

Diseño y Construcción de un Robot Seguidor de Línea Controlado por el PIC16F84A

Medina Cervantes Jesús^{1,*}, Reyna Jiménez Jonattan¹, Santos Luna Joaquín¹, Osorio Mirón Anselmo², Juárez Rivera Victorino¹

(1) Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Universidad Veracruzana, Calle 16 de Septiembre No. 100, Colonia Centro, Ciudad Mendoza, Veracruz, México.

(2) Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana, Prolongación de Oriente 6 No. 1009, Colonia Rafael Alvarado, Orizaba, Veracruz, México.

Resumen

En este documento se presenta la metodología seguida para el diseño y construcción de un robot móvil seguidor de una línea negra con fondo blanco. El diseño propuesto presenta una estructura con el modo de conducción de tipo triciclo, es decir, tiene tanto tracción como dirección delanteras, a diferencia de los móviles desarrollados en diversas fuentes [1,2,3,4,5], que presentan la conducción diferencial para este tipo de aplicación.

Se utilizaron dos motores de corriente directa con cajas reductoras de velocidad. El motor para la dirección se acopla a la rueda delantera mediante el mecanismo de polea-banda. El móvil tiene sólo dos sensores infrarrojos CNY70 montados en la parte delantera. El robot es controlado mediante el PIC16F84A, la programación se realizó en lenguaje ensamblador utilizando el software MPLAB IDE v7.60 y el programa se grabó en el microcontrolador usando el software IC-Prog 1.05D y un programador PIC-500.

Se realizó un circuito electrónico propio. El cual se imprimió en dos placas separadas, la primera contiene la parte sensorial (sensores CNY70 y un acondicionador de señal LM358) y la segunda contiene el control y la potencia (PIC16F84A y driver LM293B).

El funcionamiento general del robot es adecuado, sin embargo, se puede optimizar su funcionamiento cambiando algunos aspectos de su programación o utilizando materiales más ligeros en su estructura para reducir efectos inerciales.

Palabras clave: Diseño, robot móvil, seguidor de línea, PIC16F84A.

1. Introducción

Hoy en día la Robótica Móvil se ha convertido en un tema de gran interés, con grandes adelantos debido a una gran cantidad de proyectos que se han desarrollado en todo el mundo. Como resultado de esto, se han logrado conseguir robots móviles con amplia interacción con el medio, lo cual ha abierto una inmensa gama de aplicaciones como la toma muestras, análisis del medio, detección de gases, fugas, envío de señales de audio y video y viceversa, etc., todo ello de forma remota para evitar el riesgo humano [6].

Nuestro país no es la excepción, existen ya algunas Universidades que desarrollan proyectos e incluso concursos relacionados con diferentes modalidades de robots móviles.

En la Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, los autores están interesados en el desarrollo de sistemas móviles con fines de investigación y docencia para promover entre la Comunidad Universitaria el desarrollo de eventos competitivos. De esta manera se pretende generar conocimiento en este campo a mediano plazo, para producir tecnologías dirigidas al mejoramiento del desempeño de la conducción autónoma de vehículos, con la finalidad de utilizarlos para automatización de procesos o en ambientes peligrosos o de difícil acceso.

* El autor agradece el apoyo recibido por el Programa de Mejoramiento del Profesorado, No. de oficio: PROMEP/103.5/08/3228.

En este trabajo se presenta el diseño y construcción de un robot seguidor de línea negra, que es una de las aplicaciones más sencillas de los robots móviles. El documento presenta la metodología seguida para el desarrollo del proyecto, la cual consiste a grandes rasgos en el diseño de la estructura física del robot, el análisis cinemático y dinámico de la misma, el diseño del circuito electrónico y su implementación en placa impresa, la programación del control y grabado en un PIC16F84A, el ensamble de todos los componentes y la puesta en marcha del robot.

2. Diseño de la estructura física y modo de conducción del móvil

En la actualidad existe una gran cantidad de proyectos de desarrollo de robots seguidores de línea, sin embargo, la mayoría de la literatura encontrada presenta el modo de conducción diferencial, es decir, se utilizan dos motores independientes que hacen la función de tracción y dirección al mismo tiempo [1,2,3,4,5]. Los autores eligieron para este trabajo la estructura con el mando de tipo triciclo, para iniciarse en el importante campo de la aplicación de los robots móviles, con fines de investigación y docencia.

