

Control de Movimiento de un Robot Móvil Tipo Diferencial Robot Δ bot-32b

U. Cortés*, A. Castañeda*, A. Benítez**, A. Díaz**

*Departamento de Mecatrónica, Universidad Tecnológica de Huejotzingo,
Santa Ana Xalmimilulco, México (Tel: 227 275 9300; e-mail: ulises@cortes.mitmx.net).

**Departamento de Posgrado, Universidad Politécnica de Puebla,
Juan C. Bonilla, Puebla, México}

Resumen: En este artículo se presenta el control de movimiento de un robot móvil tipo diferencial, el cual esta designado a la programación de algoritmos de navegación, el control que se ha implementado corresponde a un lazo interno y externo, en el interno se tiene control PID modificado a su forma velocidad para cada una de sus ruedas, los parámetros de los controles PID se calcularon por el método Ziegler-Nichols, y para el lazo externo se tiene un ley de control de seguimiento de trayectoria.

Keywords: Robótica y Mecatrónica, Control de Procesos, Control PID, Robótica Móvil.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente la robótica móvil resulta ser un tema de investigación muy amplio, esto debido al grado de inteligencia y todo lo que involucra su implementación, para esto se requiere de la aplicación sinérgica de conocimientos y técnicas de varias disciplinas como: física, matemáticas, mecánica, electrónica, control automático y computación. Debido a que los robots móviles son una aproximación muy cercana a la creación de un agente inteligente (Russell & Norving, 2010), son un sistema capaz de procesar la información de su entorno y establecer un comportamiento similar al de un ser vivo. El problema del control de robots móviles con ruedas ha sido registrado ampliamente en literatura, no solo empleando controladores PID, sino también en topología con un lazo de control interno y externo (Howe Hing & Mailah, 2006) (Aranda Bricaire, Salgado Jiménez, & Velasco Villa, 2002), este problema se formula como la obtención de una ley de control que permita estabilizarlo sobre un punto de trabajo, una de las técnicas más comunes en el control de robots móviles con ruedas, está basada en su odometría (Valencia V., Montoya O., & Hernández Ríos, 2009), lo que consiste en estimar su posición a partir del movimiento de sus ruedas, esto a partir de encoders ópticos (Cortés Ramírez & Castañeda Espinoza, 2014). De los robot móviles con ruedas la morfología más utilizada es el tipo diferencial, debido a su simplicidad de construcción, como lo es por ejemplo, el robot Khepera, Nomad, Magel-lan, B21R o GIIRA-02 (Muñoz, Andrade, & Londoño Ospina, 2006), dedicados a la enseñanza y educación, ya que la única consideración mecánica que hay que tomar en cuenta para su implementación es que los ejes

de las ruedas sean paralelos, debido a ello se convierte en una plataforma de uso común.

El objetivo principal de este trabajo es el de dotar a un robot móvil tipo diferencial del control de movimiento, ya que con ello se conseguirá que el control y el modelo matemático sea transparente para el usuario al momento de hacer navegación, esto lo hace ideal para sistemas que se centran en resolver tareas como seguimiento de trayectorias, evasión de obstáculos y exploración del entorno como (Kocaturk, 2015), donde su salida es el comando de velocidad para las ruedas; o como en (Payá, Reinoso, Gil, & Jiménez, 2007), donde el trabajo reportado se enfoca a la conectividad a través de internet de cada una de sus plataformas. El aporte significativo es que este prototipo contará con comandos de movimiento utilizados para la programación de trayectorias, designadas a usuarios sin amplios conocimientos en robótica, programación o electrónica, con una simplicidad como (Martínez Suárez, Londoño Ospina, & Muñoz Ceballos, 2007) pero sin el entorno de simulación en 3D. El control implementado consta de un control interno PID para cada una de sus ruedas a diferencia de (Quevedo, Purroy, Villar, & Cuguero, 2001) donde se implementó un PID a partir de la respuesta de una sola rueda; y un control externo para el seguimiento de trayectoria.

2. PLATAFORMA MÓVIL

2.1 Modelo Cinemático

Para un robot móvil con ruedas del tipo diferencial (Fig. 1), la velocidad (v) y dirección (ϕ) del robot, dependerán

directamente de la velocidad instantánea de cada una de las ruedas expresadas como w_d y w_i , es decir, para que el robot pueda moverse en línea recta, se tiene que cumplir la condición de $w_d = w_i$.

