

# Diseño y construcción de una plataforma de robot móvil teleoperada a bajo costo para interiores

Andrés Gaona, David Loza, Byron Cortez, Luis Segura

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica/Carrera de Ingeniería Mecatrónica, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Ecuador

adgaona1@espe.edu.ec, dcloza@espe.edu.ec, bhcortez@espe.edu.ec, ljsegura@espe.edu.ec

**Resumen**—Este trabajo presenta el diseño y construcción de una plataforma robótica móvil de bajo costo. El robot ha sido desarrollado en base a tres sistemas: mecánico, sensorial y de control. El sistema mecánico describe la implementación de los mecanismos de tracción y translación. El sistema sensorial muestra los sensores implementados para realizar odometría y navegación reactiva. El sistema de control explica los componentes del algoritmo de control utilizado para la manipulación del robot móvil. Se utilizó el Sistema Operativo para Robots (ROS) como base del diseño del autómata. La plataforma robótica ha sido probada bajo diferentes circunstancias obteniendo resultados prometedores de frente a nuevos estudios.

**Palabras Claves**— Robot móvil, plataforma de bajo costo, arquitectura de control de robot.

**Abstract**—This paper presents the design and construction of a low-cost mobile robot platform. Mechanical, sensory, and control modules are developed as part of the robot. The mechanical system describes the implementation of translation and traction mechanisms. The sensory system shows the sensors that back up the reactive navigation and odometry. The control system explains the parts and algorithms used to control the mobile platform. The controller was developed in the Robotic Operating System (ROS). The robot platform has been tested obtaining promising results toward new implementations.

**Keywords**— Mobile robot, low-cost platform, robot control architecture.

## I. INTRODUCCIÓN

La robótica móvil se ha convertido en un punto importante de atención para la investigación dentro de la comunidad científica. Esto se debe a la versatilidad de los robots para adaptarse a diferentes aplicaciones; y la consideración de que estos tipos de autómatas están equipados con un grado relativamente alto de inteligencia artificial [1]. Según Bräunl [2], un robot móvil (MR) es una máquina autómata que posee capacidad de movimiento dentro de un entorno particular; esta afirmación solo interpreta las características de los robots más importantes, pero no la única. Para complementar esta idea, es importante señalar aspectos tales como la cinemática, la percepción y la localización en un entorno determinado. Un MR debe tener la capacidad de navegar en un espacio establecido, pudiendo evitar situaciones de colisión con objetos estáticos y móviles. Además, las condiciones extremas de temperatura, radiación y humedad deben ser esquivadas y esto depende de la aplicación [3].

Teniendo en cuenta los antecedentes mencionados, la construcción de una plataforma de robot móvil (MRP) es imprescindible como punto de partida hacia diversos

desarrollos y líneas de investigación. Además, esto respalda a los alumnos en el proceso de aprendizaje y la validación de los algoritmos de control.

Es importante tener en cuenta el costo de cada elemento al diseñar y construir un robot con tales características. Una implementación de bajo costo permite replicar el robot tantas veces como sea necesario para manipular sus características, y esto hace que esta plataforma sea diferente de las comerciales. Comprar un robot comercial es costoso en Ecuador; por lo tanto, desarrollar una plataforma de bajo costo se ha convertido en una alternativa para realizar investigaciones sobre este tema.

## II. ESTRUCTURA DE LA PLATAFORMA DEL ROBOT MÓVIL

Se ha planteado una estructura modular para el diseño y la construcción de la MR. Esto permite una mejor distribución de las operaciones de la funcionalidad del robot. Los componentes, independientes entre ellos, se pueden reorganizar en diferentes arquitecturas de control; también pueden reutilizarse en otros robots y reemplazarse por otros módulos. La forma de diseño es normal y recurrente en robots de este tipo, por ejemplo, Kobuki [4], KIVA [5], Husky [4], entre otros. Se utiliza un mecanismo diferencial para integrar las ruedas motrices al robot, además se incorporan dos ruedas seguidoras que sirven como pivotes para aumentar la estabilidad del robot.

