

Modelado y control de alto nivel de un camión volquete autónomo

Herguedas, R.^{a,*}, Rodríguez-Fortun, J.M.^a, Espelosin, J.J.^a, Seco, T.^a

^aInstituto Tecnológico de Aragón, María de Luna 8, 50018, Zaragoza, España.

To cite this article: Herguedas, R., Rodríguez-Fortun, J.M., Espelosin, J.J., Seco, T. 2026. Modeling and high-level control of an autonomous dumper truck. Actas del II Simposio CEA de los GT: Ingeniería de Control - Modelado, Simulación y Optimización - Educación en Automática. Zaragoza, España.

Resumen

Este artículo describe los aspectos principales del modelado y control de un camión volquete autónomo. En particular, se expone el modelado del entorno y del vehículo en el software de simulación (Gazebo) y el sistema de control de movimiento. Este sistema consta de dos módulos principales: el controlador longitudinal, basado en un regulador PI, y el controlador lateral, basado en *Model Predictive Control* (MPC). Por último, se presentan resultados del desempeño del control en el lugar de pruebas real. El controlador de movimiento del camión forma parte de un sistema más complejo que permite el transporte autónomo de materias primas dentro de una cantera de áridos, desde la zona de extracción hasta la estación de procesamiento. Gracias a la solución desarrollada, la seguridad y la eficiencia del proceso mejoran significativamente, lo que permite a los operadores humanos realizar tareas más variadas y con mayor valor añadido.

Palabras clave: Modelado de sistemas, Seguimiento de trayectorias, Simulación física, Camión autónomo, Transporte de áridos.

Modeling and high-level control of an autonomous dumper truck

Abstract

This paper describes the main aspects of the modeling and control of an autonomous dumper truck. In particular, we show the modeling of the environment and the vehicle in the simulation software (Gazebo) and the motion control system. This system consists of two main modules: the longitudinal controller, based on a PI regulator, and the lateral controller, based on Model Predictive Control (MPC). Finally, we report control performance results in the real test site. The truck motion controller is part of a more complex system that enables the autonomous transport of raw materials inside a sand and gravel quarry, from the extraction zone to the processing station. Thanks to the developed solution, the safety and efficiency of the process are significantly improved, allowing the human operators to conduct more varied tasks with higher added value.

Keywords: Systems modeling, Trajectory following, Physical simulation, Autonomous truck, Sand and gravel transport.

1. Introducción

El sector de los áridos es el principal suministrador de materias primas para la construcción de infraestructuras, edificación e industria, lo que le confiere el carácter de industria estratégica. Es la segunda materia prima más consumida por el hombre después del agua y cada español consumió en 2019 unos 2.890 kilogramos anuales, es decir, 7,9 kilogramos diarios (en 2007 se consumieron cerca de 33 kilogramos diarios). La explotación de áridos se realiza habitualmente a cielo abierto en canteras o gra-

veras. Actualmente existen en España unas 1.757 explotaciones de áridos, más del 65 % del total de la industria extractiva (Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos, 2019). Además, la industria de la construcción es el principal consumidor mundial de materias primas y consume el 40 % de los recursos energéticos globales, generando entre el 25 y el 40 % de las emisiones de carbono del mundo (REBUILD expo, 2020). El entorno de la cantera, a pesar de ser una zona de trabajo acotada y controlada, presenta una serie de condicionantes, como la simultaneidad de trabajos que se realizan -extracción, carga,

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

transporte-, la presencia de personal trabajando a pie de cantera o la variabilidad permanente de la orografía del terreno, que requieren el desarrollo de una tecnología avanzada capaz de contemplar estas condiciones, de forma que se eviten atropellos, colisiones entre la maquinaria operativa o incluso vuelcos de los vehículos autónomos. Según los datos recogidos en el último informe completo publicado de *Estadísticas de Accidentes de Trabajo* del Ministerio de Trabajo y Economía Social, en 2019 se registraron 1.999 accidentes laborales con baja en trabajos en canteras, minas a cielo abierto y excavaciones (Ministerio de Trabajo, Migraciones y Seguridad Social, 2020). Si se compara esta cifra con la de 2018 (1.946) y 2017 (1.816), podemos observar que el número de accidentes en este entorno de trabajo ha ido en aumento. Estas cifras ponen de manifiesto la necesidad de avanzar hacia procesos de trabajo más eficientes y seguros que permitan una reducción en la accidentabilidad. La transformación del proceso de transporte de áridos hacia un modelo autónomo, en el que se reduce la presencia de trabajadores en el entorno de los vehículos, es clave para lograr esta menor accidentabilidad.

