

Jornadas de Automática

Diseño de robot móvil con tracción independiente para rescate

Padial-Allué, D.^{1,*}, Serón, J.¹, Vázquez-Martín R.¹, García-Cerezo, A.¹

Grupo de Robótica y Mecatrónica, Instituto Universitario de Investigación en Ingeniería Mecatrónica y Sistemas Ciberfísicos, Universidad de Málaga, 29071 Málaga, España.

To cite this article: Padial-Allué, D., Serón, J., Vázquez-Martín, R., García-Cerezo, A. 2024. Design of mobile robot with independent traction for rescue tasks.

Jornadas de Automática, 45. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2024.45.10926>

Resumen

Este artículo describe el desarrollo de un vehículo autónomo diseñado para tareas de rescate en terrenos no estructurados, enfocado en maximizar las ventajas de los sistemas de locomoción Ackerman y deslizamiento utilizando un sistema de tracción independiente. El vehículo está concebido para ascender pendientes pronunciadas mientras soporta cargas pesadas. Se ha realizado un diseño 3D del vehículo y un estudio de sus dimensiones y ángulos críticos para las labores de rescate. Asimismo, también se han estudiado las necesidades de par para mover el vehículo por estas pendientes y se ha realizado una selección cuidadosa de componentes para cumplir con los requisitos de robustez y funcionalidad del vehículo. Aunque aún no se han realizado pruebas físicas, el diseño preliminar establece una base sólida para futuras etapas de desarrollo. Los próximos pasos incluyen completar el ensamblaje del vehículo, realizar el modelado matemático de su funcionamiento y, finalmente, llevar a cabo pruebas en campo para validar y optimizar su rendimiento.

Palabras clave: Robots Móviles, Sistemas Robóticos Autónomos, Sensores y Actuadores Automotrices, Vehículos Eléctricos y Solares, Arquitecturas de Control en Gestión Automotriz

Design of mobile robot with independent traction for rescue tasks.

Abstract

This paper describes the development of an autonomous vehicle designed for rescue tasks in unstructured terrain, focused on maximizing the advantages of Ackerman locomotion and skid-steering systems. The vehicle is designed to climb steep slopes while carrying heavy loads. A 3D design of the vehicle has been carried out and a study of its dimensions and critical angles for rescue tasks has been performed. The torque requirements to move the vehicle up these slopes have been studied and a careful selection of components has been made to meet the vehicle's robustness and functionality requirements. Although physical testing has not yet been performed, the preliminary design establishes a solid foundation for future stages of development. The next steps include completing the vehicle's assembly, mathematical modeling of its operation, and conducting field tests to validate and optimize its performance.

Keywords: , Mobile Robots, Autonomous robotic systems, Automotive sensors and actuators, Electric and solar vehicles, Control architectures in automotive control

1. Introducción

Se habla de catástrofes para referirse a eventos traumáticos de gran magnitud para la sociedad que se deben a fenómenos naturales como terremotos o inundaciones, así como a activi-

dades humanas como explosiones o vertidos contaminantes. Estos desastres a menudo causan la pérdida de vidas humanas y animales, aunque una rápida y eficaz intervención puede reducir el número de víctimas. Las catástrofes naturales pueden

*Autor para correspondencia: davipadial@uma.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

acarrear daños materiales, económicos y psicológicos a largo plazo y de coste elevado.

En la respuesta a catástrofes, los sistemas robóticos pueden contribuir tanto a mejorar el tiempo de reacción como a posibilitar operaciones de mayor alcance mediante el despliegue en áreas inexploradas que supongan un riesgo extremo para los efectivos humanos de búsqueda y rescate. Existen varias aportaciones en la rama de la robótica que han servido como herramientas adicionales a los métodos convencionales para las tareas de búsqueda y rescate. Los *robots aéreos* (UAV), son utilizados para labores de búsqueda de personas y reconocimiento del entorno (Schedl et al., 2021), estos robots presentan como inconveniente su capacidad de carga y su autonomía, no siendo útiles para el transporte de mercancías pesadas ni de personas heridas. En el campo de los robots móviles terrestres (UGV) se pueden encontrar aportaciones dentro de la *robótica blanda*, desarrollando robots capaces de moverse reptando permitiendo la búsqueda de personas sepultadas en los escombros de un terremoto (Wen et al., 2023). Pese a su buena adaptabilidad al terreno, estos robots tienen una velocidad muy baja, inferior a 0.5 m/s, y no tienen capacidad de transportar materiales o personas. Para mejorar esta deficiencia se pueden emplear robots pequeños con ruedas capaces de inspeccionar y realizar búsquedas dentro de tuberías como MRINSPECT IV (gon Roh and Choi, 2005). Una vez realizadas las tareas de búsqueda y de mapeo del terreno es interesante tener robots de gran tamaño que permitan el transporte de personas y material siendo los más utilizados en estas tareas de rescate los robots con locomoción por deslizamiento, teniendo ruedas como el robot desarrollado por Bu (Bu et al., 2021) o tener ruedas y cadenas como el desarrollado por Tazzari (Tazzari et al., 2020), mejorando la tracción en terrenos complicados