En la figura 1 se presenta un diagrama del diseño de la estructura física del robot móvil. En este diagrama se puede observar que el motor de tracción estará conectado a la rueda delantera a través del mecanismo de polea-banda. Para ello, se utilizan dos poleas y una banda dentada con relación 2:1. También se observa que en la posición delantera se colocarán dos sensores infrarrojos CNY70, los cuales recibirán la información del exterior y la enviarán al microcontrolador.

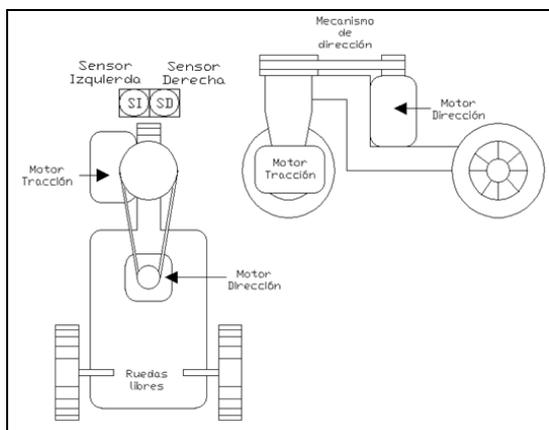


Fig. 1. Diseño de la estructura física del móvil.

Los elementos para la construcción de la estructura metálica del móvil son de la marca Meccano®. En la figura 2 se presenta la imagen real de la estructura física del robot móvil, cuyas dimensiones son 10.5cm de ancho x 21cm de largo x 14cm de alto. Los motores de corriente directa utilizados son de 12Volts. El motor utilizado para la tracción posee una caja reductora de construcción propia con relación de 34:1, mientras que, el motor de dirección en conjunto con la caja reductora y la transmisión polea-banda de construcción propia posee una relación de 30:1.

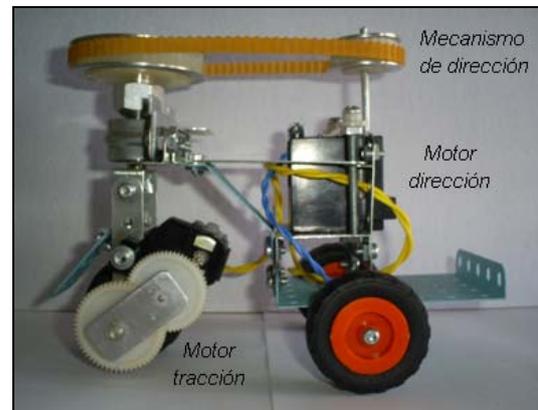


Fig. 2. Diseño de la estructura física del móvil.

3. Análisis cinemático y dinámico de la estructura del móvil

Con respecto del grado de movilidad (δ_m) y grado de direccionalidad (δ_s), las estructuras de los robots móviles se clasifican cinco tipos, mediante la denominación "robot móvil de tipo (δ_m, δ_s)" [7]. Bajo esta clasificación, la estructura elegida en este trabajo es un robot móvil de tipo (1,1). Los robots de este tipo de tienen una o varias ruedas convencionales fijas en un único eje común y también tienen una o más ruedas convencionales centradas orientables, con la condición de que el centro de las mismas no se localice en el eje de las ruedas fijas. El robot móvil presentado tiene dos ruedas convencionales fijas en la parte trasera y una rueda convencional centrada orientable en la parte delantera (tipo "triciclo"), como se ve en la figura 3.

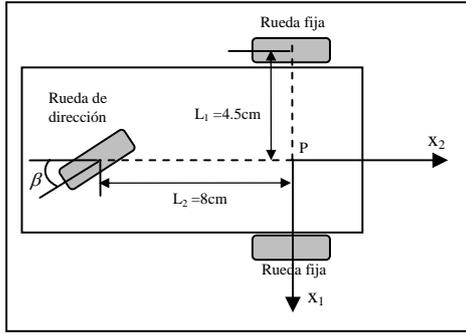


Fig. 3. Robot móvil tipo (1,1).