Pese a que existen trabajos previos dedicados al estudio y desarrollo de sistemas de conducción autónoma aplicados a camiones (Barosan et al., 2020; Caldas et al., 2023; Hasiri and Kermanshah, 2024), las soluciones completas son todavía poco adaptables y robustas para un uso industrial generalizado.

En este contexto, y con el propósito de avanzar en la resolución de esta problemática, se ha llevado a cabo el proyecto DAKAR, que ha tenido como objetivo el desarrollo e implementación de un kit de robotización en un camión volquete. Este kit permite convertir un vehículo convencional en autónomo mediante la incorporación de sensores, actuadores, sistemas de control y técnicas basadas en inteligencia artificial. Además, se ha diseñado un sistema de determinación y comunicación del estado del camión, que ha permitido coordinar la operativa en tiempo real con otros equipos implicados en el proceso, como la excavadora encargada de cargar material en el camión y el sistema de procesamiento de áridos. A diferencia de propuestas anteriores, este proyecto presenta una solución completa al problema de transporte autónomo de áridos dentro de una cantera, validada con pruebas experimentales en el entorno real. Este artículo se centra en el modelado virtual del camión y en los sistemas de control de alto nivel del movimiento.

2. Descripción del problema

El problema a resolver trata de automatizar el movimiento de un camión volquete en una cantera de áridos, de forma que éste sea capaz de moverse de forma autónoma entre la zona de carga y la de descarga de material. Esta operativa, que incluye la circulación por las vías habilitadas y la ejecución de maniobras de aparcamiento, engloba múltiples desafíos técnicos.

2.1. Retos abordados

En primer lugar, la orografía de las canteras a cielo abierto cambia constantemente debido a la extracción de material. También por este motivo, los cambios bruscos de pendiente son habituales entre distintas zonas de la explotación, con rampas de hasta el 15 % de desnivel. La climatología es otro factor que

influye de forma notable sobre el terreno, produciendo superficies poco firmes y de baja fricción que dificultan la transitabilidad, así como ambientes polvorientos que perjudican la percepción del entorno, entre otros efectos. El camión es además un sistema altamente variable. La masa del vehículo cambia sustancialmente cuando circula en vacío y cuando está cargado de material, siendo la cantidad cargada diferente en cada ciclo. Por último, los espacios reducidos y la proximidad a los obstáculos, como en la zona de descarga, suponen un reto considerable en términos de maniobrabilidad y evitación de colisiones. En estos lugares, se requiere un control preciso de la velocidad lineal y angular del vehículo para posicionarlo de acuerdo a los requerimientos de la tarea de forma segura.

2.2. Herramientas utilizadas

Con el fin de desarrollar el sistema de conducción autónoma del camión volquete, se ha hecho uso de una serie de herramientas software basadas en ROS2. ROS2 es un conjunto de librerías y herramientas software diseñado especialmente para su uso en plataformas robóticas, que incluye drivers, para sensores y actuadores, y algoritmos de muy diversa índole. Autoware es una de las herramientas de software libre más potente para conducción autónoma construida sobre ROS2 (The Autoware Foundation, 2025). Pensada para turismos en entornos urbanos estructurados, se han modificado en este caso sus funcionalidades y configuración para el caso del camión en la mina de áridos. Para la validación del sistema en simulación se ha utilizado Gazebo, un simulador basado en ROS que permite definir y evaluar sistemas robóticos virtuales mediante una interfaz gráfica sencilla y un motor físico capaz de reproducir dinámicas complejas, como contactos y fricciones (Open Robotics, 2025). El software ha sido instalado en un ordenador industrial Onlogic Karbon 804, con un procesador Intel Core i9 de 16 núcleos a 4.8GHz y una tarjeta gráfica Nvidia RTX A4000. Este ordenador se conecta a una ECU mediante comunicación CAN, que está conectada a su vez a un camión volquete convencional intervenido para poder actuar sobre el acelerador, freno y volante del mismo, entre otros sistemas. La velocidad del vehículo y posición angular de los elementos de dirección ha sido obtenida mediante encoders instalados en los ejes de giro.

