

# Compensación de Fricción en el Control en Tiempo Real de un Robot Móvil

CENTRO NACIONAL DE ACTUALIZACIÓN DOCENTE EN MECATRÓNICA-CNAD

M. en C. José Felipe Camarena García Departamento de Control

Tel: (52) 58 41 21 65, Fax: (52) 58 41 16 34 México, D.F.

E-mail: [fcamaren@cnad.edu.mx](mailto:fcamaren@cnad.edu.mx)

## RESUMEN

Este documento trata el estudio de técnicas de control en tiempo real aplicadas a un prototipo de robot móvil con el propósito de realizar el seguimiento de trayectorias preestablecidas en el plano cartesiano. La estructura de control propuesta se basa en un lazo interno a través de un controlador PID y de un lazo externo que describe el comportamiento cinemático del vehículo. El lazo interno realiza el seguimiento de velocidad angular de cada rueda que proporcionan la tracción del robot. El lazo externo consiste de un esquema de linealización de entrada salida por retroalimentación del vector de estado que se encarga de generar los perfiles de velocidad para cada motor.

**Palabras Claves:** Robot móvil, seguimiento de trayectoria, control por retroalimentación del estado, compensación de fricción.

## INTRODUCCIÓN

La automatización y la robótica juegan un papel fundamental en la industria de los países desarrollados, dentro de la robótica surge una subespecialidad enfocada al estudio de los vehículos guiados automáticamente. Los robots móviles son utilizados en un sin número de tareas, principalmente en acciones que resultan ser peligrosas para el hombre, entre las que se pueden mencionar las misiones en otros planetas, en áreas radiactivas, volcánicas y submarinas. Los robots móviles resultan ser ventajosos para la industria, ya que con ellos se pueden optimizar los procesos de producción en el aspecto de la distribución, transporte de insumos y almacenamiento de productos terminados. Un robot móvil se puede definir como un dispositivo electromecánico capaz de desplazarse por sí solo, a través de un espacio de trabajo con diferentes niveles de inteligencia, ésta inteligencia radica en la capacidad del robot para identificar el espacio de trabajo por medio de múltiples sensores, y de esta manera poder modificar su comportamiento. Los robots móviles se clasifican de acuerdo a su tipo de locomoción, en tres categorías; mediante orugas, mediante patas y mediante ruedas. Con la finalidad de simplificar el modelo matemático que describe las propiedades de un robot móvil impulsado por ruedas, con frecuencia se hace

el planteamiento de que las ruedas del robot giran sin resbalar sobre la superficie de apoyo [4,7,8].

El propósito de este trabajo consiste en experimentar con un prototipo de robot móvil técnicas de control en tiempo real que permitan el seguimiento de trayectorias preestablecidas. El esquema de control propuesto está formado por dos lazos de retroalimentación. Un lazo interno compuesto de un controlador Proporcional integral derivativo (PID) que se encarga de realizar un seguimiento de velocidad angular en las ruedas que proporcionan la tracción del vehículo, y un lazo externo asociado al modelo cinemático del vehículo, destinado a generar los perfiles de velocidad para cada motor, que corresponden a las trayectorias de posición deseadas en el plano cartesiano. El lazo externo de control consiste en un esquema de linealización entrada salida por retroalimentación del estado.

Este artículo está organizado de la siguiente manera. Se inicia con el desarrollo del esquema de control para el modelo cinemático del robot móvil. Después se presenta el esquema de control utilizado para el modelo dinámico de los motores. Posteriormente se presentan los resultados experimentales obtenidos al aplicar el esquema de control propuesto para el robot móvil. Finalmente, se presenta las conclusiones del trabajo.

## MODELO MATEMÁTICO

A continuación se describe el modelo cinemático del robot móvil y el modelo dinámico de los motores de corriente directa.

