

Implementación de algoritmos de navegación en un robot diferencial Turtlebot 2 empleando una Jetson Nano

Salado, K. I.¹, Ramírez, O. D.², Arias, J. A.³

<https://doi.org/10.56643/Editorial.LasalleOaxaca.22.c118>

Cómo citar:

Salado, K. I., Ramírez, O. D., Arias, J. A. (2025). Implementación de algoritmos de navegación en un robot diferencial Turtlebot 2 empleando una Jetson Nano. *Memorias del Congreso Estatal de Género y Humanidades, Ciencias, Tecnologías e Innovación 2024*. 10-27. Editorial Universidad La Salle Oaxaca.
<https://10.56643/Editorial.LasalleOaxaca.22.c118>

Resumen

Este trabajo presenta la implementación de una computadora NVIDIA Jetson Nano, basada en arquitectura ARM, que utiliza un conjunto reducido de instrucciones para controlar la velocidad angular y lineal de un robot diferencial *TurtleBot 2* (Kobuki), con el objetivo de ejecutar algoritmos de navegación autónoma. El uso de la *Jetson Nano* permite establecer una conexión inalámbrica entre la computadora y el *TurtleBot 2*, facilitando la transferencia eficiente de información y el procesamiento de datos. Además, esta implementación amplía el área operativa del robot, limitada únicamente por el alcance de la red Wi-Fi disponible. Los resultados

¹ Universidad Tecnológica de la Mixteca. itzchav3001@gmail.com

² Universidad Tecnológica de la Mixteca. odramirez@mixteco.utm.mx

³ Universidad Tecnológica de la Mixteca. anibal@mixteco.utm.mx

obtenidos al aplicar tanto la técnica deliberativa como la técnica reactiva demuestran la capacidad del robot para desplazarse de manera efectiva en entornos diversos, incluso bajo condiciones variables.

Palabras clave: Jetson Nano, Campos Potenciales, PRM

Introducción

Los robots manipuladores se introdujeron en la industria con el propósito de realizar tareas repetitivas, sin embargo, tienen un espacio de trabajo limitado por la extensión máxima de sus articulaciones. Sin embargo, con el objetivo de ampliar el área de trabajo de los robots industriales, se desarrollaron los primeros robots móviles, conocidos como Vehículos Guiados Automáticamente (AGV, por sus siglas en inglés), fueron diseñados para proporcionar un transporte eficiente. Estos robots se encontraban limitados a ejecutar una secuencia de acciones programadas y carecían de la capacidad de adaptarse a diferentes situaciones. Sin embargo, durante los años noventa se comenzaron a desarrollar vehículos capaces de operar en entornos diversos, los cuales presentaban un mayor grado de inteligencia y percepción, lo que les permitía desplazarse en entornos no estructurados y adaptarse a condiciones variables (Tapia y López, 2017).

Un robot móvil se define como un sistema electromecánico capaz de desplazarse de manera autónoma utilizando dispositivos de locomoción, el cual cuenta con sensores que monitorean su posición relativa al origen y al destino, así como percibir su entorno, y generalmente se realiza el control en lazo cerrado (Sotelo

et al., 2007). Existen diferentes niveles de autonomía en los robots móviles, los cuales dependen de su capacidad para adquirir información del entorno, procesar señales y ejecutar acciones sin intervención humana. Estas habilidades incluyen la percepción, el modelado, la planificación y la interacción con el entorno con el fin de alcanzar objetivos específicos (Valadez, 2018), (Zghair y Al-Araji, 2021), (da Costa y Pereira, 2021).

Entre las configuraciones más utilizadas en los robots móviles destaca la configuración diferencial, basada en la diferencia de velocidades entre las ruedas laterales en un solo eje. Esta configuración permite propulsar y controlar las ruedas de manera independiente, proporcionando tracción y dirección al robot. Gracias a esta característica, el robot puede cambiar su orientación sin necesidad de realizar movimientos de traslación (Valencia et al., 2009), (Pérez et al., 2021).

