

# DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO ROBÓTICO MÓVIL ROMBOIDAL PARA SEGUIMIENTO DE LÍNEA

(Design and construction of a rhombic  
mobile robot for line tracking)

Gustavo Andrés Jiménez Vargas, Oscar Ernesto Pérez Castillo

Escuela de Ingeniería Electrónica, UPTC-Sogamoso, Grupo de Investigación GIRA,  
dongus80@gmail.com

(Recibido mayo 8 de 2006 y aceptado noviembre 6 de 2006)

<p><b>Resumen:</b> El presente artículo describe el proceso de diseño e implementación, de un prototipo de Robótica Móvil Inteligente. En este artículo se detallan aspectos importantes como la configuración del móvil, acoples mecánicos, motores empleados, fuentes de alimentación y sensores utilizados para la realización de la tarea del seguimiento de línea.</p>	<p><b>Abstract:</b> This article describes the design process and implementation, of a prototype of Mobile Robotics. In this important aspects are detailed as the configuration of the mobile, couple mechanics, motors, feeding sources and sensors used for the realization of the task of line tracking.</p>
<p><b>Palabras clave:</b> configuración romboidal, robot móvil, seguimiento de línea</p>	<p><b>Key words:</b> rhombic configuration, mobile robot, line tracking.</p>

## 1. INTRODUCCIÓN

La aplicación inicial de la robótica se dio en el sector industrial, donde se buscaba desarrollar robots que permitieran tener niveles de producción más grandes, reduciendo costos y con la posibilidad de reconfigurar tareas; además de obtener productos homogéneos y de excelente calidad. Todo esto en menor tiempo y garantizando mejores niveles de seguridad en tareas peligrosas para el hombre (Arranz et al., 2006).

Con la aparición de las nuevas aplicaciones en sectores de servicios, construcción, agricultura, militares etc. (COTEC, 2006), cambia un poco el panorama meramente industrial, dirigido al diseño de robots manipuladores. Ahora y con el apoyo de la robótica móvil, se busca mejorar las condiciones de trabajo, en labores como inspección, vigilancia, transporte, limpieza, etc. Dotando al robot con avanzados sistemas sensoriales y un alto grado de inteligencia, que le permitan desplazarse autónomamente en ambientes conocidos y desconocidos, interactuar con los humanos y manipular objetos entre otros.

El prototipo robótico, planteado en este artículo, está orientado al transporte de materiales y herramientas, en la industria, utilizando la tecnología de Seguimiento de Líneas pintadas en la superficie.

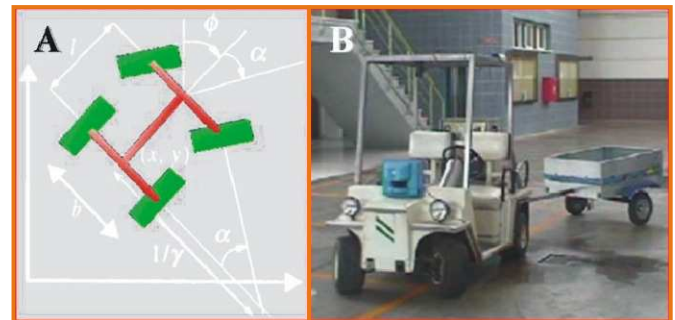
## 2. SISTEMAS DE LOCOMOCIÓN

Dentro de la robótica móvil sobre ruedas existen diferentes configuraciones de sistemas de locomoción, entre las que se

pueden distinguir configuración ackerman, triciclo, diferencial y romboidal, de las cuales se hará una breve descripción a continuación.

### 2.1 Configuración Ackerman

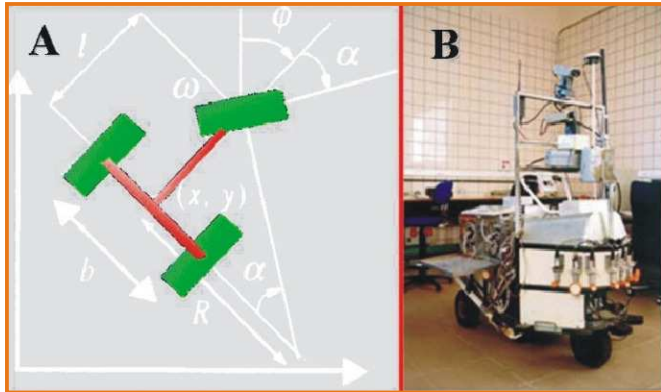
Es básicamente una modificación de un vehículo convencional de cuatro ruedas (Ver Figura 1), se caracteriza porque la rueda delantera interior gira a un ángulo ligeramente superior a la exterior, para evitar el deslizamiento de las ruedas. Su desventaja es la limitada maniobrabilidad y es utilizado en ambientes exteriores (Ollero, 2001).



