

Sistema de posicionamiento global embebido en un robot móvil (3,0) para el control en el espacio de operación *

S. E. Benítez-García^{1,2} J. L. De-La-Cruz-Osorio^{1,2}
M. G. Villarreal-Cervantes² J. P. Sánchez-Santana^{2,3}

¹ Instituto Politécnico Nacional, ESIME Unidad Culhuacan, Av. Santa Ana 1000, Col. San Francisco Culhuacan, Deleg. Coyoacán, C.P. 04430 Ciudad de México, México (sbenitezg1100, jdelacruz1100}@alumno.ipn.mx,)

² Departamento de Posgrado, Instituto Politécnico Nacional, CIDETEC, Av. Juan de Dios Bátiz s/n, 07700, Ciudad de México, México. (mvillarrealc@ipn.mx)

³ Universidad Politécnica de Puebla, Tercer Carril del Ejido "Serrano" s/n, San Mateo Cuanalá, Juan C. Bonilla, C. P. 72640, Puebla, México. (jose.sanchez@uppuebla.edu.mx)

Resumen: El desarrollo de una plataforma experimental conlleva una gran cantidad de etapas para su diseño y construcción lo que requiere un tiempo de manufacturación prolongado, por lo que en repetidas ocasiones se opta por la adquisición de una plataforma experimental de tipo comercial. Sin embargo en su mayoría integran sistemas de control de arquitectura cerrada o híbrida limitando su utilización. En el presente trabajo se presenta un robot móvil (3,0) como plataforma experimental que ha sido desarrollado mediante la implementación de módulos funcionales de tal forma que se proporcione un sistema de control de arquitectura abierta. Dicha plataforma utiliza un sistema de posicionamiento con base en odometría, basado en su modelo cinemático para determinar su posición global con respecto a un marco de referencia inercial. Como estrategia de control utiliza un controlador Proporcional-Derivativo (PD) en el espacio de operación, abordándose el problema de regulación para el posicionamiento del robot en cuatro coordenadas cartesianas diferentes. Los resultados experimentales sustentan el funcionamiento y fiabilidad del sistema robótico, donde se muestra el correcto funcionamiento del sistema.

Keywords: Sistema de control de arquitectura abierta, odometría, robot móvil (3,0), controlador PD.

1. INTRODUCCIÓN

La robótica ha logrado su mayor éxito en la fabricación industrial siendo los robots manipuladores los preferidos, ya que estos cuentan con un alto nivel de destreza y precisión para la manipulación de objetos. Sin embargo, tienen una desventaja al estar limitados en movilidad, la que depende del espacio en donde se encuentren montados (Siewart and Nourbakhsh, 2004).

Por el contrario, un robot móvil es capaz de desplazarse en distintos terrenos y son aplicados en diferentes áreas como son: la exploración minera, exploración planetaria, misiones militares, manejo de desechos tóxicos, automatización de procesos, vigilancia, reconocimiento de terrenos, entre otras. Los robots móviles terrestres se pueden clasificar en

tres categorías según su medio de locomoción: por ruedas, por patas y por orugas.

Los robots móviles con ruedas (RMR) han sido de gran interés debido a diferentes factores como son: el nivel de eficiencia en términos de la energía utilizada para realizar un desplazamiento en superficies planas y firmes, no producen desgastes significativos en las ruedas y que requieren un número menor de piezas para su construcción, en contraste con los robots que emplean patas u orugas como medio de locomoción.

Existen diferentes tipos de ruedas que se pueden clasificar en dos tipos básicos: ruedas convencionales y omnidireccionales (Canudas et al., 1996). Para las ruedas convencionales se supone que el contacto entre la rueda y el suelo satisface las condiciones de rodamiento puro y de no deslizamiento a lo largo del movimiento, esto implica que las componentes de velocidad del punto de contacto son iguales a cero. En cuanto a una rueda omnidireccional únicamente una componente de velocidad, en el punto de contacto, es igual a cero a lo largo del movimiento.

* Proyecto financiado por la COFAA y la SIP del Instituto Politécnico Nacional bajo el proyecto 20160826 y al CONACYT bajo el apoyo 182298. El cuarto autor agradece el apoyo brindado por la UPP y la BUAP por amparar los estudios de posgrado que esta realizando en el CIDETEC. Asimismo, al PROPEDEP con la beca DSA/103.5/14/11458.