El robot diferencial *Turtlebot 2*, ubicado en la División de Estudios de Posgrado de la Universidad Tecnológica de la Mixteca, se especializa en el desarrollo de algoritmos de navegación, se implementó una técnica deliberativa (Mapa de Ruta Probabilística, mejor conocido como PRM) y una reactiva (campos potenciales). Para ello fue necesario implementar un módulo *NVIDIA Jetson Nano* de tamaño reducido. Esta actualización posibilitó el control inalámbrico de la velocidad angular y lineal del robot, mejorando su rendimiento y ampliando su área de acción según la red Wi-Fi disponible. Se realizaron ajustes estéticos, incluyendo elementos de color rosa para destacar la contribución de las mujeres en el desarrollo tecnológico.

Objetivo

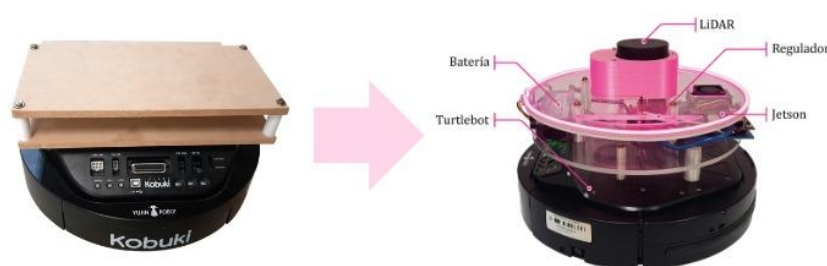
Implementar una técnica de navegación deliberativa y navegación reactiva en un robot móvil en configuración diferencial.

Desarrollo

Se hicieron adaptaciones en el *Turtlebot 2*, como se muestra en la Figura 1, se cambiaron las bases de MDF, por acrílico, posteriormente se implementó un LiDAR el cual es un sensor láser el cual realiza 1147 lecturas en un rango de 360°, con una distancia de medición de 0.15m a 12m. Proporciona un vector con las mediciones tomadas cada 0.26°. Así mismo se implementaron los algoritmos en una *Nvidia Jetson Nano*, la cual es una computadora pequeña que tiene capacidad de procesamiento en tiempo real.

Figura 1.

Mejoras del robot diferencial Turtlebot 2



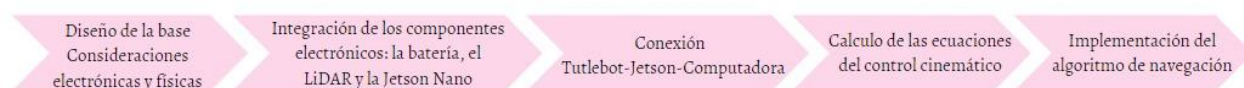
Una vez realizada la implementación se estableció una conexión Wi-Fi mediante las direcciones IP estáticas de la *Jetson Nano* y la computadora principal por medio de un modem. Finalmente, una vez establecida la conexión *Turtlebot 2* -

Jetson - Computadora, se ejecutó el programa de navegación en la computadora realizará el procesamiento y enviará los datos a la *Jetson Nano* para controlar el movimiento del robot a través de la conexión Wi-Fi.

Metodología

Figura 2.

Metodología



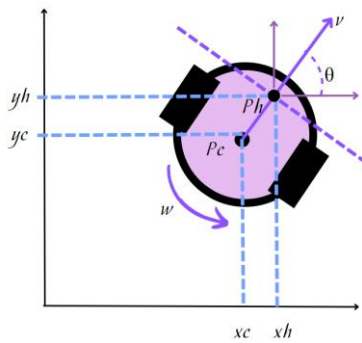
Las etapas de las adaptaciones físicas para la implementación de los algoritmos de navegación se muestran en la Figura. 2. Primero, fue necesario diseñar la base, para lo cual se tuvo que considerar la distribución de los elementos electrónicos y las características físicas del sensor y del robot. Una vez realizada la base, se integraron los componentes electrónicos y se llevaron a cabo las conexiones físicas. Posteriormente, se realizó la conexión entre la *Jetson Nano* y el *TurtleBot 2*, para lo cual fue necesario crear el nodo maestro. Se conectó la *Jetson Nano* a la computadora vía Wi-Fi. Para mover el robot de un punto a otro, se requirió realizar el control desde un punto fuera del centro, por lo que se calcularon las ecuaciones para el control cinemático, tanto para el control mediante campos potenciales como para desplazar el robot a los puntos deseados de la trayectoria.

