

Modelado, simulación y construcción de un robot móvil de ruedas tipo diferencial



**Edgar Roberto Ramos-Silvestre, Rodolfo Morales-Guerrero,
Ramón Silva-Ortigoza**

*CIDETEC-IPN, Departamento de Posgrado, Área de Mecatrónica,
Unidad Profesional Adolfo López Mateos, C.P. 07700, México D. F., México.*

E-mail: eramoss0901@ipn.mx

(Recibido el 1 de Julio de 2010; aceptado el 23 de Septiembre de 2010)

Resumen

Dentro el estudio de la robótica móvil y sus diferentes configuraciones es posible encontrar diversas aplicaciones que van desde el entretenimiento, medicina, milicia, sistemas de rescate, hasta la exploración en otros planetas. Con la búsqueda de nuevas tendencias tecnológicas, el estudio de la robótica móvil juega un papel muy importante en el área académica y es abordada por estudiantes, profesores e investigadores con el propósito de obtener un mayor conocimiento de esta rama; sin embargo no todos estos estudios concluyen satisfactoriamente en la implementación de un prototipo físico donde se pueda realizar las pruebas de distintas leyes de control para que el móvil realice movimientos autónomos. En el presente artículo se realiza el modelado, simulación y construcción de un robot móvil de ruedas tipo diferencial, que servirá como prototipo para realizar diferentes pruebas de la teoría de control automático, pudiendo de esta forma llevar a la práctica los conceptos teóricos relacionados con la robótica móvil, así como el desarrollo de investigación en esta área.

Palabras clave: Robot móvil de ruedas, modelado, simulación, prototipo.

Abstract

Into the study of the mobile robotics and its different configurations, it's possible to find different applications, such as those for entertainment, medicine, militia, rescue systems or other planets exploration. With the looking for new technological trends, the study of the mobile robotics became really important in the academic area and it's studied by students, teachers and investigators by the intention of getting more knowledge of this branch; even though not all these studies finish satisfactorily in the implementation of a physical prototype where it's possible to test the different control laws so that the mobile realizes autonomous movements. In this article the modeling, simulation and construction of a differential wheels mobile robot, that will serve as a prototype to try different test of the automatic control theory, being possible in this way to take into the practice the theoretical concepts related to the mobile robotics of wheels, thus as the development of investigation in this area.

Keywords: Mobile robot of wheels, modeling, simulation, prototype.

PACS: 07.07.Tw, 07.05.Dz, 07.07.Df

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

La robótica, es una de las tecnologías más importantes en la nueva era de la sociedad [1], en la búsqueda de nuevas tendencias tecnológicas, el estudio de la robótica móvil juega un papel muy importante en diversas áreas y aplicaciones que van desde diversos sectores del quehacer humano, tales como el industrial, militar, exploración espacial, entretenimiento, asistencia médica, seguridad, entre otras muchas aplicaciones.

Como ya se menciona debido a las diversas aplicaciones dentro del estudio de la robótica móvil se pueden clasificar a los robots en vehículos aéreos, terrestres y acuáticos [2]. De la misma manera, hablando de los robots terrestres podemos encontrar que estos a su vez se pueden clasificar de acuerdo

al tipo de locomoción que utilicen para desplazarse dentro de su espacio de trabajo en tres categorías: robots de ruedas [3, 4, 5], robots de patas [6, 7] y robots de orugas [8, 9]. A pesar del amplio estudio de la movilidad de robots por patas y de orugas, el desarrollo más significativo se ha dado en la locomoción por ruedas. Una ventaja principal por la que es más conveniente utilizar ruedas como medio locomotor es la facilidad para construirlas; otras ventajas son que solo es necesario suministrar energía al eje de las ruedas motrices, se puede desplazar un peso mayor que usando patas, requieren menor cantidad de partes, el control de las ruedas es menos complejo que la actuación de las patas o de las orugas, causan menor desgaste en la superficie en donde se mueven en comparación con las bandas de las orugas y los problemas de balance no presentan gran dificultad, ya que el

robot siempre se encontrará en contacto con una superficie, lo cual no siempre sucede con los robots actuados con patas u orugas.

Sin embargo cabe mencionar que los robots móviles con ruedas (RMR) también presentan un problema a enfrentar, las ruedas no pueden salvar grandes obstáculos; para esto se debe de tener en cuenta en el diseño el radio de las llantas, su disposición en el móvil y la parte que proporcionará el movimiento, es decir cuáles van a ser las llantas motrices. De lo anterior los sistemas de los que se compone un RMR se resume en dos partes fundamentales: un arreglo cinemático y un sistema de actuadores. Entendiendo por arreglo cinemático al análisis del movimiento sin tener en cuenta las fuerzas que lo producen, ni las que se generan; y por la parte de actuadores como aquellos recursos que proporcionan el movimiento. Hablando de la parte cinemática en RMR, se encuentran diversas configuraciones [10, 11, 12] que han sido de interés en múltiples estudios, dentro de las cuales se encuentran la configuración Ackerman, triciclo, skid steer, síncrona, tracción omnidireccional y tracción diferencial, siendo esta última la más común y la empleada en este trabajo.

La configuración por tracción diferencial se caracteriza porque el movimiento se consigue con dos ruedas, acopladas cada una a su propio motor, teniendo normalmente una o dos ruedas de apoyo. De esta forma se logra que el robot avance en línea recta fijando ambos motores a la misma velocidad, también se le puede hacer girar en una u otra dirección cuando se aplican velocidades diferentes, y se logra que gire sobre su propio eje cuando las velocidades tienen igual magnitud con sentidos opuestos.

Asimismo, para hacer más tratable el problema de modelado, en la obtención de los modelos cinemáticos de RMR, es común introducir suposiciones de diseño y operación [13, 14] como: a) El robot se mueve sobre una superficie plana, b) El deslizamiento en la ruedas izquierda y derecha es despreciable, c) El robot es rígido y no cuenta con partes flexibles, d) el robot tiene restricciones no holonómicas [15, 16].

En lo referente a la parte de actuadores o motores, estos se encargan de generar los perfiles de velocidad angulares impuestos por el modelo cinemático. Particularmente los motores de corriente directa (CD) son los más usados en la actuación de RMR debido a su facilidad de control, ya que estos poseen un modelo lineal.