Existen cinco configuraciones de interés práctico para los RMR relacionadas con el número de grados de movilidad (δ_m) y direccionalidad (δ_s), estas configuraciones son identificadas con la notación: RMR de Tipo (δ_m, δ_s). Una de ellas es el RMR Tipo (3,0), comúnmente llamado omnidireccional, que es de gran interés debido a que cuenta con total movilidad en el plano, es decir, que tiene la capacidad de moverse en cada instante de tiempo a cualquier dirección independientemente de su orientación (Campion et al., 1996).

Para que un RMR navegue de forma autónoma debe ser capaz de determinar o estimar su posición y orientación en el espacio, además de conocer la posición de otros objetos o características de interés en el entorno del robot. Con el propósito de realizar estas acciones los RMR utilizan un sistema de posicionamiento que puede ser de tipo absoluto o relativo (Borenstein et al., 1996), o ambos con la finalidad de obtener mayor fiabilidad en la estimación de la posición y orientación como se muestra en Fu et al. (2013).

Los sistemas de posicionamiento absolutos son sistemas que se basan en elementos de referencia externos, que cuenten con una posición fija y sean de fácil detección, para estimar la posición de un elemento de interés. En Petriu (1998) se utilizan marcas artificiales en el piso para hacer un camino que es identificado por un sistema de visión montado en un robot móvil; en Huang et al. (2006) se emplean sensores ultrasónicos, configurados como faros activos, que son detectados por micrófonos montados en el robot AIBO. En estos sistemas se obtiene una alta fiabilidad en la estimación de posición pero sus principales desventajas son el alto costo de implementación y mantenimiento de instalaciones.

Por otra parte, los sistemas de posicionamiento relativo se dividen en dos métodos: sistemas de navegación inercial y odometría. Estos métodos de posicionamiento, al no contar con referencias externas, tienen la desventaja de acumular errores en la estimación de la posición; sin embargo, en los últimos años ha habido notables avances tecnológicos en materia de sensores logrando reducir estos errores (Tezartes, 2014). Las ventajas de estos métodos de posicionamiento son la facilidad y bajo costo de implementación, y la reducción de interferencias externa (Grant and Willia, 2008).

Otro aspecto importante de la navegación de los RMR es el sistema de control que se encarga de operar sus movimientos. De acuerdo con la clasificación presentada en (Ford, 1994) este sistema puede ser de arquitectura cerrada, híbrida o abierta. Un sistema cerrado es aquel donde no se puede, o es muy complicado, realizar cambios en el hardware externo o incluir software, por ejemplo, el robot comercial OTTO 1500 que fue diseñado específicamente para el transporte de carga. Los sistemas híbridos son aquellos donde la ley del control del robot no se puede modificar pero algunos otros elementos son accesibles al usuario. Un ejemplo de este tipo de arquitectura es el robot comercial Pioneer P3-DX que es utilizado como plataforma de investigación porque es posible agregar sensores, manipuladores y otros accesorios desarrollados por el fabricante. La arquitectura abierta es aquella en la que se puede modificar el diseño original, de acuerdo a las

necesidades del usuario, permitiendo añadir sensores, cambiar interfaces, programar nuevas leyes de control, entre otras; como es el caso que se presenta en M. G. Villarreal-Cervantes (2016), donde se implementa un robot SCARA como plataforma experimental con un sistema de control abierto basado en una computadora personal y una tarjeta de adquisición de datos Sensoray-626.

Por tal motivo, en este trabajo se tiene interés en implementar un sistema de posicionamiento con base en odometría para localizar, con respecto a un marco de referencia inercial, la posición global de un robot móvil (3,0) en un ambiente controlado, donde se asume que se conoce la posición cartesiana inicial y que las llantas no deslizan. Además, para poder realizar los resultados experimentales se implementó un sistema de control de arquitectura abierta en el robot móvil (3,0), donde se incluye el sistema de posicionamiento global por odometría que servirá para el control de regulación. Dicha arquitectura se desarrolló mediante el diseño de módulos funcionales, esto con el fin de aportar una plataforma experimental de fácil uso y que sea posible modificar los elementos que componen el sistema de control.

El resto del documento esta organizado de la siguiente forma: en la sección 2 se describe el modelo cinemático del robot móvil (3,0) y el controlador empleado. En la sección 3 se analiza el sistema de posicionamiento global con base en odometría. En la sección 4 se exponen las características de la plataforma experimental. Los resultados experimentales se presentan en la sección 5 y finalmente en la sección 6 se exhiben las conclusiones y perspectivas del trabajo.