En la literatura existen varios trabajos dedicados al análisis cinemático y dinámico de los robots móviles, el análisis aquí presentado está fundamentado en [7]. Las ruedas fijas y las ruedas centradas orientables presentan los mismos dos tipos de restricciones, con la diferencia de que el ángulo β es constante para las ruedas fijas y es variable con el tiempo para las ruedas centradas orientables:

- A lo largo del plano de la rueda

$$[-\sin(\alpha + \beta) \quad \cos(\alpha + \beta) \quad l \cos \beta] R(\theta) \dot{\xi} + r \dot{\varphi} = 0 \quad (1)$$

- Ortogonal al plano de la rueda

$$[\cos(\alpha + \beta) \quad \sin(\alpha + \beta) \quad l \sin \beta] R(\theta) \dot{\xi} = 0 \quad (2)$$

La configuración del robot se describe completamente por los siguientes vectores de coordenadas:

- Coordenadas de postura: $\xi(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ \theta(t) \end{pmatrix}$ para las coordenadas de posición en el plano.
- Coordenadas angulares: $\beta_c(t)$ para los ángulos de orientación de las ruedas centradas orientables.
- Coordenadas de rotación: $\varphi(t) = \begin{pmatrix} \varphi_f(t) \\ \varphi_c(t) \end{pmatrix}$ para los ángulos de rotación de las ruedas alrededor del eje horizontal de rotación.

Al conjunto de coordenadas de postura, angulares y de rotación (ξ , β_c y φ , respectivamente) se le llama *conjunto de coordenadas de configuración*.

Así, las restricciones para el robot tipo (1,1) pueden reescribirse como:

$$J_1(\beta_c) R(\theta) \dot{\xi} + J_2 \dot{\varphi} = 0 \quad (3)$$

$$C_1(\beta_c) R(\theta) \dot{\xi} = 0 \quad (4)$$

Considerando que:

Ruedas	α	β	l
1f	0	0	0.045m
2f	π	0	0.045m
3c	$3\pi/2$	-	0.08m

Las restricciones tienen la forma (3) y (4), donde:

$$J_1 = \begin{pmatrix} J_{1f} \\ J_{1c} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0.045 \\ 0 & -1 & 0.045 \\ \cos \beta_{c3} & \cos \beta_{c3} & 0.08 \cos \beta_{c3} \end{pmatrix}$$

$$J_2 = \text{diag}(r)$$

$$C_1 = \begin{pmatrix} C_{1f} \\ C_{1c} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ \sin \beta_{c3} & -\cos \beta_{c3} & 0.08 \sin \beta_{c3} \end{pmatrix}$$

Por otro lado, resulta importante describir las relaciones dinámicas entre las coordenadas de configuración ξ , β_c , φ y el torque desarrollado por los motores acoplados al robot. A este modelo espacial de estado se le llama *modelo dinámico de configuración general*. Se asume que el robot está equipado con motores que fuerzan la orientación de las ruedas orientables β_c o la rotación de las ruedas φ . El modelo dinámico de configuración general tiene la forma (vea los detalles de la derivación del modelo en [7]):

$$\dot{\xi} = R^T(\theta) \sum (\beta_c) \eta \quad (5)$$

$$\dot{\beta}_c = \zeta \quad (6)$$

donde: η y ζ son velocidades homogéneas que pueden ser interpretadas como entradas en el sistema.

A las ecuaciones (5) y (6) se le llama *modelo dinámico de postura*. Este modelo se escribe de forma compacta como sigue:

$$\dot{z} = B(z)u \quad (7)$$

donde: $z = \xi$ $B(z) = R^T(\theta) \sum$ $u = \eta$

Para el robot móvil tipo (1,1) se tiene:

$$\dot{z} = B(z)u$$

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\beta}_{c3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.045 \sin \theta \sin \beta_{c3} & 0 \\ 0.045 \cos \theta \sin \beta_{c3} & 0 \\ \cos \beta_{c3} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \eta_1 \\ \zeta_1 \end{pmatrix}$$

El modelo dinámico se escribe como:

$$H_1(\beta_c) \dot{\eta} + \sum^T (\beta_c) \dot{\xi} + f_1(\beta_c, \eta, \zeta) = B(\beta_c, \beta_{oc}) P \tau_m \quad (8)$$

