

# ROBOTS MÓVILES OMNIDIRECCIONALES

## OMNIDIRECTIONAL MOBILE ROBOTS

Edson Branisley Amaguaña Moreta<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Investigador independiente, Ingeniería en Electrónica y Automatización. Ecuador ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7595-929X>. Correo: [edsonmoreta2000@gmail.com](mailto:edsonmoreta2000@gmail.com)

Katherine Estefania Pilapanta Carrasco<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Investigador independiente, Ingeniería en Electrónica y Automatización. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5149-5950>. Correo: [kathiestefania98@hotmail.com](mailto:kathiestefania98@hotmail.com)

Bryan Fabricio Laica Tulmo<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Investigador independiente, Ingeniería en Electrónica y Automatización. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7888-768X>. Correo: [fabriciolaica@gmail.com](mailto:fabriciolaica@gmail.com)

Diego Ramiro Ñacato Estrella<sup>4</sup>

<sup>4</sup> Ingeniero en Electrónica control y redes industriales, Magister en sistemas de Control y Automatización Industrial. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7233-9076>. Correo: [diego.nacato@esepoch.edu.ec](mailto:diego.nacato@esepoch.edu.ec)

\* Autor para correspondencia: [diego.nacato@esepoch.edu.ec](mailto:diego.nacato@esepoch.edu.ec)

### Resumen

Para determinar la configuración cinemática del robot móvil se determina el tipo de ruedas para su movimiento. Las ruedas omnidireccionales en los robots representan una alternativa favorable para lograr una movilidad con alto grado de libertad. A partir del análisis antes mencionado la presente investigación aborda contenido sobre el robot móvil omnidireccional distribuido en 3 etapas: tipos de ruedas, modelo cinemático y ecuaciones que rigen en el robot y la simulación del robot omnidireccional con el tiempo que se estabiliza.

**Palabras clave:** Robótica móvil, ruedas omnidireccionales, motor sin escobillas

## Abstract

*To determine the kinematic configuration of the mobile robot, the type of wheels for its movement is determined. Omnidirectional wheels on robots represent a favorable alternative to achieve mobility with a high degree of freedom. Based on the aforementioned analysis, this research addresses content on the omnidirectional mobile robot distributed in 3 stages: types of wheels, kinematic model and equations that govern the robot and the simulation of the omnidirectional robot with time that stabilizes.*

**Keywords:** *Mobile robotics, omnidirectional wheels, brush- less motor.*

**Fecha de recibido:** 02/12/2022

**Fecha de aceptado:** 31/01/2023

**Fecha de publicado:** 01/02/2023

## Introducción

Los continuos avances dentro de la robótica móvil han dado hincapié a estudios e investigaciones enfocados en robots omnidireccionales con estructuras más eficientes en la ejecución de movimientos frontales, laterales y rotacionales sobre superficies planas y además poseen la capacidad de maniobra frente a obstáculos en espacios reducidos (Zambrano Pérez, 2015).

La configuración cinemática del robot móvil determina el tipo de ruedas para su movimiento, las cuales pueden ser omnidireccionales, convencionales, tipo castor y ruedas de bolas (Chapman, 2010). El tipo de rueda y su configuración son de vital importancia ya que influyen en tres características fundamentales como: la maniobrabilidad, controlabilidad y estabilidad (Goris, 2005).

Las ruedas omnidireccionales son las encargadas de permitir al robot su desplazamiento en cualquier dirección sin la necesidad de rotar primero, y de efectuar trayectorias complejas de desplazamiento y rotación logrando el ángulo correcto (Hassani, Maalej, & Rekik, 2018).

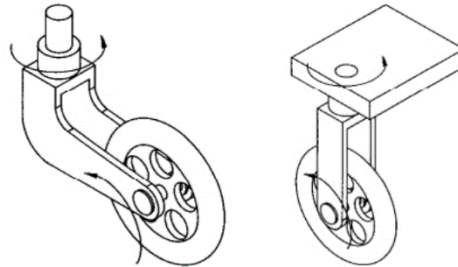
Los actuadores son los principales elementos que conforman a un robot omnidireccional dotándole de movimiento, siendo los más utilizados los motores de corriente directa por su linealidad y facilidad de control, en especial los de tipo imán permanente con o sin escobilla (Paniagua Jaramillo, 2015).