Este artículo tiene como objetivo definir las características de un nuevo robot terrestre diseñado específicamente para el transporte de personas y materiales en escenarios de catástrofes. Este vehículo autónomo se desarrolla para superar las limitaciones de los robots actualmente disponibles. Para ello se decide construir un vehículo autónomo, con dimensiones y capacidad de carga elevadas destinado al transporte de heridos y de mercancías en las labores de rescate. Además, este robot contará con capacidades todoterreno, permitiéndole navegar por terrenos irregulares y superar pendientes pronunciadas. Para alcanzar estos objetivos, se ha optado por equipar al robot con ruedas, tracción total e independiente y sistemas de locomoción híbrido aprovechando la maniobrabilidad de la locomoción por deslizamiento y la estabilidad a grandes velocidades de la locomoción ackerman (Maclaurin, 2008).

La implementación de la tecnología robótica en tareas que implican la interacción entre humanos y robots está directamente vinculada con la seguridad y la confianza. Así, para afrontar el próximo reto de contar con robots como actores clave en el espacio de trabajo de la respuesta a las catástrofes, se requiere que en los equipos de robots se haga un diseño tolerante a fallos que le permita continuar con sus labores en todo momento, no sólo para el equipo y el entorno, sino también para los supervivientes y el equipo humano de rescate.

Este artículo detalla las características del vehículo, analizando las dimensiones, una estimación de su peso y las mejoras aplicadas al chasis para optimizar su rendimiento en te-

renos difíciles. La segunda parte del documento aborda los requerimientos de potencia necesarios para la selección del tren de potencia del vehículo, así como los componentes elegidos para la construcción del robot. En la tercera sección, se revisa la arquitectura elegida que permite la teleoperación del vehículo y la comunicación entre sus diversos componentes. Finalmente, se presentan las conclusiones y se discuten las direcciones de investigaciones futuras.

2. Características del vehículo

El vehículo utilizado como base en este proyecto es el Panther XY50D. Se trata de un cuadriciclo eléctrico de tipo todo terreno similar a los denominados “buggies” en términos de estructura y funcionalidad. Para el desarrollo de este proyecto se ha procedido al desmontaje de la carrocería, el sistema de propulsión y las baterías con el objeto de su rediseño y optimización para un desempeño óptimo. Desechando el sistema de propulsión se aprovechará el chasis del vehículo compuesto por piezas de acero de alta resistencia.

En la concepción de un vehículo destinado a funciones de rescate, se establecen requisitos específicos para garantizar su eficiencia y versatilidad. El diseño de este vehículo debe cumplir con los siguientes criterios:

■ Diseño del Chasis y Tracción:

- Tracción en las cuatro ruedas de forma independiente.
- Dirección basada en el principio de Ackerman para óptima maniobrabilidad.
- Ser capaz de realizar giros mediante deslizamiento de las ruedas.
- Potencia suficiente para ascender pendientes escarpadas.
- Capacidad para circular en terrenos no estructurados.

■ Funcionalidad:

- Resistente y capaz de asumir funciones militares y de rescate.
- Utilización de elementos comerciales cumpliendo el estándar militar y de alta seguridad para garantizar rendimiento óptimo en todas las circunstancias de uso.
- Implementación de una arquitectura basada en el bus CAN permitiendo centralizar la información del vehículo.
- Espacio dedicado para el transporte objetos y víctimas, priorizando operaciones de rescate.