**Figura 1.** Configuración Ackerman. A. Esquema de la configuración. B. Robot Romeo 4R, desarrollado en el Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Sevilla.  
Fuente: Ferruz, Hurtado, 2003.

## 2.2 Configuración Triciclo Clásico

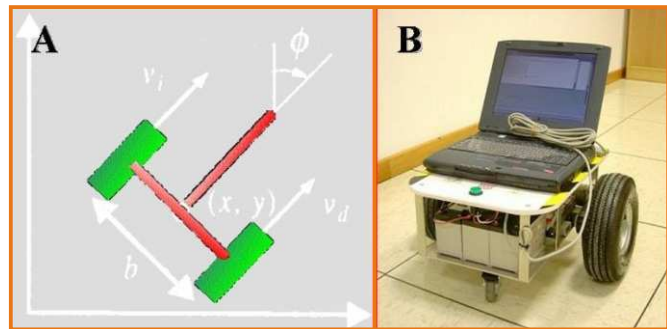
En este sistema de locomoción (Ver Figura 2) la rueda delantera, sirve a la vez para tracción y para direccionamiento. Las dos ruedas laterales de su eje trasero, se mueven libremente. Tiene una mayor maniobrabilidad que la configuración ackerman, pero presenta problemas de estabilidad en terrenos difíciles (Ollero, 2001).



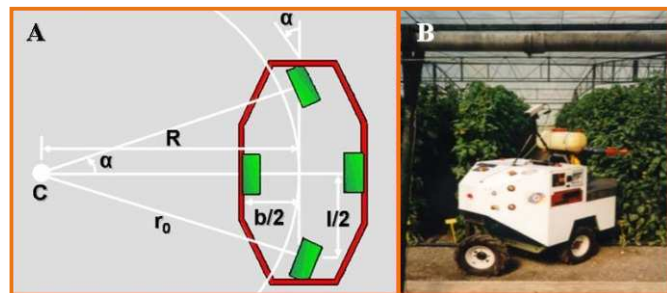
**Figura 2.** Configuración Triciclo Clásico. A. Esquema de la configuración. B. Robot Romeo 3R, desarrollado en el Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Sevilla.  
Fuente: Aracil Santoja.

## 2.3 Configuración Diferencial

En esta configuración (Ver Figura 3), la tracción y el direccionamiento vienen dados por la diferencia de velocidades de las ruedas laterales, accionadas independientemente. Adicionalmente, en esta configuración existen una o más ruedas de soporte (Ollero, 2001).



**Figura 3.** Configuración Diferencial. A. Esquema de la configuración. B. Robot OPTIMUS, desarrollado en la Facultad de Informática, Universidad de La Coruña.  
Fuente: Silvosa Rivera, 2004.



**Figura 4.** Configuración Romboidal. A. Esquema de la configuración. B. Robot AURORA, desarrollado por el Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Málaga.  
Fuente: García Cerezo, 2005.

## 2.4 Configuración Romboidal

Esta configuración consiste en cuatro ruedas dispuestas en las diagonales de un rombo imaginario (Ver Figura 4), con la diagonal principal según el eje longitudinal del vehículo, y dos ruedas laterales actuadas en forma independiente. Al actuarse en el eje longitudinal las ruedas delantera y trasera giran en sentido contrario actuando como ruedas de direccionamiento. Este sistema combina este direccionamiento con el diferencial. Además, tiene entre sus ventajas un radio de giro nulo y presenta una buena propiedad en seguimiento de caminos (Muñoz, 1995; Ollero, 2001).

## 3. DIRECCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO Y ACOPLES MECÁNICOS

### 3.1 Direccionamiento del Prototipo

Debido a las características de maniobrabilidad y buena propiedad en el seguimiento de caminos, se seleccionó la configuración romboidal para la implementación del prototipo. Como se describió en el comportamiento de la configuración romboidal, se hace necesario diseñar un mecanismo que permita obtener un giro complementario de dos ruedas.

El primer mecanismo desarrollado para la realización de esta tarea buscaba generar el movimiento a partir de acoples mecánicos accionados por un servomotor.