La Fig. 1 muestra un modelo CAD que contiene la distribución y ubicación de las ruedas conducidas y seguidoras. Las ruedas motrices no deben exceder el 5% del peso del robot para no influir significativamente en el dimensionamiento de los motores; el área de la banda de rodadura del neumático debe ofrecer buenas características de adherencia [6]. Por otro lado, las ruedas seguidoras deberían dar versatilidad hacia el desplazamiento adecuado de la plataforma.

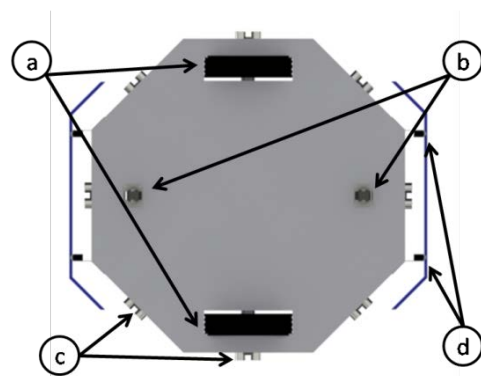


Fig. 1. Distribución de componentes: a) ruedas motrices, b) rueda de seguimiento, c) sensores ultrasónicos, y d) interruptores de límite

Los motores paso a paso se utilizan para impulsar las ruedas y se dimensionaron teniendo en cuenta el caso más crítico, como se muestra en la Fig. 2 [6]. Explica las cargas cinemáticas presentes en las ruedas motrices cuando el robot quiere superar la posición de parada. Este fenómeno está gobernado por (1).

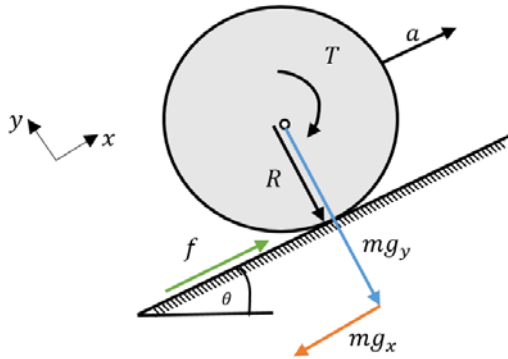


Fig. 2. Cinemática de carga en una rueda motriz para superar la posición de parada

TABLA I  
PARÁMETROS DE DIMENSIÓN DEL MOTOR

Símbolo	Descripción	Magnitud
$T_m$	Torque motor	2.2 Nm
$fs$	Factor de seguridad	2
$e$	Eficiencia del motor	0.9
$a$	Aceleración	$0.1 \frac{m}{s^2}$
$\theta$	Pendiente máxima	15°
$m$	Masa	10 kg
$R$	Radio de la rueda de tracción	0.15 m
$n$	Número de ruedas motrices	2

$$T_m = fs \cdot \left( \frac{100}{e} \right) \left[ \frac{(a + g \cdot \sin \theta) \cdot m \cdot R}{n} \right] \quad (1)$$

Al calcular (1) para los parámetros detallados que se muestran en la Tabla I, se obtiene como resultado el par necesario (2.2 Nm) para superar la posición de parada.

Se instalaron dos motores paso a paso para alcanzar el par exigido. Sus especificaciones son de 2.5 Nm y 200 pulsos por revolución. Esto permite un control preciso de la posición y orientación del robot móvil. Dos controladores que suministran el voltaje y la corriente adecuados se integraron para simplificar la etapa de potencia que controla los motores paso a paso. Estos controladores se rigen por el módulo de control que se describe más adelante en este documento. Los motores y sus accionamientos requieren 24 V. El sistema mecánico finaliza con la implementación de dos baterías de 12 V y 3 A.

El sistema sensorial permite la interpretación del entorno que rodea al robot. La navegación reactiva y la odometría están incorporadas. Se coloca un sensor de sonda para la adquisición de señal, el sensor es un elemento no confiable cuando se trabaja fuera del rango de distancia y el espectro angular [8]. Para dar solución a este problema, 24 sensores de sonar deberían distribuirse en un anillo; sin embargo, se podría generar una repetibilidad incongruente en las mediciones obtenidas [8].