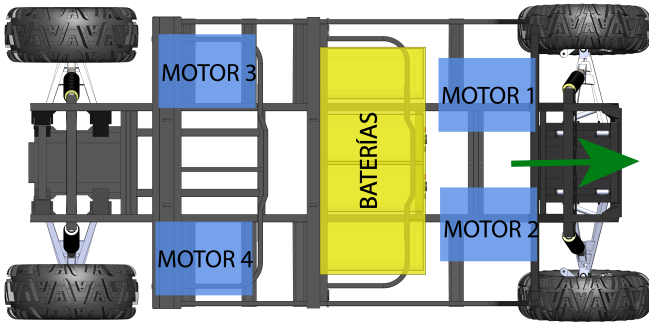


Figura 1: Disposición batería y motores

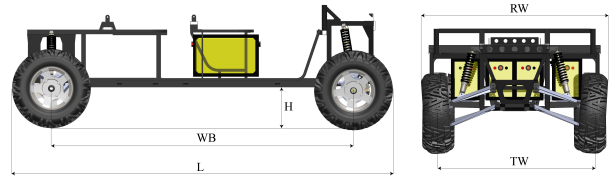


Figura 2: Dimensiones vehículo

Tabla 1: Dimensiones del vehículo

		mm
Longitud total	L	3296
Anchura	W	1640
Batalla	WB	2641
Ancho de vía	TW	1280
Altura total	RW	N/D
Altura libre al suelo	H	400

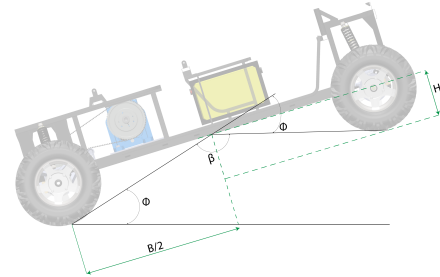


Figura 3: Ángulo ventral

Al integrar estos requisitos, se busca desarrollar un vehículo todo terreno que cumpla con los estándares necesarios para enfrentarse a situaciones complicadas, ya sea en entornos militares o en operaciones de rescate. En la Figura 1 se presenta la disposición del vehículo. La sección central del vehículo se destina exclusivamente para la instalación de las baterías. Con el objetivo de lograr un sistema de propulsión completamente independiente, se colocan cuatro motores en las cuatro esquinas del vehículo, transmitiendo la potencia de cada motor a su rueda respectiva.

Los 4 motores actúan de forma independiente sobre cada una de las ruedas, de forma que es posible transmitir el par necesario a cada una de ellas de forma aislada en función de las necesidades del terreno.

2.1. Dimensiones

Se ha empleado la tecnología OptiTrack para obtener una elevada precisión en las dimensiones del vehículo. Este enfoque se revela como esencial para recopilar información detallada, mejorando la integridad de los datos disponibles para el análisis científico del vehículo en cuestión. Las dimensiones actuales del vehículo se presentan en la Tabla 1 y Figura 2.

La altura total no se encuentra establecida ya que dependerá del uso final del vehículo y su carrocería definitiva. En este momento la masa del vehículo en su estado vacío es de 343 kg, incluyendo solo el chasis y las ruedas. Este peso, es el peso en vacío, pendiente de incorporar el peso de las baterías y el sistema de potencia completo. Se estima el peso total del vehículo (tara) en 950 kg, quedando disponibles 550 kg útiles para el transporte de personas o mercancías. Todos los cálculos se harán con la masa máxima autorizada del vehículo siendo esta de 1500 kg.

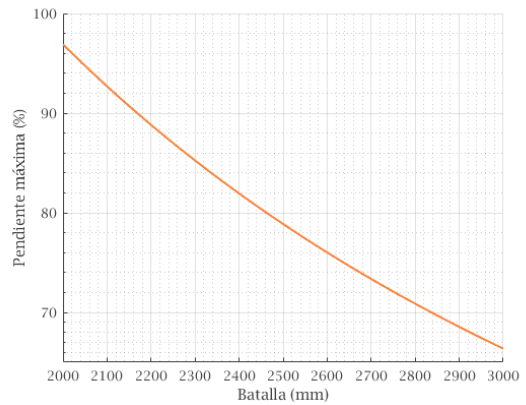


Figura 4: Ángulo ventral en función de la batalla

2.2. Ángulo Ventral

El ángulo ventral (Φ) determina la capacidad del vehículo para superar un desnivel pronunciado y corto tipo badén o cresta de una subida sin que golpeen sus partes bajas en el vértice de la pendiente, ver Figura 3. Este ángulo depende de la batalla del vehículo (WB) y de la altura libre al suelo (H).