En los últimos tiempos, el estudio de la robótica móvil ha sido objeto de interés para una gran cantidad de investigadores, en lo relativo a factores importantes asociados a la búsqueda de lograr una total autonomía en los robots móviles, es por tal motivo que el objetivo de este trabajo es el de modelar, simular y construir un RMR tipo diferencial que permita comprobar e implementar lo desarrollado en la teoría.

Este artículo está dividido en cinco secciones. En la sección II, se realiza el modelado cinemático del robot móvil de ruedas para lo cual hacemos uso del método de Euler-Lagrange para encontrar las ecuaciones diferenciales que gobiernan la dinámica de un robot móvil diferencial, tomando en cuenta que la entrada de control del sistema

serán las velocidades angulares de cada rueda, izquierda y derecha. En la sección III, se realiza la simulación del modelo obtenido en la sección II, para lo cual se hace uso de la herramienta Matlab[®] Simulink[®], de tal forma que las ecuaciones diferenciales que representan al robot móvil son puestas en un entorno de diagrama de bloques, y de esta forma observar su desempeño cuando se aplican diversas combinaciones de velocidades angulares a cada rueda tanto izquierda como derecha. En la sección IV, se describe la construcción física del robot móvil, tanto de la parte mecánica como de la parte electrónica, y una vez que describe la construcción se muestra el ensamblado del mismo. Finalmente, en la sección V, se presentan las conclusiones del documento.

II. MODELO CINEMÁTICO DEL ROBOT MÓVIL

Para el modelado del robot móvil se considera que el movimiento del robot se realiza en el plano XY, con una configuración de tracción diferencial. En la Figura 1 se muestra el diagrama del robot móvil para desarrollar el modelo cinemático de un robot diferencial [17, 18, 19, 20]. De acuerdo a la Figura 1, (x, y) denota la posición del punto medio del eje que une las dos llantas traseras, ϕ describe el ángulo que forma el eje de simetría del móvil respecto al eje X positivo, ω_d y ω_i son las velocidades angulares de las llantas derecha e izquierda, respectivamente, mientras que r es el radio de las llantas y $2l$ es la separación entre ellas.

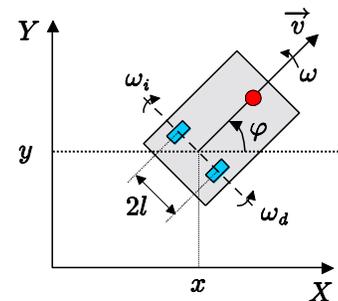


FIGURA 1. Diagrama del robot móvil.

Sobre cada rueda, tanto izquierda como derecha, actúa una fuerza, \vec{F}_i y \vec{F}_d , que proporcionan las velocidades \vec{v}_i y \vec{v}_d , respectivamente. En las Figuras 2(a) y 2(b) se muestran el diagrama de fuerzas y de velocidades, y tomando como coordenadas generalizadas a (x, y, ϕ) , se encuentra que la posición de los puntos de contacto de cada una de las llantas con el plano XY está dada por

$$\vec{r}_i = x - l \sin \varphi \hat{x} + y + l \cos \varphi \hat{y}, \quad (1)$$

$$\vec{r}_d = x + l \sin \varphi \hat{x} + y - l \cos \varphi \hat{y},$$

de donde, si m es la masa de cada de una de las llantas entonces la energía cinética del sistema está dada por

$$T = \frac{m}{2} \left(\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + l^2 \dot{\varphi}^2 \right) = m(\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + l^2 \dot{\varphi}^2), \quad (2)$$

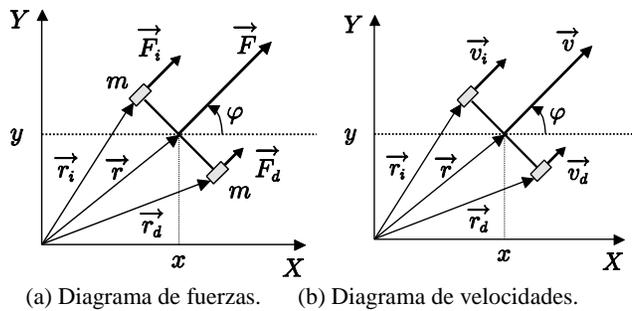


FIGURA 2. Diagrama de fuerzas y velocidades.

Con base en la teoría de Lagrange de la mecánica clásica, las ecuaciones de movimiento del sistema físico están dadas por:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial T}{\partial x} &= Q_x, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{y}} \right) - \frac{\partial T}{\partial y} &= Q_y, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi} &= Q_\varphi, \end{aligned} \quad (3)$$

donde Q_x , Q_y , Q_φ , son las denominadas componentes de la fuerza generalizada, las cuales están dadas por

$$\begin{aligned} Q_x &= \vec{F}_i \cdot \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial x} + \vec{F}_d \cdot \frac{\partial \vec{r}_d}{\partial x} = \vec{F}_i + \vec{F}_d \cdot \hat{x}, \\ Q_y &= \vec{F}_i \cdot \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial y} + \vec{F}_d \cdot \frac{\partial \vec{r}_d}{\partial y} = \vec{F}_i + \vec{F}_d \cdot \hat{y}, \\ Q_\varphi &= \vec{F}_i \cdot \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial \varphi} + \vec{F}_d \cdot \frac{\partial \vec{r}_d}{\partial \varphi} \\ Q_\varphi &= l \vec{F}_d - \vec{F}_i \cdot \cos \varphi \hat{x} + \sin \varphi \hat{y}. \end{aligned} \quad (4)$$

Tomando (1)-(4), un cálculo directo muestra que las ecuaciones de movimiento están dadas por

$$\begin{aligned} 2m\ddot{x} &= \vec{F}_i + \vec{F}_d \cdot \hat{x}, \\ 2m\ddot{y} &= \vec{F}_i + \vec{F}_d \cdot \hat{y}, \\ 2ml^2\ddot{\varphi} &= l \left(\vec{F}_d - \vec{F}_i \cdot \cos \varphi \hat{x} + \sin \varphi \hat{y} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