### Ruedas omnidireccionales

Un estudio acerca de las ruedas en los robots omnidireccionales las clasifica en dos tipos: las convencionales y las especiales (Meneses, Pereira, & Menezes, 2018).

#### A. Ruedas convencionales

Tal como se muestra en la figura 1, este tipo de ruedas posibilita desplazamientos omnidireccionales con una configuración previa de posiciones sobre robot (Doroftei, Grosu, & Spinu, 2007). Se catalogan según la posición del eje de rotación respecto de la rueda.



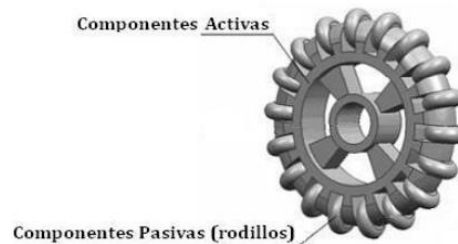
**Figura 1:** Rueda tipo Forward Offset Steered y convencional simple

Su desplazamiento omnidireccional consiste en seguir una trayectoria dentada que requiere tiempos de posicionamiento al cambiar de dirección (Doroftei et al., 2007).

### **B. Ruedas especiales**

Las ruedas omnidireccionales tienen tres grados de libertad que consisten en girar sobre su propio eje, rotar sobre su eje vertical y deslizarse lo que permite al robot alcanzar cualquier punto mediante una trayectoria directa (Diegel, Badve, Bright, Potgieter, & Tlale, 2002).

En esta categoría se encuentran las ruedas: Mecanum, universales y esféricas.

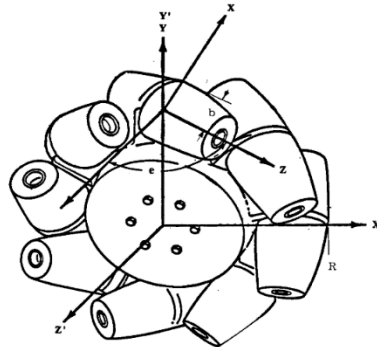


**Figura 2:** Rueda universal simple

La figura 2 muestra una rueda universal que posee rodillos pasivos periféricos que agregan una componente pasiva adicional a la activa de la rueda (Diegel et al., 2002). Este tipo de ruedas presentan las siguientes características (Bräunl, 2022), (Omar Mar, Jorge Gulín, Ivan Santana, & Bron., 2020):

- Capacidad de carga limitada.
- Diseño simple.

- Radio de rueda variable.
- Baja fricción.
- mayor sensibilidad a la superficie



**Figura 3:** Rueda omnidireccional del tipo Macanum

En la figura 3, se puede observar una rueda omnidireccional del tipo Macanum, cuyos rodillos presentan una rotación con un ángulo de  $45^\circ$  en lo general con respecto de la circunferencia exterior de la rueda (Dickerson & Lapin, 1991). Sus principales características son:

- Capacidad de carga reducida.
- Diseño complejo.
- Radio de rueda constante.
- Baja fricción.
- Mayor sensibilidad a la superficie.

Las ruedas esféricas dependen de un motor, el cual ejerce una fuerza de fricción sobre la esfera. Su principal ventaja es permitir la movilidad en todas la direcciones sin embargo, necesita ejercer una potencia levada en los motores para conseguir la fricción correcta (Yu, Spenko, & Dubowsky, 2004).

En la tabla 1, se expone las principales ventajas y desventajas de las ruedas especiales sobre las convencionales previamente revisadas (Wada & Mori, 1996).

**Tabla 1:** Contaste de las principales características de los tipos de ruedas omnidireccionales.

Ventajas	Desventajas
Simplicidad de control de movimiento.	Mecanismos con diseño complejo
Simplicidad de diseño del robot.	Baja capacidad de carga
	Estimación reducida de posición y orientación del robot.
	Inadecuación a superficies escalonadas.