Desde el punto de vista de la máxima pendiente a superar, se puede definir el ángulo Φ , ver Figura 3 como el ángulo de la pendiente de subida en la cual el vértice forma un ángulo β con el plano horizontal (W and K, 1992).

$$\Phi = 2 * \arctan \frac{2 * H}{B} \quad (1)$$

Si se representa el ángulo Φ en función de las dos variables, batalla y altura libre al suelo, se puede deducir que el ángulo ventral aumenta al elevar la altura libre al suelo del vehículo mientras que disminuye al aumentar la distancia entre los ejes (WB).

Dada la Ecuación 1 se puede obtener la relación entre el ángulo ventral y la batalla del vehículo para una altura libre al suelo dada. En la Figura 4 se observa que a menor batalla,

mayor es el ángulo ventral y por tanto el vehículo es capaz de vencer pendientes más pronunciadas.

Se decide acortar la batalla original del vehículo 400 mm, quedando en 2241 mm lo que permite incrementar el ángulo ventral de 33° a 39°. Esto supone pasar de una pendiente del 74.92 % al 87.35 %.

3. Sistemas de potencia

3.1. Selección de los motores

En este apartado se estudia el comportamiento dinámico del vehículo considerando el conjunto de fuerzas que se oponen a su movimiento en línea recta. El comportamiento dinámico en el movimiento lineal del vehículo influyen las fuerzas longitudinales de los neumáticos, las fuerzas de resistencia aerodinámica, las fuerzas de resistencia a la rodadura y las fuerzas gravitatorias (Rajamani, 2012). El objetivo del vehículo es su empleo en tareas de rescate en condiciones adversas. Se ha establecido como requisito fundamental que el vehículo tenga la capacidad de mantener una velocidad de 10 km/h en una pendiente ascendente del 100 % (45°). La estimación del par necesario en la rueda se basa en varios factores, que incluyen los esfuerzos a la rodadura, la fuerza aerodinámica y la inclinación de la pendiente, como se puede observar en la Ecuación 2.

3.2. Estimación de par y potencia necesarios

Para los cálculos y el modelado del vehículo, se considerará la masa máxima autorizada del vehículo, de 1500 kg, ver Tabla 2. Esto permitirá simular las condiciones de utilización más desfavorables del vehículo. El objetivo es calcular la fuerza necesaria de los motores para mantener una velocidad determinada, por lo que no se tienen en cuenta ningún término relacionado con la aceleración. La fuerza de tracción es igual a la suma de la fuerza aerodinámica, la resistencia a la rodadura y el peso en una pendiente ascendente.

$$F_t = F_a + F_r + F_p \quad (2)$$

Si se desarrollan cada uno de los esfuerzos se obtiene que:

$$F_t = \frac{1}{2} A_f C_d \rho v^2 + \mu mg \cos(\Phi) + mg \sin(\Phi) \quad (3)$$

Como valores de cálculo se emplean la masa máxima autorizada del vehículo, 1500 kg, la densidad del aire en condiciones estándar, el coeficiente aerodinámico para la forma geométrica de un cubo inclinado, 0.8 (Anderson, 2016). Para el área frontal se supone una carrocería completa y con formas completamente rectas, resultando una superficie de 1.3 m².

Tabla 2: Dimensiones del vehículo

Masa máxima autorizada	m	1500 kg
Densidad del aire	ρ	1.225 kg/m ³
Coefficiente aerodinámico	C_d	0.8
Área Frontal	A_f	1.3 m ²
Coefficiente de rodadura	μ	0.2
Velocidad	v	10 km/h

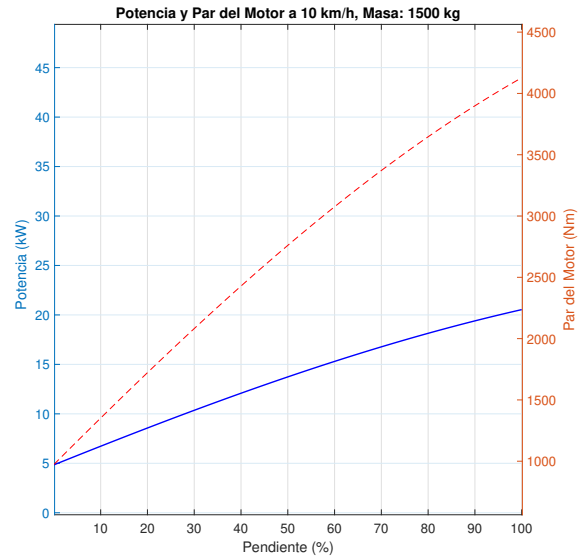


Figura 5: Par y potencia necesarios en función de la pendiente.