Después de evaluar los diferentes anillos de sensores por prueba / error y revisar los detalles presentados [7], se determinó que una distribución de 8 sonares (Figura 3a) era la más óptima para este proyecto.

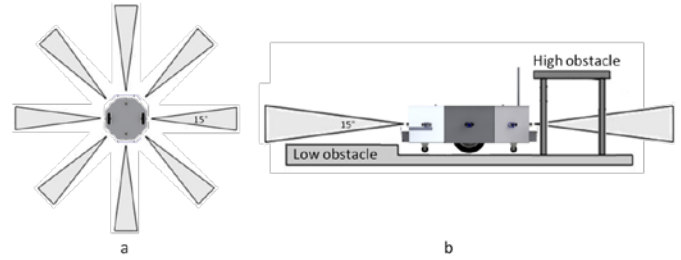


Fig. 3. (a) Distribución de sensores ultrasónicos y (b) Percepción vertical del anillo sonar-sensor

Un aspecto importante a considerar es la incertidumbre generada por los espacios no detectados, como se muestra en la Figura 3. Esto podría causar que la MR golpee con objetos en su camino. Para evitar este problema, se implementaron dos parachoques y cuando uno de ellos está activado, todas las funcionalidades del MR están desactivadas. Los efectos derivados de la variación sistemática y no sistemática son los errores para cada posición calculada. Cada valor de error indica la región de incertidumbre que tiene la posición real del robot [12], y los errores aumentan junto con la dirección de desplazamiento del robot. Esto provoca errores al determinar la posición y el ángulo que son parámetros importantes a considerar para la autonomía del robot.

Los codificadores están en los ejes de las ruedas motrices para obtener su información de rotación, también se montó otro sensor, giroscopio para obtener el ángulo de orientación del robot. La odometría calculada se basa en el modelo cinemático presentado en la Figura 4.

Como punto de partida, la matriz ortogonal rotacional  $R(\theta)$ , la cual indica el desplazamiento diferencial, establece como punto de partida el vector de posición  $\xi_I$  que se muestra en la ecuación 2.

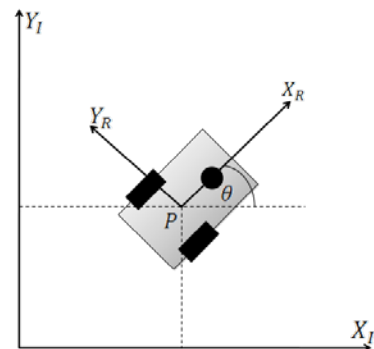


Fig. 4. Modelo de desplazamiento diferencial

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

### III. PRUEBAS Y RESULTADOS

La Fig. 5(a) muestra una representación de CAD del MP y sus componentes se detallan en la Tabla II. La Fig. 7(b) presenta la implementación de MR y la Figura 7c retrata una vista externa del robot.

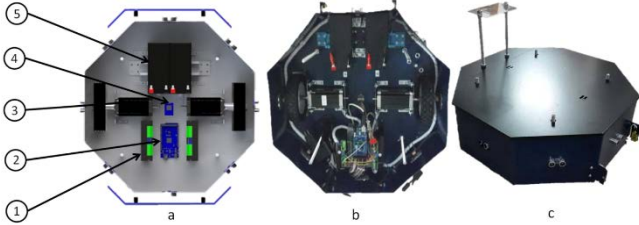


Fig. 5. Plataforma de robot móvil implementada

Número	Descripción
1	Driver del motor paso a paso
2	Sistema integrado Arduino
3	Motor paso a paso
4	Giroscopio y encoder
5	Baterías

Para comenzar con la operación del MRP, el Arduino A debe ser comunicado al sistema operativo ROS. Este procedimiento permite que los dispositivos periféricos controlen el robot. Los movimientos se envían desde el comando del joystick y están limitados por el nodo de navegación reactiva; esto evita que el operador realice desplazamientos que no están de acuerdo con el entorno donde opera el robot. Mientras tanto, la pantalla ROS muestra constantemente la posición y la velocidad de la plataforma móvil.

Para evaluar si los requisitos de diseño se lograron o no, se requieren varias pruebas. Cada vez que se desarrolló un nodo ROS, se realizó una prueba.