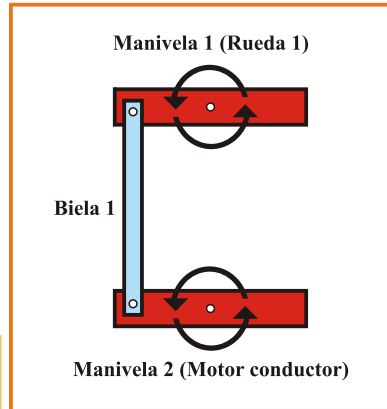
El conjunto mecánico desarrollado se dividió en dos partes, que cumplieran las siguientes características:

Giro de  $+90^\circ$  a  $-90^\circ$  en el mismo sentido del motor conductor (Mecanismo A).

Giro de  $+90^\circ$  a  $-90^\circ$  en sentido contrario al del motor conductor (Mecanismo B).

El Mecanismo A (Ver Figura 5) dispone de cinco elementos principales: dos manivelas, una biela y dos soportes de rotación (ejes). Un movimiento de la manivela dos (Motor conductor), acoplada rígidamente al eje del motor conductor; produce un movimiento en la misma proporción y sentido en la manivela uno (rueda uno), gracias al efecto de transmisión de la biela uno.

Para obtener un resultado satisfactorio, se requiere que la distancia entre centros de la biela uno, sea exactamente igual a la distancia entre los centros de los ejes de las manivelas uno y dos.

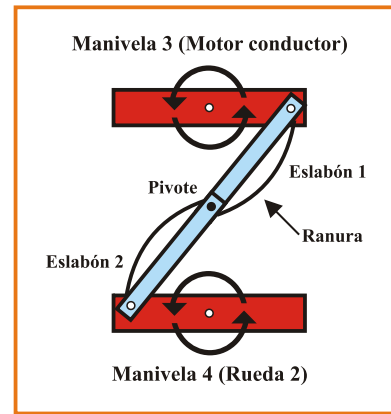


**Figura 5.** Mecanismo A.  
Fuente: Los autores.

El Mecanismo B (Ver Figura 6) dispone de seis elementos principales: dos manivelas, dos eslabones, un pivote y una ranura. Un movimiento de la manivela tres (Motor conductor), acoplada rígidamente al eje del motor conductor; produce un movimiento en la misma proporción pero en sentido contrario de la manivela cuatro (rueda dos), debido a que el pivote es obligado a seguir la trayectoria definida por la ranura diseñada.

El ensamble del conjunto del sistema mecánico se realizó sobre una lámina de fibra de vidrio de 1 cm de espesor, con longitudes de 20 cms de largo por 15.5 cms de ancho (Ver Figura 7). Primer mecanismo de direccionamiento). En esta lámina se realizó la ranura con ayuda de una fresa de control numérico computarizado (CNC). Para evitar rozamiento, de las ruedas, estas van acopladas al sistema de dirección, a partir de rodamientos.

A partir de la implementación del mecanismo diseñado, se pudo notar, en la realización de pruebas que el mecanismo presentaba problemas de fricción, imprecisiones en los ángulos de posicionamiento, y trabas del mecanismo, todo lo anterior debido a que se requería una alta precisión en la construcción de los de los acoples mecánicos.



**Figura 6.** Mecanismo B.  
Fuente: Los autores.

Como solución a este problema se decidió cambiar el mecanismo de dirección accionado por un solo motor e implementar servomotores independientes para cada rueda, con movimientos complementarios, acoplados a través de poleas y correas dentadas (ver Figura 8).



**Figura 7.** Primer mecanismo de direccionamiento  
Fuente: Los autores.



**Figura 8.** Mecanismo de direccionamiento.  
A. Representación en 3D. B. Implementación final.  
Fuente: Los autores.



### 3.2 Ruedas

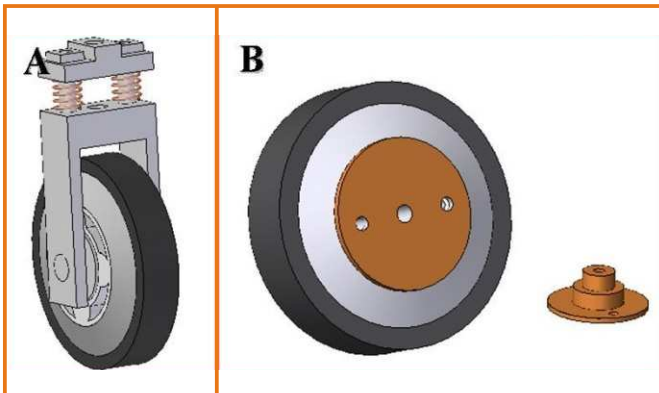
Las ruedas usadas, son de patines en línea, de 7.5 mms (tracción) y 6 mms (dirección). Con el objetivo de evitar deslizamientos en los sistemas de tracción y dirección, debidas a que las zonas de contacto de estas son mínimas, se realizaron maquinados y recubrimientos en caucho, buscando tener mayores y mejores superficies de contacto.