Modelo y control cinemático

Para el desarrollo de este trabajo, fue necesario obtener el modelo y el control cinemático del robot móvil diferencial, posteriormente se realizó el método de campos potenciales y el mapa de ruta probabilística PRM. Mediante el diagrama mostrado en la Figura 3, el cual representa el robot móvil en configuración diferencial (RMD).

Figura 3.

Modelo del robot en configuración diferencial



El modelo cinemático en un punto de operación arbitrario h (P_h) se representa mediante la ecuación:

$$\begin{aligned} \dot{x}_h &= v \cos \theta - h\omega \sin \theta \\ \dot{y}_h &= v \sin \theta + h\omega \cos \theta \end{aligned}$$

donde x_h y y_h representan las velocidades del punto h en los ejes coordenados x y y , respectivamente. Por otro lado, v y ω denotan las velocidades lineal y angular del robot. Además, θ_h corresponde al ángulo de dirección formado entre la velocidad lineal v y el eje coordenado x . $u_x = \dot{x}_h = -k(x - x_d)$ y $u_y = \dot{y}_h = -k(y - y_d)$, donde

$[x, y]$ son las posiciones del robot en el plano, y $[x_d - y_d]$ la posición deseada, el modelo cinemático inverso queda expresado en la siguiente ecuación.

$$v = u_x \cos \theta + u_y \sin \theta$$

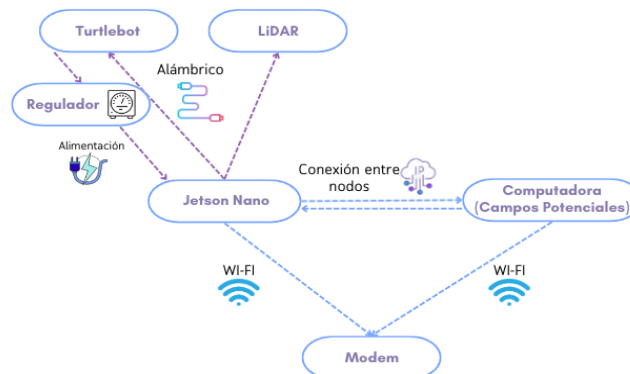
$$\omega = (-u_x \sin \theta + u_y \cos \theta) / h$$

Campos Potenciales

Para la implementación de Campos potenciales se realizó de acuerdo al diagrama de la Figura 4, en el cual se pueden observar las conexiones de físicas y la comunicación necesaria para ejecutar el programa de campos potenciales en una computadora, y a través de los tópicos enviados vía Wi-Fi a la Jetson nano, controlar el robot.

Figura 4.