La prueba uno evalúa la versatilidad del comando que tiene el MP. Por lo tanto, se establece que el robot se mueve según los comandos que se envían desde el joystick sin mostrar ningún retraso al leer los datos. Esto muestra que el procesamiento y la velocidad de la señal de muestreo no se ven afectados por el costo computacional de los algoritmos. El tiempo de funcionamiento que el robot puede alcanzar también se evalúa en esta prueba. La información obtenida demuestra que el tiempo de funcionamiento sin carga del robot es de aproximadamente 7 horas. Es en este momento cuando el módulo mecánico del robot deja de funcionar ya que el voltaje drenado se ha agotado por debajo de los 18 voltios, que es el voltaje mínimo requerido por los controladores del motor para su correcto funcionamiento.

Otra característica evaluada durante esta prueba fue la capacidad del robot para superar pendientes. Se determinó que la plataforma puede trabajar en pendientes de hasta 35 ° sin perder tracción.

La prueba dos se ejecuta cuando se integró el nodo de

odometría. Para evaluar este componente, se realizó un monitoreo constante de la trayectoria abierta, Fig. 6(a), y la trayectoria cercana, Fig. 6(b). La Fig. 6 muestra la ruta teórica en azul y la ruta real en rojo. Con los datos recopilados de estas pruebas, es posible una cuantificación del error durante el desplazamiento.

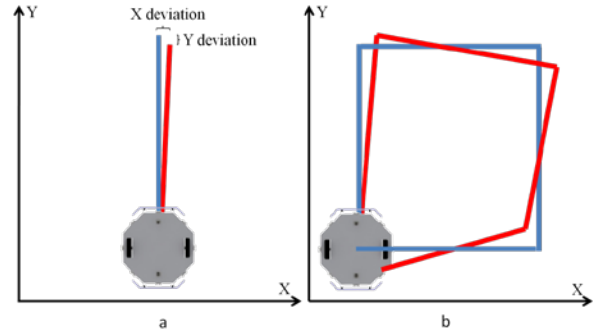


Fig. 6. Pruebas de trayectoria (Odometría) (a) Abierto y (b) cerrado

La Tabla III muestra los datos recopilados, así como el porcentaje de error. Los errores obtenidos se cuantifican en el primer y segundo caso. La magnitud de los errores no sistemáticos se calcula restando la trayectoria abierta de los valores numéricos de la trayectoria cercana. Aunque se muestran porcentajes altos considerables en la Tabla III, el error de odometría se coloca dentro de los rangos aceptables para este tipo de mediciones [10].

Número de pruebas	Trayectoria abierta		Trayectoria cerrada	
	X desviación	Y desviación	X desviación	Y desviación
1	15.6 cm	3.3 cm	47.3 cm	51.8 cm
2	12.4 cm	3.7 cm	53.1 cm	55.9 cm
3	14.7 cm	2.9 cm	43.4 cm	54.7 cm
Promedio	14.2 cm	3.3 cm	47.9 cm	54.1 cm
Porcentaje	7.9 %	1.8 %	26.6 %	30.1 %

La última prueba trata de la navegación reactiva. La estrategia se desarrolla de tal manera que los datos se toman del anillo de sensores de sonda. Sin embargo, cuando el robot identifica obstáculos en el frente, verifica las otras direcciones. Por lo tanto, si los sensores laterales están libres y el robot gira hacia la derecha como primera opción. Si el sensor lateral derecho está bloqueado, entonces el robot gira hacia la izquierda. Si ambos sensores laterales están bloqueados, el robot gira 180 ° e intenta encontrar otra salida. Cuando el MP obtiene una nueva dirección, el estado de los sensores se verifica constantemente para que el MP regrese a su orientación inicial y alcance la posición establecida. La estrategia implementada es relativamente simple y muestra la versatilidad de la plataforma con respecto a los algoritmos para la navegación reactiva.