De donde \vec{F}_i, \vec{F}_d son las fuerzas que actúan sobre las llantas izquierda y derecha, respectivamente, proporcionando las velocidades \vec{v}_i, \vec{v}_d , entonces

$$\begin{aligned} \vec{F}_i &= m\vec{v}_i = m\dot{v}_i(\cos \varphi \hat{x} + \sin \varphi \hat{y}), \\ \vec{F}_d &= m\vec{v}_d = m\dot{v}_d(\cos \varphi \hat{x} + \sin \varphi \hat{y}), \end{aligned} \quad (6)$$

donde v_i y v_d son las magnitudes de las aceleraciones de las llantas izquierda y derecha respectivamente. Usando (5) y (6), después de realizar una integración respecto al tiempo y simplificar, se encuentra que

$$\begin{aligned} 2\dot{x} &= \dot{v}_i + v_d \cos \varphi + c_x, \\ 2\dot{y} &= \dot{v}_i + v_d \sin \varphi + c_y, \\ 2l\dot{\varphi} &= \dot{v}_d - v_i \sin \varphi + c_\varphi, \end{aligned} \quad (7)$$

donde c_x , c_y y c_φ son tres constantes de integración. Finalmente, si ω_i y ω_d son las velocidades angulares de las llantas izquierda y derecha, respectivamente, la condición de rodadura sin deslizamiento es equivalente a imponer que:

$$\begin{aligned} v_i &= r\omega_i, \\ v_d &= r\omega_d, \end{aligned} \quad (8)$$

donde r denota el radio de cada una de las ruedas del móvil. Así, con la intención de hacer más general el modelo y no restringirlo a una posición y orientación iniciales las constantes de integración c_x , c_y y c_φ se hacen iguales a cero, obteniendo que las ecuaciones del modelo cinemático estén dadas por,

$$\dot{x} = \frac{v_d + w_i r}{2} \cos \varphi, \quad (9)$$

$$\dot{y} = \frac{v_d + w_i r}{2} \sin \varphi, \quad (10)$$

$$\dot{\varphi} = \frac{v_d - w_i r}{2l}. \quad (11)$$

De las ecuaciones (9)-(11) es claro que para r y l dados, la única forma de imponer que las variables del sistema (x , y , φ), generen una trayectoria deseada queda determinada por la elección apropiada de ω_d y ω_i , las cuales son conocidas como variables de control del móvil dentro del contexto de la teoría de control automático, motivo de estudio de la siguiente sección.

III. SIMULACIÓN DEL MODELO EN MATLAB®-SIMULINK®.

Esta sección tiene por objetivo el realizar la simulación del modelo cinemático del robot móvil, para observar el comportamiento del mismo, es decir, su posición y orientación, cuando se aplican diversas combinaciones de

velocidades angulares a las ruedas izquierda y derecha. Para realizar las simulaciones del modelo cinemático se utiliza el software Matlab® Simulink®.

La representación del modelo cinemático del robot móvil en Simulink® se muestra en la Figura 3. Para todas las simulaciones del sistema (9)-(11) se considerarán los parámetros siguientes: para el radio de las ruedas se considera $r = 0.075$ m, con una separación entre las mismas de $2l = 0.39$ m, con la condiciones iniciales $(x(0), y(0), \varphi(0)) = (0, 0, \pi/4 \text{ rad})$. Mientras que el tiempo de simulación que se considera es $t = 50$ s.

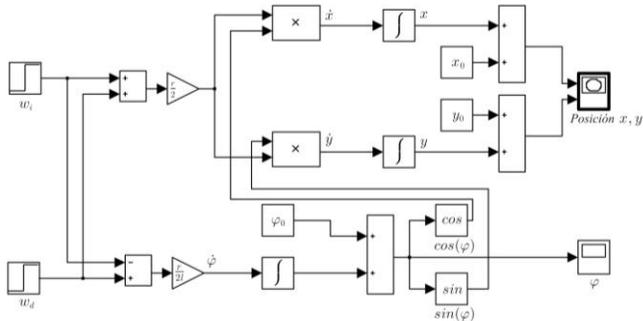


FIGURA 3. Representación del modelo cinemático por diagrama e bloques en Matlab® Simulink®.

El diagrama a bloques mostrado en la Figura 3, permite realizar la simulación del modelo cinemático, que describe el comportamiento del robot móvil para diferentes valores de velocidades angulares, teniendo la posibilidad de cambiar la orientación y la posición inicial del móvil (x_0, y_0) . Las condiciones bajo las cuales se realizaron las simulaciones se explican a continuación:

a) *Simulación 1:* Haciendo que las velocidades angulares sean iguales en ambas ruedas, es decir, $\omega_d = 1 \text{ rad/s}$ y $\omega_i = 1 \text{ rad/s}$. Es claro que cuando se impone lo anterior se genera una recta orientada a $\pi/4 \text{ rad}$ en el plano XY, lo cual está en completo acuerdo con lo obtenido en la simulación mostrada en la Figura 4.

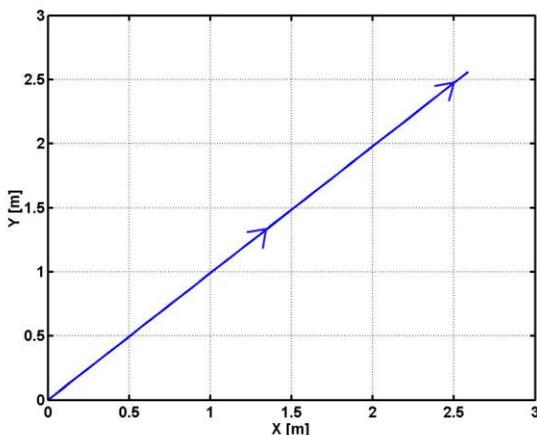


FIGURA 4. Trayectoria realizada por el robot móvil, para velocidades angulares iguales en la misma dirección $\omega_d = 1 \text{ rad/s}$ y $\omega_i = 1 \text{ rad/s}$.

b) *Simulación 2:* En esta simulación se imponen las velocidades angulares de las ruedas sean: $\omega_d = 1.2 \text{ rad/s}$ y $\omega_i = 1 \text{ rad/s}$, por lo que el robot móvil gira continuamente en sentido anti horario, lo anterior se observa en la Figura 5.

