

Dispositivos autómatas para navegación, detecciónRecoleccion de pelotas de tenis en ambientes conocidos

Carlos Cubas G.*, Marcos Consuegra P.*, Royman López B.*,
Alexis Sierra R.*, Jorge M. León**, Fernando Méndez T.**,
Carlos Ochoa P.**, Fabián Panesso L.**, Edgar Sotter S.**,
Fabián Manotas***, Víctor Manotas***, Juan Carlos Niebles***,
Mauricio Pardo***, Eric Vallejo R.****

Laboratorio de Robótica y Automatización de la Producción
Universidad del Norte
(robotica@uninorte.edu.co)

Resumen

En este artículo se muestran los rasgos principales de los robots TELÉMACO y WALKER I. Estos autómatas tienen como fin desplazarse en un laberinto conocido, recolectar dos pelotas de tenis en su recorrido y depositarlas en un compartimiento ubicado a la salida de dicho laberinto, ejecutando dichas tareas lo más rápido posible. También se describen las generalidades de la configuración de la estructura mecánica, del sistema sensorial, de las rutinas de programación y los esquemas circuitales.

Palabras claves: MDOF, navegación autónoma, seguidor de línea, PIC.

Abstract

The main features of the TELEMACO and WALKER I robots are shown in this article. These autonomous devices have the function to travel inside a known labyrinth, pick up two tennis ball on its way, deposit these balls inside a compartment located in the labyrinth exit, executing this jobs as fast as it can. Also the majority of the configuration for the mechanical structure is described for both robots, namely the sensory system, the programming routines and the circuit scheme.

Key words: MDOF, autonomous navigation, line tracker, PIC.

Fecha de recepción: 14 de febrero de 2001

* Estudiantes del programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Norte. Miembros del Grupo de Automatización y Robótica de la misma universidad.

** Estudiantes del programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad del Norte. Miembros del Grupo de Automatización y Robótica de la misma universidad.

*** Estudiantes del programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad del Norte.

**** Profesor del departamento de Ingenierías Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Norte. Coordinador de la línea de robótica autónoma del Grupo de Automatización y Robótica de la misma universidad. Candidato a doctor en Automática e Informática Industrial de la Universidad Politécnica de Valencia. (e-mail: evallejo@uninorte.edu.co)

INTRODUCCIÓN

La robótica móvil y la inteligencia artificial se han consolidado como importantes áreas de trabajo con notables avances en investigación y desarrollo de cuantiosos proyectos en todo el mundo. La comunidad científica de la Universidad del Norte no es ajena a estos avances, por lo que los miembros del Grupo de Automatización y Robótica y un grupo de estudiantes de Ingeniería Electrónica desarrollaron los robots TELÉMACO y WALKER I, los cuales se constituyen en los dos primeros robots autónomos totalmente desarrollados por estudiantes de la Universidad. Estos robots tienen como objetivo recolectar pelotas de tenis y llevarlas a un depósito indicado, en un laberinto de dimensiones y condiciones predeterminadas. Dichos robots participaron en la última versión de la «Olimpiada Robótica GRIAL Empresas Públicas de Medellín», organizada por la Universidad Pontificia Bolivariana, el 8 y 9 de septiembre de 2000, en la que obtuvieron el segundo y cuarto puesto, respectivamente, en la categoría principiantes, entre 19 participantes de todo el país.

En este artículo se mostrará una descripción del campo de trabajo de los robots (laberinto) y posteriormente se realizará una breve muestra de los principales rasgos de cada uno de ellos.

1. CAMPO DE TRABAJO (LABERINTO)

A continuación se indican las caracterís-

ticas del laberinto utilizado en la competencia «Olimpiada Robótica GRIAL 2000». Estas condiciones eran indispensables para delimitar el comportamiento del robot según las bases del concurso, y así poder obtener los puntajes deseados. Aquí tenemos:

- **Paredes:** Las paredes son 8" de alto y $\frac{1}{2}$ " de espesor. El color es blanco claro mate y una banda roja de $\frac{1}{2}$ " en los bordes superiores.
- **Sendero:** El sendero es de 12" de ancho con una línea de $\frac{3}{4}$ " de cinta aislante negra mate que corre por el centro del mismo. La línea negra en las últimas 12" de aproximación al depósito de meta presentará unas discontinuidades de $\frac{1}{2}$ " cada $\frac{1}{2}$ ". El piso del laberinto es el mismo blanco mate de las paredes.
- **La meta:** La meta tiene una barrera de $1\frac{1}{2}$ " de alto con $\frac{1}{2}$ " de espesor que la separa del resto del sendero formando una especie de depósito. La barrera tendrá en cada extremo dos franjas negras verticales de 3" de ancho. Esta barrera tendrá un sensor óptico que detendrá el cronómetro cuando el robot sea detectado, y dicha señal será tomada como la indicación de final de turno por parte del robot concursante. El sensor estará ubicado a $1\frac{1}{2}$ " del piso, y dicha señal no deberá afectar al robot.
- **Tamaño global del laberinto de competencia:** 12' por 8'.

