

Jornadas de Automática

Control de conjuntos diferenciales *brushless* integrados en plataforma omnidireccional

Nájera, S.^{a,*}, Ezquerro, M.A.^a, Falces, A.^b, Rico-Azagra, J.^a, Ferreiro-Cabello, J.^c, Fraile-García, E.^c

^a Grupo de Ingeniería de Control, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de La Rioja, Edificio Departamental - C/San José de Calasanz, 31, 26004 Logroño, La Rioja, España.

^b Grupo de Planificación, Operación y Control de Sistemas de Energía Eléctrica, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de La Rioja, Edificio Departamental - C/San José de Calasanz, 31, 26004 Logroño, La Rioja, España.

^c Grupo ScoDIP, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de La Rioja, Edificio Departamental - C/San José de Calasanz, 31, 26004 Logroño, La Rioja, España.

To cite this article: Nájera, S., Ezquerro, M.A., Falces, A., Rico-Azagra, J.A., Ferreiro-Cabello, J., Fraile-García, E. 2024. *Brushless* differential set control integrated into an omnidirectional platform. *Jornadas de Automática*, 45. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2024.45.10905>

Resumen

Actualmente, se hacen necesarios sistemas de transporte autónomos conocidos como Vehículos Autónomos Guiados (AGV) para muchas aplicaciones. En muchos casos nos encontramos con que las plataformas móviles ya existen, pero se utilizan de forma manual. Un paso previo a la plataforma autónoma es la electrificación. En este artículo se propone un sistema formado por un conjunto de ruedas, motores y controladores, que pueden incorporarse de forma sencilla y económica a plataformas de tracción manual ya existentes, convirtiéndolas en plataformas de tracción eléctrica. Un enfoque tanto desde el diseño del conjunto como desde el control del mismo, demuestra su viabilidad y funcionamiento. Se muestra un ejemplo de adecuación a una plataforma de cuatro ruedas, sustituyendo exclusivamente dos de ellas por conjuntos electrificados, permitiendo libertad total de movimientos y rotación sobre sí misma. El sistema presentado hace uso de motores *brushless* con sensores tipo *hall*, controladores para motores *brushless*, *encoders* y una arquitectura tipo maestro-esclavo para la comunicación entre los conjuntos motrices.

Palabras clave: Tecnología robótica, Robots móviles, Modelado, Movilidad urbana, Control de movimiento, Diseño mecánico de vehículos autónomos, Mecatrónica para Sistemas de Movilidad.

Brushless differential set control integrated into an omnidirectional platform

Abstract

Currently, autonomous transportation systems known as Autonomous Guided Vehicles (AGV) are necessary for many applications. In many cases we find that mobile platforms already exist, but are used manually. A previous step to the autonomous platform is electrification. This article proposes a system consisting of a set of wheels, motors and controllers, which can be easily and economically incorporated into existing manual traction platforms, converting them into electric traction platforms. An approach from both the design of the complex and its control demonstrates its viability and operation. An example of adaptation to a four-wheel platform is shown, replacing only two of them with electrified sets, allowing total freedom of movement and rotation on itself. The system presented makes use of brushless motors with hall-type sensors, controllers for brushless motors, encoders and a master-slave architecture for communication between the motor sets.

Keywords: Robotics technology, Mobile robots, Modeling, Urban Mobility, Motion control, Mechanical design of autonomous vehicles, Mechatronics for Mobility Systems.