### 3.3 Acople de las Ruedas de Dirección

En este punto, se buscaba diseñar una pieza que sirviera de soporte entre la rueda y el elemento generador de movimiento en el sistema de dirección, y que además estuviera dotado de elementos para amortiguamiento, previendo posibles problemas de apoyo. Para esto se diseño e implemento un acople en aluminio en forma de U, al cual se ensamblaron la respectiva rueda con rodamientos y un sencillo sistema de amortiguadores (Ver Figura 9A).

### 3.4 Acople de Ruedas Motrices

Para realizar la conexión entre los motores y las ruedas de tracción, se diseño e implementó un acople en bronce y en forma de Rin (Ver Figura 9B), sostenido firmemente al eje del motor y al que es posible asegurar la rueda.



**Figura 9.** Acoples de ruedas.  
A. Rueda de dirección. B. Rueda de tracción.  
Fuente: Los autores.

## 4. ACTUADORES Y FUENTES DE ALIMENTACIÓN

### 4.1 Motores de Tracción

Debido a la exigencia de fuerza necesaria para cumplir esta tarea, se opto por utilizar moto reductores, que son básicamente el acople de un mecanismo o caja de engranajes a un motor DC, con la capacidad de buen manejo de fuerza, bajo consumo de corriente y velocidad moderada, los cuales se convierten en parámetros ideales para la aplicación. Los motores utilizados son marca Buebler, con las siguientes características:

**Tabla 1.** Características Motores DC.

Variable	Medida	
Voltaje de Operación	12 V	24 V
Corriente de Operación	90 mA	120 mA
Corriente a máxima carga	700 mA	1.3 A
Velocidad Aproximada	40 rpm.	81 rpm.

### 4.1 Motores de Direccionamiento

Los motores seleccionados como conductores de movimiento en el mecanismo de dirección son servomotores marca Hobbico CS-60 (ver Tabla 2).

Estos son un tipo especial de motor que se caracterizan por su capacidad para posicionarse de forma inmediata en cualquier posición dentro de su rango de operación, de 0° a 180°, para lo que el servomotor espera una señal PWM, en la que la duración del pulso en alto le indica la posición a ubicar; Para la mayoría de los servomotores, este rango varía de 1ms para 0° a 2 ms para 180°, y el período de la señal varia de 10 ms a 30 ms. Importante señalar que para que el motor mantenga su posición, debe asegurarse que la señal se envíe constantemente.

**Tabla 2.** Características Servomotor Hobbico CS-60.

Dimen. L x W x H (in.)	Tipo Engra.	A 4.8 V		A 6 V	
		Velocidad (sec/60)	Torque (oz.-in.)	Velocidad (sec/60)	Torque (oz.-in.)
1.6 x 0.8 x 1.4	resina	0.19	42.00	0.16	49.00

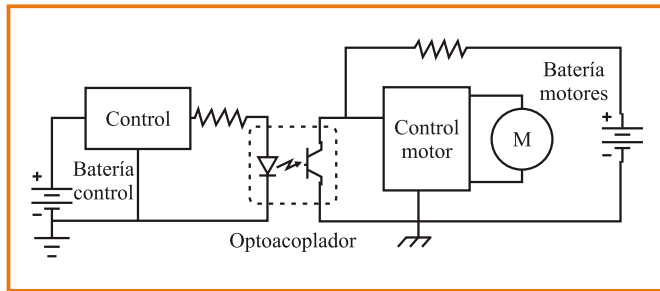
Fuente: <http://www.hobbico.com/radioaccs/heam1000.html>