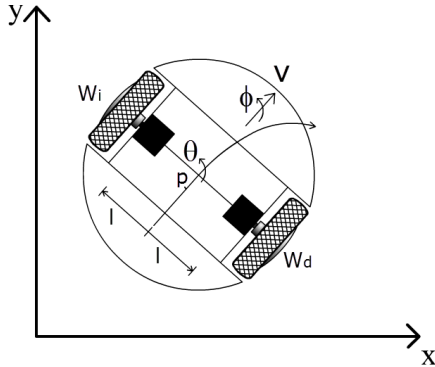


Fig. 1. Robot móvil tipo diferencial.

En este sistema la entrada es la velocidad lineal y angular del robot, a partir de la cinemática inversa se obtendrán las velocidades angulares de cada una de las ruedas (1). Sensando las velocidades angulares las ruedas y a partir de la cinemática directa (2) se calcula la velocidad lineal y angular real del robot.

$$\begin{bmatrix} w_d \\ w_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{r} & \frac{1}{r} \\ \frac{1}{r} & -\frac{1}{r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \phi \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} v \\ \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} & \frac{r}{2} \\ \frac{r}{2} & -\frac{r}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_d \\ w_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

Para determinar la evolución en el tiempo de las coordenadas cartesianas del robot móvil se tiene el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales (Silva Ortigoza, y otros, 2008):

$$\begin{cases} \dot{x} = v(t)\cos(\theta(t)) \\ \dot{y} = v(t)\sin(\theta(t)) \end{cases} \quad (3)$$

La velocidad angular se obtiene a partir de las velocidades lineales de las ruedas, denotada como:

$$\dot{\phi} = \frac{(v_d - v_i)}{l} \quad (4)$$

al integrar, se obtiene la orientación (θ) expresada como:

$$\theta(t) = \frac{v_d - v_i}{2} t + \theta_0 \quad (5)$$

Si la velocidad lineal del robot es:

$$v = \frac{v_d + v_i}{2} \quad (6)$$

entonces (3) se puede expresar de la siguiente forma:

$$\begin{cases} \dot{x} = \frac{v_d + v_i}{2} \cos(\theta(t)) \\ \dot{y} = \frac{v_d + v_i}{2} \sin(\theta(t)) \end{cases} \quad (7)$$

Al sustituir $\theta(t)$ (5) en (7) e integrando se tiene:

$$\begin{cases} x(t) = x_0 + \frac{1}{2} \left(\frac{v_d + v_i}{v_d - v_i} \right) \left[\sin \left(\frac{v_d - v_i}{l} t + \theta_0 \right) - \sin(\theta_0) \right] \\ y(t) = y_0 + \frac{1}{2} \left(\frac{v_d + v_i}{v_d - v_i} \right) \left[\cos \left(\frac{v_d - v_i}{l} t + \theta_0 \right) - \cos(\theta_0) \right] \end{cases} \quad (8)$$

con lo que es posible conocer la evolución de la trayectoria del robot móvil, partiendo de una posición inicial x_0 , y_0 y θ_0 .

2.2 Robot Móvil $\dot{u}\beta$ ot-32b

En (Cortés Ramírez, 2014) se realizó el diseño, construcción e instrumentación de un robot móvil tipo diferencial (Fig. 2), esta plataforma está conformada por:

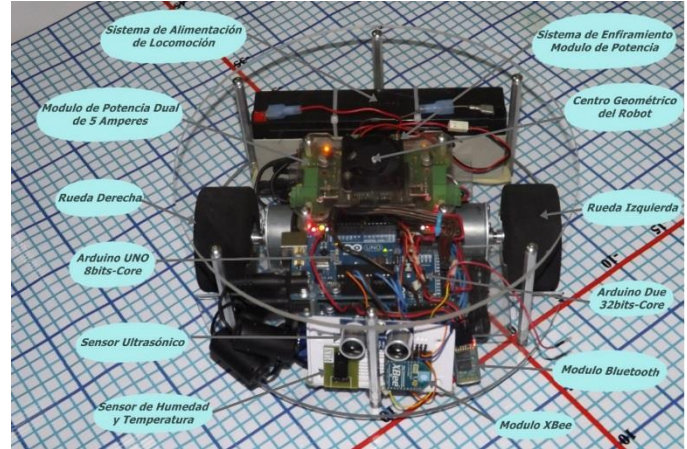


Fig. 2. Robot móvil con ruedas $\dot{u}\beta$ ot-32b.