2. MODELADO Y CONTROLADOR

El desarrollo y explicación del modelo cinemático y dinámico del robot móvil (3,0) fue obtenido de Canudas et al. (1996) y Villarreal-Cervantes (2015), donde se considera que el robot móvil esta hecho con una estructura rígida y que sus ruedas presentan condiciones ideales, esto significa que se mueven sobre un plano horizontal, sin presentar deformaciones y deslizamiento en el punto de contacto.

2.1 Modelo Cinemático

La representación esquemática del robot móvil se presenta en la Fig. 1 donde la posición y orientación del robot móvil se representa con el sistema de coordenadas de movimiento $X_m - Y_m$, que se encuentra fijo en el centro de gravedad del robot móvil; y para representar el desplazamiento del robot móvil se utiliza el sistema de coordenadas absoluto $X_w - Y_w$, que esta fijo al plano. Denotando ϕ_w como el ángulo entre ambos sistemas coordenados se puede expresar el mapeo de las velocidades relativas del robot móvil $\dot{\eta}_m = [\dot{x}_m, \dot{y}_m, \dot{\phi}_m]^T$ a las velocidades absolutas $\dot{\eta}_w = [\dot{x}_w, \dot{y}_w, \dot{\phi}_w]^T$, como se muestra en la ecuación (1). Se considera que las ruedas 1 y 3 se encuentra con un ángulo simétrico $\delta = \frac{\pi}{3}$ con respecto al eje Y_m y la rueda 2 se encuentra alineado con el eje X_m .

$$\dot{\eta}_w = \begin{bmatrix} \cos(\phi_w) & -\sin(\phi_w) & 0 \\ \sin(\phi_w) & \cos(\phi_w) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dot{\eta}_m \quad (1)$$

3. SISTEMA DE POSICIONAMIENTO

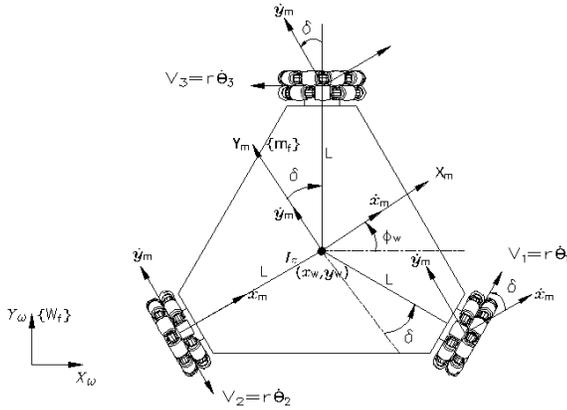


Figura 1. Diagrama esquemático del robot móvil (3,0).

A partir del diagrama esquemático de la Fig. 1 se puede expresar el mapeo entre la velocidad lineal de las llantas y la velocidad angular y lineal en el sistema coordenado del robot móvil por medio de la ecuación (2), donde $\dot{\theta} = [\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3]$ es la velocidad angular de cada rueda, $r = 0,0508$ [m] el radio de las ruedas y $L = 0,1847$ [m] la distancia del centro geométrico del robot móvil al centro de la rueda.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 r \\ \dot{\theta}_2 r \\ \dot{\theta}_3 r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & L \\ 0 & -1 & L \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & L \end{bmatrix} \dot{\eta}_m \quad (2)$$

2.2 Control PD

Considerando el problema de regulación, sea $\dot{x} = f(x) + g(x)u$ la representación en espacio de estados del modelo dinámico del robot móvil se propone el controlador presentado en la ecuación (3), donde el vector de par de entrada en las ruedas se encuentra definida por $u = [u_1, u_2, u_3]^T$

$$u = J^T \bar{v} \quad (3)$$

con:

$$\bar{v} = k_p e + k_d \dot{e} \quad (4)$$

donde: $e = [\bar{x}_d - x_1, \bar{y}_d - x_2, \bar{\phi}_d - x_3]^T$ es el error de posición lineal y angular del móvil entre la posición deseada $\bar{x}_d, \bar{y}_d, \bar{\phi}_d$ y los estados reales del sistema x_1, x_2, x_3 , $\dot{e} = [\dot{\bar{x}}_d - x_4, \dot{\bar{y}}_d - x_5, \dot{\bar{\phi}}_d - x_6]^T$ es la velocidad del error y $k_p = \text{diag}(k_{p1}, k_{p2}, k_{p3}) \in R^{3 \times 3}$, $k_d = \text{diag}(k_{d1}, k_{d2}, k_{d3}) \in R^{3 \times 3}$ son matrices definidas positivas que contienen las ganancias proporcional y derivativa del controlador.