### Modelo Cinemático del Robot Móvil

La posición del robot móvil en un plano de referencia  $(X_0, Y_0)$  puede ser descrita por sus coordenadas  $(x, y)$  y un ángulo  $\theta$ , tal y como se muestra en la figura 1. Donde  $V$  es la velocidad lineal del robot,  $(x, y)$  son las variables que define la posición del robot en el plano de referencia  $(X_0, Y_0)$ ,  $\theta$  es el ángulo de rotación del robot,  $\omega_D$  y  $\omega_I$  son las velocidades de rotación de las ruedas del robot.

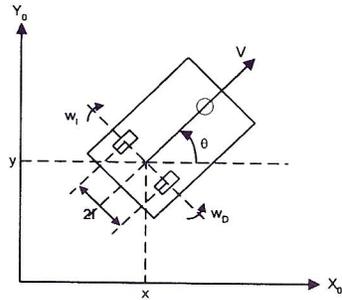


Figura 1. Plano de situación del robot móvil.

A partir de la figura 1, y sus relaciones básicas de velocidad [1], es posible establecer que la posición del robot está descrita por,

$$\begin{aligned} \dot{x} &= V \cos \theta \\ \dot{y} &= V \sin \theta \\ \dot{\theta} &= \omega \end{aligned} \quad (1)$$

De las relaciones anteriores, resulta fácil apreciar que  $V$  y  $\omega$  pueden ser consideradas como las variables de control, aunque en realidad, la velocidad tanto lineal como angular del robot, pueden ser obtenidas mediante la combinación de movimientos de las dos ruedas del robot. La transformación que relaciona a  $\omega_D$  y  $\omega_I$  con  $V$  y  $\omega$ , es la siguiente [2],

$$\begin{bmatrix} V \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & r \\ 2 & 2 \\ r & -r \\ 2l & 2l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_D \\ \omega_I \end{bmatrix} \quad (2)$$

donde  $r$  es el radio de las ruedas, y  $2l$  es la distancia entre ambas ruedas.

### Modelo Dinámico de los Motores

El prototipo empleado para la experimentación del control en tiempo real, utiliza motores de corriente directa (figura 2) de regular eficiencia. A continuación se presenta los aspectos más importantes del modelado e identificación de estos motores, ya que resulta de suma importancia para efectos de la simulación de la ley de control que se quiere implementar.

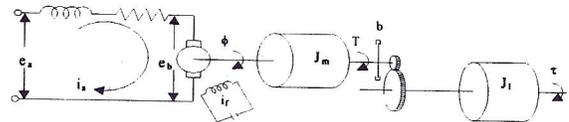


Figura 2. Esquema de un motor de corriente directa.

En la figura 2, se tiene que  $R_a$  es la resistencia de la armadura,  $L_a$  es la inductancia de la armadura,  $i_a$  es la corriente en la armadura,  $i_f$  es la corriente del campo,  $e_a$  es el voltaje aplicado a la armadura,  $e_b$  es la fuerza contra-electromotriz,  $\phi$  es el desplazamiento angular del eje del motor,  $T$  es el par desarrollado por el motor,  $J_m$  es el momento de inercia equivalente del motor-reductor,  $b$  es el coeficiente de fricción viscosa equivalente del motor-reductor,  $\tau$  es el par en la polea.

Mediante la combinación de la ley de voltaje de Kirchoff, la segunda ley de Newton, y las relación entre la corriente de armadura y el par del motor, se puede obtener el modelo matemático del motor de corriente directa, el cual está dado por,

$$J_m \frac{d^2 \phi}{dt^2} + b \frac{d\phi}{dt} = \left( \frac{e_a - K_b \frac{d\phi}{dt}}{R_a} \right) K \quad (3)$$

A partir de (3), y haciendo los cambios de variable apropiados, es posible obtener la ecuación diferencial que relaciona la velocidad angular del motor, con el voltaje aplicado a la armadura, es decir,

$$\frac{d\omega}{dt} = - \left( \frac{K_b K}{J_m R_a} + \frac{b}{J_m} \right) \omega + \left( \frac{K}{J_m R_a} \right) e_a \quad (4)$$