### 4.3 Fuente de Alimentación

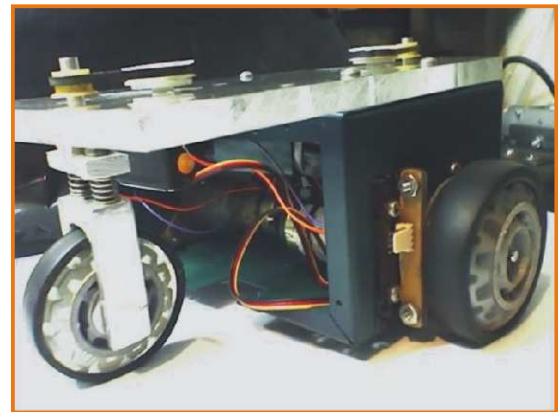
Un robot móvil necesita un sistema que le proporcione energía para realizar, durante períodos de tiempo medianamente prolongados, las tareas para las que se ha diseñado. El uso de baterías como medio de almacenamiento de energía es una buena forma de resolver el problema de la alimentación de un sistema de robótica móvil

En este caso, se utilizó un arreglo de 20 pilas AA de 1.2V a 2300mA, marca Premier. Este arreglo está dividido en dos partes, la primera de ellas conformada por cuatro pilas, que se encargan de la alimentación de los circuitos de control y, la segunda, conformada por las dieciséis pilas restantes, que se encargan de la etapa de potencia del móvil.

Debido a que los motores generan picos de voltaje y corriente, que hacen ruidosa la fuente de alimentación, afectando los circuitos de control, se hace necesario aislar la parte de potencia de la de control. Para esto se utilizan optoacopladores (Ver Figura 10) que por medio de fotones, permiten realizar una comunicación entre etapas sin que exista una conexión directa de alambre. En este caso, se seleccionó un optoacoplador con configuración de salida transistor de referencia Sharp Pc817.



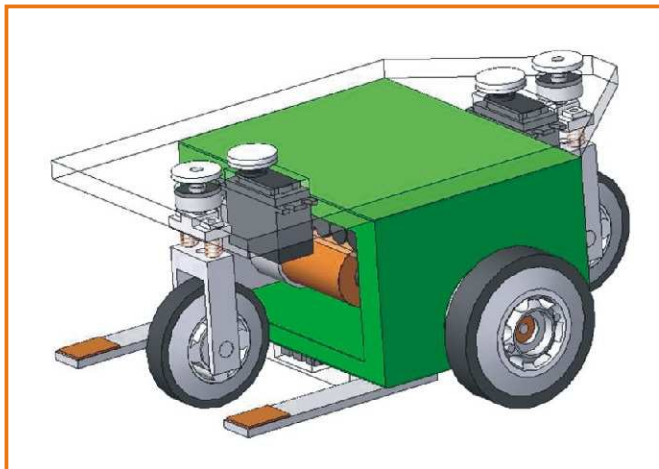
**Figura 10.** Diagrama de Aislamiento de las fuentes de alimentación.  
FUENTE: Silvosa Rivera, 2004.



**Figura 12.** Ensamble Final del Prototipo.  
Fuente: Los autores.

## 5. ENSAMBLE FINAL

Antes de realizar el ensamble completo del prototipo, se modelaron todos sus componentes (ruedas, acoples mecánicos, motores y estructuras), con la ayuda del software SOLID EDGE v12, para de obtener la mejor distribución de los mismos y las medidas necesarias para el mecanizado de la fibra y la estructura para el soporte de motores de tracción (ver Figura 11).



**Figura 11.** Modelamiento de la plataforma en SOLID EDGE v12.  
Fuente: Los autores.

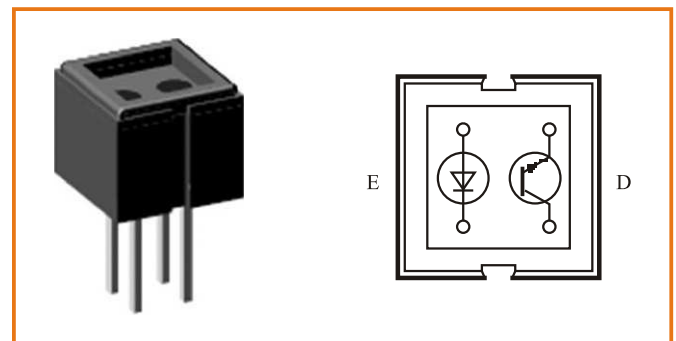
El ensamble del conjunto de direccionamiento del sistema mecánico se realizó sobre una lámina de fibra de vidrio de 1 cm de ancho, con longitudes de 27 cms de largo x 16 cms de ancho. En esta lámina se realizó el montaje de los rodamientos para los ejes de las ruedas de dirección a una distancia de 22 cms, así como las cajas para el anclaje de los servomotores. El soporte de los motores de tracción, se realizó sobre una caja de 12 cms de ancho x 8.4 cms de alto x 16 cms de largo en lámina galvanizada, (Ver Figura 12).