1. Introducción

Tanto en áreas industriales como en medicina, educación, servicios terciarios o investigación, se emplean cada vez más vehículos guiados de forma autónoma (AGV) (Abajo et al., 2022) (Espinosa et al., 2021), ya que ofrecen versatilidad para una amplia gama de trabajos. Sin embargo, actualmente muchos trabajos de transporte de cargas se siguen realizando mediante plataformas manuales. La evolución tecnológica de estas plataformas mediante la incorporación de sistemas de tracción eléctrica, y su control posterior, han permitido alcanzar el nivel de autonomía que nos proporcionan los AGVs actualmente (Sierra-García et al., 2020). El coste de adquisición de un AGV completo, diseñado específicamente para un determinado objetivo puede ser considerable, especialmente para transportar cargas pesadas. Sin embargo, una alternativa a valorar frente a la adquisición de un AGV, puede ser una primera electrificación de las plataformas ya existentes. Esta opción puede proporcionar beneficios directos como el ahorro en la inversión, permitiendo en primera instancia descargar al operario de gran parte del trabajo. Además, también puede lograrse la autonomía del transporte, implementando posteriormente los sistemas de control necesarios para el guiado autónomo (Argente-Mena et al., 2023), sobre estas plataformas previamente electrificadas.

Las plataformas de transporte más habituales actualmente poseen 4 ruedas giratorias de tipo *castor* (su eje de giro se encuentra desplazado respecto al eje vertical de rotación) como en la Figura 1, aunque también se encuentran plataformas mixtas con ruedas fijas y *castor*.



Figura 1: Plataforma manual 4 ruedas *castor*.

Una opción para la electrificación de estas plataformas reside en la sustitución de sus 4 ruedas por ruedas motorizadas direccionables para conseguir 3 grados de libertad (sistema holónimo) (Ollero, 2007), permitiendo desplazamientos en cualquier dirección y giro sobre si misma. Sin embargo, esta modificación representa un alto coste y dificultad de montaje y control debido al elevado número de dispositivos. Además, el correcto control de tracción de estos dispositivos es crucial para un funcionamiento adecuado.

Existen sistemas de tracción diferencial conformados por pares de ruedas de tracción, que se orientan mediante un servomotor para proveer la orientación necesaria a la plataforma (Macfarlane et al., 2024). Este sistema obliga a sustituir las 4 ruedas para mantener los grados de libertad de la plataforma y complica la adaptación de la misma.

También existe la posibilidad de sustituir las ruedas existentes por ruedas universales o ruedas suecas, que proporcionan 3 grados de libertad gracias a su diseño, sin necesidad de orientación de las mismas (Klancar et al.,

2017). Sin embargo, este sistema a pesar de ser más flexible y resistente, es más complejo de adaptar en sistemas ya existentes, menos eficiente y más caro.

Por otro lado, existen otras alternativas (Mandow et al., 1996) (Ollero et al., 1993) que implican restricciones y, por tanto, son sistemas no holonómicos. Ambas configuraciones responden a una disposición rómbica según la Figura 2. Poseen 4 ruedas dispuestas en las diagonales del rombo, siendo la diagonal principal, el eje longitudinal de la plataforma. Las dos ruedas de la diagonal principal son actuadas en orientación y las otras 2 ruedas son fijas motrices. Este sistema permite movimientos en modo diferencial y en modo maniobra, coordinando las consignas de las 4 ruedas.

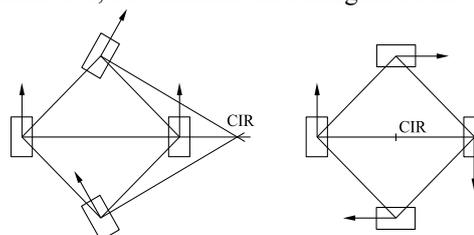


Figura 2: Configuración en rombo. (a) locomoción modo diferencial. (b) locomoción modo maniobra.

En este trabajo se introduce un novedoso sistema para convertir plataformas manuales de 4 ruedas en plataformas electrificadas con 3 grados de libertad, mediante la sustitución de solamente dos de sus ruedas por conjuntos de tracción diferencial compactos y económicos, conformados con motores *brushless*. También se propone un esquema comunicación y su sistema de control para el correcto funcionamiento del conjunto completo.

En los siguientes apartados se explica el diseño del sistema, el modelo basado en las ecuaciones de movimiento de un sistema de tracción diferencial y el control propuesto. Finalmente, la última sección reúne las conclusiones y los trabajos futuros.