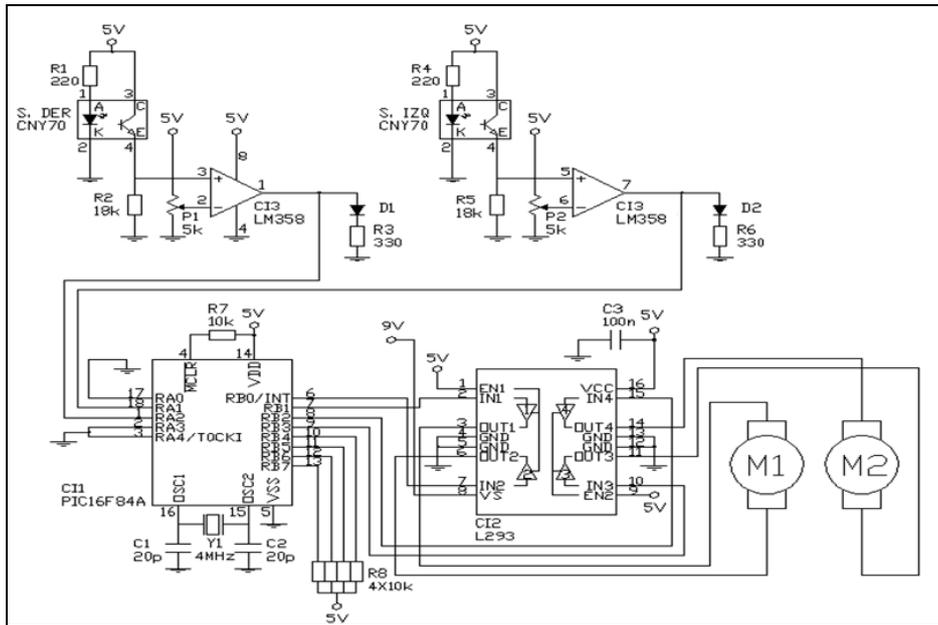


Fig. 3. Diseño del circuito electrónico.

donde: $B(\beta_c) = \sum^T (\beta_c) E^T (\beta_c)$

De esta manera, se tiene para el robot móvil tipo (1,1):

$$B = [\sin \beta_{c3} + \cos \beta_{c3} \quad -\sin \beta_{c3} + \cos \beta_{c3} \quad 1]$$

$$P = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

4. Diseño del circuito electrónico y construcción de la placa impresa

En la figura 3 se presenta el diseño propio del circuito electrónico, que incluye la etapa sensorial mediante la instalación de dos sensores CNY70, la etapa de control mediante el microcontrolador PIC16F84A y la etapa de potencia mediante los dos motores de corriente directa.

La construcción del circuito impreso fue basada en el circuito electrónico de la figura 3. Sin embargo, se optó por dividir en dos partes el circuito impreso, con la finalidad de reducir el espacio ocupado por el mismo. La primera parte del circuito posee la instalación de los dos sensores CNY70, el circuito integrado LM358 y dos diodos LEDs indicadores de señal; este circuito constituye la etapa sensorial. En la figura 4 se presenta este circuito impreso.

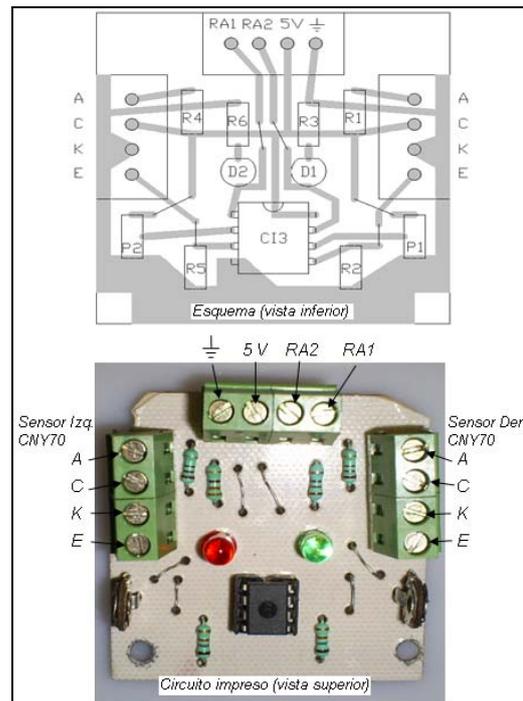


Fig. 4. Circuito impreso de la etapa sensorial.

La segunda parte del circuito impreso comprende el Microcontrolador PIC16F84A, el reloj de cuarzo de 4MHz y el integrado LM293; este circuito constituye la etapa de control y potencia. En la Figura 5 se presenta este circuito impreso.