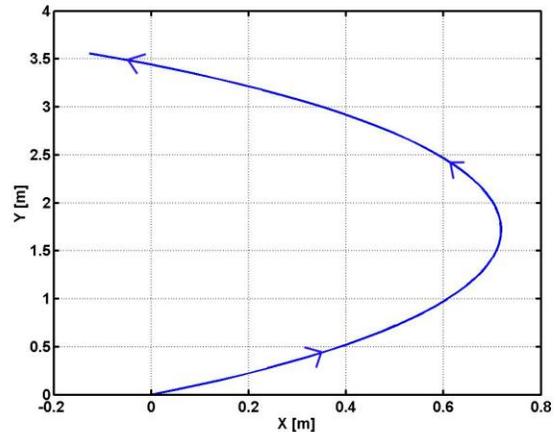


FIGURA 5. Trayectoria realizada por el robot móvil, para una velocidad angular de la rueda derecha mayor a la de la izquierda $\omega_d = 1.2 \text{ rad/s}$ y $\omega_i = 1 \text{ rad/s}$.

c) *Simulación 3:* En esta simulación se aplican las siguientes velocidades angulares: $\omega_d = 0.08 t \text{ rad/s}$ para la rueda derecha y $\omega_i = 1 \text{ rad/s}$ para la rueda izquierda. En estas condiciones se puede observar como hay un punto en el cual la rueda derecha supera en velocidad a la rueda izquierda y sigue una curva cerrada. Este comportamiento se muestra en la Figura 6.

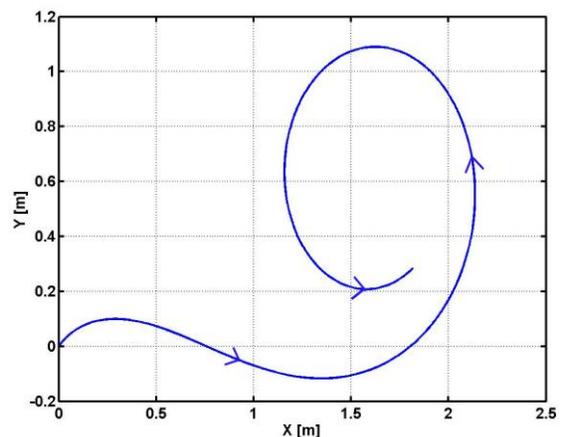


FIGURA 6. Trayectoria realizada por el robot móvil, cuando se aplica una rampa a la rueda derecha $\omega_d = 0.08 t \text{ rad/s}$ y la izquierda $\omega_i = 1 \text{ rad/s}$.

d) *Simulación 4*: En esta simulación se aplican velocidades iguales a ambas ruedas, pero en sentidos opuestos, es decir, $\omega_d = 1 \text{ rad/s}$ y $\omega_i = -1 \text{ rad/s}$. Con esto se puede verificar una característica que tiene el robot móvil tipo tracción diferencial; que es el de girar sobre sí mismo en estas condiciones. En la Figura 7 se muestra el resultado de este efecto.

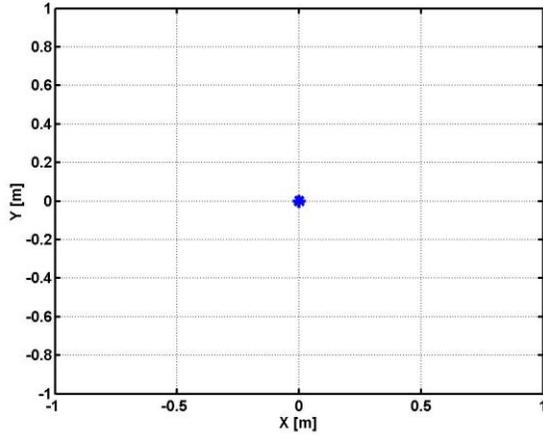


FIGURA 7. Trayectoria realizada por el robot móvil, para velocidades angulares iguales, pero de sentido opuesto $\omega_d = 1 \text{ rad/s}$ y $\omega_i = -1 \text{ rad/s}$.

IV. CONSTRUCCIÓN DEL ROBOT MOVIL

Esta sección aborda dos etapas generales de las que se compone el prototipo de robot móvil, los cuales son: etapa de los *subsistemas* que involucra los componentes mecánicos, y la etapa de *potencia*, que permite conocer la parte electrónica. En la Figura 8 se muestran las etapas que conforma el robot móvil de ruedas construido.

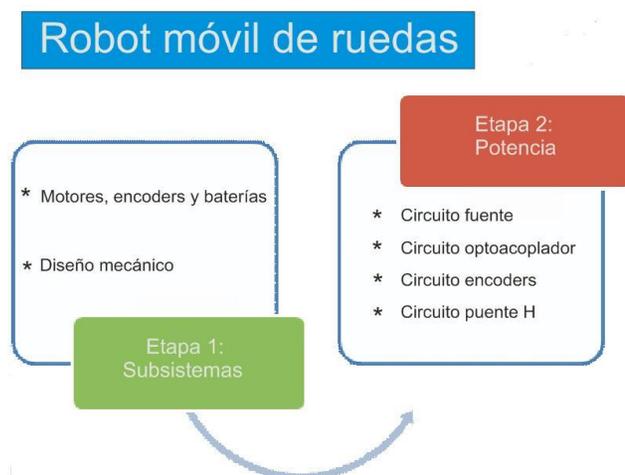


FIGURA 8. Etapas de las que se componen el robot móvil de ruedas construido.

A. Etapa 1: Subsistemas

En esta etapa se aborda lo referente al diseño mecánico y la selección de los componentes electromecánicos como son los motores, encoders y las baterías, para finalmente terminar en el ensamble del prototipo. A continuación se explica cada una de las partes que componen los subsistemas.

A.1 Motores, Encoders y Baterías

Es común encontrar en múltiples sistemas el uso de motores paso a paso, servomotores y motores de CD; sin embargo debido a que cada uno presenta características distintas, la selección depende del sistema a desarrollar y de esta forma se adapte a sus requerimientos. Si analizamos los servomotores, podemos mencionar que tienen un desplazamiento angular limitado y se basan para su funcionamiento en un control por ancho de pulso, por lo tanto no es el recomendable para el prototipo. Los motores a pasos, ofrecen un control con una precisión elevada en el giro del rotor debido a su estructura interna, sin embargo exigen mayor electrónica para su control, lo cual lo hace relativamente complejo para su implementación. Por lo mencionado en párrafos anteriores se utilizó un motor de CD, ya que tiene un modelo lineal que facilita su control, y además es controlable en lazo cerrado y son más sencillos de instrumentar. Los motores seleccionados para el presente prototipo corresponden a los modelos GNM3150 del fabricante MicroMo Electronics Inc., los cuales requieren de un voltaje nominal de 24 V. El par de salida es de 3.53 N-m. Asimismo el factor de reducción del motor es de 20:1. En la Figura 9 se muestra el motor de CD utilizado en el prototipo.