Definiendo a  $C_1$  y a  $C_2$  como constantes apropiadas, la ecuación (4) puede reescribirse como:

$$\frac{d\omega}{dt} = -C_1 \omega + C_2 e_a \quad (5)$$

Si representamos (4) en el dominio de la frecuencia, es posible obtener la función de transferencia entre la velocidad angular y el voltaje de armadura, es decir,

$$\frac{w(s)}{e_a(s)} = \frac{C_2}{C_1 + s} \quad (6)$$

Definiendo  $k = C_2 C_1$  y a  $\tau = 1/C_1$  se obtiene una expresión válida para la función de transferencia del motor de corriente directa (figura 3),

$$G(s) = \frac{w(s)}{e_a(s)} = \frac{k}{1 + s\tau} \quad (7)$$

cuya expresión nos permite identificar experimentalmente la respuesta del motor, aplicando una entrada conocida.

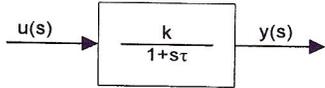
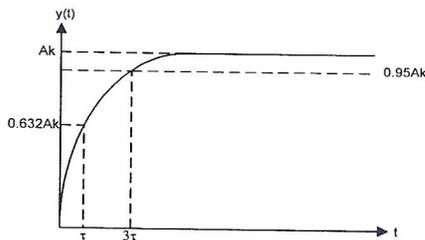


Figura 3. Función de transferencia de primer orden.

Entonces, de la figura 3 se tiene que  $u(s) = A/s$  (escalón de magnitud  $A$ ). Sustituyendo  $u(s)$  en (7), y aplicando la transformada inversa de Laplace, se obtiene,

$$y(t) = kA \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (8)$$

Figura 4. Respuesta de un sistema de primer orden con a una entrada escalón.



Con el empleo de la figura 4 que se muestra a continuación y de (8) es posible deducir el valor del coeficiente  $k$  conociendo el valor de  $Ak$  y de  $A$ , y por otro puesto que  $y(\tau) = 0.632Ak$ , resulta simple deducir el valor del coeficiente  $\tau$ .

De acuerdo a los resultados experimentales que se obtuvieron, se logró determinar las siguientes funciones de transferencia para cada uno de los motores del robot, así,

$$G_D(s) = \frac{0.475}{1 + 0.240s}, \quad G_I(s) = \frac{0.413}{1 + 0.330s}$$

## Ley de Control

El esquema de control que a continuación se desarrolla es la linealización entrada-salida por retroalimentación estática del vector de estados [3]. De (1), consideramos a  $V$  y a  $\omega$  como las variables de control,

$$\begin{aligned} u_1 &= V \\ u_2 &= \omega \end{aligned} \quad (9)$$

el modelo cinemático del robot móvil, se describe como,

$$\begin{aligned} \dot{x} &= u_1 \cos \theta \\ \dot{y} &= u_1 \sin \theta \\ \dot{\theta} &= u_2 \end{aligned} \quad (10)$$

Además, eligiendo a  $(x, y)$  como las variables de salida (figura 1), y definiéndolas como,

$$\begin{aligned} x_1 &= x \\ y_1 &= y \end{aligned} \quad (11)$$

Es fácil apreciar que el grado relativo [3] de ambas variables de salida es uno, puesto que,

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \dot{x} = u_1 \cos \theta = v_1 \\ \dot{y}_1 &= \dot{y} = u_1 \sin \theta = v_2 \end{aligned} \quad (12)$$

donde  $v_1$  y  $v_2$  son nuevas entradas cuyo objetivo será la linealización de la entrada-salida del sistema. El análisis que sigue a continuación requiere del empleo de la notación matricial, por lo que (12) se transforma en,

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{y}_1 \end{bmatrix} = A(x) \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

La expresión (13) demuestra claramente la imposibilidad de obtener las entradas originales del sistema  $u_1$  y  $u_2$ , ya que la matriz de desacoplamiento  $A(x)$  es singular.

Esta imposibilidad nos motiva a, ya sea aplicar el algoritmo de extensión dinámica [3] para lograr la linealización entrada-salida, o ya sea elegir nuevas variables de salida. Nuestra elección es la segunda, y entonces elegimos un punto central en el extremo frontal del robot móvil, tal y como se muestra en la figura 5.