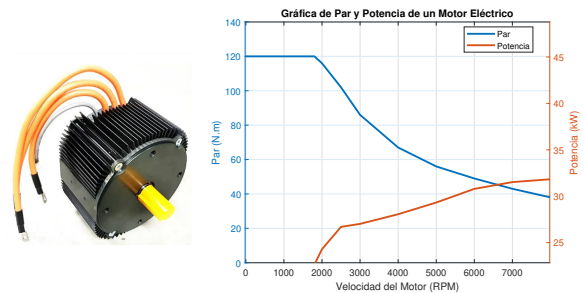


Figura 6: Motor PDM18 y curva potencia y par

En la Figura 5 se pueden ver las necesidades de potencia y par en rueda en función de la pendiente para el vehículo circulando con la masa máxima autorizada. Para subir una pendiente del 100 % a 10 km/h se necesita un par de 4128 Nm y una potencia de 20.53 kW.

3.3. Sistema de propulsión

El motor seleccionado es un motor eléctrico síncrono de imanes permanentes y flujo axial modelo PDM18 (ver Figura 6) del distribuidor Play and Drive. Para su control se utiliza la controladora SEVCON Gen4 Size6, utilizada en vehículos eléctricos y maquinaria industrial. Esta controladora permite la programación en tiempo real, diagnósticos detallados y compatibilidad con distintos tipos de motores. El motor está diseñado para trabajar entre 24 y 96 V a corriente continua, con una potencia nominal de 12.9 kW y una potencia pico de 30 kW. La velocidad máxima de operación está fijada a 8000 rpm aunque en el test de resistencia ha llegado a funcionar a 11000 rpm. El par nominal del motor es de 34 Nm mientras que el pico es de 100 Nm. El comportamiento del motor PDM18 se puede ver en la Figura 6, donde se puede observar que a bajas revoluciones es capaz de entregar un par de hasta 120 Nm. El motor se encuentra encapsulado con una certificación IP65 frente al polvo y al agua. Un motor tiene un peso de 21.4 kg, lo que hace ascender el peso total de los motores a 85,6 kg

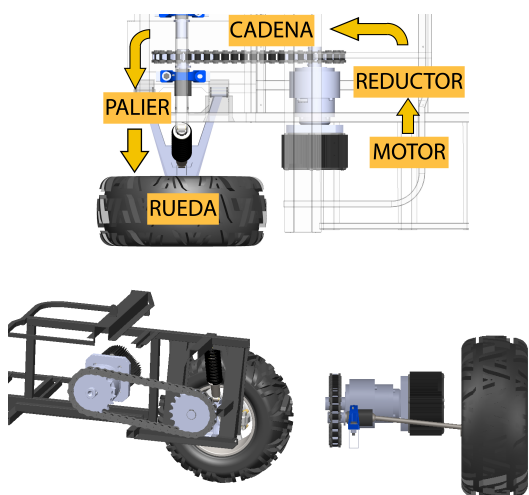


Figura 7: Cadena de transmisión



Figura 8: Batería Vanguard

Teniendo en cuenta que se utilizarán 4 motores y se requieren 4128 Nm, se necesita multiplicar el par de los motores mediante un elemento de reducción superior a 10.32:1. Dada al disposición del vehículo, la geometría de suspensión y el tamaño de los motores, es necesario ubicar los motores desacoplados de las ruedas, posicionando los conjuntos motor-reductor según la Figura 1. De esta forma, es necesario transmitir la potencia a cada una de las ruedas mediante un sistema de transmisión piñón cadena hasta llegar a los árboles de transmisión o palieres, que transmiten el movimiento a los cubos de rueda tal y como se muestra en la Figura 7.