- **Iluminación:** El sitio de competencia posee iluminación artificial y las condiciones de luz pueden ser cambiantes.

Es importante tener en cuenta que, como se indicó, la categoría en la cual participaron los robots descritos fue la de principiantes, la cual consistía en una carrera para recorrer el laberinto de competencia desde un punto de partida conocido, sabiendo la posición de sólo una de las dos pelotas, realizando las tareas definidas en el concurso, y llevando las dos pelotas al destino final.

Para la calificación de los robots se tuvo en cuenta la siguiente tabla de puntuación:

Tabla 1
Puntuación de los robots

PUNTAJE	TAREA
1	Pasar el punto a (1 punto en total)
1	Tocar cada bola (2 puntos en total)
1	Llevar cada bola al final (2 puntos en total)
3	Colocar cada bola en la meta (6 puntos en total)
11	Total

2. DESCRIPCIÓN DEL ROBOT AUTÓNOMO TELÉMACO

2.1. SISTEMA MECÁNICO

2.1.1. Generalidades de la estructura

La estructura del robot TELÉMACO puede separarse en dos partes básicas: la pla-

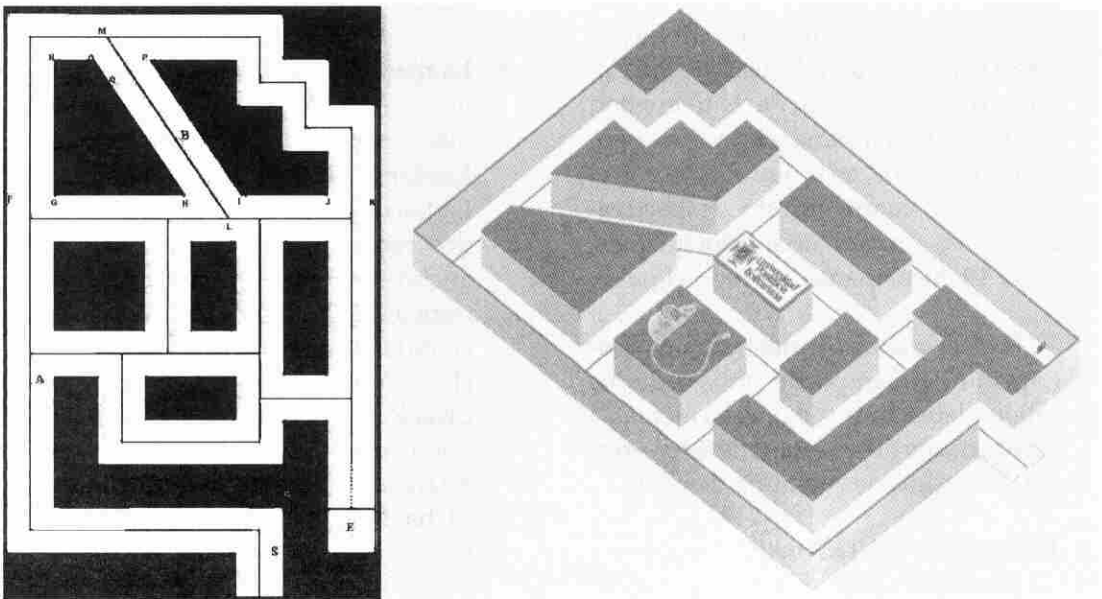


Figura 1. Vistas del laberinto de competencia

taforma de desplazamiento, la cual contiene el sistema de locomoción y estabilidad, y el sistema de retención y expulsión de pelotas.

2.1.1.1. *Plataforma de Desplazamiento*

La plataforma de desplazamiento posee dos ruedas de aeromodelos de 6 cm de diámetro, que son movidas de forma independiente por dos moto-reductores de 6 VDC, y una rueda «loca» ubicada en la parte trasera del dispositivo, cuyo fin es suministrarle un apoyo más a la plataforma y, por ende, distribuir las cargas sobre el dispositivo y proporcionar estabilidad al sistema ayudándole al robot a girar sobre su propio eje. La rueda loca utilizada para esta configuración es del tipo *roll-on*. En la tabla 2 se muestran las principales características de la plataforma.

Tabla 2

Características generales de TELÉMACO

CARACTERÍSTICA	ESPECIFICACIÓN
Grados de libertad	3
Altura máxima	19.5 cm
Área de trabajo	490.88 cm ²
Velocidad máxima de desplazamiento	18 cm/seg
Peso	2095 grf

El chasis de la plataforma, al igual que el soporte de los moto-reductores, fueron elaborados con láminas de acero galvanizado. Se optó por usar una geometría circular para la base por dos razones: asegurar que no habrá problemas de atascamiento por aristas vivas

del robot en caso de colisión con las paredes del laberinto y tener mayor disponibilidad de espacio para recibir los diferentes mecanismos y elementos de la estructura.

2.1.1.2. *Sistema de Recolección, Almacenamiento y Expulsión de Pelotas*

Este dispositivo le permite al robot recolectar, almacenar y depositar en el destino final una cantidad no mayor a dos pelotas de tenis durante el recorrido del laberinto.