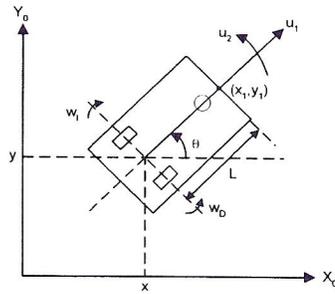


Figura 5. Salidas del sistema.

Entonces las variables de salida están dadas por,

$$\begin{aligned} x_1 &= x + L \cos \theta \\ y_1 &= y + L \sin \theta \end{aligned} \quad (14)$$

Cuyo grado relativo es igual a uno, puesto que,

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \dot{x} - L\dot{\theta} \sin \theta = u_1 \cos \theta - u_2 L \sin \theta = v_1 \\ \dot{y}_1 &= \dot{y} + L\dot{\theta} \sin \theta = u_1 \sin \theta + u_2 L \cos \theta = v_2 \end{aligned} \quad (15)$$

donde nuevamente  $v_1$  y  $v_2$  representan a las nuevas entradas que linealizan la respuesta entrada-salida del sistema. Representado (15) en notación matricial, se tiene que,

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{y}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -L \sin \theta \\ \sin \theta & L \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Donde resulta claro que las variables de control pueden ser obtenidas a partir de la siguiente expresión,

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -L \sin \theta \\ \sin \theta & L \cos \theta \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Definiendo las nuevas entradas de control de la forma  $v_1$  y  $v_2$ , los cuales gobiernan a las variables de salida  $x_1$  y  $y_1$ ,

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{y}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_{1d} - \alpha e_{x1} \\ \dot{y}_{1d} - \beta e_{y1} \end{bmatrix} \quad (18)$$

donde  $\alpha$  y  $\beta$  son ganancias mayores que cero, las cuales aseguran el seguimiento asintótico de las salidas cuando  $t \rightarrow \infty$  en lazo cerrado, entonces el error de seguimiento estará dado por:

$$\begin{aligned} e_{x1} + \alpha e_{x1} &= 0 \\ e_{y1} + \beta e_{y1} &= 0 \end{aligned} \quad (19)$$

donde

$$\begin{aligned} e_{x1} &= x_1 - x_{1d} \\ e_{y1} &= y_1 - y_{1d} \end{aligned} \quad (20)$$

Finalmente, sustituyendo (18) y (20) en (17), se obtiene la ley de control para el robot móvil, es decir:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\frac{\sin \theta}{L} & \frac{\cos \theta}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_{1d} - \alpha(x_1 - x_{1d}) \\ \dot{y}_{1d} - \beta(y_1 - y_{1d}) \end{bmatrix} \quad (21)$$

El esquema de control propuesto, se muestra en la figura 6.

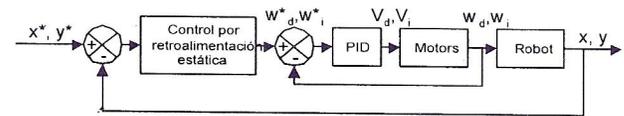


Figura 6. Esquema de control.

### Compensación de la Fricción

Con frecuencia se presentan problemas relacionados con los efectos de la fricción debido a los parámetros eléctricos y mecánicos de los motores de corriente directa, como en nuestro caso, por ejemplo, el eje del motor está acoplado directamente a un tornillo sin fin que en conjunto con una corona transmite el movimiento angular a cada rueda del robot. Este tipo de mecanismos presenta fuertes rozamientos y fricciones que repercuten en una zona muerta de operación del motor, es decir, el motor permanece sin cambio alguno para ciertos valores de voltaje aplicado en su devanado. Los efectos de la fricción ocasionan en el sistema errores considerables en el seguimiento de la trayectoria deseada.