FIGURA 9. Motor de CD de 24 V, modelo GNM3150 del fabricante MicroMo Electronics Inc.

En cuanto a los encoders que sirven para realizar la medida del desplazamiento angular del robot móvil, se eligieron de tipo incremental y que se acoplan directamente a los motores, y son de la marca OMRON, modelo E6A2-CW5. El funcionamiento de un encoder consiste en un arreglo de fototransistor y fotodiodo, colocados en ambos extremos de un disco que tiene sectores opacos y libres, el cual se monta en el rotor del motor y al girar el disco, el número de pulsos

por revolución, determina la resolución del encoder [21]. Entre las características más importantes del encoder podemos mencionar que:

- Es posible instrumentarlo para sensar desplazamiento, velocidad, desplazamiento angular, posición y aceleración.
- Requiere de una alimentación de 12-24 V CD.
- Resolución de 2000 pulsos por revolución.
- Cuenta con tres canales (channel A, channel B) y un índice (Index).

La Figura 10 muestra el encoder óptico de tipo incremental que fue utilizado en el prototipo del robot móvil.



FIGURA 10. Encoder óptico tipo Incremental de la marca OMRON.

Todo sistema electromecánico, necesita una fuente de energía para poder realizar una tarea; para el prototipo utilizamos baterías de plomo-ácido, las cuales son muy comunes en diversas aplicaciones. Regularmente estas baterías se encuentran en módulos de 12 V con distintas capacidades de corrientes, para el robot móvil se necesitara de dos módulos de 12 V en serie, para formar una fuente de 24 V que permita el buen desempeño de los motores. Las baterías adquiridas son de la marca YUASA y son de una capacidad de 12 A-hr (Amper-hora), como se muestra en la Figura 11.

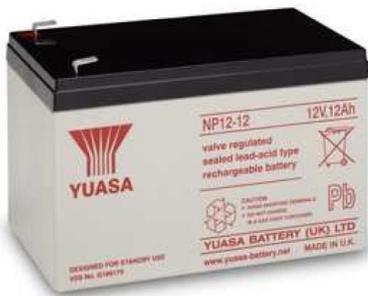


FIGURA 11. Batería de plomo-ácido, 12 V de la marca YUASA.

A.2 Diseño mecánico

Una vez realizado la selección de los dispositivos electromecánicos que brindan tracción a robot, Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol. 4, No. 3, Sept. 2010

describiremos el proceso de construcción del prototipo. El diseño del robot se realizo con el software SolidWork, que permite diseño de piezas mecánicas así como de su ensamblado. La manufactura se realizo con la ayuda de un centro de maquinado por control numérico (CNC) adicionalmente se utilizo herramienta convencional como el torno y la fresa. Las partes que compone el robot móvil son:

- a) *Base del robot móvil*, que es la pieza donde se soporta toda la estructura cinemática y la parte de los actuadores del robot. Las dimensiones finales de la pieza son de 55 cm de largo y de 48.5 cm en la parte más ancha de la pieza.
- b) *Ruedas motrices*, que permiten el desplazamiento en el plano del robot móvil. Las dimensiones de cada pieza es de 10 cm de diámetro adicionalmente la pieza se vulcanizo para tener mayor fricción sobre la superficie en la que se desplace y finalmente tiene un diámetro de 15 cm.
- c) *Buje de unión entre ruedas motrices y flecha del motor*, sirven para conectar las ruedas del robot con el eje del motor. La base de la pieza tiene un diámetro de 3.5 cm y el largo de la misma es de 4 cm, el diámetro menor en la punta del buje es de 2 cm.
- d) *Base para ruedas de bola*, esta pieza es la que soporta al par de ruedas de bola que brindan estabilidad al robot. Tiene una dimensión de 36 cm de largo.
- e) *Barras de unión entre soportes y estructura*, se realizaron 3 piezas semejantes las cuales se distribuyen a lo largo del soporte de las ruedas de bolas, las dimensiones de las piezas son 7.15 cm de largo y tiene un diámetro de 1.6 cm.
- f) *Sujetadores de rodamientos*, se tiene dos piezas que de 7.4 x 6.4 cm, el diámetro de la caja para el rodamiento es de 3.7 cm con un diámetro interno de 2.2 cm.
- g) *Bridas de soporte para el motor*, sirven como soporte para los motores permitiendo sujetarlos a la base del robot, con el fin de fijarlos y puedan unirse a los ejes de las ruedas. Ambas piezas tiene la forma de medio círculo con un radio de 2.75 cm que al unirse sujetara al contorno del motor, la brida superior tiene una dimensión de 7.6 x 5.98 cm y la brida inferior mide 7.6 x 3.3 cm, ambas tiene un ancho de 3.15 cm.
- h) *Bases para el encoder*, permiten sujetarlos con la base del robot, asimismo unen con la flecha del motor. La pieza tiene forma de ángulo de 90°, la base de la pieza mide 6.8 x 4.5 cm y la parte donde se empotra el encoder tiene una longitud de 7.7 cm con el corte circular de 3 cm de diámetro.

Una vez que se tienen maquinadas cada una de las piezas del robot móvil se procede a ensamblar las mismas junto con la parte de subsistemas. Se muestra en las Figuras 12 y 13 el conjunto de las piezas culminadas y distribuidas en su posición antes de su ensamble.



FIGURA 12. Piezas finalizadas para el ensamble del robot móvil.



FIGURA 13. Piezas distribuidas en su posición antes de su ensamble.

En las Figuras 14, 15 y 16 se muestran respectivamente, la vista inferior, la vista isométrica y la vista lateral del robot móvil. En el lado izquierdo de estas figuras se presenta la estructura del robot diseñado en SolidWorks. Mientras que en el lado derecho de las mismas figuras se muestran las fotografías del prototipo del robot construido.

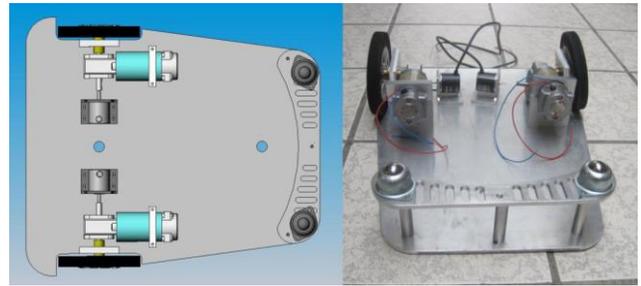


FIGURA 14. Vista inferior del robot móvil.