Para la labor de recolección se desarrolló un sistema de transmisión de potencia tipo *sprocket* (ver figura 2), que consiste en un piñón de pequeñas dimensiones que le transmite potencia a través de una cadena a un engranaje recto de mayor tamaño. Esta transmisión se alimenta con un motor de 4.5 VDC acoplado al piñón. Al momento de detectar la pelota se activa el motor que mueve el sistema tipo *sprocket*. El engrane de mayor tamaño entra en contacto con la pelota y, debido a su sentido de rotación, la empuja dentro del robot. Posteriormente, la pelota es subida debido a la fuerza tangencial que ejerce la cadena sobre la pelota, a través de una canaleta de PVC de 3 1/2" de diámetro que posee una pendiente de 35°. Inmediatamente supera la longitud inclinada de 7.8 cm, otro tramo de canaleta, pero ahora con una pendiente negativa, obliga a las dos pelotas a bajar, por la acción de su propio peso. Al final de este segundo tramo de canaleta se encuentra

localizado un tope que detiene las pelotas y que sólo será activado por el contacto de la barrera de $1\frac{1}{2}$ ' de alto y $\frac{1}{2}$ " de espesor que está ubicada al final del laberinto, y de esta manera permitir la caída de las mismas en el depósito final.

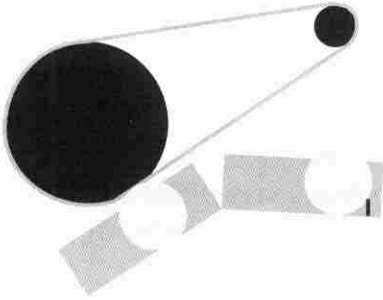


Figura 2. Esquema del dispositivo recolector de pelotas

Dicho tope consiste en una pequeña lámina de acero galvanizado que se encuentra soportada sobre una guía corrediza en su parte inferior, la cual se desliza mediante el choque con la barrera del depósito, y permite que la lámina baje y las pelotas caigan por la acción de la gravedad. En la figura 3 se muestra el esquema del dispositivo mecánico retenedor de pelotas y su accionamiento para arrojar las pelotas detrás de la barrera.

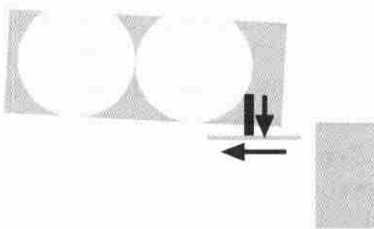


Figura 3. Sistema de expulsión de pelotas

2.2. CINEMÁTICA DEL DISPOSITIVO

El robot TELÉMACO posee una configuración MDOF (*Multi Degree Of Freedom*), más exactamente, de dos grados de libertad en la plataforma, representado en las dos entradas de movimiento controlado de las ruedas motrices, y un grado de libertad en el manipulador.

Con respecto a la cinemática del dispositivo, evaluando las posibles configuraciones de movimiento del mismo durante el recorrido del laberinto y asumiendo el móvil como un cuerpo rígido, se encuentran los casos que se describen a continuación:

- Desplazamientos rectilíneos hacia delante y en reversa. Velocidades iguales en ambos motores (ver figura 4).

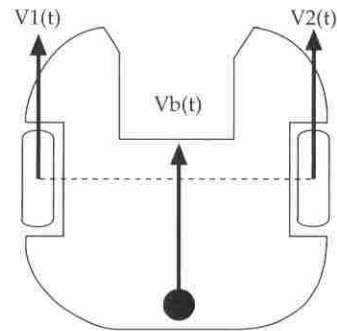


Figura 4. Cinemática de la plataforma en movimientos de traslación pura

En este caso, el centro instantáneo de rotación se encuentra ubicado en el infinito y la velocidad de todas las partículas del móvil son iguales a las velocidades

de los motores. Este movimiento se produce cuando el robot recorre los tramos rectos del laberinto.

- Rotación de la plataforma sobre su propio eje. Velocidades iguales en ambos motores pero con sentidos de rotación inversos (ver figura 5).

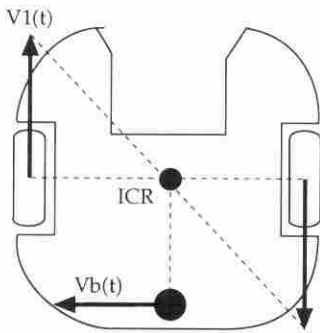


Figura 5. Cinemática de la plataforma en movimientos de rotación pura

En este caso, el centro instantáneo de rotación (ICR) se encuentra localizado en el punto medio entre las dos ruedas. Este movimiento se produce cuando el robot detecta alguna esquina o intersección dentro del laberinto.

2.3. DINÁMICA DEL SISTEMA

Para cuantificar los requerimientos necesarios en el motor del recolector para subir las pelotas se realizó el análisis dinámico de dicho sistema (ver figura 6). En dicha figura se muestra el DCL (diagrama de cuerpo libre) de la pelota subiendo la canaleta.