3. Modelado y simulación

Con el propósito de validar los sistemas principales en un entorno controlado (generación del mapa semántico, percepción, localización, planificación, control), previamente a tener el camión real completamente robotizado, se ha construido un entorno virtual de pruebas en Gazebo. El modelo de camión autónomo desarrollado (Figura 1) se trata de una representación simplificada de la forma del camión, que incluye la cinemática de éste (articulaciones, tipos de enlaces y sistemas de referencia), los principales efectos dinámicos involucrados en el movimiento (inercias, rigideces, rozamientos, etc.) y los sensores más importantes equipados en el camión (GPS, LIDAR, IMU y cámara). A pesar de la simplicidad de la forma estética, el modelo incorpora en detalle aquellos sistemas involucrados en el control de la velocidad del vehículo. Entre ellos, destacan los siguientes: mismo número de ejes e interconexión entre ellos; relación entre ángulo de giro de ruedas respecto del giro del

volante; chasis flexible, modelado como una unión articulada entre semichasis delantero y trasero; ruedas flexibles y modelado de la rigidez y el rozamiento con la superficie de contacto; centro de gravedad variable en función de la carga; modelado del motor y la transmisión, identificando los tiempos de cambio entre marchas, relaciones de transmisión y respuesta par-rpm del motor; y sistema de freno basado en rozamiento.

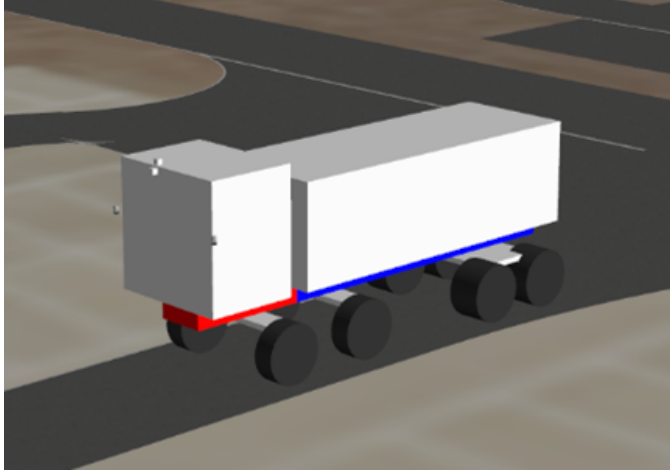


Figura 1: Modelo virtual del camión autónomo en Gazebo.

Por otra parte, el mundo de simulación en Gazebo se ha construido de forma que se pareciera lo máximo posible al entorno real de pruebas preliminares de caracterización y validación. Para ello, se utilizó información obtenida por satélite de la zona (laboratorio de exteriores del Instituto Tecnológico de Aragón), generando una malla tridimensional del suelo del entorno sobre la que se incluyeron estructuras adicionales como edificios, farolas, vallas y otros obstáculos. Además, se definió gráficamente el carril sobre el que circularía el camión en estas pruebas de validación. En la Figura 2 se muestra el resultado final del mundo recreado en Gazebo. Cabe resaltar que, salvo modificaciones en los parámetros de ajuste, calibración y configuración, la base del sistema de conducción autónoma validado en simulación es exactamente la misma que en el sistema real. Dada la dificultad de simular efectos como la variabilidad de la orografía y la consistencia del terreno, algunos sistemas como la compensación de pendiente (descrita en el siguiente apartado) se ajustaron y validaron directamente en el entorno real.



