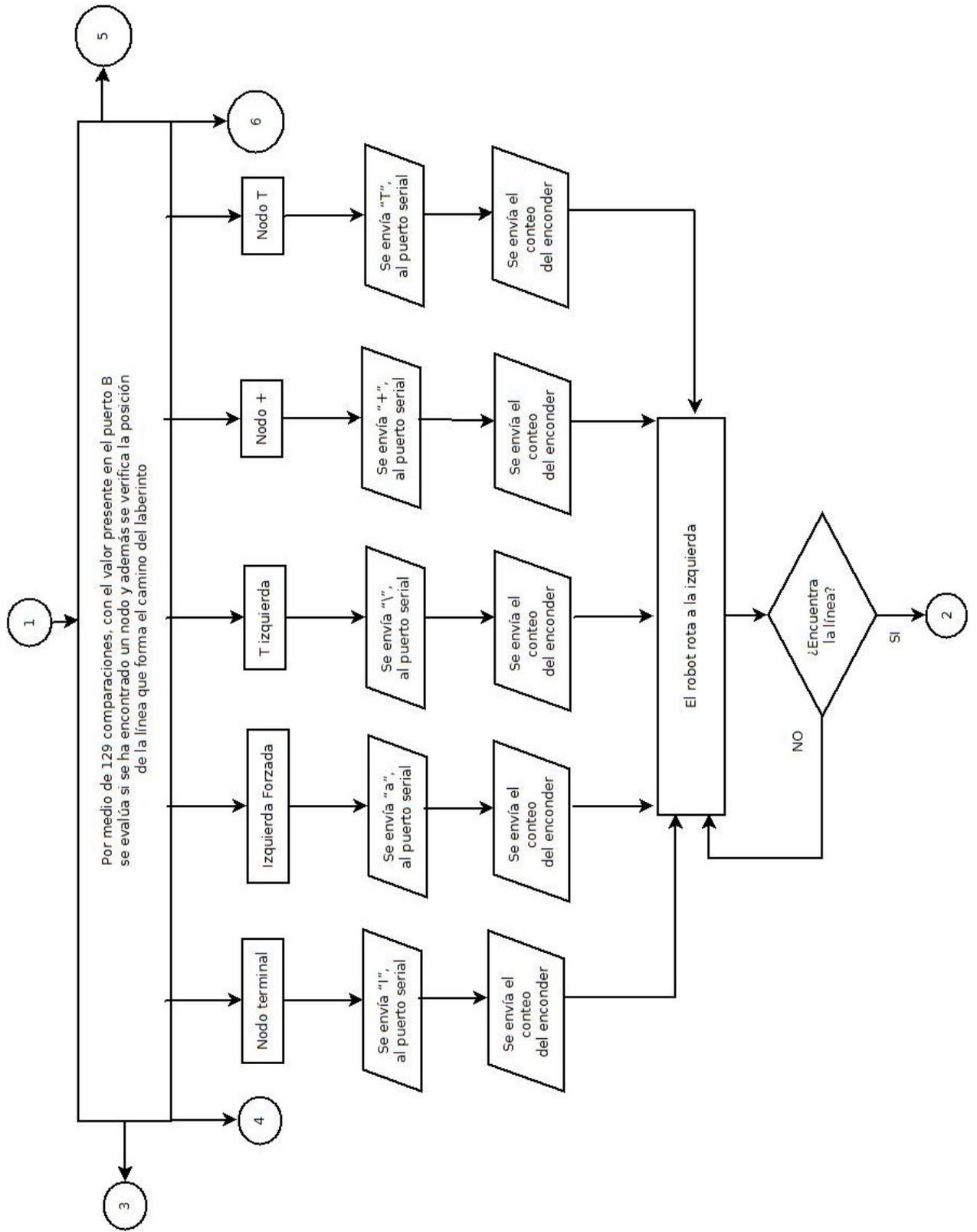
68

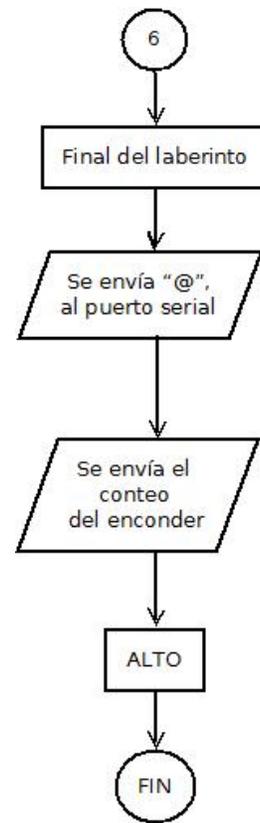
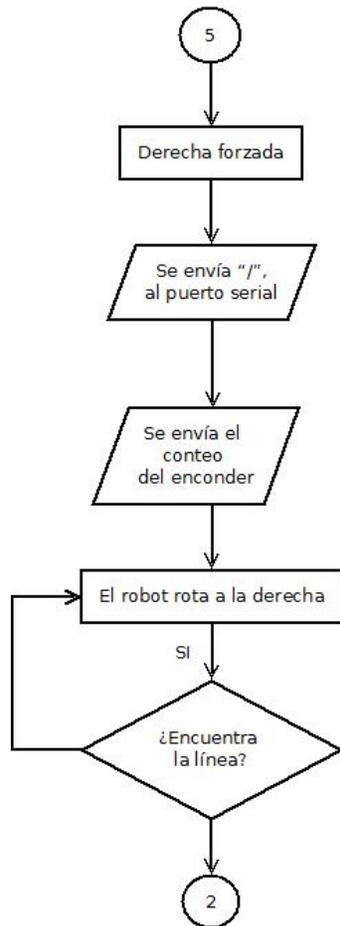
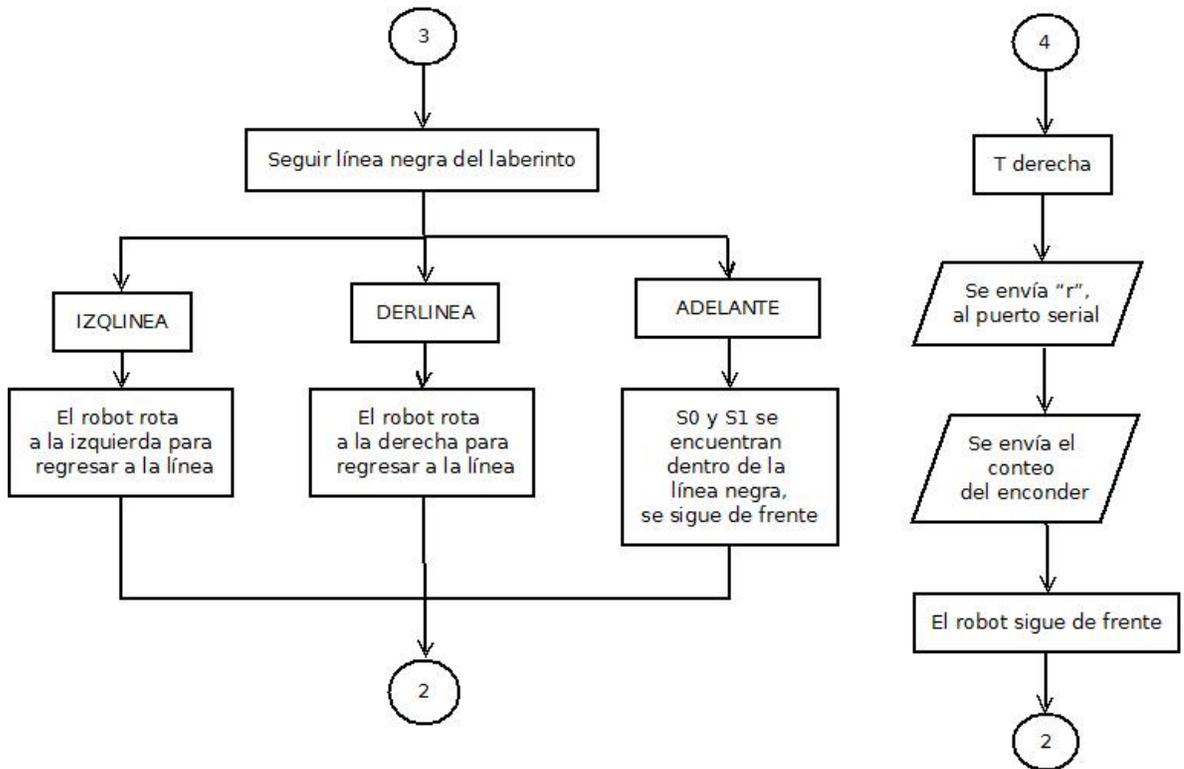
1

2

3

4





REFERENCIAS

- 1 Albella, J, Optoelectrónica y comunicación óptica, Raycar, España, 1998.
- 2 Dudek, G, Computational Principles of Mobile Robotics, Cambridge University, EUA, 2000.
- 3 Everett, H, Sensors for Mobile Robots, Theory and Application, Peters, EUA, 1995.
- 4 Iovine, J, PIC Microcontroller Project Book, McGraw-Hill, USA, 2004.
- 5 Loveday, G, Manual de electrónica para ingenieros, Trillas, México, 1992.
- 6 Morris, M, Diseño Digital, Pearson Prentice Hall, México, 2003.
- 7 Ogata, K, Sistemas de Control en Tiempo Discreto, Pearson Prentice Hall, 1996.
- 8 Ollero, A, Robótica Manipuladores y robots móviles, Marcombo, España, 2001.
- 9 Pedroni, V, Circuit design with VHDL, MIT Press, England, 2004.
- 10 Philip, C, Building Electro-Optical Systems Making it all Work, John Wiley & Sons, USA, 2000.
- 11 Predko, M, Programming Robot Controllers, McGraw-Hill, EUA, 2003.

- 12 Williams, D, PDA Robotics Using Your Personal Digital Assistant to Control Your Robot, McGraw-Hill, 2003.
- 13 Ogando, S, Sistema de detección, registro y despliegue de tiempos para pruebas de capacidad físico atlética, Tesis Licenciatura (Ingeniero Eléctrico Electrónico) - UNAM, Facultad de Ingeniería, México, 2003.
- 14 Peralta, F, Robot para resolver laberintos, Tesis Licenciatura (Ingeniero Eléctrico Electrónico) - UNAM, Facultad de Ingeniería, México, 2006.
- 15 Palleja, T, Diseño y construcción de un robot móvil como herramienta docente en asignaturas de electrónica, Universidad de Lleida, España, 2006.
- 16 <http://www.jameco.com>
- 17 <http://www.maxim-ic.com>
- 18 <http://www.robocup.org>
- 19 <http://www.robothon.org/robothon/maze.php>
- 20 <http://www.robothon.org/Robothon2005/results.php>