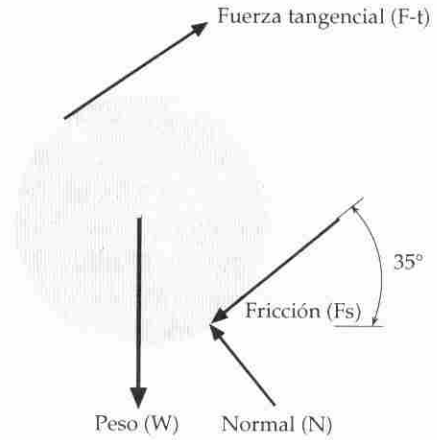


Figura 6. Diagrama de cuerpo libre de la pelota subiendo por la canaleta

Rotando los ejes X y Y 35° aplicando la ley de Newton se obtiene:

$$\sum F_x = F_t - \mu_s N - W \sin 35^\circ = 0$$

$$\sum F_y = N - W \cos 35^\circ = 0$$

En este caso se toma el coeficiente de fricción estática para caracterizar el caso de inminencia de movimiento en la pelota. Simplificando las ecuaciones anteriores se llega a la siguiente expresión que permite relacionar la fuerza tangencial necesaria en la banda para subir la pelota en función del peso de la pelota y del coeficiente de fricción:

$$F_t = (\sin 35^\circ + \mu_s \cos 35^\circ) W$$

El peso de la pelota de tenis fue 57 grf, y debido a la dificultad para encontrar un coeficiente de rozamiento entre superficies plásticas y superficies de lana o felpa, se tomó un valor de 0.5,

el cual es bastante alto y cubija la situación que podría presentarse en la realidad. Con estos datos se obtuvo una fuerza tangencial de 56.03 grf para producir el movimiento de subida de la pelota a través del tramo inclinado de la canaleta. Multiplicando dicha fuerza por el radio del engranaje se pudo obtener el torque necesario para elevar la pelota, cuya magnitud fue de 0.168 cm*Kgf.

2.4. DESPLAZAMIENTO Y EXPLORACIÓN

2.4.1. Sensores de seguimiento de línea

El robot TELÉMACO utiliza cinco sensores para realizar el seguimiento de línea y detección de cruces. El tipo de sensor utilizado fue el QRD1113 de Optoelectronics. El diagrama esquemático de este dispositivo se muestra en la figura 7.

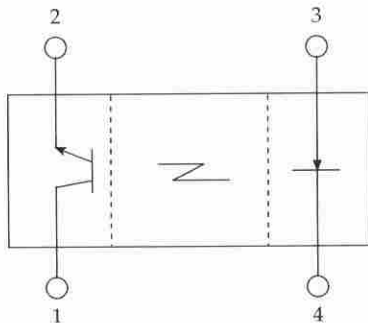


Figura 7. Diagrama esquemático del sensor usado para el seguimiento de línea

Este sensor consta de un LED infrarrojo y un fototransistor. Cuando la luz

infrarroja estimula el fototransistor, éste se satura y conduce. De esta forma se convierte la luz infrarroja incidente en una señal eléctrica.

La luz infrarroja, emitida por el LED, sólo puede llegar al fototransistor si ha sido reflejada por alguna superficie que lo permita. Esta característica es aprovechada para detectar la línea negra que recorre el laberinto. Debido a que una superficie de color negro no refleja la luz infrarroja y que el fondo blanco sobre el que se encuentra dicha línea sí la refleja, es posible detectar cuándo se está sobre la línea negra.

La figura 8 muestra la forma como se colocaron los sensores. Para realizar la detección y seguimiento de la línea negra se utilizan los sensores A, B y C. La manera como están distribuidos estos sensores, así como la distancia que tienen del centro de rotación de la plataforma, aseguran que se puedan corregir inmediatamente errores mínimos en la trayectoria.

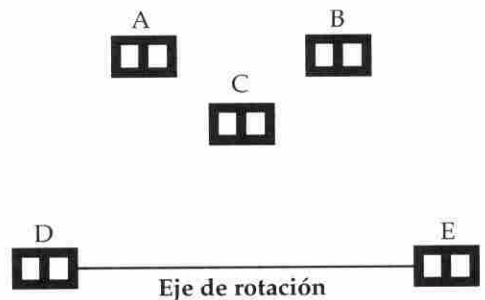


Figura 8. Configuración de los sensores de seguimiento de línea y detección de cruces

Los sensores D y E son utilizados para detectar cruces. Estos sensores están ubicados sobre el eje de rotación; de esta forma, cuando alguno de los dos detecte la línea negra, el robot entenderá que está pasando sobre un cruce y realizará las rutinas respectivas.

2.4.2. Control de motores

TELÉMACO utiliza dos motores de dc para desplazarse. Estos motores son dirigidos mediante un L298. Este integrado contiene dos puentes *H* que permiten controlar la velocidad, utilizando señales de PWM (*Pulse Wide Modulation*), y el sentido de giro de cada uno de los motores, utilizando señales de control. Todas estas entradas están a nivel TTL. El control de cada motor es independiente. El diagrama esquemático de este dispositivo se muestra en la figura 9.