### Motor brushless

Este tipo de actuador no posee escobillas por lo que no requiere reemplazo ni mantenimiento, de la misma forma no generan chispas a causa de la ausencia de escobillas. Su principal característica es su conmutación electrónica y no mecánica, por lo que el movimiento del rotor se genera censando la posición del rotor de manera continua (Flores Aldás & Romero Saltos, 2019).

Los motores sin escobillas alcanzan velocidades más elevadas en comparación con los motores con escobillas, presentan un alto rendimiento y alta potencia no obstante, son costosos y complejos (Jimbo Tacuri, 2015).

Un motor de imanes permanentes se define como una fuente de tensión ideal dependiente de la velocidad de giro, en serie con un inductor y una resistencia (Schiferl & Lipo, 1990), sin embargo, en los motores sin escobillas con devanados concentrados fraccionados, las bobinas no aportan por igual al par total del motor en cada instante, por lo cual, se tiene una constante denominada factor de bobinado  $wf$ , dando paso a la siguiente expresión algebraica (El-Refaie, Jahns, & Novotny, 2006), (Omar Mar, Gulín González, & Santana Ching, 2021):

$$K_t = 2 * N * L * B_g * R * wf$$

El resultado es el valor de la constante de par  $K_t$  relaciona el par generado y una corriente de excitación dada. Según la ley de Faraday y la expresión anterior se tiene que (Numan, Rodrigo, & Esteban, 2016):

$$E = 2 * B * L * R * \omega_m$$

$$K_t = \frac{E}{\omega_m}$$

El valor de la resistencia se obtiene analíticamente y la inductancia por simulación, donde  $\rho_{cu}$  es la resistividad del cobre,  $l$  la longitud total de bobinado y  $S$  la sección del cable. Obteniendo la siguiente expresión:

$$R = \frac{\rho_{cu} * l}{S}$$

La inductancia se obtiene simulando el motor con una pequeña corriente positiva y luego con una pequeña corriente negativa. De este modo, la inductancia es el valor del cambio de enlace del flujo, dividido por la diferencia de las corrientes en la simulación de la siguiente forma (He, 2018):

$$L = \frac{Flux_+ - Flux_-}{I_+ - I_-}$$

## Materiales y métodos

### Modelo Cinemático del Robot

El robot omnidireccional se conoce como robot tipo (3,0). Para obtener el modelo cinemático, se asume que el robot móvil se mueve en un plano horizontal y que sus ruedas son indeformables, se supone también que las ruedas están perfectamente en posición vertical, rotan alrededor de su eje horizontal y la rotación del plano de cada rueda está fijo respecto al cuerpo del robot móvil.

Considérese un marco de coordenadas inercial  $G = (XYZ)$  y un marco de coordenadas adjunto al robot móvil omnidireccional  $m = (X_m Y_m Z_m)$ , como se muestra en la figura 4, donde las coordenadas  $(x, y, 0)$

denotan la posición del centro del robot.  $\phi$  es el ángulo de orientación del móvil respecto al marco inercial  $G$ ,  $L > 0$  es la distancia entre el centro del robot y cada rueda,  $\delta = 30$  es el ángulo de orientación del eje de la rueda 1 con respecto al eje  $X_m$ ,  $r > 0$  es el radio de cada rueda. Las ruedas están uniformemente distribuidas a 120 entre cada par de ellas, además el eje de la rueda 3 es paralelo al eje  $Y_m$ .  $v_x, v_y$  y  $w$  con las velocidades lineales y angular del robot móvil,  $\dot{\theta}_i, i = 1, 2, 3$  son las velocidades angulares de cada rueda.