### IV. CONCLUSIONES

Se implementó una plataforma de robot móvil teleoperado para interiores. Se determinaron las siguientes características del robot: dimensiones (50 × 50 × 30 cm), peso (10 kg), velocidad máxima (0,5 m / s), pendiente máxima que puede superarse (15 °), tiempo de funcionamiento (7 horas) El sistema de control fue

completamente desarrollado en el sistema operativo Robot (ROS). El uso de una estructura modular al construir un MRP permite incorporar nuevos dispositivos para actualizarlo o variar su funcionalidad. La navegación reactiva presenta una gran versatilidad cuando se implementa en MR. Por lo tanto, las estrategias de movimiento se pueden reformular para que el robot responda de manera diferente según los nuevos requisitos. Otro aspecto importante a considerar es el hecho de que los sensores ultrasónicos podrían exigir un alto costo computacional si el código se detiene esperando a que regrese la señal. Adicionalmente, se puede incorporar un módulo de visión para permitir la visualización de la odometría [11]. Esto mitigaría los efectos de los errores sistemáticos y no sistemáticos que están presentes en el módulo de odometría. La reducción de errores también se puede lograr desarrollando algoritmos probabilísticos como el filtro extendido de Kalman [15,16], Montecarlo [17], entre otros. Se puede lograr un beneficio importante al agregar un módulo de visión; esto hace posible la teleoperación del robot desde una estación fija [18]. Para lograr este propósito, se debe incluir una red de área local para intercambiar información entre las computadoras. Cuando el robot opera bajo esta estrategia, es necesario que lo realice dentro de una área cerrada. La autonomía de los robots móviles es una alternativa a considerar muy de cerca. La localización y mapeo simultáneo (SLAM) [7] es una de las principales áreas donde la investigación se realiza con la ayuda del robot construido. La implementación de SLAM requiere de un sistema sensorial instalado, así como la incorporación de un módulo de visión.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a todo el personal del Laboratorio de Procesos de Fabricación de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, con una mención especial a Roberty Velasco.

#### REFERENCIAS

- [1] J. Jones, A. Flynn, B. Seiger, *Mobile Robots: Inspiration to Implementation*, AK Peters, 1998
- [2] T. Braunl, "Embedded Robotics: Mobile Design and Applications with Embedded Systems," Springer Science & Business Media, 2008.
- [3] F. Fahimi, "Autonomous Robots: Modeling, Path Planning and Control," Springer Science & Business Media, 2009
- [4] Open Source Robotics Foundation, TurtleBot, Online and Available: <http://turtlebot.com/>
- [5] R. D'Andrea, "Guest editorial: A revolution in the warehouse: A retrospective on KIVA systems and the grand challenges ahead," *IEEE Transactions Automation Science and Engineering*, 2012, pp. 638 – 639
- [6] R. Vandana, R. Fernandes, "Optimal sizing of motor – battery system for in wheel electric vehicles," *IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2010, pp. 2510 – 2515
- [7] H.-D. Kim, S.-W. Seo, I.-H. Jang, K.-B. Sim, "SLAM of mobile robot in the indoor environment with digital magnetic compass and ultrasonic sensors," *IEEE International Conference Control, Automation and Systems ICCAS'07*, 2007, pp. 87 – 90
- [8] S. Kim, Y. Kim, "Robot localization using ultrasonic sensors, Intelligence," *IEEE/RSJ International Conference Robot and Systems IROS'04*, 2004, pp. 3762 – 3766
- [9] Open Source Arduino, Arduino, Online and Available <http://arduino.cc/en/>
- [10] K. Chong, L. Kleeman, "Accurate odometry and error modeling for a mobile robot," *IEEE international Conference robotics and Automation*, 1997, pp. 2783 – 2788

- [11] B. Siciliano, O. Khatib, *Springer Handbook of Robotics*, Springer Science & Business Media, 2002.
- [12] J. Borenstein, H. Everett, L. Feng et al., *Where am I? Sensors and Methods for Robot Mobile Positioning*, University of Michigan, 1996
- [13] Open Source Robotics Foundation, Robot Operating System ROS, Online and Available: <http://ros.org>
- [14] D. Nister, O. Naroditsky, J. Bergen, "Visual Odometry," *IEEE International Conference Computer Vision and Pattern Recognition CVPR'04*, 2004, pp. 652.