A) *Unidad de Control*: Procesa las variables y señales del sistema, así como el algoritmo de control, consta de una placa Arduino DUE, conformada por un microcontrolador ARM Cortex-M3 AT91SAM3X8E de 32 bits, a 84 MHz.

B) *Sistema de Potencia*: La etapa de potencia suministra energía al sistema de locomoción y consta de un módulo de potencia dual de 5 amperes, eléctricamente aislado de la etapa de control, ya que de esa forma se evitará el ruido generado por los motores en la conmutación de los PWM.

C) *Sistema Sensorial*: En esta etapa se tiene un sensor de corriente y encóder de efecto hall para cada motor, designados para medir posición, velocidad, corriente y torque.

D) *Sistema de Comunicación*: El sistema de comunicaciones enviará las variables de control a un sistema remoto de visualización, esto con la finalidad de poder observar la respuesta de la estrategia de control.

2.3 Calculo de Posición y Velocidad Angular

Los encóders tienen una resolución de 16 pulsos por revolución, una caja de engranes con una relación de 131:1, por lo que, una vuelta de la rueda corresponde 8384 pulsos en cuadratura. El método utilizado para leer los encóder en cuadratura es ilustrado en (Fig. 3), el cual consiste en detectar

flancos ascendentes y descendentes a partir de interrupciones de cada canal y polear el otro canal si es uno o cero para incrementar o decrementar el contador de encóder.

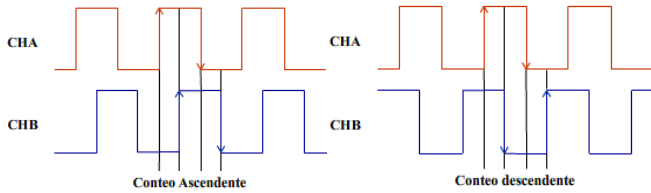


Fig. 3. Lectura de los encóder en cuadratura.

A partir del conteo de pulsos (CNT), se puede deducir que la velocidad angular está dada como:

$$\theta_d = \frac{2\pi}{C_e \cdot P_E} \cdot CNT_{i,d} [rad] \quad (9)$$

donde: C_e es la relación de la caja de engranes, P_E es la resolución del encóder y $CNT_{i,d}$ es el contador de pulsos.

La velocidad instantánea está dada por el cambio de posición en un intervalo de tiempo expresado como:

$$w_{d,i}(t) = \frac{\theta_d(t) - \theta_d(t - 1)}{\Delta t_m} \quad (10)$$

donde: $w_{d,i}$ es la velocidad angular de la rueda derecha e izquierda respectivamente y Δt_m es el periodo de muestreo.

3. CONTROL PID EN SU FORMA VELOCIDAD EN EL ROBOT úBot-32b

El esquema de control propuesto en (Fig. 4), la entrada del sistema son las variables de velocidad y dirección del robot móvil, denotadas como V_d y φ_d , de donde, a partir del modelo cinemático de la ecuación (1) se calculan las velocidades angulares deseadas $w_{d,d}$ y $w_{d,i}$, para el motor derecho e izquierdo respectivamente.

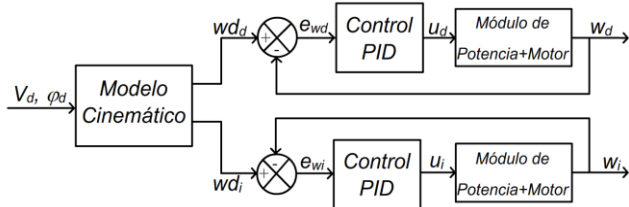


Fig. 4. Esquema de control PID para robot úBot-32b.