2. Plataforma móvil adaptada

La solución propuesta se desarrolla teniendo en cuenta los siguientes objetivos:

- Obtener la mayor flexibilidad de movimientos.
- Simplificar y facilitar la adaptación de la plataforma.
- Mejorar económicamente otras propuestas.
- Simplificar los sistemas de control.
- Proveer fiabilidad y facilidad de mantenimiento.

Tabla 1: Características robot omnidireccional vs robot de tracción diferencial.

Capacidad	Robot Omnidireccional	Robot de tracción diferencial
Movimiento	En cualquier dirección sin necesidad de girar	Hacia adelante o atrás y girar sobre su eje
Maniobrabilidad	Excelente	Media
Complejidad mecánica	Alta	Media
Control	Más complejo	Menos complejo
Velocidad	Baja	Media
Costo	Alto	Bajo
Capacidad de carga	Media	Alta
Precisión	Alta	Moderada

Una vez analizadas las plataformas más comunes, podemos distinguir aquellas que son omnidireccionales como muestra la [Figura 3](#) (proveen movimientos en cualquier dirección y giro, no necesitando orientarse previamente), y las que no lo son (necesitando orientarse previamente para poder desplazarse) como las conformadas por sistemas diferenciales según la [Figura 4](#) ([Sánchez et al., 2021](#)).

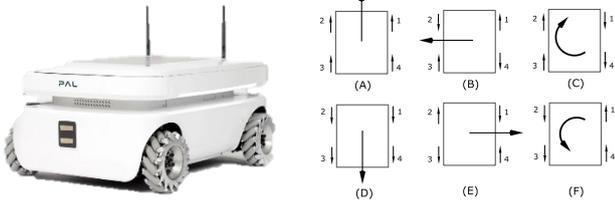


Figura 3: Plataforma omnidireccional TIAGo OMNI Base.

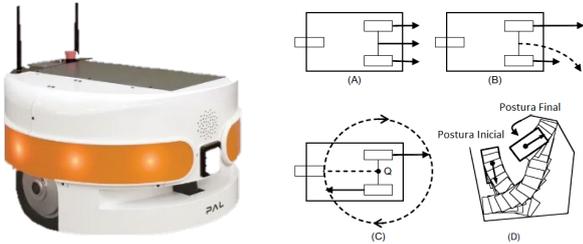


Figura 4: Plataforma diferencial TIAGo Base.

La solución desarrollada se centra en proveer capacidad de omnidireccionalidad a una plataforma existente de 4 ruedas, minimizando el número de elementos a instalar y simplificándolos lo máximo posible para favorecer los objetivos citados anteriormente.

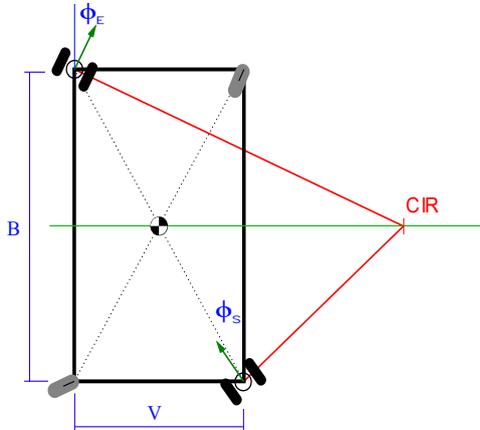


Figura 5: Plataforma adaptada de 4 ruedas (2 libres castor y 2 tractoras direccionables).

La plataforma de 4 ruedas una vez adaptada, integra 2 conjuntos de tracción tal como se muestra en la figura 5. La principal ventaja es que solo se deben sustituir dos ruedas para mantener los grados de libertad que ya posee, y por tanto su omnidireccionalidad. Esto implica un menor coste, una mayor facilidad de montaje e implementación para la comunicación entre los elementos, y también un sencillo sistema de control para su locomoción, frente a otras propuestas comentadas anteriormente.