Diagrama de conexión para Campos Potenciales



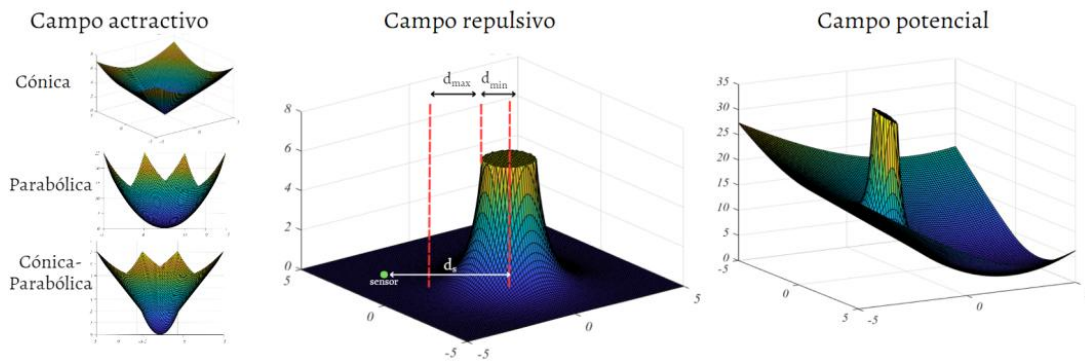
El método de Campos potenciales utiliza dos funciones principales: el gradiente de la función de campo atractivo ($\nabla U_{atrac}(q)$), que guía al robot hacia un punto objetivo deseado, y el gradiente de la función de campo repulsivo ($\nabla U_{rep}(q)$), que se activa cuando el robot detecta un obstáculo a una distancia determinada (Duhé,

Victor, y Melchior, 2021). Como se muestra en la Figura 5. De esta manera, el campo potencial total ($F_{total}(q)$) se define mediante la siguiente ecuación:

$$F_{total}(q) = -\nabla U_{atrac}(q) + \nabla U_{rep}(q) = \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix}$$

Figura 5.

Campos potenciales



Campo Atractivo

El campo atractivo se encarga de guiar al robot hacia un punto objetivo deseado. En la Figura 5, se muestra el comportamiento de los campos atractivos según la geometría esta afectará el comportamiento del robot, una geometría cónica permite llegar rápidamente a la referencia, pero de manera abrupta, mientras que una geometría parabólica permite que el robot llegue de forma más suave. Al combinar estas dos técnicas, es posible llegar rápido a la referencia de manera suave (Salado Chávez, Martínez Hernández, Ramírez Cárdenas, y Arias Aguilar, 2023). Las ecuaciones para calcular el campo atractivo dependiendo de la geometría deseada se definen en la ecuación

$$\nabla U_{atrac}(q) = \begin{cases} \begin{bmatrix} K_{atrac}(x_h - x_d) \\ K_{atrac}(y_h - y_d) \end{bmatrix} & si \quad d < Q_d \\ \begin{bmatrix} \frac{Q_d K_{atrac}(x_h - x_d)}{d} \\ \frac{Q_d K_{atrac}(y_h - y_d)}{d} \end{bmatrix} & si \quad d > Q_d \end{cases}$$

Campo Repulsivo

En relación al campo repulsivo, se define una distancia mínima (d_{min}) y una distancia máxima (d_{max}) a las cuales dicho campo afecta al robot, como se ilustra en la Figura 4. Cuando la distancia entre el robot y el objeto (distancia de detección del sensor, ds) supera la distancia máxima, el valor del campo repulsivo se vuelve cero, indicando que no hay influencia repulsiva en ese rango (Duhé, Victor, & Melchior, 2021). Por otro lado, cuando (ds) se encuentra entre la distancia mínima y la distancia máxima, el campo potencial tiene un perfil como el mostrado en la ecuación:

$$\nabla U_{rep}(q) = \begin{cases} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} & en \quad otro \quad caso \\ \begin{bmatrix} -\frac{K_{rep}x_{si}}{d_{si}^3} \left(\frac{1}{d_{si}} - \frac{1}{d_{max}} \right) \\ -\frac{K_{rep}y_{si}}{d_{si}^3} \left(\frac{1}{d_{si}} - \frac{1}{d_{max}} \right) \end{bmatrix} & si \quad d_{min} < d_{si} < d_{max} \end{cases}$$

PRM

El algoritmo de Hoja de Ruta Probabilística (PRM), propuesto por Kavraki en 1996 (Kavraki et al., 1996), se utiliza para generar rutas libres de obstáculos en el entorno previamente mapeado. Este algoritmo consta de crear un gráfico de red

compuesto por nodos y conexiones entre estos nodos en áreas libres de colisiones. Y posteriormente se buscan los mejores nodos conectados que van desde el punto inicial hasta la posición objetivo (Alpkiray et al., 2018)