Figura 2: Mundo de Gazebo utilizado, semejante al entorno real de pruebas preliminares y de caracterización.

4. Sistema de seguimiento de trayectorias

De los múltiples subsistemas de los que consta Autoware para abordar el problema de conducción autónoma, aquí se cen-

tra el interés en el módulo de control o seguimiento de trayectorias. Estas trayectorias son calculadas previamente en el módulo de planificación, y representan secuencias de posiciones en el espacio a alcanzar con una velocidad determinada. Las posiciones y velocidades tienen en cuenta las características del terreno y las restricciones de movimiento del vehículo. Para ejecutarlas con el camión autónomo, se resuelve separadamente el seguimiento longitudinal (acelerador y freno) y el lateral (dirección).

4.1. Control longitudinal

El elemento principal de control de la velocidad longitudinal del vehículo es un regulador PI. Este tipo de controlador es la solución adoptada de forma habitual para este problema, y en este caso ha sido considerada también debido a su robustez y simplicidad. Para ajustar este término longitudinal mediante ensayos en la cantera, se ha tenido en cuenta el esquema simplificado de la Figura 3.

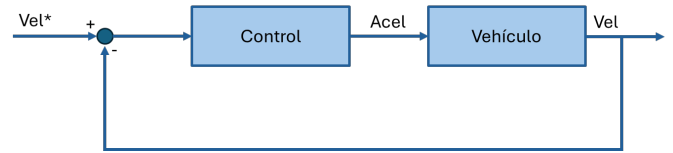


Figura 3: Esquema simplificado del control de velocidad longitudinal.

Después, se ha asumido que la evolución de la velocidad, y por tanto el comportamiento del vehículo, se puede aproximar a un sistema de primer orden:

$$\frac{V}{A} = \frac{k}{\tau s + 1}, \quad (1)$$

donde V es la velocidad, A la aceleración, k es la ganancia del sistema y τ su constante de tiempo. Para identificar el modelo equivalente se aplica un par sobre las ruedas, que después se convierte aceleración teniendo en cuenta la posición del pedal, la relación de transmisión y la masa del vehículo. Para lograr un error nulo en estacionario, es suficiente con aplicar el control PI comentado anteriormente:

$$\frac{A}{\epsilon} = k_p + \frac{k_i}{s} = k_i \frac{(\frac{k_p}{k_i} s + 1)}{s}. \quad (2)$$

Tras fijar el ancho de banda del control (f), relacionado con las ganancias del controlador a partir de la condición del módulo, se obtienen las dos ganancias necesarias para la parte integral k_i y para la parte proporcional k_p :

$$|\frac{k_i}{s} k| = 1 \rightarrow k_i = \frac{2\pi f}{k}, \quad (3)$$

$$k_p = \tau k_i. \quad (4)$$

Debido a las diferentes dinámicas en la dimensión longitudinal, se han utilizado dos controladores distintos para los modos de aparcamiento (baja velocidad) y conducción en carril (velocidad nominal). Mediante los datos de velocidad tras aplicar una entrada de tipo 'escalón' en aceleración, se ha obtenido el ajuste de las ganancias de control para ambos modos de funcionamiento. Gracias al regulador, se obtiene una acción de aceleración necesaria para alcanzar el punto de la trayectoria con la velocidad deseada.

Para convertir la aceleración/deceleración en consigna de pedal de acelerador y freno, es necesario realizar una calibración de estos actuadores. La calibración se lleva a cabo tomando datos de aceleración y velocidad para distintos valores de actuación sobre los pedales, conduciendo el vehículo manualmente y en línea recta. Los datos recogidos se filtran y promedian para construir una tabla de aceleraciones resultantes, para un valor de actuación a una velocidad del vehículo determinada. Una vez completada, es posible calcular la acción a aplicar en cada uno de los pedales con la aceleración deseada y la velocidad actual del camión, en porcentaje sobre el valor máximo.