Cada motor está conectado a dos pines de salida del L298. El voltaje entre estos dos pines es 9V y la polaridad

entre ellos determina el sentido de giro del respectivo motor. La señal PWM que entra provoca una intermitencia del voltaje en los pines de salida, y varía el voltaje de 9V a 0V. Esta intermitencia es la que permite el aumento o disminución de la velocidad. La velocidad dependerá del tiempo que demore la señal PWM en 1 lógico en cada pulso.

2.5. DETECCIÓN DE PELOTA

Para detectar las pelotas TELÉMACO utiliza un sistema parecido al de seguimiento de línea, ya que ambos utilizan luz infrarroja. La diferencia radica en que en este sistema el emisor se encuentra enfrente del receptor, y forman entre ambos una barrera de luz infrarroja. El proceso de la detección de la pelota se ilustra en la figura 10. El emisor es un led infrarrojo de uso común y el detector es un circuito integrado infrarrojo utilizado en controles remotos de equipos de uso doméstico; estos dispositivos están compuestos internamente por una

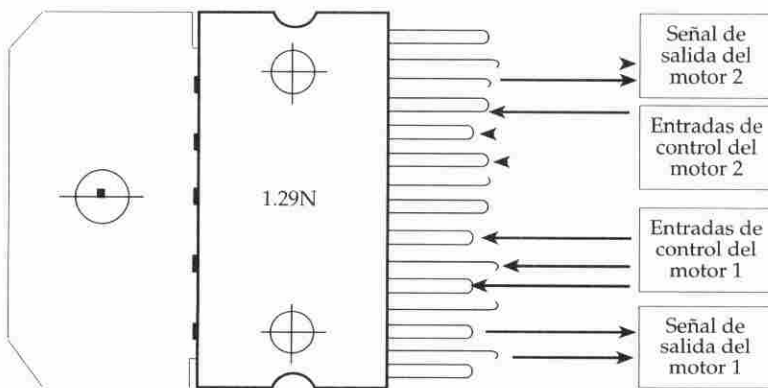


Figura 9. Diagrama esquemático del integrado L298

serie de circuitos que los hacen especiales para este uso, ya que lo único que tenemos que hacer es polarizarlos con una fuente de 5V y tomar la señal del pin de salida.

La utilización de dispositivos infrarrojos tiene una desventaja, que consiste en la interferencia causada por la componente infrarroja de la luz del recinto donde se encuentre. Para solucionar este problema se genera una señal con una frecuencia de alrededor de los 40 kilo hertz, ésta es sensada por el detector, amplificada y filtrada por un circuito. Al utilizar sensores infrarrojos comunes se tendrían que hacer los cálculos respectivos para conseguir una amplificación y filtrado óptimos; esta tarea representaría dificultad, imprecisión, incremento en los costos y espacio físico innecesario. Para corregir este inconveniente se utiliza un circuito integrado que hace la

función de amplificación y filtrado de forma precisa, y además posee un tamaño perfecto para esta clase de aplicaciones, con pulsos generados por un microcontrolador PIC16F84 que se encarga, al mismo tiempo, de detectar el momento en que se interrumpa la barrera para avisar al microcontrolador principal y éste decida que hacer.

2.6. CONTROL GENERAL

El control general del robot lo efectúa un microcontrolador PIC16C74A. Es en este microcontrolador en el que se encuentran todas las rutinas de recorrido del laberinto. La figura 11 muestra las conexiones de entrada y salida a este microcontrolador.

Las señales provenientes de los sensores de seguimiento de línea y detección de cruces, todas lógicas con niveles

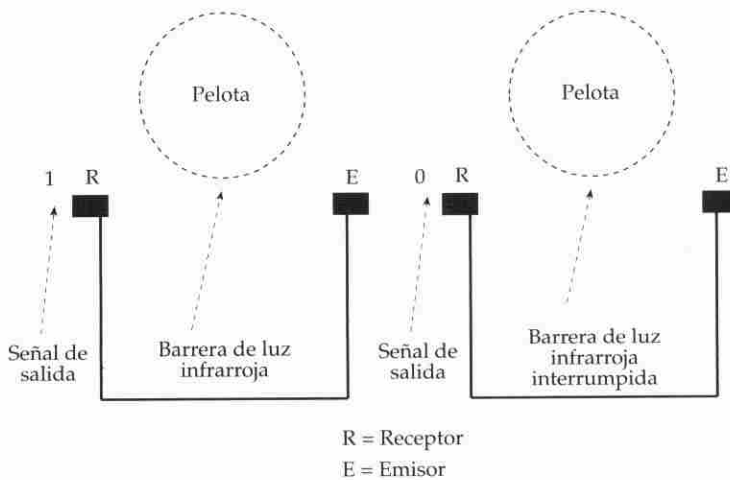


Figura 10. Proceso de detección de pelota mediante barrera de luz infrarroja

TTL, entran al PIC16C74A. De acuerdo con estas entradas, el microcontrolador envía las respectivas señales de control al L298, que se encarga de controlar el giro y la velocidad de los motores. La señal de PWM que permite aumentar o disminuir la velocidad de los motores es producida también por este microcontrolador.