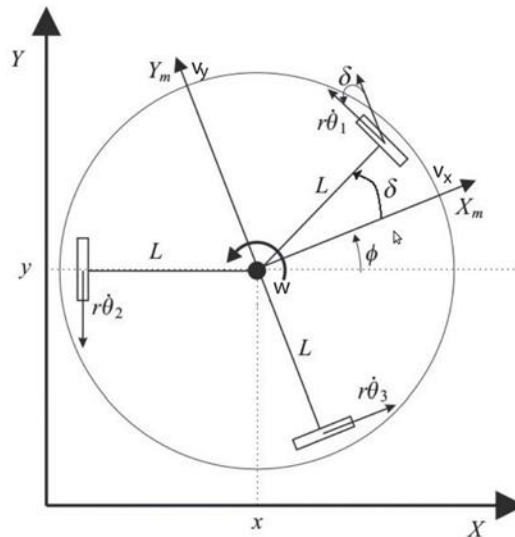


Figura 3. Coordenadas de postura y velocidades del robot.

Las ecuaciones que relacionan las velocidades de las ruedas con las velocidades lineales y angulares del robot móvil están dadas por:

$$r\dot{\theta}_3 = L\dot{\phi} + v_x \quad (1)$$

$$r\dot{\theta}_1 = L\dot{\phi} + v_1 \quad (2)$$

$$r\dot{\theta}_2 = L\dot{\phi} + v_2 \quad (3)$$

Donde  $v_1$  y  $v_2$  son velocidades lineales en las ruedas que corresponden al movimiento traslacional del robot, las cuales se calculan de la siguiente manera. Considérese la figura 5. Se tiene que,

$$\sin \delta = \frac{-v_x}{V_1} \Rightarrow V_1 \sin \delta = -v_x \quad (4)$$

$$\cos \delta = \frac{v_y}{V_1} \Rightarrow V_1 \cos \delta = v_y \quad (5)$$

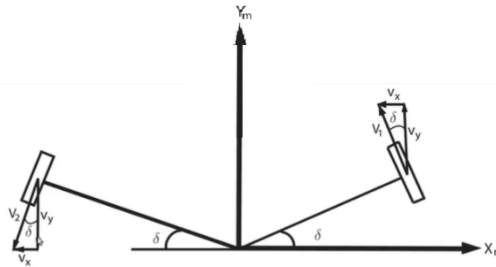
Al multiplicar (4) por  $\text{sen} \delta$  y (5) por  $\text{cos} \delta$  y sumar ambas ecuaciones, se obtiene:

$$V_1 = -v_x \sin \delta + v_y \cos \delta \quad (6)$$

De la misma manera para la rueda 2, se tiene que:

$$\sin \delta = \frac{-v_x}{V_2} \Rightarrow V_2 \sin \delta = -v_x \quad (7)$$

$$\cos \delta = \frac{v_y}{V_2} \Rightarrow V_2 \cos \delta = v_y \quad (8)$$



**Figura 4.** Velocidades lineales de las ruedas

Al multiplicar (7) por  $\text{sen} \delta$  y (8) por  $\text{cos} \delta$  y sumar ambas ecuaciones, se obtiene:

$$V_2 = -v_x \sin \delta + v_y \cos \delta \quad (6)$$

Al sustituir (6) y (9) en (2) y (3), respectivamente, se obtiene la relación entre las velocidades de las ruedas y las velocidades lineales dada por:

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-\sin \delta}{r} & \frac{\cos \delta}{r} & \frac{L}{r} \\ -\sin \delta & -\cos \delta & \frac{L}{r} \\ \frac{1}{r} & 0 & \frac{L}{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ w \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} = A_r(\delta) \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ w \end{bmatrix} \quad (10)$$

Nótese que  $\det(A_r) = 2(\sin \delta + L + 1) \left( \frac{L \cos \delta}{r^3} \right) \neq 0$ , cuando  $\delta \neq \pm 90$ . Entonces, el modelo cinemático del robot omnidireccional está dado por:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ w \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = R(\phi)U \quad (11)$$

Donde  $U = [v_x \ v_y \ w]^T$  es el vector de control y  $R(\delta)$  es la matriz ortogonal de rotación alrededor del eje  $Z_G$ .