Otro elemento clave en el control del movimiento longitudinal es el cambio de marchas. A partir del signo de la velocidad deseada, es posible saber si la marcha requerida es hacia delante (signo positivo) o marcha atrás (signo negativo). Una vez determinada la dirección, el valor de la marcha se obtiene dependiendo de si el camión está cargado o descargado y de la pendiente del camino a recorrer. En términos generales, las marchas largas se aplican cuando el camión circula en vacío en tramos de pendiente reducida, mientras que las marchas cortas se limitan a la circulación con carga o en pendientes pronunciadas. Cabe mencionar que una tabla de calibración de los pedales solo es válida para la marcha utilizada durante el proceso de grabación de datos. Dado el elevado esfuerzo requerido para generar una tabla, que se traduce en horas de conducción manual, se ha optado por aplicar un factor de escala calculado a partir de la marcha con la que se ha realizado la calibración y la marcha deseada según los criterios descritos anteriormente. De este modo, por ejemplo, si el factor de reducción en marcha 5 es 4.0, y en la 2 es 10.0, y la tabla de calibración se graba en marcha 5 y se requiere circular en 2, habría que aplicar un factor de escala de 0.4 a la aceleración proveniente del controlador PI antes de realizar la conversión con la tabla. Para evitar escalar también los valores de freno, no afectados por la marcha, esta modificación se limita a las aceleraciones positivas.

4.2. Control lateral

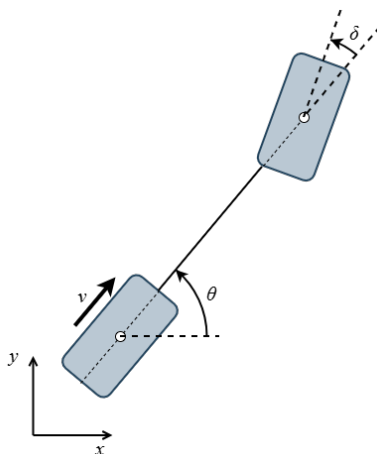


Figura 4: Modelo cinemático de tipo bicicleta.

La dirección de giro del camión autónomo se calcula mediante *Model Predictive Control* (MPC). Este método de control ha sido considerado por la gran adaptabilidad a sistemas

dinámicos complejos, la compatibilidad con restricciones tanto lineales como no lineales y la eficacia a la hora de anticipar estados del sistema (Guanetti et al., 2018). Este controlador utiliza un modelo del sistema para predecir la secuencia óptima de acciones que lleva al estado deseado en cada momento. En este caso, se considera el modelo de bicicleta para representar la cinemática del camión (Snider, 2009) (Figura 4).

En este modelo, v representa la velocidad medida en el centro del eje trasero, θ el ángulo de dirección del vehículo en el sistema de coordenadas global y δ el ángulo de la rueda directriz. A pesar de que la cinemática real del camión difiere de la representada por este modelo, se ha comprobado que en la práctica es una aproximación suficientemente precisa. El algoritmo de optimización, basado en programación cuadrática, trata de encontrar valores de ángulo de giro de ruedas directrices y su derivada tales que lleven al vehículo a seguir la curvatura de las trayectorias objetivo a lo largo de un horizonte temporal determinado. Para ajustar este controlador, simplemente se ha introducido el retraso del motor actuador de la dirección como parámetro. Con esta modificación, el seguimiento de las curvas se ha producido de manera satisfactoria.

Para convertir el ángulo de giro de rueda en ángulo de giro de volante, se han aplicado las gráficas disponibles en la documentación del fabricante utilizando el valor promedio de giro de las cuatro ruedas directrices del camión.

5. Resultados de control en el entorno real

Una vez validados los principales sistemas de conducción autónoma de forma preliminar en simulación, se ha llevado a cabo una serie de pruebas en una cantera de áridos real para comprobar el funcionamiento de los controladores en la operación de transporte completa.