De la misma forma que las plataformas rómbicas, posee dos modos de locomoción, el modo diferencial y el de maniobra. Sin embargo, el control se reduce a la coordinación de 2 elementos y no 4, lo que simplifica el sistema.

Dependiendo del punto de guiado del vehículo, la obtención del modelo cinemático puede ser complicada ya que el centro instantáneo de rotación o CIR puede no estar en el mismo eje transversal del vehículo, en función de los ángulos de orientación de los conjuntos tractoros. Para reducir el problema a la hora de maniobrar, se propone controlar el giro de la plataforma mediante la orientación del conjunto tractor delantero o ángulo de entrada ϕ_E . Se busca a su vez mantener el CIR contenido en el eje transversal de la plataforma que pasa por el centro de gravedad del conjunto para facilitar su maniobrabilidad. Para ello, el ángulo aplicado al conjunto tractor trasero ϕ_S vendrá determinado de tal forma que este conjunto tractor se oriente con respecto al mismo CIR que el conjunto tractor delantero, según la [Figura 5](#). La relación existente entre el giro de los dos conjuntos tractoros (delantero y trasero) está determinada por la expresión:

$$\phi_S = \text{atan} \left(\frac{B \cdot \tan(\phi_E)}{B - 2 \cdot V \cdot \tan(\phi_E)} \right) \quad (1)$$

Por lo tanto, será suficiente una única consigna de orientación para poder realizar el control de giro de la plataforma.

De la misma forma, se puede obtener la velocidad de cada conjunto tractor (v_E y v_S) necesaria para rotar la plataforma sobre su CIR. Esto permitirá evitar deslizamientos entre los conjuntos tractoros. La relación existente entre las velocidades de los dos conjuntos tractoros está determinada por la expresión:

$$v_S = v_E \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{B^2}{\cos(2 \cdot \Phi_E) - 1}}}{\sqrt{\frac{(B - 2 \cdot V \cdot \tan(\Phi_E))^2}{\tan(\Phi_E)^2} + B^2}} \quad (2)$$

Teniendo en cuenta una carga uniformemente repartida en la plataforma, el par aplicado a cada conjunto tractor se puede tomar proporcional a la consigna de velocidad ya que los conjuntos tractoros son iguales, para evitar deslizamientos entre ellos. Esta relación dependerá de los parámetros físicos de los motores una vez identificados.

3. Conjunto de tracción diferencial

El conjunto diseñado trata de reunir en un espacio pequeño, similar al que ocuparía una rueda doble, todos los elementos necesarios para el funcionamiento del sistema. En concreto, tal como se muestra en la [Figura 6](#), el conjunto se compone por dos ruedas tipo *hoverboard* con motor integrado, dos controladores *Odrive® Pro* y un módulo de comunicación y control basado en *Arduino*, así como una estructura de anclaje que soporta todos los elementos en formato compacto, permitiendo el giro libre con respecto a la plataforma.

Este conjunto de tracción diferencial permite según el modelo diferencial de la [Figura 7](#) orientarse convenientemente mediante un par diferencial ejercido entre sus dos ruedas, que provoca el giro del conjunto. Gracias a la tracción y orientación de dos de estos conjuntos, se puede controlar la

orientación de la plataforma y por tanto la trayectoria de la misma.



Figura 6: Conjunto de tracción diferencial.