### Control del robot (3,0)

Al definir las coordenadas de postura del robot dadas por:

$$q = [x \ y \ \phi]^T$$

el modelo cinemático del robot (3,0) se puede escribir de manera matricial como:

$$\dot{q} = R(\phi)U \quad (12)$$

Al realizar una retroalimentación de estado de la forma:

$$U = R^{-1}(\phi)u \quad (13)$$

Donde  $u \in \mathbb{R}^3$  es un control auxiliar, se obtiene el modelo cinemático lineal del robot (3,0) dado por

$$\dot{q} = u \quad (14)$$

Nótese que  $R^{-1} = R^T$

El error de seguimiento se define como:

$$e(t) = \begin{bmatrix} e_x(t) \\ e_y(t) \\ e_\phi(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_d(t) - x \\ y_d(t) - y \\ \phi_d(t) - \phi \end{bmatrix} \quad (15)$$

donde  $x_d(t)$ ,  $y_d(t)$  y  $\phi_d(t)$  son las coordenadas de postura deseadas.

Se propone un controlador proporcional (P) con compensación dada por:

$$u = \begin{bmatrix} \dot{x}_d(t) \\ \dot{y}_d(t) \\ \dot{\phi}_d(t) \end{bmatrix} + k_p e(t) \quad (16)$$

Donde  $k_p \in \mathbb{R}_+$

Al cerrar el lazo de control, se obtiene la dinámica del error dada por

$$\dot{e} + k_p e = 0 \quad (17)$$

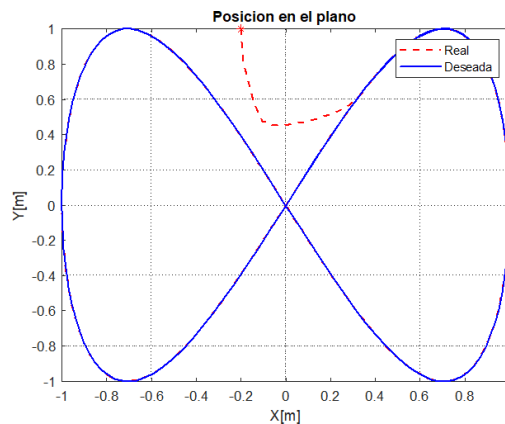
La cual es asintóticamente exponencialmente estable, dado que el polinomio característico de (17) está dado por:

$$s + k_p = 0 \quad (18)$$

En el cual todas sus raíces tienen parte real negativa (polinomio Hurwitz).

## Resultados y discusión

A través de software SIMULINK podemos simular el modelo cinemático del robot (3,0) como se muestra en la figura 6. En donde se representa el control P y el modelo cinemático a través del bloque MATLAB Function.



**Figura 6:** Ejemplo de representación de función en MATLAB.

La gráfica de la posición en el plano se muestra en la figura 7, donde se puede observar que el asterisco rojo corresponde a la posición inicial, la misma que alcanza la trayectoria deseada por el usuario considerando la saturación de velocidades.

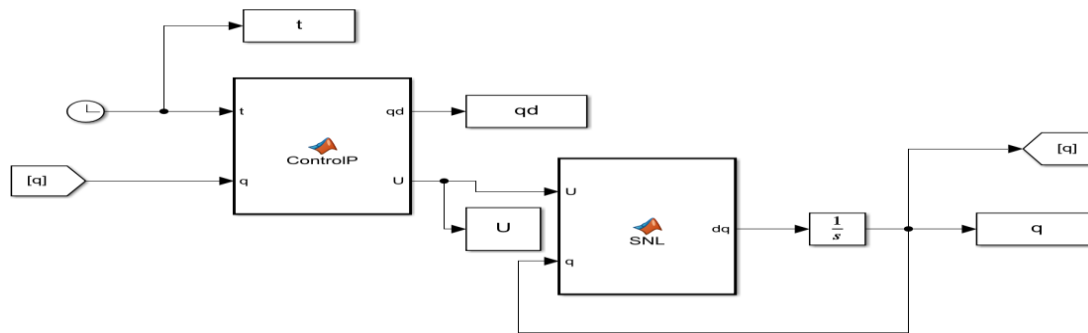


Figura 7. Trayectoria del robot (3,0).