## 6. SENSORES UTILIZADOS Y ALGORITMO DE CONTROL

### 6.1 Sensor reflexivo CNY70

Este es un sensor óptico reflexivo con salida a transistor “fabricado por Vishay Telefunken Semiconductors”, que tiene una construcción compacta donde el emisor de luz y el receptor se colocan en la misma dirección para detectar la presencia de un objetivo, por medio del empleo de la reflexión del haz de luz infrarroja IR sobre el objeto; el emisor es un diodo Led infrarrojo y el receptor consiste en un fototransistor (ver Figura 13).

En cuanto a sus características técnicas, la distancia del objeto reflectante debe estar entre los 5 y 10 mms, la corriente directa del diodo  $I_f=50\text{ mA}$  y la intensidad del colector es de  $I_c=50\text{ mA}$ .



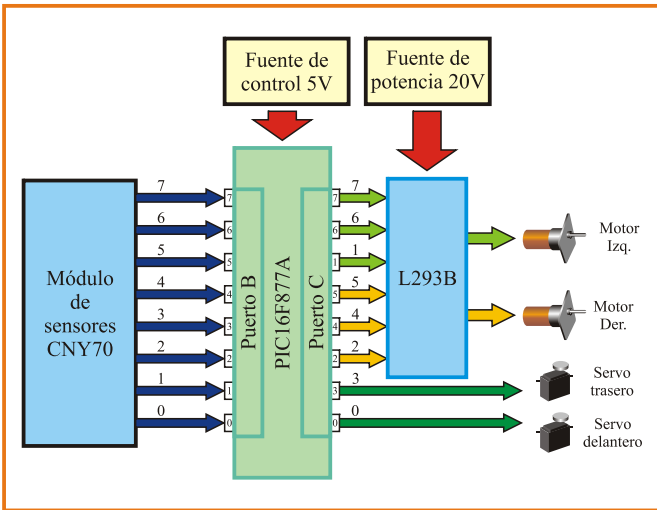
**Figura 13.** Sensor Reflexivo CNY70.  
Fuente: <http://www.vishay.com/docs/83751/cny70.pdf>.

### 6.2 Control de Dirección y Velocidad

Debido a las características de la configuración romboidal, se debe tener en cuenta el control de posicionamiento de las ruedas de direccionamiento y el control de velocidad y sentido de giro de las ruedas de tracción.

El posicionamiento de las ruedas de dirección se realiza a partir de una señal de PWM y de su complemento, que se generan con ayuda del microcontrolador PIC16F877A (Uscátegui et al., 2000).

Para el control de los motores de tracción, se utilizó el circuito integrado L293B, este es un driver de cuatro canales, que permite controlar el sentido de giro a partir de dos bits de control, y la velocidad de los motores por medio de una señal PWM (García, 2006), señales de control que son proporcionadas por el microcontrolador PIC16F877A (Ver Figura 14).



**Figura 14.** Diagrama de bloques Seguimiento de Línea.  
Fuente: Los autores.

### 6.3 Seguimiento de Línea

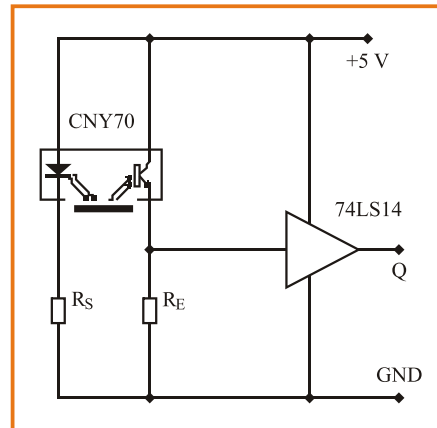
Para la realización de la tarea de seguimiento de línea, se realizó un arreglo de tres sensores CNY70 en línea sobre una tarjeta impresa, implementando, para cada sensor, el circuito de la Figura 15, este circuito proporciona una salida de 5 v cuando detecta línea negra y de 0 v cuando no.