En el caso de la recolección de las pelotas sólo se utilizan dos pines del microcontrolador. La señal lógica que sale del PIC16F84, que controla el infrarrojo detector de pelotas, llega al pin 36 del PIC16C74A; si esta señal indica que se ha detectado una pelota, este microcontrolador activa el motor de recolección de pelotas mediante una señal lógica enviada a través del pin 24.

3. DESCRIPCIÓN DEL ROBOT AUTÓNOMO WALKER I

3.1. DESCRIPCIÓN DEL *HARDWARE*

Los sistemas mecánicos el robot WALKER I están montados sobre una base de

zinc cuyo tamaño le da un área de trabajo lo suficientemente pequeña para que el robot no tropiece con las paredes del laberinto. En la implementación del robot se utilizaron tres sistemas mecánicos: el sistema de desplazamiento, el sistema de recolección de pelota y el sistema de liberación de pelotas.

El robot WALKER I para su movilización utiliza dos motores de paso que fueron obtenidos de una impresora EPSON LX 810. Son motores unipolares que se polarizan a 12 voltios. Para lograr mayor torque en el movimiento de los motores, se utilizaron en el modo fase, que se logra rotando la secuencia 1100 en los cuatro terminales de cada motor. La interfaz entre los motores y el microcontrolador se realizó con los integrados ULN2003 de fabricación CMOS, que son capaces de manejar una corriente de salida máxima de 500mA.

Para el sistema de recolección de pelotas se utilizaron dos motores de DC obtenidos de los sistemas mecánicos de un VHS, cuya ventaja era representa-

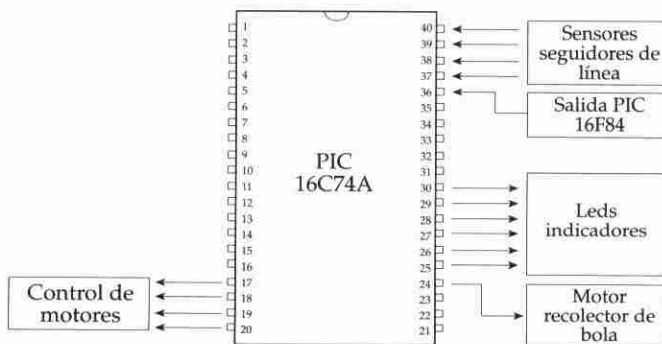


Figura 11. Esquema en bloques de las conexiones al microcontrolador PIC16C74A

tiva, ya que éstos incluyen un conjunto de engranajes que le entregan una mayor fuerza al movimiento de cada uno de los motores. Además, se cuenta con un brazo como el que se muestra en la figura 12.

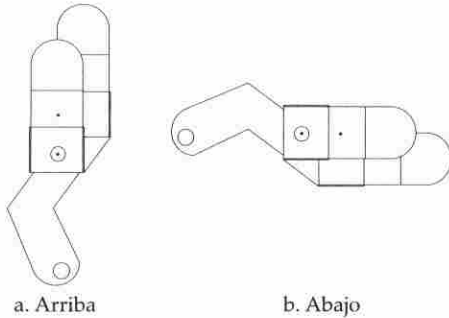


Figura 12. Brazo del robot

En la figura 12 se puede observar que el manipulador posee dos grados

de libertad, uno que permite subir y bajar el brazo y otro que abre y cierra la pinza. Por lo tanto, uno de los motores DC se utiliza para el movimiento de subir y bajar el brazo, mientras que el otro motor permite abrir y cerrar la pinza. La interfaz entre el microcontrolador y los motores se implementó mediante la utilización de un *driver* tipo *punte H* dual, cuya referencia es STK6972. Por lo tanto, para accionar cada motor se envían dos bits hacia el *driver* de la siguiente manera: 00 deshabilita el movimiento del motor, 01 mueve el motor hacia un sentido y 10 lo mueve hacia la dirección opuesta. La polarización de los motores es a 12 voltios.

El sistema de liberación de pelotas se implementó mediante un sistema electromecánico obtenido de un repro-

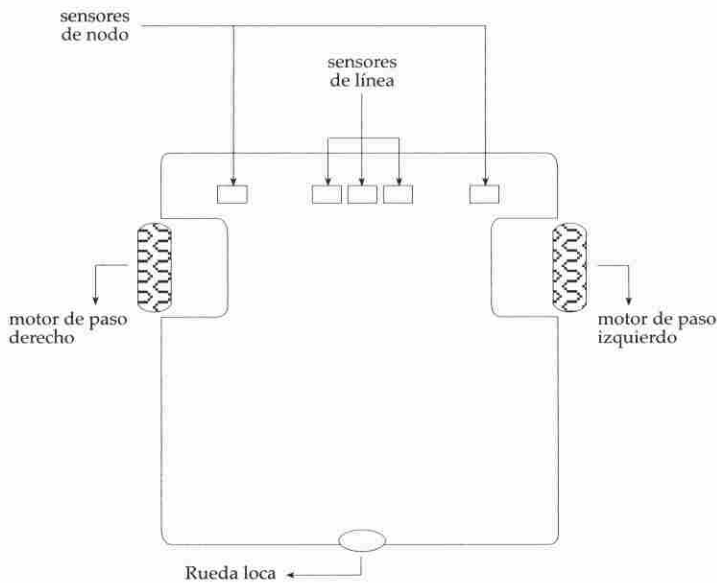


Figura 13. Vista inferior del robot-Ubicación de sensores

ductor de vídeo BETA. El pequeño sistema consta de un solenoide que al ser polarizado se magnetiza y acciona una pequeña palanca. La interfaz entre el microcontrolador y este sistema se realiza a través de un relé que se activa cuando se envía un 1 lógico a la base del transistor que lo maneja. La polarización utilizada fue de 12 voltios.