La estrategia de control PID ha sido empleada exitosamente en diversos sistemas de control industrial, al igual que en robótica móvil como en (Palmeira A., Magalhaes R., De O. Contente, & Ferreira A., 2012) (Aranda Bricaire, Salgado Jiménez, & Velasco Villa, 2002) al igual que para el control de motores de DC como en (Alasooly, Rdeha, & Barsoum, 2010) (Silva, Carvalho, Vasconcelos, & Soares, 2007), para evitar que la salida del controlador rebase la saturación del

actuador de la planta, se ha limitado las entradas del sistema $V_d = \pm 20$ cm/seg y $\varphi_d = \pm 45$ grad/seg, así como la entrada del actuador de la planta quien está limitado en los valores de ± 8.7 rad/seg.

El de control PID en función del tiempo se expresa como:

$$u(t) = K_c \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (11)$$

La señal $e(t)$, esta denotada como la diferencia de la entrada con respecto a la salida como:

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (12)$$

Para implementar el controlador PID en un sistema digital, es necesario discretizar, por lo que (11), en su forma discreta queda expresada como:

$$U(z) = \left[K_p + \frac{K_i}{1 - z^{-1}} + K_d(1 - z^{-1}) \right] E(z) \quad (13)$$

donde: K_p , K_i y K_d son las ganancias de las acciones de control proporcional, integral y derivativa; expresadas como:

$$K_p = K_c - \frac{K_c T}{2T_i} = -\frac{K_i}{2} \quad (14)$$

$$K_i = \frac{K_c T}{T_i} \quad (15)$$

$$K_d = \frac{K_c T_d}{T} \quad (16)$$

3.1 Control PID en su forma velocidad

En (13) se expresa el control PID discreto en su forma posición, para obtenerlo en su forma velocidad se considera la diferencia hacia atrás entre $u(kT)$ y $u((k-1)T)$. Esto se puede conseguir utilizando $\nabla u(kT) = u(kT) - u((k-1)T)$, y simplificando se tiene:

$$U(z) = -K_p Y(z) + K_i \frac{R(z) - Y(z)}{1 - z^{-1}} - K_d(1 - z^{-1})Y(z) \quad (17)$$

es prescindible denotar que el único término donde aparece $E(z)$ es en la acción de control integral, por lo que, el termino integral no se puede excluir del controlador.

Simplificando (17), se tiene:

$$u(z) = P(z) + I(z) + D(z) \quad (18)$$

donde, para el control PID en su forma velocidad se tiene que:

$$P(z) = -K_p Y(z) \quad (19)$$

$$I(z) = \frac{K_i E(z)}{1 - z^{-1}} \quad (20)$$

$$D(z) = -K_d(1 - z^{-1})Y(z) \quad (21)$$

donde, $P(z)$ corresponde a la acción de control proporcional, $I(z)$ al integral y $D(z)$ al derivativo. Y las constantes K_p , K_i y K_d , están dadas por (14), (15) y (16), respectivamente.

La ecuación (18) puede ser expresada en el dominio del tiempo como:

$$u(t) = P(t) + I(t) + D(t) \quad (22)$$

donde, utilizando los teoremas y propiedades de la transformada z para (19) y (21) y en particular para (20) la propiedad acumulativa, se tiene:

$$P(t) = K_p y(t) \quad (23)$$

$$I(t) = K_i (I(t-1) + e(t)) \quad (24)$$

$$D(t) = -K_d (y(t) - y(t-1)) \quad (25)$$

3.2 Sintonización de parámetros del control PID

La estrategia de control PID tiene tres parámetros (K_c , T_i y T_d) que interactúan uno con otro, para cuando no se conocen la función de transferencia de la planta G_p , estos parámetros pueden sintonizarse por el método de Ziegler y Nichols. Ellos propusieron dos métodos para encontrar los valores de los parámetros PID basándose en el análisis de lazo abierto y lazo cerrado de la planta a controlar. En lazo abierto se plantea obtener la respuesta de la planta al escalón unitario, si no tiene integradores ni polos complejos conjugados, la curva de respuesta tendrá la forma de S (Ogata, 2010).