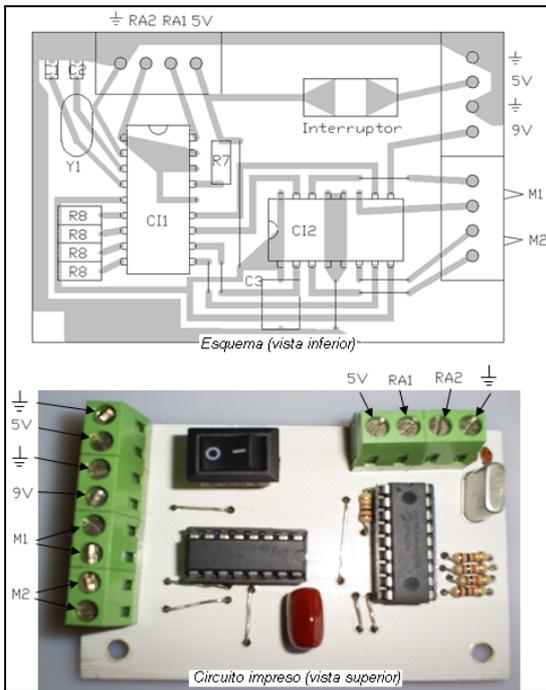


Fig. 5. Circuito impreso de la etapa de control y potencia.

5. Montaje y análisis de Resultados.

Enseguida se presenta el montaje final del robot móvil, que incluye los circuitos electrónicos en placa impresa y la instalación de los sensores al frente de la rueda delantera. Se utilizan baterías de recargables para energizar el robot móvil, con la finalidad de reducir costos de operación del robot y disminuir la contribución a la contaminación ambiental. Para la lógica de control se utilizan 5Volts, mientras que para energizar los motores se utiliza una batería de 9Volts. En la figura 6 se presenta el robot completamente instalado.

El robot instalado con todos sus componentes presenta una masa total de 650gr. Se realizaron pruebas para calcular la velocidad media del robot en línea recta con baterías completamente cargadas, la cual resultó ser de 41.6cm/s.

Así mismo, se realizaron pruebas para obtener el tiempo y distancia de frenado, con la finalidad de obtener datos acerca del tiempo de retardo al cambio de dirección y el par del motor. El robot tardó en promedio 0.03s para detenerse, lo cual produce una desaceleración de 13.886m/s^2 . Puesto que se conoce la masa del robot móvil y el radio de las ruedas (2.2cm), se obtuvo una fuerza de frenado de 9.01N y un par de torsión de 198mN·m. Además, como la

relación del reductor de velocidad del motor de tracción es de 34:1, se obtiene que el par del motor es de 5.82mN·m.

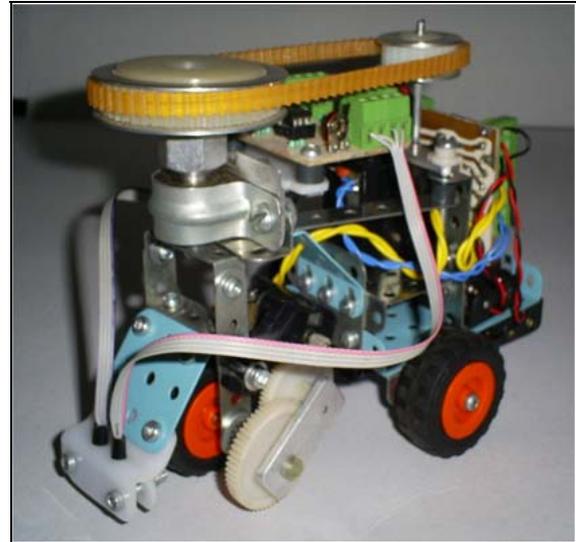


Fig. 6. Instalación completa del robot seguidor de línea.

Para realizar el control del robot móvil se utilizó el microcontrolador PIC16F84A, la programación se realizó en lenguaje ensamblador utilizando el software MPLAB IDE v7.60 y el programa se grabó en el microcontrolador usando el software IC-Prog 1.05D y un programador PIC-500. En la figura 7 se observa una parte del programa implementado para el control del robot móvil.

```

INCLUDE <P16F84A.INC> ;Definición de los oper
DIZQ EQU 0C ;Almacenar en memoria D
DDER EQU 0D ;Almacenar en memoria D
DREC EQU 0E ;Almacenar en memoria D
DAUX EQU 0F ;Almacenar en memoria D

ORG 00 ;El programa comienza
GOTO MAIN ;Ir a ciclo MAIN
MAIN BSF STATUS,RPO ;Pone a 1 el bit 5
MOVLW 0FF
MOVWF PORTA ;Las líneas del pue
CLRF PORTB ;Las líneas del pue
BCF STATUS,RPO ;Pone a 0 el bit 5

MOVLW D'0'
MOVWF DREC ;Establecer solució
MOVWF DAUX ;Establecer auxilia
MOVLW D'2'
MOVWF DDER ;Establecer solució
MOVLW D'4'
MOVWF DIZQ ;Establecer solució

CICLO MOVF PORTA,W ;Lee el puerto A
XORWF DREC,W ;¿Los sensores dete
BTFSZ STATUS,Z
GOTO CICLO1 ;Sí, Salta a CICLO

MOVF PORTA,W ;Lee el puerto A
XORWF DIZQ,W ;¿Los sensores dete
BTFSZ STATUS,Z
    
```

