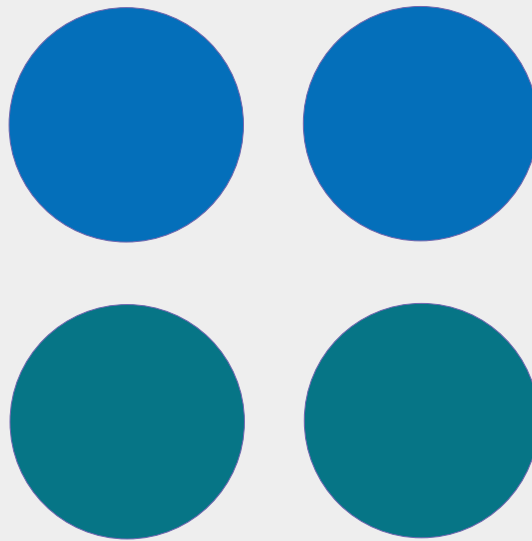


Libro de Actas II Simposio CEA de Ingeniería de Control, Modelado, Simulación y Optimización, y Educación en Automática

(SIME 2026)



Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón
Universidad de Zaragoza

Édgar Ramírez Laboreo
Rodrigo Aldana López
Eduardo Moya Lasheras
Editores

Zaragoza, 21-23 enero 2026



Libro de Actas

del

II Simposio Conjunto de los Grupos Temáticos de CEA de Ingeniería de Control, de Modelado, Simulación y Optimización, y de Educación en Automática (SIME 2026)

Édgar Ramírez Laboreo, Rodrigo Aldana López, Eduardo Moya Lasheras
(Editores)

Édgar Ramírez Laboreo, Rodrigo Aldana López, Eduardo Moya Lasheras (eds.)

1.^a edición. Zaragoza, 2026

Edita: Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A). Universidad de Zaragoza

ISBN: 979-13-88046-11-7



Servicio de Publicaciones
Universidad Zaragoza

Comité organizador local

- Édgar Ramírez Laboreo (Presidente del Comité)
- Rodrigo Aldana López
- Eduardo Moya Lasheras
- Eloy Serrano Seco
- Jorge Vicente Martínez
- Miguel Aranda Calleja
- Carlos Sagüés Blázquez
- Gonzalo López Nicolás
- Rosario Aragüés Muñoz
- Enrique Teruel Doñate
- Irene Pérez Salesa
- Javier Fañanás Anaya
- Juan García-Lechuz Sierra
- Anthony Kyung Guzmán Leguel
- Sergio Pardina Quirós
- Ariana Méndez Castillo

Comité científico

- Manuel G. Ortega Linares
- Carlos Vilas Fernández
- Ildfonso Ruano Ruano
- Montserrat Gil Martínez
- Alejandro Vignoni
- Jesús Chacón Sombría
- Édgar Ramírez Laboreo
- Rodrigo Aldana López
- Eduardo Moya Lasheras

Índice

Plenarias 1

Los siguientes resúmenes se corresponden con las ponencias plenarias del Simposio, organizadas por invitación del Comité Organizador Local y el Comité Científico.

Implementation of advanced process controllers
de Prada Moraga, C. 3

Observadores robustos/no lineales para modelos algebraico-diferenciales
Sala, A. 5

Control por adelanto para rechazo de perturbaciones medibles: reglas de sintonía y aspectos de implementación
Guzmán, J. L. 7

Hacia la simplicidad en el diseño y control de robots blandos
Monje, C. A. 9

Resúmenes 11

Todos los resúmenes presentados a continuación fueron avalados por el Comité Científico y presentados como comunicaciones orales durante el Simposio.