Ziegler y Nicholson sugirieron que muchos de los procesos en lazo abierto pueden definirse según la función de transferencia (26), para el caso de un sistema de primer orden; y para un sistema de doble por (27); y para un sistema de segundo orden por (28) (Alfaro Ruíz, 2002), ambos con tiempo muerto, fundamentado en (Kushwah & Patra, 2014) para el caso del motor de DC es posible emplear dicho método.

$$G_p(s) = \frac{k_0 e^{-\tau_0 s}}{1 + \tau s} \quad (26)$$

$$G_p = \frac{k_0 e^{-\tau_0 s}}{(1 + \tau s)^2} \quad (27)$$

$$G_p = \frac{k_0 e^{-\tau_0 s}}{\tau^2 s^2 + 2\zeta\tau s + 1} \quad (28)$$

Los coeficientes τ_0 y τ de (26), (27) y (28), pueden hallarse a partir de la línea tangente en el punto de inflexión de la curva de respuesta del sistema en lazo abierto.

Para k_0 , puede ser calculado a partir de

$$k_0 = \frac{y(t)_{\text{Final}} - y(t)_{\text{inicial}}}{u(t)_{\text{Final}} - u(t)_{\text{inicial}}} \quad (29)$$

Las relaciones de estos coeficientes con los parámetros del controlador quedan expresadas por (Alfaro Ruíz, 2002):

$$K_c = 1.2 \frac{\tau}{k_0 \tau_0} \quad \text{a} \quad K_c = 2 \frac{\tau}{k_0 \tau_0} \quad (30)$$

$$T_i = 2\tau_0 \quad (31)$$

$$T_d = \frac{\tau_0}{2} \quad (32)$$

4. LEY DE CONTROL DE SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIA

En este apartado se considera el problema de seguimiento, en la posición y orientación del robot móvil, en las coordenadas x_r , y_r , y θ_r a partir de las ecuaciones de movimiento del robot móvil tipo diferencial dadas por (3) y (4).

4.1 Calculo del error de seguimiento

El error de seguimiento está dado por (Siciliano & Khatib, 2008):

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \sin \theta_r \\ -\sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d - x_r \\ y_d - y_r \end{bmatrix} \quad (33)$$

Calculando la derivada con respecto al tiempo de (33), se obtiene el vector de errores de velocidad expresado como:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \end{bmatrix} = \dot{\theta}_r \begin{bmatrix} -\sin \theta_r & \cos \theta_r \\ \cos \theta_r & \sin \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d - x_r \\ y_d - y_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \sin \theta_r \\ -\sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_d - \dot{x}_r \\ \dot{y}_d - \dot{y}_r \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_r y_e + V_d \cos \theta_e - V_r \\ -\varphi_r x_e + V_d \sin \theta_e \end{bmatrix} \quad (35)$$

donde el error en la orientación del robot está dado por:

$$\theta_e = \theta_d - \theta_r \quad (36)$$

de lo que podemos deducir el siguiente sistema de ecuaciones

$$\begin{cases} \dot{x}_e = \varphi_r y_e + V_d \cos \theta_e - V_r \\ \dot{y}_e = -\varphi_r x_e + V_d \sin \theta_e \\ \dot{\theta}_e = \varphi_d - \varphi_r \end{cases} \quad (37)$$

4.2 Variables de control

Para determinar una ley de control para V y φ , que sea asintóticamente estable y el error (x_e , y_e y θ_e) tienda a cero, se considera el cambio de coordenadas y variables de control como: $x_e, y_e, \theta_e, V_d, \varphi_d \rightarrow z_1, z_2, z_3, uV, u\varphi$.

Por lo que podemos decir que para el caso de los errores de posición quedan expresados en (38) y (39), para el error en la orientación en (40), y las velocidades del robot estarán denotadas en (41) y (42) (Siciliano & Khatib, 2008).

$$z_1 = x_e \quad (38)$$

$$z_2 = y_e \quad (39)$$

$$z_3 = \tan \theta_e \quad (40)$$

$$u_1 = V_d \cos \theta_e - V_r \quad (41)$$

$$u_2 = \frac{\varphi_d - \varphi_r}{\cos^2 \theta_e} \quad (42)$$

Por lo que el sistema (37), puede reescribirse como:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = \varphi_r z_2 + u_1 \\ \dot{z}_2 = -\varphi_r z_1 + V_d \cos \theta_e \\ \dot{\theta}_e = \varphi_d - \varphi_r \end{cases} \quad (43)$$

4.3 Ley de control de seguimiento de trayectoria

Considerando el error de seguimiento es posible implementar la siguiente ley de control, expresada en (44) y (45) (Siciliano & Khatib, 2008).

$$V = V_d \cos \theta_e + k_1 z_1 \quad (44)$$

$$\varphi = \varphi_r + V_d k_2 z_2 + k_3 \sin \theta_e \quad (45)$$

donde las constantes k_1 , k_2 , y k_3 son positivas, esta ley de control de seguimiento es asintóticamente estable (Osuna Altamirano, 2010).