De manera experimental se realizó la identificación de la función de transferencia de los motores (7), y se pudo apreciar la existencia del problema de la fricción en el control de los mismos. En la figura 7 se muestra la respuesta del motor izquierdo y derecho ante una entrada con crecimiento exponencial. Claramente se puede observar como los motores empiezan a funcionar solo cuando el voltaje aplicado es mayor que cierto umbral (5.4 volts para el motor derecho y 5.45 volts para el motor izquierdo), esta respuesta indeseable es lo que se conoce como zona muerta. Para compensar este efecto en cada uno de los motores es necesario aplicar un torque de fricción  $f$ , dependiente de la velocidad angular  $w$ , el cual debe ser considerado en el modelo (7) de la siguiente manera,

$$\tau w + w = k(V - f(w)) \quad (22)$$

El valor de la compensación  $f$  puede ser estimado mediante el siguiente modelo, [5,6]

$$f(w) = (f_c + f_v|w|)sign(w) \quad (23)$$

Donde  $f_c$  es un parámetro asociado al efecto de la fricción de Coulomb y  $f_v$  es un parámetro asociado a los efectos de la fricción viscosa. La fricción de Coulomb es la componente más importante de la fricción, y es independiente de la magnitud de la velocidad del motor. La fricción viscosa es proporcional a la velocidad y, en particular, tiende a cero cuando la velocidad es nula. Bajo el esquema de compensación de la fricción dado por (23) se presenta saturación en el controlador PID debido a los cambios discontinuos de los voltajes de control cuando el robot cambia su dirección bruscamente, tal como lo hace en los extremos de la parábola. Una forma de disminuir esos cambios bruscos en el seguimiento de la trayectoria es proponiendo el modelo de compensación de fricción de Dahl, que básicamente transforma la respuesta discontinua a una señal suave, eliminando de esta manera la saturación de los controles [5,6]. El modelo básico de Dahl para la compensación de la fricción esta dado por,

$$f = \sigma z + f_v w \quad (24)$$

$$\dot{z} = -\frac{\sigma}{f_c} |w| z + w \quad (25)$$

Donde  $f_c$  es la fricción de coulomb,  $f_v$  es la fricción viscosa,  $\sigma$  es un parámetro apropiado y  $z$  es el estado interno de la fricción, el cual no es medible.

Para una entrada de 6 volts, experimentalmente se obtienen los siguientes parámetros para el modelo (24)-(25) que incluye el efecto de la fricción Dahl.

	Motor Derecho	Motor Izquierdo
$f_c$	$f_{cd} = 5.40$	$f_{ci} = 5.45$
$f_v$	$f_{vd} = 0.05$	$f_{vi} = 0.06$
$\sigma$	$\sigma_d = 1$	$\sigma_i = 1$

Tabla 1. Valores obtenidos experimentalmente para la fricción de Coulomb y viscosa en los motores.

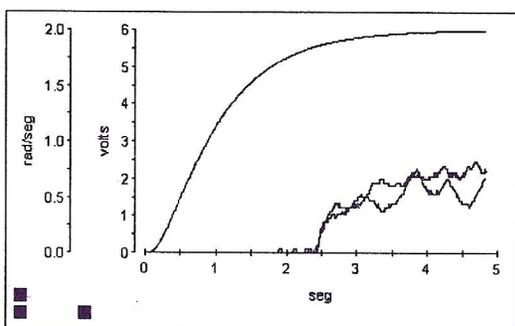


Figura 7. Zona muerta de los motores causada por la fricción.

## Simulación

Empleando el software Matlab, y desarrollando los programas de simulación en Simulink, se obtuvieron los siguientes resultados. Se hicieron simulaciones con tres tipos de trayectorias a seguir; parábola, círculo y hélice.

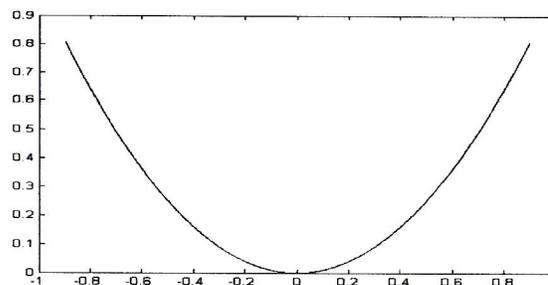


Figura 8. Trayectoria deseada simulada (parábola).