Para esta simulación se definió una velocidad máxima de  $v_{max} = 0.4$  y mediante la expresión condicional “if” se verifica si la velocidad en el eje  $x$  es mayor a la  $v_{max}$  entonces  $U(x) = v_{max}$  ó si la velocidad en el eje  $x$  es menor a la  $v_{max}$ , entonces  $U(x) = -v_{max}$  de la misma manera se hace para la velocidad en  $y$ , y la velocidad angular  $\omega$ . En la figura 8 se muestra como las velocidades son saturadas en 0.4 a través de las entradas de control en  $v_x, v_y$  y  $\omega$

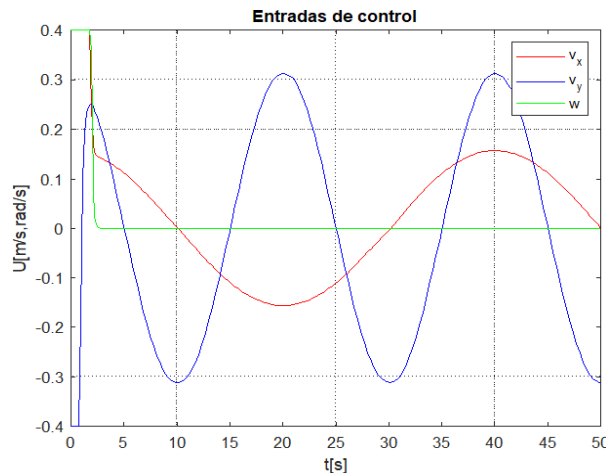
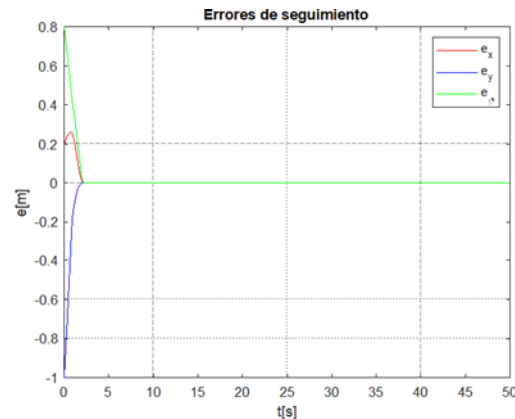


Figura 8. Saturación de la v<sub>max</sub> del robot (3,0).

Así mismo el error de seguimiento se muestra en la figura 8 donde se observa que a los 2.5 seg aproximadamente los errores convergen a 0.



**Figura 9.** Convergencia a 0 de los errores de seguimiento del robot (3,0)

## Conclusiones

Se reconoció que el robot omnidireccional tiene una gran facilidad de realizar maniobras en el plano ya que por medio de sus ruedas no necesita hacer un giro previo para poder moverse en cualquier dirección.

Se realizó en simulink cumpliendo con los requerimientos deseados, para obtener la trayectoria deseada del robot, saturación de la  $v_{max}$  del robot y la convergencia de 0 de los errores de seguimiento del robot.