5. COMANDOS DE MOVIMIENTOS

La simplicidad en la programación se ha conseguido con la implementación de siete comandos de movimiento que son: **Stop ()**, **Avanza (v,q)**, **Regresa (v,q)**, **GiraDerecha (q)**, **GiraIzquierda (q)**, **Rota(q)** y **espera(t)**; donde q es la velocidad angular en grados/segundo y v es la velocidad lineal en cm/segundo. La prueba de estos comandos se ilustra en (Fig. 5). Indicando por medio de un metalenguaje las secuencias de movimiento para el usuario ya no será necesario programar la estrategia de control (20) y (42, 45), los modelos cinemáticos de robot (1), (2), ni las ecuaciones de movimiento (3) y (4).

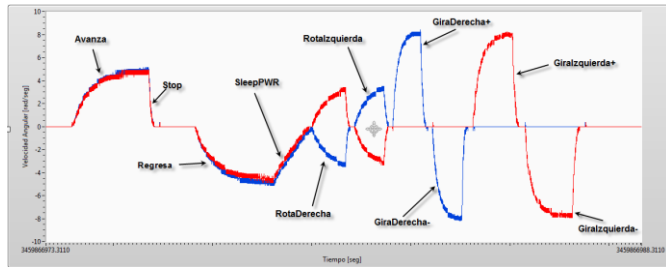


Fig. 5. Prueba de consignas de movimiento (Lazo abierto).

6. PRUEBAS Y RESULTADOS

6.1 Prueba de los controladores PID en su forma velocidad

El esquema de control implementado en el robot $\hat{u}$ bot-32b correspondiente al lazo interno, es un PID en su forma velocidad, donde la entrada son las velocidades angulares de cada rueda. En (Fig. 6), se muestra la respuesta del sistema en lazo abierto, donde, la velocidad deseada [rad/seg] está representada por la señal de color azul y la velocidad real de los motores derecho e izquierdo están denotadas en color rojo y verde respectivamente, es evidente notar que para el caso del motor derecho no alcanza el valor de referencia deseado y en el caso del motor izquierdo está por arriba de dicha referencia. En (Fig. 7, arriba) se muestra la respuesta con los controles PID implementados con una ganancia de $K_p = 0.5$, se puede observar que el error en las velocidades se ha reducido, pero se tiene sobre amortiguamiento en la salida. En (Fig. 7, Centro), se tiene una ganancia proporcional K_p igual a 1. Y para el caso de (Fig. 7, Abajo), se tiene una ganancia proporcional K_p igual a 4, y para este valor de K_p ya no hay amortiguamiento.

6.2 Prueba de la ley de control de seguimiento

Para poner a prueba la ley de control de seguimiento de trayectoria se realizó la prueba mostrada en (Fig. 8), donde se verificó que el movimiento del robot respondiera adecuadamente ante dicha ley de control, en el gráfico se denota en el trazo de color rojo la trayectoria deseada y de color azul la trayectoria real. En (Fig. 9), se realizó la secuencia de un cuadrado, el cual se repitió cinco veces, esto con la finalidad de poner a prueba el error acumulativo, y de manera experimental podemos denotar que aunque exista una

diferencia mínima entre la trayectoria deseada (Trazo rojo) y la real (Trazo azul), la ley de control implementada en todo momento está siguiendo a la consigna de movimiento indicada.

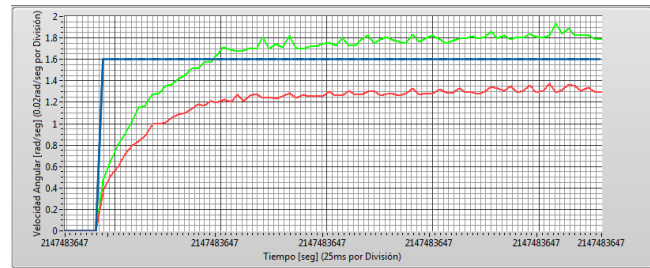


Fig. 6. Respuesta de los motores en lazo abierto.