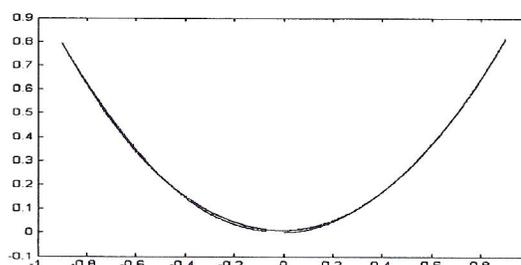


Figura 9. Trayectoria real simulada del robot móvil.

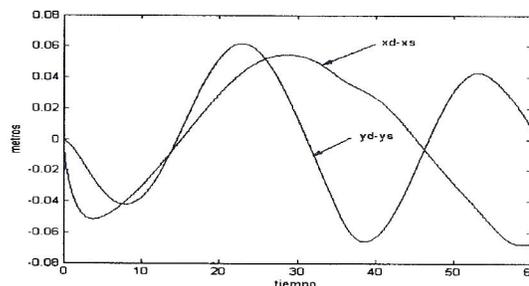


Figura 10. Errores de seguimiento en x , y en y.

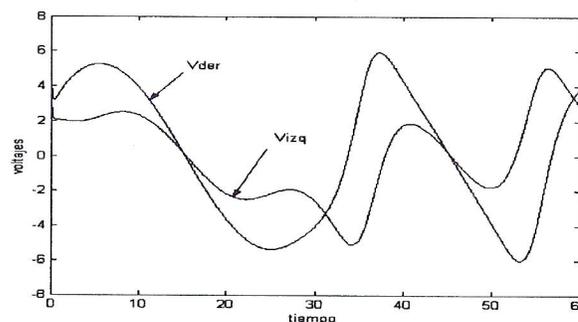


Figura 11. Voltajes de Control.

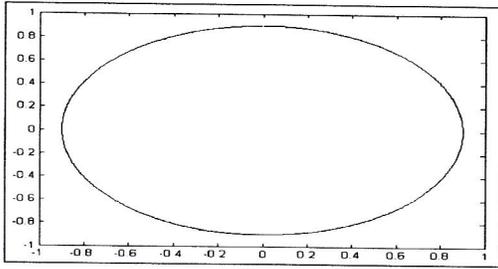


Figura 12. Trayectoria circular.

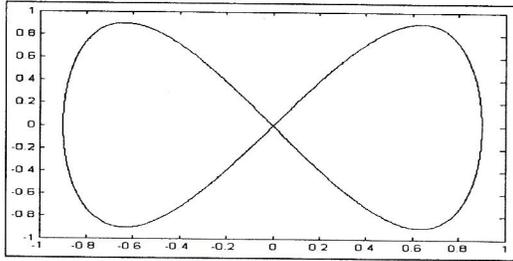


Figura 13. Trayectoria tipo hélice.

## RESULTADOS EN TIEMPO REAL

La implementación del esquema de control mostrado en la figura 6, se realizó mediante una tarjeta de adquisición de datos DSP (dSPACE DS1102) en la cual el programa de control propuesto puede ser transferido directamente a través del paquete de simulación Simulink de Matlab.

El objetivo de la experimentación en tiempo real es que el robot móvil siga una trayectoria preestablecida mediante la implantación del esquema de control mostrado en la figura 6. Para esto, se define y parametriza una parábola en un plano (X,Y), la cual representa la trayectoria deseada que el robot móvil tendrá que seguir. Esta parametrización está dada por,