La matriz Jacobiana J esta definida en la ecuación (5)

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\bar{\beta}_1}{3} & \frac{2}{3} \sin \phi & -\frac{\bar{\beta}_2}{3} \\ \frac{\bar{\beta}_3}{3} & -\frac{2}{3} \cos \phi & \frac{\bar{\beta}_4}{3} \\ \frac{1}{3L} & \frac{1}{3L} & \frac{1}{3L} \end{bmatrix} \quad (5)$$

donde: $\bar{\beta}_1 = \sqrt{3} \cos \phi - \sin \phi$, $\bar{\beta}_2 = \sin \phi + \sqrt{3} \cos \phi$, $\bar{\beta}_3 = \cos \phi + \sqrt{3} \sin \phi$, $\bar{\beta}_4 = \cos \phi - \sqrt{3} \sin \phi$.

El sistema de posicionamiento con base en odometría es ampliamente utilizado en robots móviles debido a que brinda una buena precisión a corto plazo, es de bajo costo y permite altas frecuencias de muestreo, como es el caso que se presenta en Villarreal-Cervantes (2015), donde se ha utilizado dicho sistema para la localización del robot móvil. Este sistema de posicionamiento es sencillo de implementar ya que se basa en ecuaciones que convierten el número de revoluciones de las ruedas en desplazamientos lineales relativos al suelo considerando una condición de partida definida por el usuario.

Se asume que el robot móvil se encuentra en un ambiente controlado en donde la superficie es plana y sin inclinaciones, no existe deslizamiento de las llantas, y presenta una adecuada caracterización los parámetros cinemáticos del robot móvil. Por lo que el sistema de posicionamiento con base en odometría es una opción viable. Es bien conocido que al no considerar la premisa anteriormente comentada y al no contemplar referencias externas de posicionamiento se genera una acumulación de error considerable. La corrección de este error requiere la implementación de sistemas de procesamiento y medición de alta velocidad y precisión, o bien implementar métodos recientes desarrollados en múltiples investigaciones, como es el caso que se presenta en Xu and Collins (2009), donde hace uso de redes neuronales para la calibración y corrección de errores en el sistema de odometría y a su vez realiza un reconocimiento del ambiente en el que estará trabajando.

El robot móvil (3,0) requiere una lectura continua de los pulsos generados por los codificadores rotatorios para estimar el desplazamiento lineal de cada rueda a partir de sus respectivos desplazamientos angulares. En la Fig. 2 se muestra el diagrama esquemático del funcionamiento básico del giro de un motor, el efecto de reducción y el desplazamiento lineal de la rueda. Donde q representa el desplazamiento angular del motor, $M = 51$ la relación de movimiento entre la entrada y la salida de la caja de engranajes, r el radio de la rueda, θ y ΔS representan el desplazamiento angular y lineal de la rueda, respectivamente.

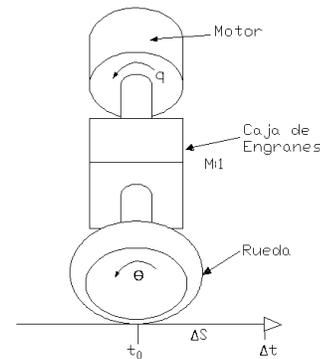


Figura 2. Diagrama esquemático general de la rueda, caja de engranes y motor.

A partir del número de pulsos (N_p) obtenidos en un intervalo de tiempo Δt , se puede obtener el desplazamiento angular θ de la rueda como se presenta en la ecuación (6),

donde $P_v = 256$ es el número de pulsos por vuelta que genera el codificador rotatorio.

$$\theta = \frac{q}{M} = \frac{N_p}{P_v M} \quad (6)$$

La transformación de desplazamiento angular a desplazamiento lineal esta dado por la ecuación (7)

$$\Delta S = 2\pi r \left(\frac{N_p}{P_v M} \right) \quad (7)$$

De la ecuación (2) del modelo cinemático, se obtiene las ecuaciones (8) - (10) para determinar la posición absoluta del robot móvil en el espacio de operación en cada intervalo de tiempo. Donde las condiciones iniciales están representadas por x_{w_i} , y_{w_i} y ϕ_{w_i}

$$\begin{aligned} \Delta x_w &= x_{w_i} - \frac{\Delta S_1}{3} (\sin\phi_w - \sqrt{3}\cos\phi_w) \\ &\quad - \frac{\Delta S_3}{3} (\sin\phi_w + \sqrt{3}\cos\phi_w) \\ &\quad + \frac{2\Delta S_2}{3} \sin\phi_w \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \Delta y_w &= y_{w_i} - \frac{\Delta S_1}{3} (\cos\phi_w + \sqrt{3}\sin\phi_w) \\ &\quad - \frac{\Delta S_3}{3} (\cos\phi_w - \sqrt{3}\sin\phi_w) \\ &\quad + \frac{2\Delta S_2}{3} \cos\phi_w \end{aligned} \quad (9)$$

$$\Delta\phi_w = \phi_{w_i} + \frac{1}{3L} (\Delta S_1 + \Delta S_2 + \Delta S_3) \quad (10)$$