Se ha optado por un elemento reductor planetario APEX modelo AE205 con una relación de reducción de 15:1 que satisface completamente las necesidades de par y de velocidad de los motores. Para la transmisión de potencia de la reductora a los palieres se realiza mediante una cadena estandar DIN-8187 24-B1 con piñones de 19 dientes calculada para una vida nominal de 3000h.

3.4. Baterías

Las baterías elegidas para este vehículo son de iones de litio y tienen una capacidad de 5 kWh con un voltaje de 48 V, fabricadas por Vanguard, ver Figura 8. Estas baterías están equipadas con comunicación CANbus J1939, lo que permite realizar diagnósticos, monitorizar el estado de carga y salud de la batería.

Además, estas baterías cuentan con una protección IP66, lo que las hace resistentes al polvo y al agua. También están equipadas con contactores que permiten habilitar la carga y descarga de la batería, fusibles para la seguridad eléctrica y un Sistema de Gestión de Batería (BMS) para supervisar y controlar diversas funciones relacionadas con la batería.

Se instalan cuatro baterías en el vehículo, conectadas en una combinación serie y paralelo para lograr una configuración de 96 V y una capacidad total de 20 kWh. Cada batería pesa 45 kg, lo que hace que el peso total para el almacenamiento de energía sea de 180 kg.

Dado que las baterías son de 48V y los motores trabajan a 96V se precisa realizar dos paquetes de dos baterías en serie que finalmente se agrupan en paralelo (2s2p) para conseguir una tensión de 96V. La carga de las baterías se realizará con el cargador suministrado por el fabricante, que carga las baterías a su tensión nominal, 48V. Esto implica que el sistema de baterías tiene una tensión de carga diferente a la de funcionamiento en el vehículo. Para solventar esto se instala un sistema de contactores, cuando se enciende el vehículo conecta las baterías en serie, y cuando se apaga deja las baterías desconectadas del sistema en serie, dejándolas conectadas todas en paralelo preparadas para la carga.

Las baterías Vanguard mediante su conector HDP26-18-20SN permite la comunicación avanzada mediante bus CAN entre la batería y resto de componentes del vehículo, ver Figura 9. Durante el proceso de carga, pueden conectarse hasta cuatro baterías diferentes en paralelo mediante una caja de conexiones. Esta caja integra tanto el bus de comunicaciones como la gestión de contactores entre las baterías, posibilitando conmutar entre la configuración de carga y de descarga de baterías. Durante la fase de descarga —cuando el vehículo está en uso— es necesario que los elementos de control de las baterías sean independientes para tener las tensiones correctas. No obstante, el bus de comunicación continúa conectado sin ninguna modificación, permitiendo la transmisión constante de información de las baterías al resto de dispositivos unidos al bus.

4. Arquitectura

4.1. Arquitectura

Toda la comunicación del vehículo se realiza a través de bus CAN, lo que permite integrar los diversos sistemas y módulos del vehículo, como el motor, la dirección, y otros sistemas para intercambiar información y comandos. Esto proporciona una forma eficiente y estandarizada de gestionar la comunicación interna del vehículo. Además, el bus CAN permite la incorporación y la supresión de elementos al sistema de forma sencilla.

Para la gestión y control del vehículo, se integra un ordenador industrial Advantech UNO-2484G embebido como pieza central. Este dispositivo, equipado con conectividad a través del bus CAN, establece una comunicación efectiva con todos los componentes del vehículo, incluyendo baterías, motores y sensores. Gracias a esta conexión, se facilita una supervisión y operación coordinada de los distintos sistemas, asegurando un rendimiento óptimo y una gestión eficiente del vehículo en su totalidad.