5.1. Validación del sistema de control

Tras haber ajustado los controladores en el entorno real, y con el fin de validar el sistema de control, se ha comparado la curva de velocidad alcanzada frente a velocidad calculada por el planificador (deseada). La Figura 5 muestra cómo el ajuste del control es satisfactorio, ya que la curva velocidad del camión se asemeja a la de velocidad deseada a pesar de las perturbaciones ambientales (perfil variable del terreno, viento, ruido en medidas sensores, error de los actuadores, etc.).

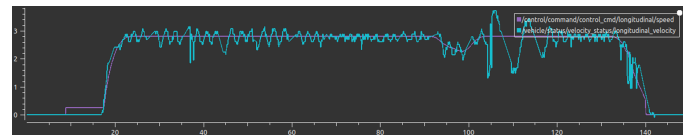


Figura 5: Curvas de velocidad en el eje vertical en [m/s], calculada por el planificador (morado, trazo recto) y alcanzada por el camión (azul), a lo largo del tiempo en el eje horizontal en [s].

5.2. Validación del sistema de transporte autónomo completo

El funcionamiento de los controladores para el seguimiento de trayectorias ha sido validado en una secuencia de transporte completa en la cantera. La Figura 6 muestra a la izquierda la ruta calculada desde la zona inicial de descarga hasta la de carga, y a la derecha la trayectoria desde la zona de carga hasta la de

descarga. A lo largo de estas rutas, en el modo de circulación en carril, se ha comprobado como el camión es capaz de circular de forma autónoma a velocidad nominal (2.8 [m/s] o 10 [km/h] aproximadamente) atravesando zonas de terreno blando, con presencia de agua estancada y pendientes pronunciadas tanto en vacío como con carga (Figura 5).

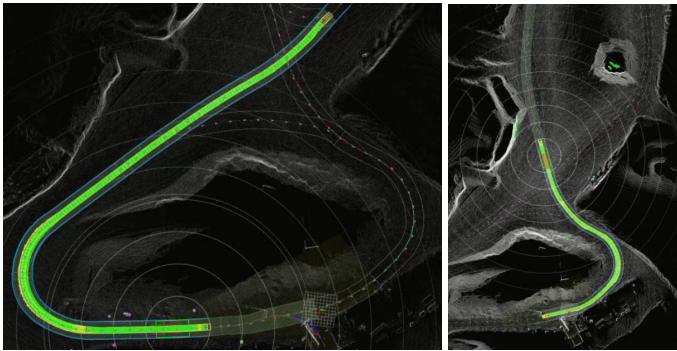


Figura 6: Rutas calculadas desde la zona de carga hasta la de descarga (izquierda) y viceversa (derecha).

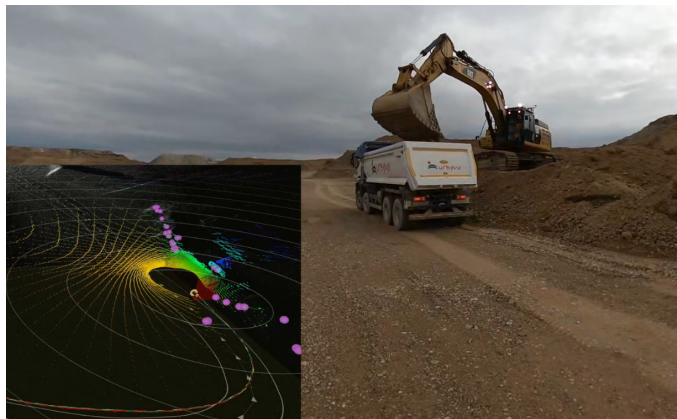


Figura 7: Carga del camión en modo autónomo con retroexcavadora.