4. PLATAFORMA EXPERIMENTAL

Para la manufacturación de la estructura base del robot móvil (3,0) se utiliza aluminio debido a que es un material resistente y de alta durabilidad; además de ser ligero, de bajo costo y presenta una alta resistencia a la corrosión. Los parámetros cinemáticos del robot móvil (Fig. 3) se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Dimensiones del robot móvil (3,0)

Característica	Unidades	Dimensión
Radio	m	0.215
Altura	m	0.23



Figura 3. Prototipo experimental.

El prototipo consta de tres principales subsistemas: 1) el subsistema de energía, 2) el subsistema de control y 3) el subsistema de localización, como se muestra en la Fig. 4.

- El subsistema de energía cuenta con dos modos de operación: con baterías de ácido de plomo (internas) o con una fuente externa de alimentación de Corriente Directa (CD), conmutados mediante un interruptor eléctrico. Durante el modo de operación por fuente externa es posible realizar la carga correspondiente de las baterías internas, esto con la finalidad de

seguir operando el prototipo y evitar contratiempos que genera el tiempo de carga de las baterías. Por otra parte se utilizó un convertidor tipo Buck Pololu D24V50F5 de 5V a 5A, que proporciona el voltaje y corriente necesarios para los elementos electrónicos de baja potencia.

- El subsistema de control se compone por tres etapas principalmente. 1) La etapa de procesamiento, que hace uso de un micro-controlador (μC) ATmega328P que se encarga de enviar la solicitud de datos al sistema de localización, prosigue con el cálculo de la señal de control (par) necesaria para realizar una tarea específica y transformar este resultado a una señal PWM equivalente a la corriente necesaria para producir dicho par con base en la ecuación (11). 2) La etapa de potencia, que se compone de tres servo-amplificadoras encargadas de interpretar la señal PWM (generada por la etapa anterior) y convertirla en corriente que es suministrada a cada motor de CD del robot móvil (3,0). 3) La etapa de envío de datos, que mediante el uso de una antena RF Xbee-Serie-1, se encarga de transmitir los estados reales $x = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]$ a una computadora personal para realizar la interpretación de los resultados de manera gráfica.

$$\tau = K_m i_a M \quad (11)$$

- El subsistema de localización se compone de dos etapas: 1) la etapa de conteo de pulsos, en donde se adquieren las tres señales de los codificadores ópticos de los motores y por medio del circuito integrado (C.I.) LS7366R, se convierten en un número entero de 16 bits, el cual contiene el número de pulsos generados por el codificador. El número de pulsos es enviado a la siguiente etapa por medio del protocolo de comunicación SPI (Serial Peripheral Interface por sus siglas en inglés). 2) La etapa de estimación de posición, en donde se estiman los estados actuales del robot móvil a partir del dato enviado (N_p) en la etapa anterior. Los estados actuales x se envían por un protocolo de comunicación I2C (Inter-Integrate Circuit por sus siglas en inglés) al sistema de control. Se utiliza el μC ATmega328P para realizar esta etapa.

El robot móvil (3,0) se desarrollo con el propósito de proporcionar un sistema de arquitectura de control abierta por lo que se cubren los siguientes aspectos:

- Subsistemas diseñados con base en una estructura modular
- Uso de arquitectura de bus estándar para la comunicación entre módulos
- Uso del lenguaje de programación estándar C

Permitiendo así el intercambio de su diferentes módulos y la manipulación del programa.

5. RESULTADOS

La sintonización del controlador se realizó utilizando el método heurístico presentado en Villarreal-Cervantes and Pantoja-García (2012) obteniendo un funcionamiento aceptable empleando las ganancias proporcionales (k_p) y derivativas (k_d) mostradas en la Tabla 2.