En este caso, las variables de control de cada conjunto tractor son las velocidades angulares de las dos ruedas ω_d y ω_i . Siendo r el radio de las mismas, se pueden calcular las velocidades lineales de cada rueda v_d y v_i . Las velocidades de avance v y de giro ω del conjunto tractor se pueden calcular por tanto según (3) y (4). Siendo l la vía o distancia existente entre las dos ruedas del conjunto tractor y determinadas v y ω , se pueden obtener las velocidades angulares que hay que aplicar a cada rueda según (5) y (6).

$$v = \frac{v_d + v_i}{2} = \frac{(\omega_d + \omega_i) \cdot r}{2} \quad (3)$$

$$\omega = \frac{v_d - v_i}{l} = \frac{(\omega_d - \omega_i) \cdot r}{l} \quad (4)$$

$$\omega_i = \frac{v - \frac{l}{2} \cdot \omega}{r} \quad (5)$$

$$\omega_d = \frac{v + \frac{l}{2} \cdot \omega}{r} \quad (6)$$

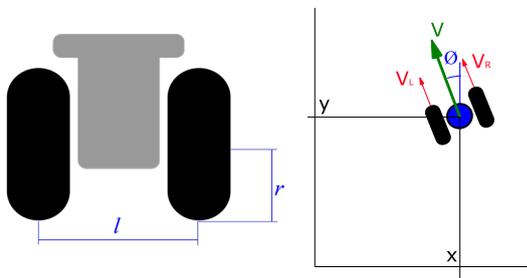


Figura 7: Modelo del conjunto de tracción diferencial.

Se puede expresar el vector de coordenadas globales del punto de guía del vehículo y la orientación a través de su Jacobiano como (7), y este modelo puede expresarse en función de las variables de control como (8), obteniendo de esta forma la cinemática directa necesaria para el control del dispositivo en posición y orientación.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ \phi' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\text{sen}\phi & 0 \\ \text{cos}\phi & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ \phi' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r \cdot \text{sen}\phi}{2} & -\frac{r \cdot \text{sen}\phi}{2} \\ \frac{r \cdot \text{cos}\phi}{2} & \frac{r \cdot \text{cos}\phi}{2} \\ \frac{2}{l} & \frac{2}{l} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_i \\ \omega_d \end{bmatrix} \quad (8)$$

3.1. Motores y ruedas

Se ha optado por un sistema basado en conjuntos de motor-rueda integrales similares a las de los sistemas *hoverboard* (dispositivo de transporte personal motorizado que consta de una plataforma con dos ruedas y es controlado por el equilibrio del usuario). Estas ruedas tienen incorporado un motor *brushless* de 15 pares de polos y de una potencia aproximada de 350 W, lo que permite que este sistema de tracción sea compacto y económico. Además, debido a su diámetro de 16 (cm) son ideales para cualquier sistema de transporte de pequeñas cargas y fácilmente integrable. Estos motores *brushless* se pueden alimentar a 24V mediante un control de sus 3 fases de alimentación y poseen un sensor *hall* A/B/Z integrado para el control de su movimiento por medio del controlador. Se requieren dos conjuntos de motor-rueda para poder generar la tracción diferencial entre conjuntos que permita desplazar en cualquier dirección la plataforma.

3.2. Controladores

En este caso se ha optado por utilizar controladores de la marca *Odrive*®, en particular su modelo *Pro* por diversas razones. Ofrecen una combinación de alta potencia y eficiencia, un control preciso, avanzado y configurable en lazo cerrado, una interfaz de comunicación versátil, facilidad de configuración y uso, robustez y fiabilidad probadas, compatibilidad con una amplia gama de motores y capacidad de actualizaciones. El esquema general de control de este controlador se basa en una unidad de control realimentada por un sensor *hall* de 3 fases, la cual actúa sobre una etapa de potencia hacia el motor.

Cada controlador es capaz de manejar un solo motor, por lo que se hacen necesarios 2 controladores por cada conjunto de tracción diferencial. Ambos controladores son gestionados desde un sistema externo que les provee de las consignas y/o acciones de control necesarias. Los controladores *Odrive*® son los encargados de realizar el lazo de control de par independiente de cada motor.