Para determinar el movimiento o corrección de la plataforma, a realizar, se tiene la Tabla 3, de estados, para las posibles combinaciones de los sensores de entrada.

Para el movimiento de adelante, el algoritmo de control posiciona inicialmente las ruedas en dirección paralela a la línea a seguir, además de configurar iguales las velocidades de las ruedas de tracción.

Dependiendo del número de sensores que se salgan de la línea a seguir, el algoritmo determina en un grado alto, medio o bajo el valor de corrección del ángulo de dirección y la velocidad de las ruedas de tracción.

Sumado a lo anterior, la corrección en grado alto se realiza cuando la totalidad de los sensores se sale de la línea, caso en el cual el algoritmo toma el estado anterior para determinar hacia



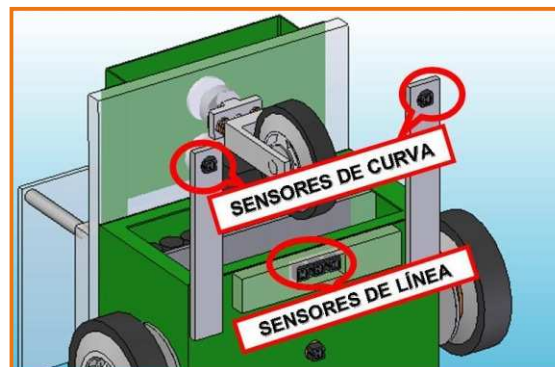
**Figura 15.** Acople Sensor Reflexivo CNY70.  
Fuente: <http://www.vishay.com>.

**Tabla 3.** Tipo de corrección según estado de sensores

Izq.	Cen.	Der.	Movimiento
0	0	0	Giro en el eje
0	0	1	Giro Izquierdo Medio
0	1	0	Adelante
0	1	1	Giro Izquierdo Bajo
1	0	0	Giro Derecho Medio
1	0	1	Adelante
1	1	0	Giro Derecho Bajo
1	1	1	Adelante

que lado realiza un giro sobre su propio eje para encontrar de nuevo la línea.

Este sencillo algoritmo, hace el seguimiento de línea negra, de una buena forma, pero cuando se encuentra con curvas muy cerradas, tiene que realizar muchas correcciones sobre su propio eje, por lo que pareciera que el prototipo saltara. Para corregir este problema, se incluyeron en el algoritmo dos sensores más (ver Figura 16), estos nos indican la existencia de una curva en la trayectoria, por lo que se pueden tomar acciones antes de entrar en esta.



**Figura 16.** Distribución de los sensores ópticos reflexivos CNY70, para el seguimiento de línea.  
Fuente: Los autores.

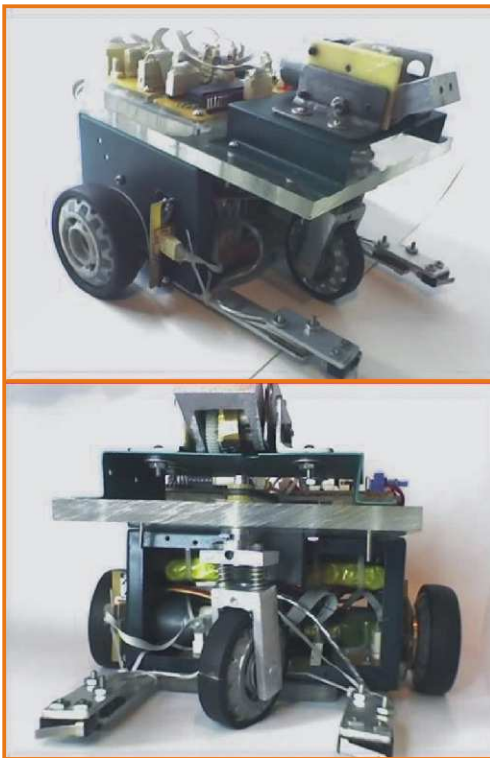


## 7. CONCLUSIONES

Una de las etapas importantes en el proceso de diseño e implementación de un prototipo robótico (ver Figura 17) es el buen desarrollo de los acoples y partes mecánicas, ya que la respuesta de la máquina ante la aplicación de una señal de control será la esperada, por lo que es importante, antes de realizar la implementación, apoyarse en un software de diseño mecánico, que coadyuve a prever fallas en la plataforma móvil y encontrar la mejor distribución de sus componentes.