Por otro lado, el robot toma información necesaria de su entorno para su correcta navegación y cumplimiento de las tareas establecidas mediante un conjunto de sensores de línea y un sensor de pelota.

Los sensores de línea fueron implementados utilizando 5 pares de sensores infrarrojos (emisores y receptores infrarrojos) del tipo QRD1114, que fueron ubicados en el robot como se muestra en la figura 13. Los tres sensores centrales se utilizan para el seguimiento de línea y corrección del desplazamiento. La ubicación es en la zona delantera a 5 cm del centro de giro. Los sensores externos son utilizados para la detección de nodos y de cualquier tipo de cruce. Este tipo de sensores son muy útiles en este tipo de tareas, ya que cuando un sensor capta el color blanco entrega un voltaje de 0.2 voltios, que corresponde a un cero lógico; mientras que cuando capta el color negro entrega un voltaje de 4.1 voltios, que corresponde a un uno lógico. Esto brinda la posibilidad de no colocar interfases entre la salida de los sensores y los pines de entrada del microcontrolador. Sin embargo, para evitar

senzar señales fantasmas, se colocó un condensador entre la salida de cada sensor y referencia.

El sensor de pelota fue colocado en la parte delantera del robot, a unos 8 cm del centro de rotación, y consta de un interruptor que puede ser accionado suavemente; de este modo, cuando el robot se está moviendo y encuentra una pelota, el sensor se activa sin necesidad de que el robot empuje la pelota.

3.2. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE

El programa que permite a WALKER I recorrer el laberinto, recoger las dos pelotas de tenis y salir de éste de la manera más eficiente posible se describe a continuación.

Inicialmente se obtienen los datos provenientes de los sensores de línea; a partir de esto se toman decisiones en lo referente a seguimiento de línea. Si el robot se sale de la línea negra, ya sea hacia la izquierda o hacia la derecha, se realizan las correcciones necesarias para encaminarlo nuevamente sobre ésta. Constantemente, junto con los sensores de seguimiento de línea se están leyendo los sensores de detección de nodos; de llegar a activarse alguno de ellos, se procederá a tomar una decisión que depende del nodo donde se encuentre el robot.

Para resolver el laberinto recogiendo las dos pelotas se generó una ruta para recoger primero la pelota que se encuentra en la posición conocida, y luego

realizar una exploración completa de todo el laberinto en búsqueda de la segunda pelota; además, durante esta ruta se está revisando si ya se han recogido las dos pelotas. Esta revisión se efectúa cada vez que se detecta un nodo. En caso que se hayan encontrado las dos pelotas se aborta el algoritmo de exploración del laberinto, para pasar a decidir cuál es la ruta más corta hasta la salida; esta decisión se toma a partir de una lista de rutas de regreso preestablecidas, dependiendo de la posición actual del robot. El algoritmo de resolver el laberinto inicializa un contador, el cual indica el último nodo por el que

se pasó, lo cual le permite a WALKER I saber en qué parte del laberinto se encuentra y qué decisión debe tomar cuando encuentre el siguiente nodo. Las diferentes decisiones que toma el robot en los nodos se encuentran tabuladas en la tabla 3.

Para determinar la ruta definitiva con la que se recorrería el laberinto se generaron, mediante un algoritmo en Turbo Pascal, todas las rutas válidas para llegar desde la entrada hasta la salida, pasando como máximo por 24 nodos; después de esto, y conociendo la posición de una de las pelotas, se decidió

Tabla 3
Secuencia de decisiones

Rotación hacia la izquierda	El robot adelanta 5.5cm hasta que el nodo quede ubicado sobre su centro de rotación, luego gira 15° hacia la izquierda a lazo abierto, y continúa girando hasta que el sensor detector de línea negra se encienda (sensor 3) .
Rotación hacia la derecha	El robot adelanta 5.5cm hasta que el nodo quede ubicado sobre su centro de rotación, luego gira 15° hacia la derecha a lazo abierto, y continúa girando hasta que el sensor detector de línea negra se encienda (sensor 3) .
Rotación 60° a la derecha	Aquí el adelanto para ubicar el centro de rotación del robot sobre el nodo es de 2.5cm, luego se giran 30° a lazo abierto hacia la derecha, y se continúa girando hasta encontrar la línea negra (sensor 3 activo).
Rotación 120° a la derecha	Esta rutina es igual que la de rotación 60° a la derecha, sólo que aquí el adelanto para la ubicación del centro de rotación sobre el nodo es de 8cm.
Rotación 180°	Para las rotaciones de 180° se usan las rutinas de rotación hacia la izquierda o hacia la derecha, dependiendo del nodo en que se encuentre.
Rotación 180° en una T	Para esta rotación se adelantan 5cm para ubicarse sobre el eje de rotación, luego se giran 15° a lazo abierto y se continúa girando hasta encontrar el sensor 3 activo; después de esto se giran 15° a lazo abierto nuevamente, y finalmente se continúa girando a lazo cerrado hasta detectar la línea negra con el sensor 3.