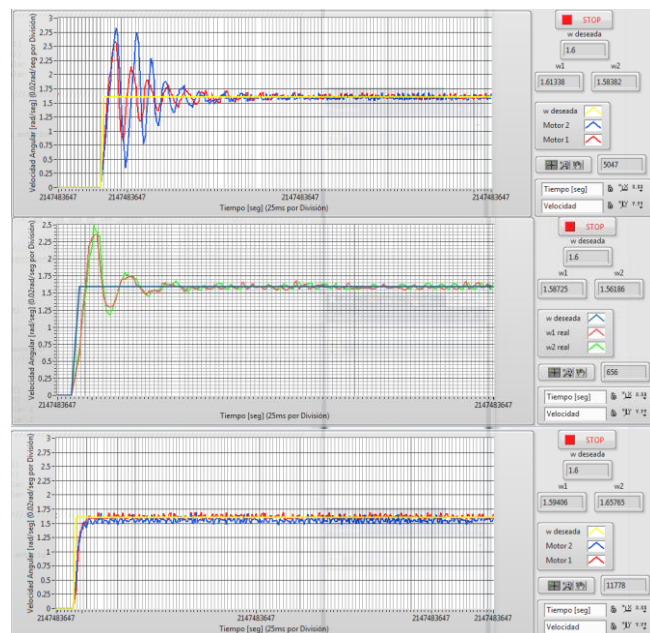


Fig. 7. Respuesta del control PID en su forma velocidad.

7. CONCLUSIONES

Una de las ventajas de implementar una ley de control de movimiento para un robot móvil con ruedas y al contar con comandos de movimiento, se consigue que el control sea transparente para el usuario, ya que en la programación solo se tienen que indicar las velocidades lineal y angular del robot.

La ventaja del control PID en su forma velocidad, es que ante imperfecciones del suelo o alguna pendiente, las ruedas mantengan su velocidad deseada y al contar con una ley de seguimiento de trayectoria se asegura que el robot siga la consigna indicada por el usuario.

Como trabajo futuro se contempla la implementación de los bloques sensoriales, como sistema de visión y sensores ultrasónicos, además de la implementación de una PC a bordo con un sistema operativo ROS, quien estará indicando

al control de movimiento la velocidades lineal y angular, por medio de un bus de comunicación UART.

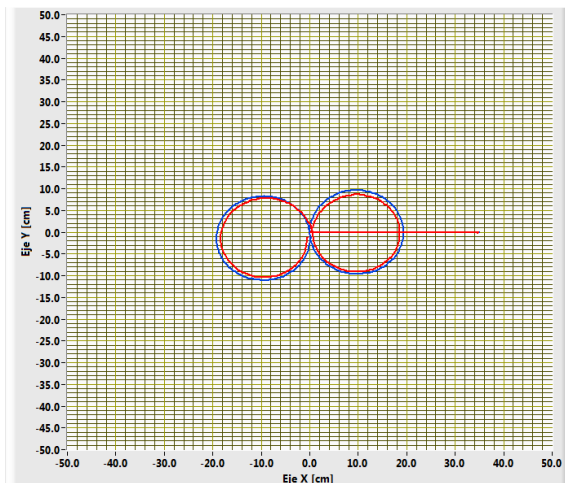


Fig. 8. Trayectoria de movimiento.

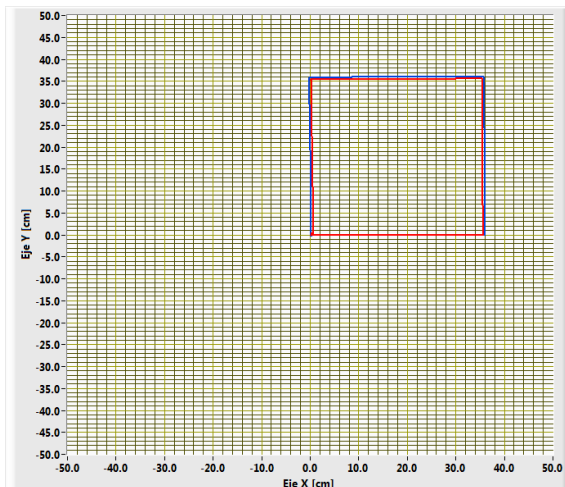


Fig. 9. Prueba de la ley control de seguimiento de trayectoria.