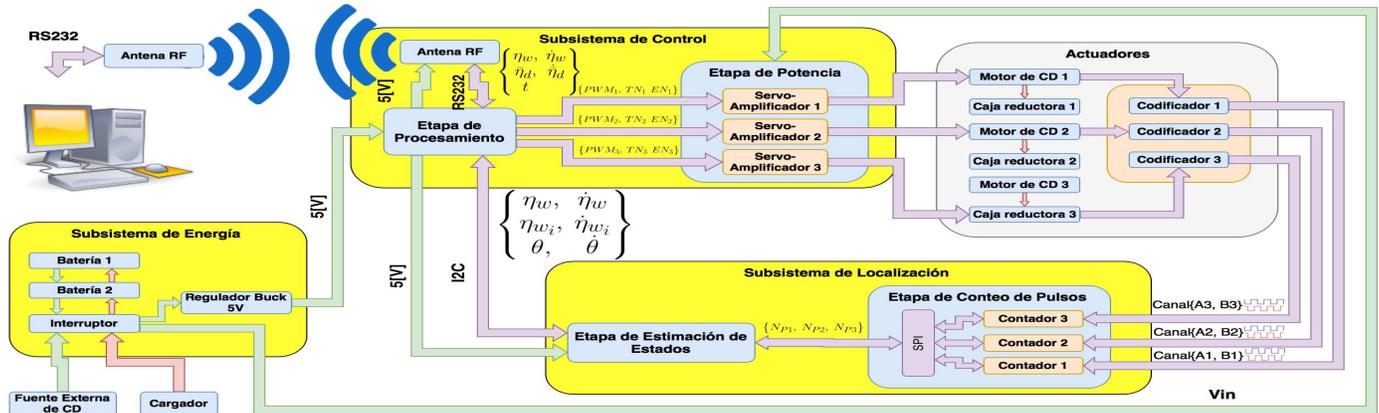


Figura 4. Subsistemas que Componen la Plataforma Experimental.

Tabla 2. Ganancias del Controlador PD

k_p	11	11	2.4
k_d	3	3	2.3

Los resultados experimentales se obtuvieron considerando un tiempo de muestreo $\Delta t = 5[ms]$ y condiciones iniciales del robot móvil $\bar{x}_{w,i} = [0, 0, 0, 0, 0, 0]^T$ y se consideran cuatro coordenadas cartesianas deseadas: $P_1 : \bar{x}_d = [1, 1, 0, 0, 0, 0]^T$, $P_2 : \bar{x}_d = [-1, 1, \frac{\pi}{2}, 0, 0, 0]^T$, $P_3 : \bar{x}_d = [-1, -1, \pi, 0, 0, 0]^T$, $P_4 : \bar{x}_d = [1, -1, \frac{3\pi}{2}, 0, 0, 0]^T$. Para posicionarse en estos puntos se asigna un tiempo máximo de 10[s]. En la Fig. 5 se pueden apreciar las coordenadas cartesianas deseadas en superposición con el desplazamiento realizado por el robot móvil para posicionarse en las cuatro coordenadas cartesianas.

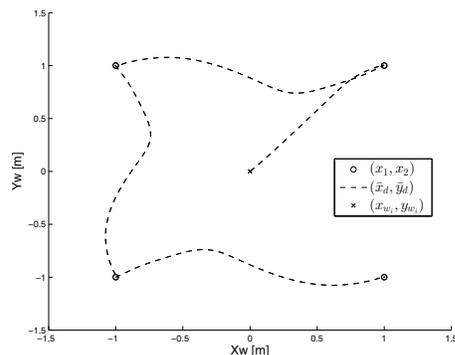


Figura 5. Posición deseada y comportamiento del robot móvil en el sistema coordenado $X_w - Y_w$.

En la Fig. 6 se muestran los tres grados de libertad, donde se observa en cada caso que el sistema de control busca alcanzar rápidamente la coordenada y orientación deseado, llegando a la coordenada cartesiana deseada en un tiempo menor a 5[s].

En la Fig. 7 se muestran los errores de posicionamiento del robot móvil $e = [e_1, e_2, e_3]^T$, en donde, para cada coordenada cartesiana se observa que este error tiende a cero pero sin converger a cero. Teniendo un máximo error en estado estacionario de $e_1 = \pm 0,002[m]$, $e_2 = \pm 0,001[m]$ y $e_{\phi_w} = \pm 0,032[rad]$ en X_w , Y_w y ϕ_w respectivamente.

El experimento anteriormente mencionado fue realizado en cuatro ocasiones con las mismas condiciones de operación.