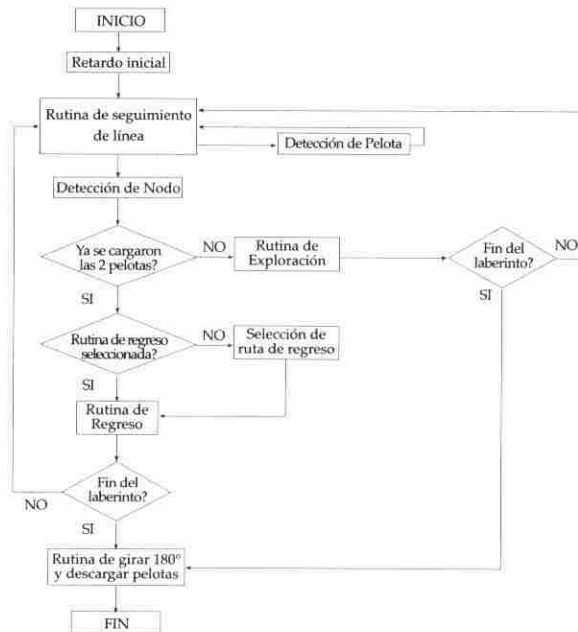
analizar sólo las rutas que pasaran primero por dicha posición. Esto disminuyó en gran medida el número de rutas generadas. Otro criterio que se utilizó para seguir descartando rutas fue eliminar aquéllas en las que fuesen necesarios giros de 180°. Nótese que los giros de 180° sólo son utilizados si ya se han encontrado las dos pelotas, y no en la exploración inicial del laberinto. Aun con todos estos criterios, el número de rutas que se debía analizar era grande como para realizar dicha tarea manualmente. Para resolver esta dificultad se construyó un algoritmo en BASIC, con objeto de simular el laberinto real, y evaluar la distancia total recorrida en cada una de las alternativas. Se probaron aquí la gran mayoría de las rutas, lo cual arrojó como resultado tres de ellas con

la más pequeña distancia total recorrida.

Finalmente se observaron en el simulador varias veces las tres rutas disponibles, comparándolas, y anotando las ventajas y desventajas de cada una de ellas, y de esta manera se dejó como ruta de exploración definitiva la más ventajosa de las tres.

El sensor de detección de pelota se conectó al pin de interrupción (RB0) del PIC16C74B, de manera que cuando se detecte la pelota se deja de hacer cualquier rutina que se estuviese ejecutando y se pasa a activar el brazo para recoger la pelota. Una vez recogida la pelota se regresa al programa principal, y se continúa realizando la actividad en la que se encontraba antes de detectar la pelota.

Diagrama de flujo del programa



CONCLUSIONES

La robótica móvil constituye una perspectiva de investigación bastante interesante, debido a su ilimitada gama de aplicaciones en la vida diaria.

Durante el desarrollo de estos robots se pudo realizar un trabajo interdisciplinario que permitió identificar las fortalezas de cada uno de los integrantes del Grupo de Automatización y Robótica y del grupo de estudiantes de Ingeniería Electrónica, de tal forma que se ejecutaran de manera adecuada las fases de diseño, construcción y programación de los robots TELÉMAGO y WALKER I. Este aporte es trascendental, si se tiene en cuenta que permite fortalecer las directrices del grupo de investigación, dar a conocer los resultados de los proyectos y establecer nexos con otros grupos de investigación en áreas afines en Colombia.

AGRADECIMIENTOS

- A la decanatura de Ingenierías de la Universidad del Norte, por colaborar con la inscripción de los robots en el concurso y con algunos recursos para su construcción.
- Al programa de Ingeniería Electrónica, dirigido por el ingeniero Humberto Campanella, por la colaboración prestada en la construcción de WALKER I.
- A los ingenieros Carlos Paternina, Roque Hernández, Johvany Pacheco, Javier Salcedo y Eric Vallejo, por colaborar con recursos propios para la consecución del traslado del robot TELÉMAGO y de su representante legal a la ciudad de Medellín.

Bibliografía

- BARRIENTOS, Antonio, Luis Felipe Peñín, Carlos Balaguer, Rafael Aracil. *Fundamentos de robótica*. Madrid. McGraw-Hill, 1997.
- ROBOT: *Science & Technology*. September-October 1999.
- FU, K.S, GONZÁLEZ, R.C., LEE, C.S.G. *Robótica: control, detección, visión e inteligencia*. México, McGraw-Hill, 1994.