REFERENCIAS

Alasooly, H., Rdeha, M., & Barsoum, N. (2010). Control DC Motor Using Different Control Strategies. *Global Journal of Technology*, 111-119.

Alfaro Ruiz, V. M. (2002). Métodos de Sintonización de Controladores PID que Operan como Reguladores. *Ingeniería*, 2(12), 21-36.

Aranda Bricaire, E., Salgado Jiménez, T., & Velasco Villa, M. (2002). Control no Lineal Discontinuo de un Robot Móvil. *Computación y Sistemas*, 42-49.

Cortés Ramírez, U. (2014). *Implementación de un Control de Movimiento en Robot Móvil tipo Diferencial*. Puebla, México: Universidad Politécnica de Puebla.

Cortés Ramírez, U., & Castañeda Espinoza, A. (2014). Diseño e Instrumentación de un Robot Móvil Tipo Diferencial. *Congreso Universitario 2014*, 195-200.

Howe Hing, T., & Mailah, M. (2006). Motion Control of Nonholonomic Wheels Mobile Robot in a Structured Layout. *Journal Mekanikal*(21), 27-39.

Kocaturk, B. (2015). Motion Control of Wheeled Mobile Robots. *Interdisciplinary Description of Complex System*, 41-47. doi:10.7906/indecs.13.1.6

Kushwah, M., & Patra, A. (2014). Tuning PID Controller for Speed Control of DC Motor Using Soft Computing Techniques - A Review. *Advance in electronic an Electric Engineering*, 4(2), 141-148.

Martínez Suárez, J. B., Londoño Ospina, N., & Muñoz Ceballos, N. D. (2007). Sistema configurable de simulación 3D para robótica móvil. Plataforma de desarrollo K++. *Revista de Ingeniería*(25), 4-11.

Muñoz, N. D., Andrade, C. A., & Londoño Ospina, N. (2006). Diseño y construcción de un robot móvil orientado a la enseñanza e investigación. *Ingeniería y Desarrollo*(19), 114-1127.

Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna*. Madrid, España: Pearson.

Osuna Altamirano, T. (2010). *Navegación y Control de Robot Móvil*. Tijuana, B.C., México: Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital.

Palmeira A., H. K., Magalhaes R., K. C., De O. Contente, C., & Ferreira A., M. D. (2012). Comparasion Between Classical PID and Fuzzy PI+PD Controller Aplied to a Mobile Robot. *XV Congreso Latinoamericano de Control Automatico*, 23-26.

Payá, L., Reinoso, O., Gil, A., & Jiménez, L. M. (2007). Plataforma Distribuida para la Realización de Practicas de Robótica Móvil a través de Internet. *Información Tecnológica*, 18(6), 27-38.

Quevedo, J., Purroy, M., Villar, P., & Cugero, J. (2001). Control de seguimiento de un robot móvil autónomo. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 22(3), 54-59.

Russell, S. J., & Norving, P. (2010). *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. US: Prentice Hall.

Siciliano, B., & Khatib, O. (2008). *Handbook of Robotics*. Italy, Stanford: Springer.

Silva Ortigoza, R., Molina Vilchis, M., Hernández Guzman, V. M., Silva Ortigoza, G., Marciano Melchor, M., & Portilla Flores, E. A. (2008). Modelado y Control de un robot Móvil tipo Newt en la tarea de Seguimiento de Trayectoria. *Télématique*, 7(2), 129-145.

Silva, V., Carvalho, V., Vasconcelos, R. M., & Soares, F. (2007). Remote PID Control of a DC Motor. *International Journal of Online Engineering*, 3(3), 1-3.

Valencia V., J. A., Montoya O., A., & Hernando Rios, L. (Mayo de 2009). Modelo Cinemático de un Robot Móvil Tipo Diferencial y Navegación a Partir de la Estimación Odométrica. *Scientia et Technica*, XV(41), 191-196.