3.3. Encoder

En cada conjunto tractor, con el fin de conocer su orientación, se utiliza un *encoder* absoluto de la marca *CUI devices*, modelo *AMT203* de 12 bits y con comunicación *SPI*, recomendado por el fabricante del controlador *Odrive*®. Este *encoder* es el encargado de medir el ángulo girado debido a la tracción diferencial, permitiéndonos realizar un control de orientación del conjunto en función de una consigna, que vendrá determinada por el controlador central del sistema.



Figura 8: Encoder CUI AMT203.

3.4. Sistema de comunicación y control

Debido a la concepción del sistema como conjunto de tracción diferencial, y a su aplicabilidad en potencia a una plataforma ya existente de 4 ruedas libres, se requieren al

Este planteamiento se debe a que no se encuentran ventajas claras si se emplea un control de velocidad para esta aplicación particular y sin embargo dicho control puede ser contraproducente de cara a la experiencia de usuario al utilizar la plataforma, por no encontrarnos habituados a un control de velocidad bajo entornos con situaciones continuamente cambiantes (símil al uso de un vehículo en entorno urbano sin situaciones mantenidas suficientemente en el tiempo como para activar un control de velocidad).

El lazo de control de orientación (mediante acoplamiento diferencial) utiliza el ángulo proporcionado por el *encoder* y por simplicidad y facilidad de implementación, un PID ajustado para obtener un comportamiento con tiempo de establecimiento menor a 1.5s, sin sobreimpulso y sin error en régimen permanente. Se emplea la estructura PID paralelo según (11) con pesos en la referencia y filtro derivativo, cuyos parámetros son $K_p=2.045$, $K_d=1.698$, $K_i=0.571$, $b=0.87$, $c=0.579$, $N=100$. Los pesos b y c han sido determinados mediante ajustes experimentales para reducir el sobreimpulso y minimizar la sensibilidad al ruido.

$$u(t)=K_p[b \cdot r(t)-y(t)]+K_i \int [r(t)-y(t)] dt + K_d \frac{N}{1+N \cdot T_d} \frac{d}{dt} [c \cdot r(t)-y(t)] \quad (11)$$

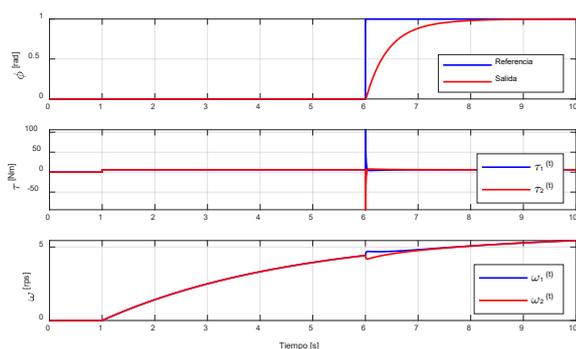


Figura 12: Resultado del sistema controlado para consigna de par de avance constante de 6 Nm y cambio de orientación de 1 rad.

Este sistema proporciona un control de dirección de cada uno de los conjuntos motrices con capacidad y precisión suficiente para el caso de estudio. En la Figura 12 se muestra su comportamiento una vez implementado el control en el dispositivo, frente a una consigna de par de avance de 6 Nm y de ángulo de orientación de 1 rad.

6. Conclusiones

El sistema desarrollado formado por 2 conjuntos tractores diferenciales interconectados permite simplificar la electrificación de plataformas de 4 ruedas libres. Evita el uso de motores de diferentes tipos como los servos empleados habitualmente para el control de dirección de ruedas. El empleo de solo 2 conjuntos motrices iguales, no solo reduce el coste del sistema, sino que además simplifica el montaje, el mantenimiento, la sincronización entre los elementos y las comunicaciones entre ellos. Este sistema, además provee omnidireccionalidad a la plataforma, permitiendo su uso en espacios reducidos. Un simple lazo de control de orientación en cada conjunto tractor permite orientar la plataforma,

mientras que un control de par integrado en cada controlador es suficiente para un desplazamiento correcto e intuitivo de la plataforma. No se considera un control automático de velocidad y la orientación de los conjuntos tractores se genera mediante su cinemática. Sin embargo, para realizar un control completamente auto guiado, se deben considerar otros factores como el deslizamiento y el reparto de cargas.