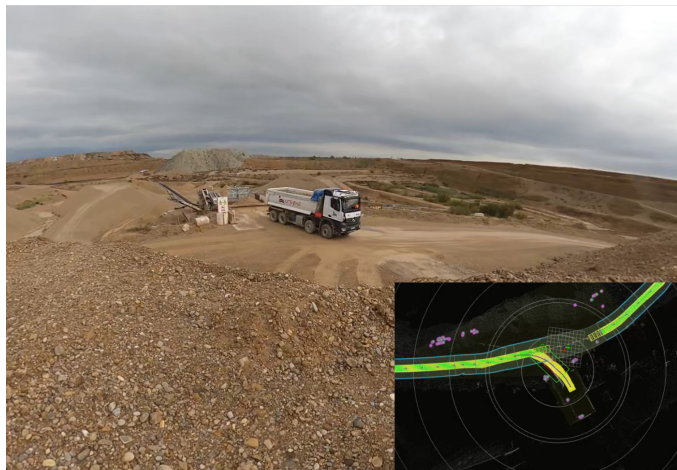


Figura 8: Maniobra de aparcamiento para la descarga en tolva.



Figura 9: Posición de descarga en tolva.

La circulación en modo de aparcamiento también ha sido validada en zonas de espacio limitado de forma satisfactoria. En la Figura 7 se puede observar el camión siendo cargado en modo autónomo en la zona de extracción de material, en una posición muy próxima al frente de excavación. La maniobra de aparcamiento para descargar material en la tolva se muestra en la parte inferior derecha de la Figura 8. Se puede ver que en la posición final de descarga (Figura 9) el espacio libre hasta los obstáculos circundantes es considerablemente reducido.

6. Conclusiones

En este artículo se describen los aspectos principales del modelado y control del movimiento de un camión autónomo, aplicado al transporte de áridos en una cantera. Las pruebas en el lugar de operación real han demostrado la validez de los sistemas desarrollados e ilustrado las mejoras respecto al sistema de transporte manual, en términos de seguridad y confort para los trabajadores. Los siguientes pasos se orientan a avanzar hacia la automatización integral de la cantera, incorporando funciones como la excavación autónoma, la gestión automática del cribado y un sistema de gestión de flotas que coordine varios vehículos autónomos. Estos desarrollos permitirán seguir mejorando la eficiencia y la seguridad del proceso de extracción.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias a URBANIZACIONES Y MEDIO AMBIENTE, S.L. (Urbyma) a través del proyecto DAKAR (IDI-20220458), y parcialmente gracias al apoyo del Gobierno de Aragón a través del proyecto DGA FSE T73_23R.

Referencias

- Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos, 2019. El sector de los áridos en 2019 y perspectivas 2020. Boletín informativo ANEFA.
- Barosan, I., Basmenj, A. A., Chouhan, S. G. R., Manrique, D., 2020. Development of a virtual simulation environment and a digital twin of an autonomous driving truck for a distribution center. In: Software Architecture. pp. 542–557.

- Caldas, K. A. Q., Barbosa, F. M., Silva, J. A. R., Santos, T. C., Gomes, I. P., Rosero, L. A., Wolf, D. F., Grassi Jr., V., 2023. Autonomous driving of trucks in off-road environment. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems* 34, 1179–1193.
DOI: 10.1007/s40313-023-01041-1
- Guanetti, J., Kim, Y., Borrelli, F., 2018. Control of connected and automated vehicles: State of the art and future challenges. *Annual Reviews in Control* 45, 18–40.
DOI: 10.1016/j.arcontrol.2018.04.011
- Hasiri, A., Kermanshah, A., 2024. Exploring the role of autonomous trucks in addressing challenges within the trucking industry: A comprehensive review. *Systems* 12 (9), 320.
- Ministerio de Trabajo, Migraciones y Seguridad Social, 2020. Estadística de accidentes de trabajo. Catálogo de publicaciones de la Administración General del Estado.
- Open Robotics, 2025. Gazebo simulator for ros. <https://gazebo.org/>.
- REBUILD expo, 2020. Sostenibilidad y eficiencia: hacia una construcción circular. Blog informativo.
- Snider, J. M., 2009. Automatic steering methods for autonomous automobile path tracking. Robotics Institute, Pittsburgh, PA, Tech. Rep. CMU-RITR-09-08.
- The Autoware Foundation, 2025. Autoware, open-source autonomous driving framework. <https://autoware.org/>.