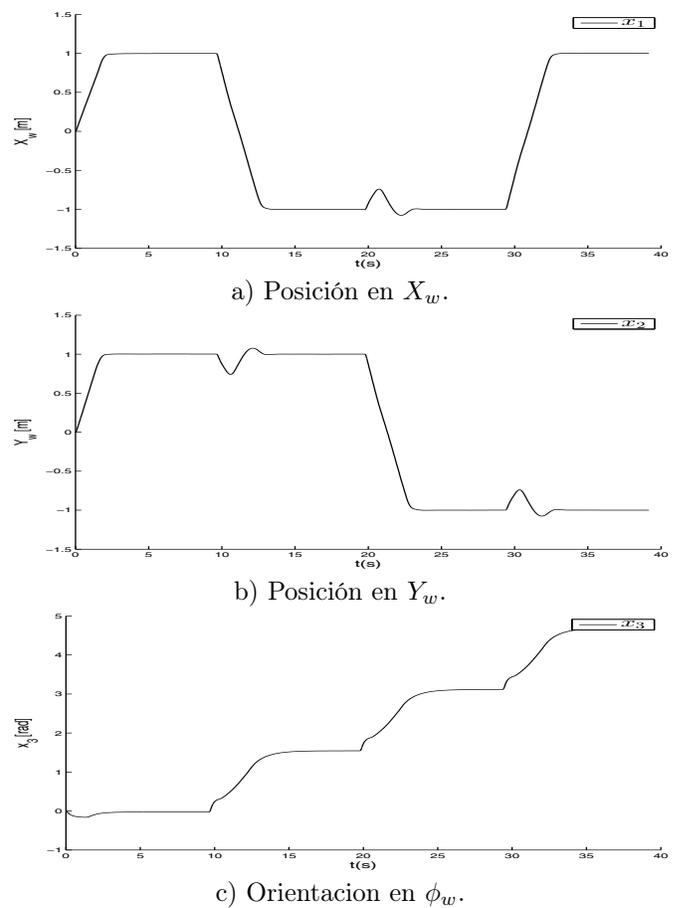


Figura 6. Resultados experimentales en X_w , Y_w y ϕ_w .

Esto con el propósito de determinar la precisión con que el robot móvil (3,0) puede obtener los mismos resultados. Los resultados obtenidos para cada grado de libertad del robot móvil se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3. Precisión del robot móvil (3,0)

Grado de Libertad	X_w	Y_w	ϕ_w
Precisión	0.0012 [m]	0.0009 [m]	0.018 [rad]

En la Fig. 8 se observa la respuesta del controlador donde se puede apreciar una respuesta completamente plana en $t = 1[s]$ y $t = 10[s]$, lo que indica una saturación

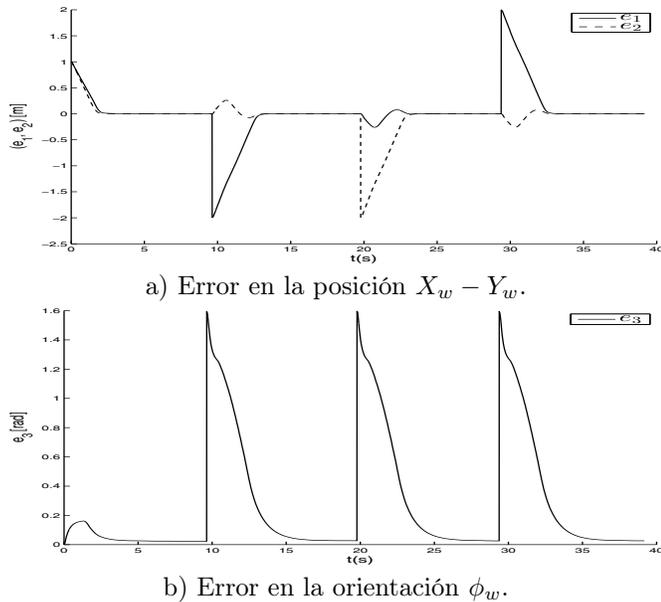


Figura 7. Error en los estados de posición y orientación.

en el controlador, es decir, se proporciona el máximo par admisible para obtener la respuesta deseada. Dicha respuesta se debe a la exigencia de realizar un cambio en su posición muy grande en un tiempo muy corto, siendo esta relación de 2 metros en un tiempo de 1 segundo. A pesar de esta situación el sistema de control realizó la tarea específica de posicionar el robot móvil (3,0) en los puntos deseados en un corto periodo de tiempo.