$$x_{1d} = a \sin\left(\frac{2\pi}{P} t\right) \quad (26)$$

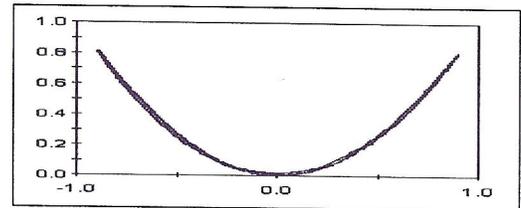
$$y_{1d} = x_{1d}^2$$

Donde  $a = 0.8$ , es la amplitud de la parábola, y  $P = 60$  seg, es el tiempo que le tomará al robot móvil seguir la trayectoria completa. Los parámetros de la ley de retroalimentación estática estuvieron dados por  $\alpha = \beta = 1$ . Se fijaron las condiciones iniciales  $x = -L$ ,  $y = 0$ ,  $\theta = 0$ . Los parámetros de sintonización del PID sin considerar la compensación de fricción se muestran en la tabla 2. Se consideró un período de muestreo de 10 ms.

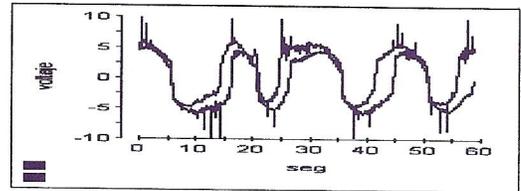
Motor Derecho	Motor Izquierdo
$K_p = 4.2$	$K_p = 4.8$
$K_i = 1.1$	$K_i = 0.75$
$K_d = 0.01$	$K_d = 0.01$

Tabla 2. Valores de sintonización para el PID, obtenidos por el método Ziegler-Nichols.

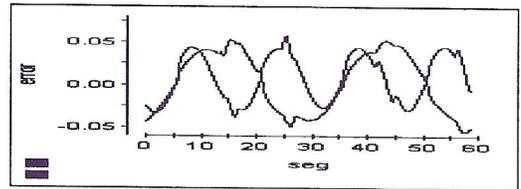
Para la compensación de fricción se consideraron los parámetros dados en la tabla 1. En las gráficas de la figura 14 se muestra en (A) la trayectoria deseada y la real, seguida por el robot móvil en el plano cartesiano. Las figuras 14 (B) y 15 (B), muestran los voltajes de control para el caso sin y con compensación de fricción respectivamente. Con base a los errores obtenidos en  $x$ , y en  $y$ , (figura 14 (C) y 15 (C)) puede concluirse que los resultados experimentales son satisfactorios ya que se logra el seguimiento deseado, obteniéndose una apreciable mejoría en el caso donde se consideró el esquema de Dahl para la compensación de la fricción, ya que el error se redujo a un valor máximo de 4 mm. Por otra parte, los voltajes de control estuvieron dentro de los valores apropiados sin llegar a la saturación, (caso con compensación de fricción). Por último se puede mencionar que los efectos de la zona muerta de los motores es reducida cuando se compensa la fricción bajo el esquema de Dahl (24)-(25) (ver figura 9(E) para el estado interno  $z$ )



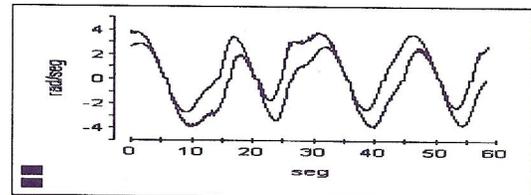
(A) Trayectoria del robot móvil ( $x_d-y_d, x_s-y_s$ )



(B) Voltajes de Control ( $V_d, V_i$ )

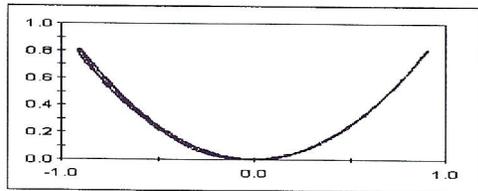


(C) Errores de seguimiento ( $x_d-x_s, y_d-y_s$ )

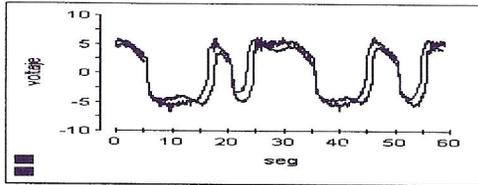


(D) Velocidades angulares  $W_i$  y  $W_d$ .