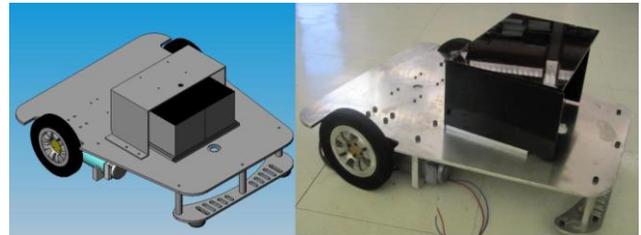


FIGURA 15. Vista isométrica del robot móvil.

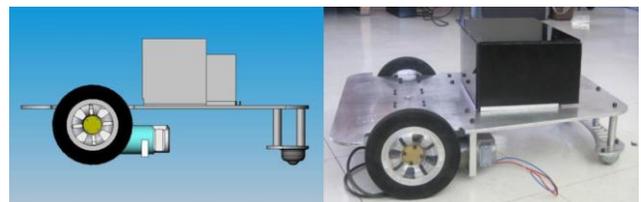


FIGURA 16. Vista lateral del robot móvil.

Como se puede observar en las figuras anteriores el prototipo está ensamblado, pero todavía no cuenta con la electrónica necesaria para accionar los motores CD. La estructura del robot nos permite observar cómo se realizará la disposición de las tarjetas electrónicas y las baterías para la alimentación, así como el cableado de las mismas.

B. Etapa 2: Potencia

Después que se tiene el prototipo construido y ensamblado, procedemos a describir la etapa de potencia, la cual brinda el movimiento a las ruedas por medio de los motores y alimenta los circuitos encargados de realizar el control para desarrollar la tarea planteada. Sin duda la etapa de potencia es parte fundamental para lograr el resultado esperado ya que por medio de esta etapa, el robot es capaz de realizar movimientos y estar en contacto con la tarjeta controladora. En la Figura 14 se presenta un diagrama a bloques que muestra la vertiente planteada para la realización de cada uno de los circuitos involucrados en esta etapa, donde el bloque etiquetado con DS1104 es una “tarjeta de control” que sirve como enlace entre una PC y la electrónica del robot móvil, cabe mencionar que por medio de esta tarjeta de control será posible implementar en el futuro técnicas de control automático que gobiernen el comportamiento del móvil. Asimismo, es importante decir que en todos los

circuitos electrónicos diseñados y construidos se empleó el software Altium Designer 2004.

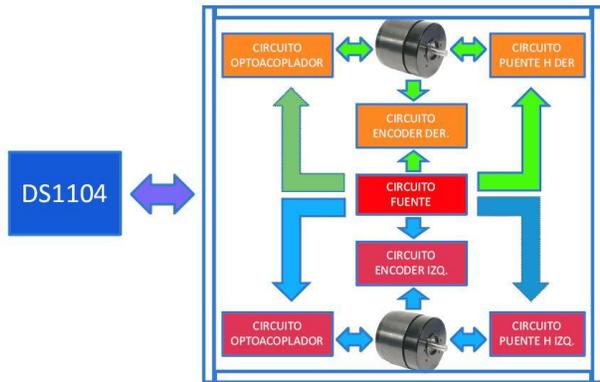


FIGURA 14. Etapa de potencia del robot móvil.

Circuito fuente: Como se mencionó anteriormente, el sistema que se realizó, cuenta con dos baterías de 12 V para su funcionamiento, por lo cual el circuito fuente es capaz de suministrar los distintos valores de voltaje a cada uno de los sistemas del robot móvil. Para reducir el voltaje de las baterías, se emplearon circuitos reguladores de voltaje 7805 para la fuente de 5 V que alimenta la etapa de optoacopladores en el puente H y la electrónica necesaria, también se hace uso del 7812 para 12 V que suministra energía a los ventiladores que brindan refrigeración al puente H y a los encoders. Como medio de protección en este circuito, se integran un par de fusibles en caso de presentarse una sobrecarga de corriente en el sistema. En la Figura 15 se aprecia lo anteriormente descrito, observamos del lado izquierdo las salidas de voltaje provenientes de las baterías directamente y del lado derecho las etapas reguladas a través de los circuitos reguladores de voltaje.

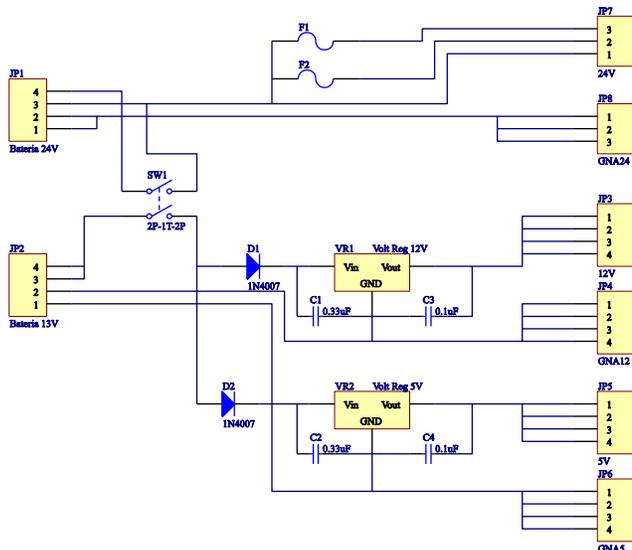


FIGURA 15. Circuito fuente de la etapa de potencia.

Circuito optoacoplador: Este circuito tiene la función de acoplar dos señales de medios distintos, es decir su función principal es mantener aislada eléctricamente dos circuitos y proteger a la tarjeta controladora y así evitar el paso directo de corriente que pudiera dañar algún dispositivo. Cabe señalar que fue necesario construir dos tarjetas de este circuito, debido a que el prototipo utiliza dos motores para realizar movimientos. En la Figura 16 se muestra el circuito y sus diferentes dispositivos electrónicos.

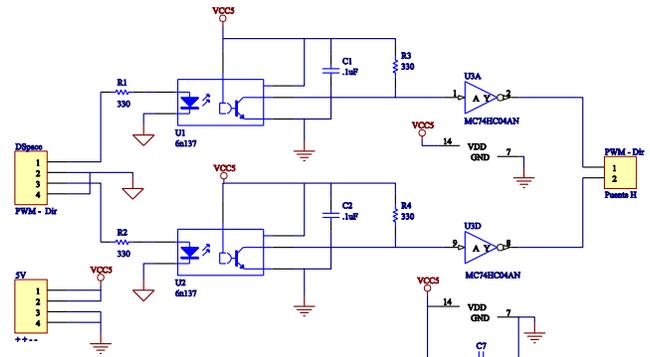


FIGURA 16. Circuito optoacoplador de la etapa de potencia.