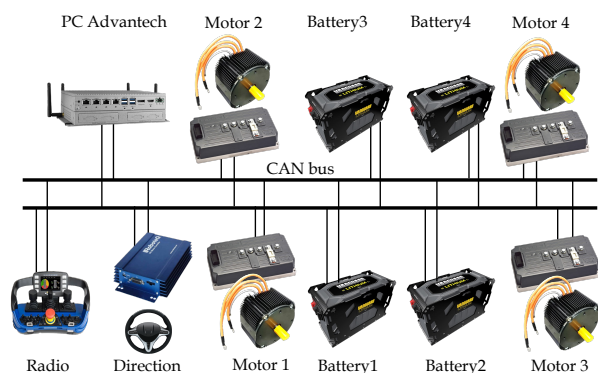


Figura 9: Arquitectura CAN bus



Figura 10: Radio Scanreco

4.2. Teleoperación

El vehículo podrá ser teleoperado mediante un sistema de control remoto vía radio. Se ha seleccionado el sistema Remote Control System G3B CAN del fabricante Scanreco. El sistema de control remoto está compuesto por mando emisor (Figura 10) y un receptor de radio que enviará mensajes al bus CAN. El mando de control remoto está compuesto por 2 joysticks, 6 botones configurables y un botón de paro de emergencia. El mando se comunica con el receptor vía radio en la frecuencia de 433 MHz. El sistema de control remoto envía mensajes a través del bus CAN, que será interpretado por el ordenador principal y por el resto de dispositivos que hay en el vehículo. Este ordenador enviará ordenes a los 4 motores de tracción y a un motor que se ubica en la columna de dirección del vehículo sensorizado con un encoder absoluto KUBLER 8.F3663.4311.B362 y una controladora para motores de corriente continua ROBOTEQ SDC2160.

5. Conclusiones

Se ha elegido una plataforma para la construcción del robot, se ha realizado un modelado 3D que permite el diseño y la distribución eficiente de los elementos sobre el vehículo. Los componentes se han seleccionado meticulosamente para proporcionar al vehículo tracción total e independiente, junto con un sistema de dirección completamente automatizado.

El sistema de transmisión ha quedado definido y actualmente dispone de motores y controladoras con los que se está trabajando en la configuración. Actualmente se está a la espera de la recepción del resto de componentes del sistema de transmisión para acoplar los motores en el vehículo. En la búsqueda de un elemento reductor compacto y ligero que se adaptase a las necesidades del vehículo ha sido necesario rediseñar el sistema completo de transmisión en varias ocasiones hasta llegar a la solución propuesta en este artículo.

El sistema eléctrico se encuentra en proceso de definición y pruebas. Las cuatro baterías se han interconectado y alimentan actualmente los motores que están en uso. Tras realizar algunos test se considera que es necesario redefinir las conexiones entre los sistemas de control de baterías y es necesario diseñar una caja de relés para combinar las conexiones de forma adecuada.

Se ha definido una arquitectura basada en bus CAN a la que todos los elementos estarán conectados y enviarán mensajes a través de él.

Como líneas futuras de trabajo, se propone modelar matemáticamente las características cinemáticas y dinámicas del vehículo para desarrollar su sistema de control, así como realizar el ensamblaje completo de los componentes.

6. Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, Gobierno de España, proyecto PID2021-122944OB-I00.

Referencias

- Anderson, J. D., Mar. 2016. Fundamentals of aerodynamics, 6th Edition. McGraw-Hill Education, Columbus, OH.
- Bu, H., Li, A., Huang, X., Li, W., Wang, J., 12 2021. Optimal design of the six-wheel steering system with multiple steering modes. Vol. 2021, pp. 1–18.
DOI: 10.1155/2021/1716116
- gon Roh, S., Choi, H. R., 2005. Differential-drive in-pipe robot for moving inside urban gas pipelines. IEEE Transactions on Robotics 21 (1), 1–17.
DOI: 10.1109/TR0.2004.838000
- Maclaurin, B., 2008. Comparing the steering performances of skid- and ackermann-steered vehicles. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering 222, 739 – 756.
DOI: 10.1243/09544070JAUT0567
- Rajamani, R., 2012. Vehicle Dynamics and Control. Springer US.
DOI: 10.1007/978-1-4614-1433-9
- Schedl, D. C., Kurmi, I., Bimber, O., 2021. An autonomous drone for search and rescue in forests using airborne optical sectioning.
- Tazzari, R., Mengoli, D., Marconi, L., 2020. Design concept and modelling of a tracked ugv for orchard precision agriculture. In: 2020 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor). pp. 207–212.
DOI: 10.1109/MetroAgriFor50201.2020.9277577
- W, R., K, K. S., 1992. Roadway design standards to accommodate low-clearance vehicles. Transportation Research Record (1356), 80–89.
- Wen, T., Hu, J., Zhang, J., Li, X., Kang, S., Zhang, N., 10 2023. Design, Performance Analysis, and Experiments of a Soft Robot for Rescue. Journal of Mechanisms and Robotics 16 (7), 071011.
DOI: 10.1115/1.4063669