Para el buen funcionamiento de los circuitos electrónicos de control basados en microcontroladores, es importante minimizar al máximo los problemas de ruido en las fuentes de alimentación, generados por picos de voltaje y corriente, propios de los motores, por lo que se hace necesario el aislamiento total de circuitos de control y de potencia, a través de optoacopladores, así la comunicación entre el control de motores y la electrónica de control se realiza a través de fotones.

Las características de maniobrabilidad y buena propiedad en el seguimiento de caminos de la configuración romboidal, combinadas con el posicionamiento inmediato de los servomotores en cualquier posición, en un rango de 180°, le daría a esta plataforma robótica la posibilidad de un mayor número de correcciones en la tarea del seguimiento de línea, si se contara con un mayor número de sensores.



**Figura 17.** Implementación Final Prototipo Robótico Romboidal.  
Fuente: Los autores.

## 8. REFERENCIAS

- Aracil Santoja, Javier. Vicerrectorado de Investigación. Sevilla: Universidad de Sevilla. Obtenido el 20 diciembre de 2006 en [http://investigacion.us.es/infrainves/ver\\_articulo.php?idart=24](http://investigacion.us.es/infrainves/ver_articulo.php?idart=24)
- Arranz, Álvaro; Baliñas, Jorge; Palacios, Sebastián; García, Josué; González, Daniel; Rodríguez, Javier; González, Ángel; Rojas, Fernando y Blanco, Víctor, (2006, Noviembre). Aplicaciones de robots móviles. Alcalá: Universidad de Alcalá. Obtenido el 21 febrero de 2007 en [http://www.depeca.uah.es/docencia/LibreEleccion/IDM\\_RM/trabajos0607/AplicacionesRobotsMoviles.pdf](http://www.depeca.uah.es/docencia/LibreEleccion/IDM_RM/trabajos0607/AplicacionesRobotsMoviles.pdf)
- Cotec, (2006, Marzo). Documentos sobre oportunidades tecnológicas N° 23, Robótica y Automatización. Madrid. Obtenido el 22 diciembre de 2006 en <http://www.cotec.es/docs/ficheros/repositorio/Publicaciones/Docoporttecnoc/RoboticaYAutomatizacion.pdf>
- Ferruz, M. Joaquín; Hurtado C., Sebastián, (2003). Localización de robots móviles basados en visión. Sevilla: Universidad de Sevilla, Grupo de robótica visión y control. Obtenido el 20 diciembre de 2006 en <http://www2.isa.uma.es/investig/redvision/Localizaci%F3n%20de%20Robots%20Moviles%20basada%20en%20vision%20.pdf>
- García Cerezo, Alfonso J., (2005). Proyecto CROMAT, Teleoperación y control coordinado de sistemas multirrobot. Málaga: Universidad de Málaga, Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Obtenido el 20 diciembre de 2006 en [www.isa.uma.es/C10/teleoperacion/Document%20Library/Presentacion\\_DPI2\\_002\\_04401\\_C03\\_01.pps](http://www.isa.uma.es/C10/teleoperacion/Document%20Library/Presentacion_DPI2_002_04401_C03_01.pps)
- García, Fernando, (2006). Modulo CCP en modo PWM. Oviedo: Universidad de Oviedo. Obtenido el 20 diciembre de 2006 en [http://www2.ate.uniovi.es/fernando/Doc2005/Sed\\_05/Ejemplos/CCPenPWM\\_ring.pdf](http://www2.ate.uniovi.es/fernando/Doc2005/Sed_05/Ejemplos/CCPenPWM_ring.pdf)
- Muñoz Martínez, Víctor Fdo., (1995). Planificación de Trayectorias para Robots Móviles. Obtenido el 18 de junio de 2006 en <http://webpersonal.uma.es/~VFMM/tesis.html>
- Ollero, Baturone Anibal, (2001). Robótica: Manipuladores y robots móviles. Barcelona, Marcombo y Alfaomega.
- Silvosa Rivera, Mauro, (2004, 21 de marzo). Diseño y construcción de la base de un robot móvil autónomo gobernada por microprocesador, Proyecto de fin de carrera. Coruña: Universidad de la Coruña, Facultad de Informática. Obtenido el 17 noviembre de 2006 en <http://optimus.meleeisland.net>
- Uscátegui Angulo, José; Yesa, Romero Susana y Martínez, Angulo Ignacio, (2000). MICROCONTROLADORES PIC: Diseño Práctico de Aplicaciones. Segunda Parte: PIC 16F87X. Madrid, McGRAW-HILL.