Circuito puente H: El término puente H proviene de la disposición gráfica del circuito, que se construye con cuatro transistores que trabajan en modo de encendido/apagado (interruptores) los cuales permiten la conmutación del sentido de giro de los motores, para el prototipo se emplea un circuito integrado LMD18200 que tiene las características de controlar a un motor de CD con solo dos señales PWM (siglas en inglés de Pulse Width Modulation) y DIR (dirección). Como este proceso involucra gran consumo de corriente por parte de los motores en el puente H, se agregó al circuito un conector que alimenta un ventilador cuya función es disipar el calor de los dispositivos. También se agregaron otros dos conectores que se comunican con el circuito fuente con el fin de proporcionar en este circuito alimentación de 12 V para el ventilador y 24 V para los motores. En la Figura 17 se muestra el circuito, que de igual forma que en el anterior fue necesario realizar dos tarjetas electrónicas.

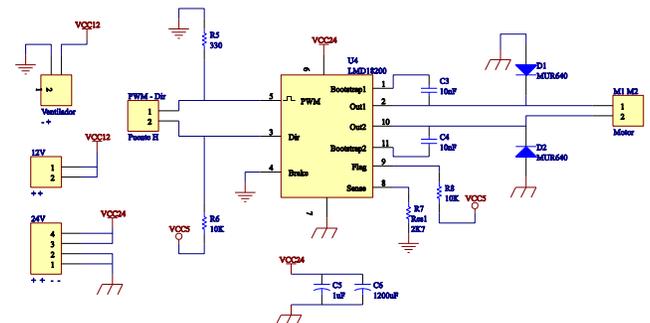


FIGURA 17. Circuito puente H de la etapa de potencia.

Circuito encoder: Este circuito se alimenta con 12 V, el cual suministra el voltaje que energiza a los encoders. Además, este circuito contiene una derivación de 5 V debido a que nuevamente se emplea optoacopladores para aislar la tarjeta de control con este circuito. Los conectores mostrados a la izquierda del diagrama etiquetados como ENCODER DER y ENCODER IZQ reciben la información de los canales A y B correspondientes a su respectivo encoder, mientras que el conector llamado ENC ALIMENT, alimenta a 12 V los encoders para su funcionamiento. Las señales provenientes de los encoders pasan a través de los circuitos optoacopladores y se envían en forma de corriente a los bornes del lado derecho (ENC DER OUT y ENC IZQ OUT). La Figura 18 muestra el circuito y sus conectores para las otras etapas.

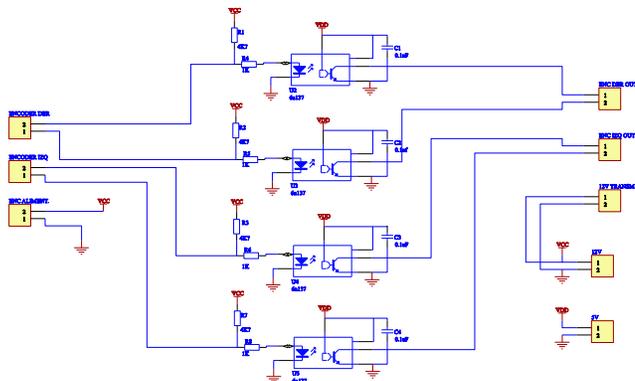


FIGURA 18. Circuito encoder de la etapa de potencia.

C. Ensamble del prototipo

Como resultado de realizar la unión de las dos etapas (etapa de *subsistemas* y etapa de *potencia*) se tiene el prototipo terminado y listo para realizar pruebas. Para finalizar, en la Figura 19 se muestran diferentes vistas del robot móvil terminado con la electrónica implementada, donde se puede observar que la parte trasera del móvil cuenta con un conector DB25-H, que permitirá realizar la conexión con una tarjeta de adquisición de datos, para realizar una tarea específica.

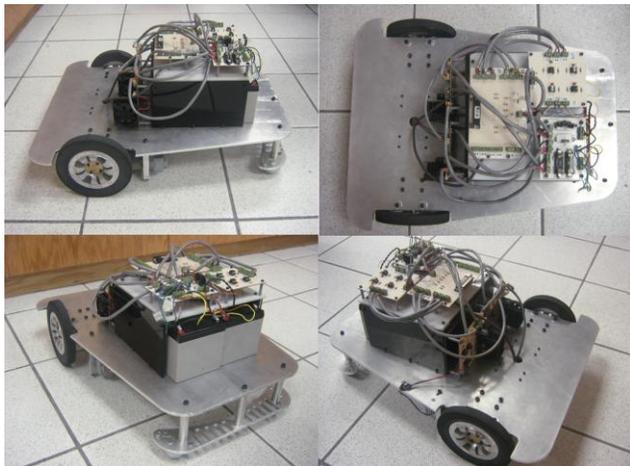


FIGURA 19. Diferentes vistas del robot móvil de ruedas terminado.

V. CONCLUSIONES

La robótica móvil como materia de estudio es bastante amplia y contar con un prototipo para realizar pruebas ayuda de gran manera a entender los conceptos teóricos. En la actualidad se cuenta con herramientas de software que permiten tanto diseñar desde una pieza mecánica hasta simular el comportamiento de un robot móvil, y de esta forma ver su desempeño.

En este trabajo se ha realizado la obtención del modelo cinemático que gobierna los estados del sistema RMR, cuyo deducción no siempre resulta sencilla de entender en otras referencias. Asimismo, hemos realizado algunas simulaciones en lazo abierto, relativo al comportamiento de este sistema ante entradas de velocidad angular impuestas, para interpretar la evolución de las trayectorias generadas en el plano XY. Esto permitirá, en el futuro el diseño de leyes de control que gobiernen a los perfiles de velocidad angular derecha, ω_d e izquierda, ω_i de tal manera que se pueda dar solución a los problemas de seguimiento de trayectorias y de evasión de obstáculos.