Para un control robusto en una plataforma concreta, se propone la realización de diferentes ensayos en carga, que desprendan información sobre el comportamiento real y la incertidumbre de los actuadores en esa situación. La escalabilidad del sistema es posible una vez conocidos los principales parámetros del sistema real, tras lo cual se realizarían ajuste sobre los controladores calculados.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias a la Agencia de Desarrollo Económico para la Rioja (ADER) a través de la ayuda *SimoAts* 2020-I-IDD-00036 (cofinanciación fondos FEDER) y también gracias a la Ayuda a Grupos de Investigación REGI 22/40 provista por la Universidad de La Rioja.

Referencias

- Abajo, M.R., Sierra-García, J.E., Santos, M. (2022). Evolutive Tuning Optimization of a PID Controller for Autonomous Path-Following Robot. DOI: [10.1007/978-3-030-87869-6_43](https://doi.org/10.1007/978-3-030-87869-6_43)
- Argente-Mena, J., Sierra-García, J.E., Santos, M. (2023). Robust Velocity Control of an Automated Guided Vehicle Using Artificial Neural Networks. En 17th International Conference on Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications (SOCO 2022) (pp. 454–463). Springer. DOI: [10.1007/978-3-031-18050-7_44](https://doi.org/10.1007/978-3-031-18050-7_44)
- Espinosa, F., Santos, C., Sierra-García, J. E., 2021. Transporte multi-AGV de una carga: estado del arte y propuesta centralizada. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 18, 82–91. DOI: [10.4995/riai.2020.12846](https://doi.org/10.4995/riai.2020.12846)
- Klancar, G., Zdesar, A., et al. (2017). Wheeled Mobile Robotics: From Fundamentals Towards Autonomous Systems. Butterworth-Heinemann. DOI: [10.1155/2020/6687816](https://doi.org/10.1155/2020/6687816)
- Macfarlane, A.B.S., van Niekerk, T., Becker, U., Mercorelli, P. (2024). “Modeling a Modular Omnidirectional AGV Developmental Platform with Integrated Suspension and Power-Plant.” Modeling, Identification, and Control for Cyber-Physical Systems Towards Industry, 151-168. DOI: [10.1016/B978-0-32-395207-1.00018-4](https://doi.org/10.1016/B978-0-32-395207-1.00018-4)
- Madow, A., Gómez-de-Gabriel, J.M., Martínez, J.L., Muñoz, V.F., Ollero, A., García-Cerezo, A. (1996). The Autonomous Mobile Robot Aurora for Greenhouse Operation. IEEE Robotics and Automation Magazine, 3(4), 18-28. DOI: [10.1109/100.556479](https://doi.org/10.1109/100.556479)
- Ollero, A., Simón, A., García, F., Torres, V.E., 1993. Integrated Mechanical Design and Modelling of a New Mobile Robot. IFAC Symposium on Intelligent Components and Instruments for Control Applications, CICA 92. Pergamon Press, 461–466. Málaga, España. DOI: [10.1016/S1474-6670\(17\)50949-0](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)50949-0)
- Ollero, A., 2007. Robótica: Manipuladores y Robots Móviles. Marcombo, Barcelona.
- Sánchez, R., Sierra-García, J. E., Santos, M. (2021). “Modelado de un AGV híbrido triciclo-diferencial”. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, 19(1), 84–95. DOI: [10.4995/riai.2021.14622](https://doi.org/10.4995/riai.2021.14622)
- Sierra-García, J.E., Santos, M. (2020). Mechatronic Modelling of Industrial AGVs: A Complex System Architecture. Complexity, 21. DOI: [10.1155/2020/6687816](https://doi.org/10.1155/2020/6687816)