## Referencias

- Bräunl, T. (2022). Driving robots. In *Embedded Robotics: From Mobile Robots to Autonomous Vehicles with Raspberry Pi and Arduino* (pp. 175-208): Springer.
- Chapman, B. (2010). When clouds become green: the green open cloud architecture. *Parallel Computing: From Multicores and GPU's to Petascale*, 19, 228. Retrieved from <https://hal.inria.fr/enst-00484321/file/Parco2009-fullversion.pdf>
- Dickerson, S. L., & Lapin, B. D. (1991). *Control of an omni-directional robotic vehicle with Mecanum wheels*. Paper presented at the NTC'91-National Telesystems Conference Proceedings.
- Diegel, O., Badve, A., Bright, G., Potgieter, J., & Tlale, S. (2002). *Improved mecanum wheel design for omni-directional robots*. Paper presented at the Proc. 2002 Australasian conference on robotics and automation, Auckland.
- Doroftei, I., Grosu, V., & Spinu, V. (2007). *Omnidirectional mobile robot-design and implementation*: INTECH Open Access Publisher London, UK.
- El-Refaie, A. M., Jahns, T. M., & Novotny, D. W. (2006). Analysis of surface permanent magnet machines with fractional-slot concentrated windings. *IEEE Transactions on Energy conversion*, 21(1), 34-43. Retrieved from [https://minds.wisconsin.edu/bitstream/handle/1793/11126/file\\_1.pdf?sequence=1](https://minds.wisconsin.edu/bitstream/handle/1793/11126/file_1.pdf?sequence=1)
- Flores Aldás, C. E., & Romero Saltos, J. M. (2019). *Desarrollo de un robot móvil autónomo, para el transporte y reparto de paquetería liviana en Laar Courier*. Retrieved from <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/17151/1/UPS-ST004086.pdf>

- Goris, K. (2005). Autonomous mobile robot mechanical design. *Vrije Universiteit Brussel, Engineering Degree Thesis, Brussels, Belgium*. Retrieved from [http://mech.vub.ac.be/multibody/final\\_works/ThesisKristofGoris.pdf](http://mech.vub.ac.be/multibody/final_works/ThesisKristofGoris.pdf)
- Hassani, I., Maalej, I., & Rekik, C. (2018). Robot path planning with avoiding obstacles in known environment using free segments and turning points algorithm. *Mathematical Problems in Engineering, 2018*. Retrieved from <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2018/2163278/>
- He, C. (2018). Design of High Efficiency Brushless Permanent Magnet Machines and Driver System. Retrieved from <https://stars.library.ucf.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=7238&context=etd>
- Jimbo Tacuri, J. E. (2015). *Caracterización del funcionamiento de un motor eléctrico de corriente continua sin escobillas Brushless con 1000 Watts de potencia*. Retrieved from <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7891/1/UPS-CT004742.pdf>
- Mar, O., Gulín González, J., & Santana Ching, I. (2021). Sistema de Laboratorios Remoto para las prácticas de control de la carrera de Ingeniería en Automática. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas, 15(2)*, 77-95.
- Mar, O., Jorge Gulín , Ivan Santana , & Bron., B. (2020). Remote Laboratory System for Automatic Engineering. *International Journal of Wireless and Ad Hoc Communication, 1(2)*, 55-63.
- Meneses, G. A., Pereira, A., & Menezes, I. F. (2018). Lattice structures design by means of topology optimization. *Mecánica Computacional, 36(46)*, 2111-2120. Retrieved from <https://amcaonline.org.ar/ojs/index.php/mc/article/download/5741/5723>
- Numan, D., Rodrigo, A., & Esteban, C. (2016). A computer-simulated environment for modeling and dynamic-behavior-analysis of special brushless motors for mechatronic mobile robotics systems. *IFAC-PapersOnLine, 49(29)*, 12-17. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896316324867>
- Paniagua Jaramillo, J. L. (2015). *Diseño e implementación de un sistema de control que permita integrarse con diferentes tipos de robot móviles terrestres*. Universidad Autónoma de Occidente, Retrieved from <https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/7757/T05805.pdf?sequence=1>
- Schiferl, R. F., & Lipo, T. A. (1990). Power capability of salient pole permanent magnet synchronous motors in variable speed drive applications. *IEEE Transactions on Industry Applications, 26(1)*, 115-123. Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/52682/>
- Wada, M., & Mori, S. (1996). *Holonomic and omnidirectional vehicle with conventional tires*. Paper presented at the Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation.
- Yu, H., Spenko, M., & Dubowsky, S. (2004). Omni-directional mobility using active split offset castors. *J. Mech. Des., 126(5)*, 822-829. Retrieved from <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=86e3c2ecc0f5fcf56cbbac71814f4c7aa76e3c1>
- Zambrano Pérez, V. D. (2015). *Implementación de algoritmos de determinación de rutas para el robotino® de festo*. Retrieved from <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/11042/1/CD-6369.pdf>