En lo relativo a la construcción de cada una de las piezas que conforman al RMR se puede decir que no existieron muchas problemáticas, excepto el diseño y construcción de las ruedas de tracción diferencial, pues hubo que construirlas en una máquina CNC, y posteriormente se mandaron a vulcanizar, para que el móvil tuviera mayor fricción con la superficie del espacio de trabajo donde se desarrollará. En lo que respecta al ensamble de las piezas mecánicas que conforman al prototipo, unas de las problemáticas presentadas durante la construcción del mismo es el relativo al ensamble de las piezas mecánicas, debido a que un mal acoplamiento de estas, principalmente en el eje de los motores que brindan el movimiento en las ruedas ocasiona un desajuste en el desplazamiento del RMR. Otra problemática es la relativa a la posición específica en que se encuentran distribuidas las ruedas de tracción al final de la base del robot se presenta un efecto de vibración en la estructura del móvil, dicho efecto podría influir en la dirección que lleve el móvil cuando se apliquen velocidades angulares a las ruedas; sin embargo una solución aceptable a este problema sería la colocación de más carga sobre el RMR o distribuir la colocación de las ruedas de soporte de tal manera que el efecto se atenúe.

El desarrollo del presente artículo se limitó a modelar, simular y construir un prototipo para realizar pruebas, pero no así a la parte de control para lo cual se sugiere adicionar una "tarjeta de control" que se adecue a las características de la electrónica que se utiliza en este robot móvil, mediante el desarrollo de técnicas de control automático.

Dentro de las perspectivas futuras de trabajo, en torno a este prototipo, se planea realizar las tareas de seguimiento de trayectorias y de evasión de obstáculos, en la formación de recursos humanos en el área de Mecatrónica.

AGRADECIMIENTOS

E. R. Ramos-Silvestre agradece el soporte económico recibido mediante una beca de estudios por parte Secretaría de Relaciones Exteriores – Dirección General de Asuntos Culturales – Dirección de Intercambio Académico de México. R. Morales-Guerrero agradece el apoyo económico a la Secretaría de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional (SIP-IPN) mediante el otorgamiento de la Beca PIFI e institucional 2010. R. Silva-Ortigoza agradece el soporte económico del Sistema Nacional de Investigadores (SNI) (México), a la Secretaria de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional (SIP-IPN) por el apoyo otorgado para el desarrollo de este trabajo, y de los Programas EDI y COFAA del IPN. De igual manera los autores agradecen los comentarios de los revisores pues han sido de gran utilidad para redactar una nueva versión mejorada.

REFERENCIAS

- [1] Castells, M., *The Information Age: Economy, Society and Culture. Volume I: The Rise of the Network Society*, (Blackwell Publishers Inc., Cambridge, 1996).
- [2] Angeles, J., *Fundamentals of Robotic Mechanical Systems. Theory, Methods and Algorithms*, (Springer-Verlag, New York, 2007).
- [3] Campion, G., Bastin, G. and D'Andréa-Novel, B., *Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots*, IEEE Trans. Robot. Automat **12**, 47-62 (1996).
- [4] Muir, P. F., *Modeling and control of wheeled mobile robots*, Ph. D. dissertation, The Robotics Institute Carnegie Mellon University, Pittsburgh (1988).
- [5] Muir, P. F. and Neuman, C. P., *Kinematic modeling of wheeled mobile robots*, Journal of Robotic Systems **4**, 281-340 (1987).
- [6] Raibert, M. H., Brown, H., Chepponis, M., Hastings, E., Koechling, J., Murphy, K. N., Murthy, S. S. and Stentz, A., *Dynamically stable legged locomotion*, Robotics Institute Technical Report **20** (1983).
- [7] Todd, D., *Walking machines: An introduction to legged robotics*, (Kogan-Page, London, 1985).
- [8] Granosik, G. and Borenstein, J., *Integrated joint actuator for serpentine robots*, IEEE/ASME Trans. on Mechatronics **10**, 473-481 (2005).
- [9] Iwamoto T., Yamamoto H. and Honma K., *Transformable crawler mechanism with adaptability to terrain variations*, in Proc. of the International Conference on Advanced Robotics, 285-292 (1983).
- [10] Bräunl, T., *Embedded robotics: Mobile robot design and applications with embedded systems*, (Springer-Verlag, New York, 2006).
- [11] Borenstein, J., Everett, H. R. and Feng, L., *Where am I?, sensors and methods for mobile robot positioning*, Technical report, (1996).
- [12] Siegwart, R. and Nourbakhsh, R., *Introduction to Autonomous Mobile Robots*, (The MIT Press, Cambridge Massachusetts, 2004).
- [13] Muir, P. F. and Neuman, C. P., *Kinematic modeling of wheeled mobile robots*, Robotics Institute Technical Report, (1986).
- [14] Tang, F., *Kinematics and design of a wheeled mobile robot*, (Center for Intelligent Machines, McGill University, Montreal, Canada, 2002).
- [15] Walsh, G., Tibury, D., Sastry, S., Murray, R. and Laumond, J. P., *Stabilization of trajectory for system with nonholonomic constraints*, IEEE Trans. Automation and Control **39**, 216-222 (1994).
- [16] Wang, D. and Xu, G., *Full-State Tracking and Internal Dynamics of Nonholonomic Wheeled Mobile Robots*, IEEE ASMAE Trans. on Mechatronics **8**, 203-214 (2003).
- [17] Silva-Ortigoza, R., Molina-Vilchis, M. A., Hernández-Guzmán, V. M., Silva-Ortigoza, G., Marciano-Melchor, M. y Portilla-Flores, E. A., *Modelado y control de un robot móvil tipo Newt en la tarea de seguimiento de trayectoria*, Télématique **7**, 129-145 (2008).
- [18] Sira-Ramírez, H. and Agrawal, S. K., *Differentially Flat Systems*, (Marcel Dekker, New York, 2004).
- [19] Silva-Ortigoza, R., Silva-Ortigoza, G., y Hernández-Guzmán, V. M., *Trajectory Tracking in a mobile robot without using velocity measurements for control of wheels*, IEEE Latin American Transactions **6**, 598-607 (2008).
- [20] Ollero, A., *Robótica Manipuladores y robots móviles*, (Marcombo, Barcelona, 2001).
- [21] Barrientos-Sotelo, V. R., *Análisis, diseño y construcción en tiempo real de un robot móvil tipo Shakey en el seguimiento de trayectoria*, Tesis de maestría dirigida por R. Silva Ortigoza y J. M. Albarrán, CIDETEC-IPN, México (2008).