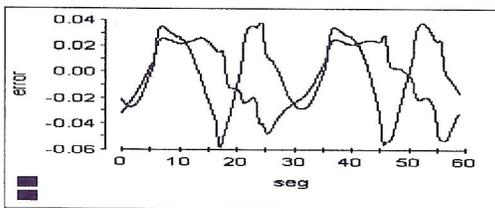
Figura 14. Gráficas obtenidas en tiempo real sin compensación de fricción.



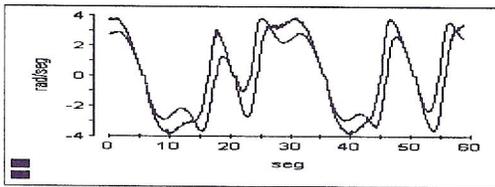
(A) Trayectoria del robot móvil (xd-yd,xs-ys)



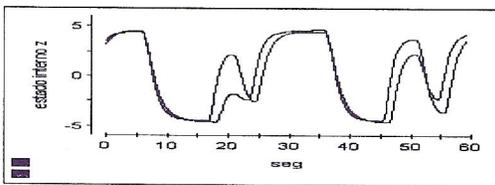
(B) Voltajes de Control ( $V_d, V_i$ )



(C) Errores de seguimiento ( $x_d-x_s, y_d-y_s$ )



(D) Velocidades angulares  $W_d$  y  $W_i$



(E) Estados internos de la fricción  $z_d$  y  $z_i$

Figura 15. Gráficas obtenidas en tiempo real con compensación de fricción bajo el esquema de Dahl.

## CONCLUSIONES

El objetivo principal de este trabajo es la implementación en tiempo real de técnicas de control en el prototipo de un robot móvil. Específicamente se propone un esquema de control por retroalimentación estática del estado, el cual permite llevar a cabo el seguimiento asintótico de trayectorias preestablecidas.

También resulta importante experimentar con el fenómeno de la fricción, con la finalidad de mejorar el desempeño de la ley de control implantada. La desventaja del esquema de control propuesto es que no se tiene control sobre la variable  $\theta$ .

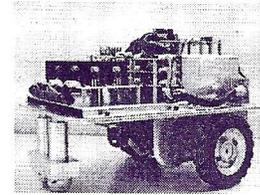


Figura 16. Robot móvil diseñado, construido y usado durante la experimentación del esquema de control propuesto en este artículo

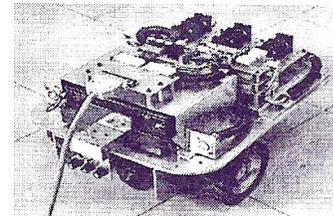


Figura 17. Robot móvil siguiendo la trayectoria descrita por la parábola en el plano X-Y

## REFERENCIAS

- [1] C. Canudas de Wit, B. Siciliano, G. Bastin, Theory of Robot Control, Springer-Verlag, London, 1996.
- [2] T. Salgado, Diseño, construcción y control de un robot móvil, Tesis de maestría, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Sección de Mecatrónica, CINVESTAV-IPN, 1999.
- [3] A. Isidori, Nonlinear control systems, 3rd edition, Springer-Verlag, 1995.
- [4] E. Aranda, T. Salgado, M. Velasco, Control no lineal discontinuo de un robot móvil, Aceptado para publicarse en la revista Computación y Sistemas.
- [5] C. Canudas de Wit, A New Model for Control of Systems with Friction, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 40, No. 3, 1995, pp. 419-425.
- [6] J. Moreno, R. Kelly, On Velocity Control Using Dahl-based Friction Compensation, Memorias del Congreso Nacional de la AMCA, San Luis Potosí, S.L.P., 2001.
- [7] G. Campion, G. Bastin, B. D'Andrea-Novell, Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Sacramento, California, 1991.
- [8] J.M. Yang, J.H. Kim, Sliding mode motion control of nonholonomic mobile robots, IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, Leuven, Belgium, 1998.