Primero fue necesario obtener una imagen del entorno, se procesa la imagen, y se genera una representación discreta mediante una cuadrícula binaria. Esta representación se obtiene utilizando el mapa preprocesado y definiendo un tamaño de celda apropiado. Cada celda en la cuadrícula puede estar marcada como ocupada o desocupada, lo que permite representar el entorno de manera estructurada. En la fase de consulta, se encuentran trayectorias seguras y eficientes que permitan al robot moverse desde un punto de inicio hasta un punto objetivo en el entorno definido. Para ejecutarlo en el *Turtlebot 2* se realizaron las conexiones como se muestra en la Figura 6.

Se obtuvo la imagen del entorno y se procesó como se muestra en la Figura 7. En la etapa de establecimiento de los puntos de inicio y fin, se llevó a cabo una conversión precisa de píxeles a metros. Para esto, se tomó en consideración la medida física del área delimitada en la imagen después de aplicar la corrección de perspectiva, la cual abarcaba un espacio de 3.06 metros en el eje x y 2.72 metros en el eje y. Mediante una simple división, se obtuvo que en el eje x correspondían 1593 píxeles y en el eje y 1200 píxeles.

Figura 6.

Diagrama de conexión PRM

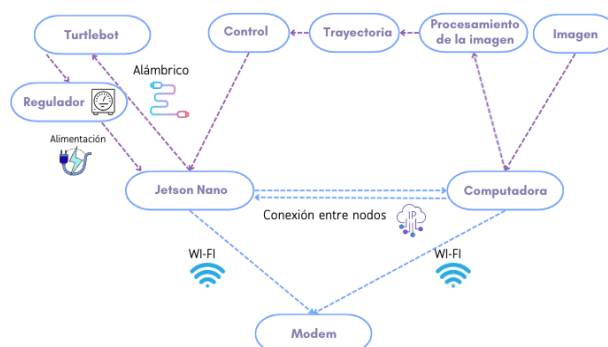


Figura 7.

Procesamiento de imagen



Una vez obtenida la imagen binarizada, se convierte en un mapa de rejillas, donde el algoritmo PRM genera nodos aleatorios que representan posibles ubicaciones en el espacio libre, se establecen conexiones entre ellos con PRM. Estas conexiones se crean si la distancia entre dos nodos es menor que la distancia máxima de conexión establecida. Dichas conexiones representan las posibles trayectorias que el robot puede seguir para moverse de un nodo a otro. El algoritmo de PRM construye un espacio libre mediante muestreo aleatorio y planificando rutas globales sin colisiones.