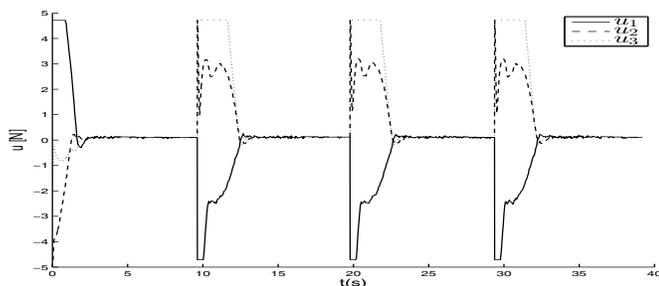


Figura 8. Respuesta del controlador en cada rueda.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este trabajo se ha presentado un robot móvil (3,0) semi-autónomo con una arquitectura de control abierta. Esto permite su reproducción con una cierta facilidad, así como la modificación y/o implementación de nuevos módulos. Con estas características y las ya expuestas en el apartado 4 es posible utilizar esta plataforma en los campos de investigación o educación, en la implementación de nuevas estrategias de control o bien aplicarlo en la enseñanza y aplicación de sistemas embebidos de control ya conocidos.

Por otra parte, el método de sintonización del controlador utilizado en este trabajo se basa en la experiencia del desarrollador lo que implica un proceso de prueba y error obteniéndose una serie de ganancias aceptables para el desempeño del sistema. Como trabajo futuro se pretende mejorar el desempeño del robot móvil encontrando nuevas ganancias mediante métodos de optimización, métodos

analíticos o métodos de auto-sintonización. Un ejemplo de lo antes mencionado se presenta en Villarreal-Cervantes and Alvarez-Gallegos (2016) donde se realiza la sintonización óptima de un controlador PID mediante algoritmos genéticos.

Como trabajo futuro se pretende la fabricación de cuatro robots móviles idénticos a la plataforma experimental presentada en este trabajo, con la finalidad de realizar consenso de robots móviles disparado por eventos para el seguimiento de trayectorias.

REFERENCIAS

- Borenstein, J., Everett, H.R., Feng, L., and Wehe, D. (1996). Mobile robot positioning - sensors and techniques. *Journal of Robotics Systems*, 231–249.
- Campion, G., Bastin, G., and D’Andrea, B. (1996). Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 47–62.
- Canudas, C., Siciliano, B., and Bastin, G. (1996). *Theory of Robot Control*. Springer, London.
- Ford, W.E. (1994). What is an open architecture robot controller? *IEEE International Symposium on Intelligent Control*, 27–32.
- Fu, G., Zhang, J., Chen, W., Peng, F., Yang, P., and Chen, C. (2013). Precise localization of mobile robots via odometry and wireless sensor network. *International Journal Advance Robotics Systems*, 1–13.
- Grant, H. and Willia, T.C. (2008). Strategic inertial navigation systems -high-accuracy inertially stabilized platforms for hostile environments. *IEEE Control Systems*, 65–85.
- Huang, J., Ishikawa, S., Ebana, M., Li, H., and Zhao, Q. (2006). Robot position identification by actively localization sound beacon. *Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 1908–1912.
- M. G. Villarreal-Cervantes, D. De-la-Cruz-Muciño, J.S.P.G.G.S.C. (2016). Arquitectura de control abierta basado en pc para sistemas mecatrónicos. *Polibits*, xx–xx.
- Petriu, E.M. (1998). Absolute position measurement using pseudo-random binary encoding. *Instrumentation and Measurement Magazine*, 19–23.
- Siewart, R. and Nourbakhsh, I. (2004). *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. The MIT Press, London, England.
- Tezartes, D. (2014). An historical perspective on inertial navigation systems. *International Symposium on International Inertial Sensors and Systems*, 1–5.
- Villarreal-Cervantes, M.G. (2015). Notas de lectura: Modelo cinemático y dinámico del robot móvil (3,0).
- Villarreal-Cervantes, M.G. and Alvarez-Gallegos, J. (2016). Off-line pid control tuning for a planar parallel robot using de variants, expert systems with applications. *Expert Systems with Applications*, xx–xx.
- Villarreal-Cervantes, M.G. and Pantoja-García, J.S. (2012). Análisis comparativo entre un control heurístico y un pid para un sistema mecatrónico. *3th International Supercomputing Conference*, 14–16.
- Xu, H. and Collins, J.J. (2009). Estimating the odometry error of a mobile robot by neural networks. *International Conference on Machine Learning and Applications*, 378–385.