Fig. 7. Implementación programa para el control del robot móvil.

Para la realización de las pruebas de desempeño del robot móvil, se utilizó la pista de pruebas mostrada en la figura 8.

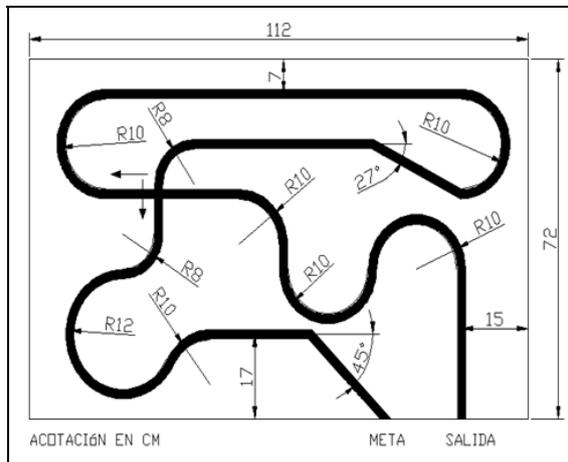


Fig. 8. Pista de pruebas del robot seguidor de línea.

6. Conclusiones.

En este trabajo se presentó el diseño y construcción de un robot móvil con estructura del tipo (1,1) y se presentaron los detalles del análisis cinemático y dinámico del robot. La realización de este proyecto permitió a los autores reflexionar sobre las capacidades de maniobrabilidad de este tipo de robot, así como las posibilidades de control del mismo.

Con la realización de este proyecto se pretende promover la participación de los estudiantes de nuestra Facultad, para que se desarrollen proyectos similares con fines de docencia y para la generación de conocimiento y nuevas aplicaciones, a mediano plazo, en este campo de la ingeniería.

El comportamiento del robot resulta adecuado para seguir la línea negra. Sin embargo, se pretenden realizar trabajos futuros en los que se implementen distintas técnicas de control aplicables a esta clase de robots.

Referencias

[1] Palacios E., Remiro F. y López L. "Microcontrolador PIC16F84A: Desarrollo

de Proyectos", Alfaomega, México, Primera Edición, 2004.

- [2] Villegas J., Marín E., Mejía C., Palacio F, Revelo B. González E. "Navegación Autónoma, Localización y Desplazamiento de Piezas en Entornos Estáticos y Conocidos". Extraído el 5 de Diciembre de 2008 desde: <http://www.redcientifica.com/doc/doc200105210006.html>
- [3] Cubas C., et al. "Dispositivos Automatas para Navegación, Detección Recolección de Pelotas de Tenis en Ambientes Conocidos", Ingeniería y Desarrollo. redalyc, Julio, número 009, pp. 98-112, 2001.
- [4] Alzate A., López A., Restrepo C., "Control Difuso de una Plataforma Móvil para el Seguimiento de Trayectorias", Scientia Et Technica. redalyc, Agosto, vol. XIII, número 035, pp. 169-174, 2007.
- [5] Jaimes C., Barrios J., Caviedes S. "Informes Seguidor de línea", 23 de Mayo de 2007, Colombia. Extraído el 8 de Noviembre de 2008 desde: <http://www.scribd.com/doc/490126/Seguidor-de-linea-negra?autodown=pdf>
- [6] Reyes F. et al. "Diseño, Modelado y Construcción de un Robot Móvil", Segundo Congreso Nacional de Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, pp. 1-5, Puebla, México, del 24 al 26 de Septiembre de 2002.
- [7] Campion G., Bastin G. and D'Andreá-Novel B., "Structural Properties and Classification of Kinematic and Dynamic Models of Wheeled Mobile Robots", IEEE Transactions on Robotics and Automation. Vol. 12, No. 1, pp. 47-62. 1996.