Resultados y discusión

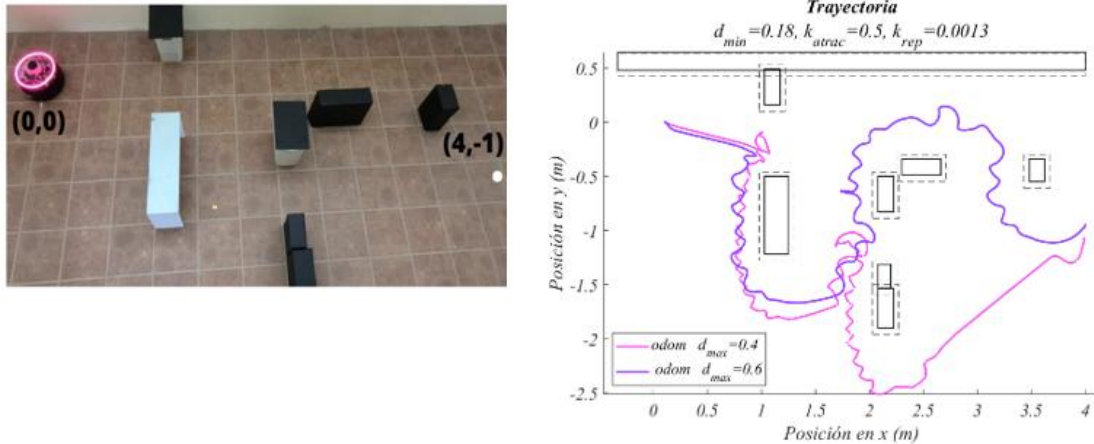
Campos Potenciales

Los campos potenciales se probaron en el entorno, con el objetivo de evaluar el comportamiento del sistema del robot en la computadora *Jetson Nano* y la calidad de la conexión inalámbrica al procesar desde otro punto. Se buscó que el entorno en el que se implementó el algoritmo fuera lo más controlado posible. De esta manera, los objetos se mantuvieron en la misma posición en todas las pruebas, y se evitó la presencia de elementos dinámicos que pudieran interferir con la trayectoria del robot, con el fin de observar que los parámetros funcionaran correctamente.

La Figura 8 muestra la trayectoria del punto h durante la ejecución del programa en la implementación en el entorno, se realizaron dos pruebas con una distancia máxima de colisión diferente, para observar el comportamiento del robot, esto provoca que el robot se desplace de forma diferente, debido a la distancia entre los obstáculos. Se puede apreciar que el robot no colisiona con los objetos y llega al punto deseado.

Figura 8.

Resultados Campos Potenciales

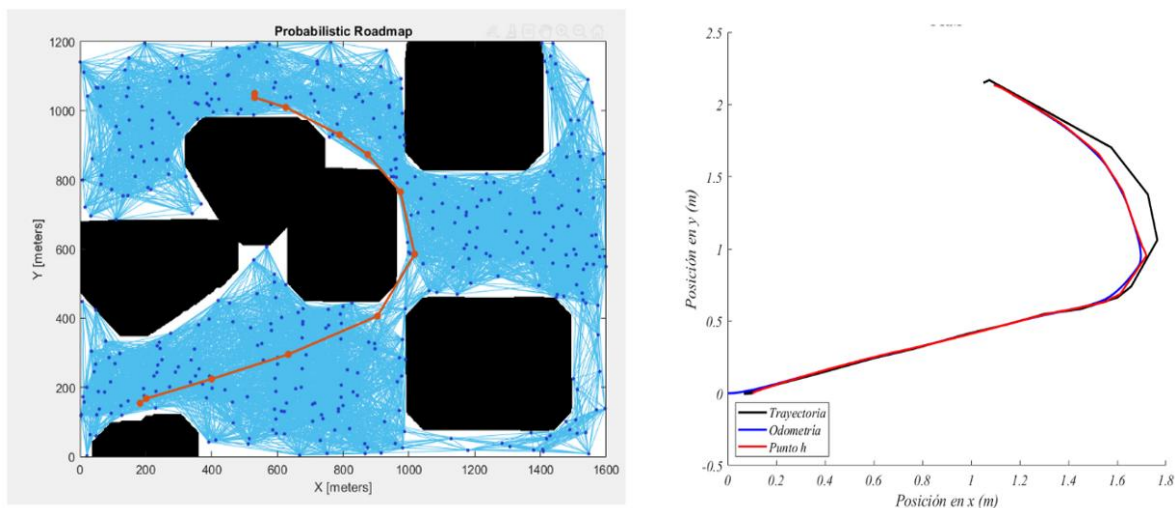


PRM

El algoritmo de planificación de ruta probabilística (PRM) se configuró con 400 nodos y una distancia de conexión de 300 píxeles para obtener una trayectoria óptima y segura. La trayectoria se guarda como un vector y aplicando el control cinemático cada punto del vector es el nuevo punto deseado, de esta forma se realiza el recorrido. En la Figura 9 se puede observar la trayectoria deseada, a lo largo de la cual, el *Turtlebot 2* se posicionó en varios puntos, empleando el control cinemático como se muestra en la Figura 9.

Figura 9.

Resultados PRM



Conclusiones

Este estudio ha demostrado la efectividad de implementar dos técnicas de navegación autónoma. En cuanto a la técnica deliberativa, basada en el algoritmo PRM (Probabilistic Roadmap), se observó que al obtener información externa del entorno y procesar imágenes, es posible generar trayectorias eficientes. La implementación del PRM ha mostrado ser eficaz para la planificación de rutas óptimas y seguras, considerando la evasión de obstáculos en el TurtleBot. Sin embargo, esta técnica tiene la limitación de no reaccionar de manera dinámica ante cambios imprevistos en el entorno. Por otro lado, la técnica reactiva, que utiliza el LiDAR, permite al robot responder de manera inmediata a elementos variables en su entorno. En este caso, se implementó un sistema de control basado en campos

potenciales, lo que permitió al TurtleBot 2 adaptarse a condiciones cambiantes en tiempo real.

Finalmente, la conexión inalámbrica entre la *Jetson Nano* y la computadora amplió el área de trabajo del robot sin necesidad de instalar una computadora en el propio robot o utilizar conexiones por cable, lo que mejora su flexibilidad operativa.

Referencias

- Alpkiray, N., Torun, Y., y Kaynar, O. (2018). Cooperación entre el algoritmo de mapa probabilístico y el algoritmo de colonia de abejas artificiales para la planificación de rutas. *2018 International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing (IDAP)*. 1-6. IEEE.
- da Costa, I. R. (2021). Sistemas robóticos móviles para el cumplimiento de pedidos: Revisión de avances recientes y oportunidades de investigación. *Robotics and Autonomous Systems*. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2021.103729>
- Duhé, J. F., Victor, S., y Melchior, P. (2021). C Contribuciones sobre el método de campo potencial artificial para la evitación efectiva de obstáculos. *Fractional Calculus and Applied Analysis*, 421--446.
- Kavraki, L. E., Svestka, P., Latombe, J.-C., y Overmars, M. H. (1996). Mapas probabilísticos para la planificación de rutas en espacios de configuración de alta dimensionalidad. *IEEE transactions on Robotics and Automation*, 566-580.
- Pérez, I. A. (2021). Robot móvil de tracción diferencial con plataforma de control modular para investigación y desarrollo ágil de proyectos. *10 congreso Nacional de Mecatrónica-Puerto Vallarta. Puerto Vallarta*.
<https://www.mecatronica.net/emilio/ArtCongNac/30-2011.pdf>
- Salado Chávez, K. I., Martínez Hernández, F. E., Ramírez Cárdenas, O. D., y Arias Aguilar, J. A. (2023). Implementación de campos potenciales en un robot móvil

diferencial. (TurtleBot2). 2023 XXV Robotics Mexican Congress (COMRob), 62-67

Sotelo, V. R., Sánchez, J. R., y Ortigoza, R. S. (2007). Robots móviles: Evolución y estado del arte. *Polibits*, 12-17.

Tapia, M. R. (2017). Robótica móvil. Jóvenes en la ciencia: revista de divulgación científica, 3, 2526-2530. Obtenido de <file:///C:/Users/000001224/Downloads/helguera,+2046-6851-1-CE.pdf>

Valadez, E. (2018). Simulación del movimiento de un vehículo terrestre para trayectorias programadas aplicando control difuso. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. <https://hdl.handle.net/20.500.12371/8773>

Valencia, J. A. (2009). Modelo cinemático de un robot móvil tipo diferencial y navegación a partir de la estimación odométrica. *Scientia et technica*, 41. <https://doi.org/10.22517/23447214.2907>

Zghair, N. A. y Al-Araji, A. (2021). Una encuesta de una década sobre sistemas de robots móviles autónomos. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 11(6), 4891-4906. <http://doi.org/10.11591/ijece.v11i6.pp4891-4906>

Derechos de Autor © 2025 por Karla Itzel Salado Chávez, Oscar David Ramírez
Cárdenas y José Anibal Arias Aguilar



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Usted es libre para Compartir —copiar y re-distribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de: Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.