Planitud diferencial para planificar trayectorias en puentes grúa con fricción y obstáculos
Vicente Martínez, J., Ramírez Laboreo, É. 13

Estructura flexible de control adaptativo ciclo a ciclo para sistemas electromecánicos
Serrano Seco, E., Moya Lasheras, E., Ramírez Laboreo, É. 15

Learning discrete event simulation with open-source tools: A ten-year experience
Teruel, E. 17

Autoregressive Physics Informed Neural Networks for Modeling Dynamical Systems
Fañanás Anaya, J., López Nicolás, G., Sagüés, C. 19

Modelo dinámico de un equipo deshidratador por vacío
Monzón Marín, J., Royo Pascual, L., Ramírez Laboreo, É. 21

Parameter estimation for event-triggered sensor fusion
Méndez Castillo, A., Pérez Salesa, I., Aldana López, R., Ramírez Treviño, A., Aragüés, R. . . . 23

Control multi-robot para formaciones flexibles	
García Lechuz, J., Aragüés, R., López Nicolás, G.	25
Morphing de formaciones en sistemas multi agente robóticos	
Mañas Álvarez, F.J., García Lechuz, J., Aragüés, R., López Nicolás, G., Guinaldo, M., Dormido, R.	27
Remanufactura robótica de productos industriales deformables	
López Nicolás, G., Aranda, M., Aragüés, R., Sagüés, C.	29
Percepción distribuida mediante consenso dinámico	
Pardina, S., Aragüés, R., López Nicolás, G.	31
Estimación fiable y tolerante a fallos de la actitud en UAVs con IMUs redundantes	
Gil Martínez, M., Rico, R., Rico Azagra, J., Najera, S., Elvira, C.	33
Artículos	35
<p>Los trabajos listados a continuación fueron también aceptados y presentados oralmente en el Simposio pero siguieron un proceso de revisión por pares específico. Las versiones finales de estos, tras introducir los cambios sugeridos por los revisores, se publicarán de manera definitiva en la revista “Simposios del Comité Español de Automática” (ISSN 3081-5002).</p>	
RA para mejorar el aprendizaje en prácticas de Ingeniería Industrial	
Martínez-Gila, D.M., Ruano-Ruano, I., Illana-Rico, S., Satorres-Martínez, S.	37
Spiking control: bioinspired solution to address nonlinearities in control systems	
Serrano-Balbontín, A.J., Tejado, I., Vinagre, B.M.	43
Elastic Deformable Material Simulation in Unity based on Mass Spring Damper Models	
Sellart, K. D., Oña, E. D., Łukawski, B., Jardón, A.	49
Assessing Student Satisfaction and System Usability in Industrial Robotics Education	
Łukawski, B., Oña, E. D., Victores, J. G., Balaguer, C., Jardón, A.	55
Técnicas de control inteligente aplicadas al robot educativo Lego Mindstorms EV3	
Arambarri, J., Hernández, I., Cabanes, I., Mancisidor, A., Santos, M.	61
Seguimiento de trayectorias autónomo en una grúa robótica hidráulica	
Arzola, C., Rodríguez-Fortún, J.M., Iglesias, J., Canalis, P., Navarro, J.	67
Modelado y control de alto nivel de un camión volquete autónomo	
Herguedas, R., Rodríguez-Fortun, J.M., Espelosin, J.J., Seco, T.	73

Plenarias



Universidad
Zaragoza

II Simposio CEA de los GT: Ingeniería de Control - Modelado, Simulación y Optimización - Educación en Automática (2026)

Implementation of advanced process controllers

de Prada Moraga, C.^{a,*}

^aDepartamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Valladolid, Paseo del Prado de la Magdalena 5, 47011, Valladolid, España.

To cite this article: de Prada Moraga, C. 2026. Implementation of Advanced Process Controllers. Actas del II Simposio CEA de los GT: Ingeniería de Control - Modelado, Simulación y Optimización - Educación en Automática. Zaragoza, España.

Resumen

La conferencia presentó y revisó varios temas que son importantes en la implementación de controladores MPC y en la optimización de procesos pero que, a menudo, no suelen ser objeto de atención en el mundo académico, tales como la selección de variables controladas, los modos de funcionamiento, el tratamiento de no-factibilidades o la consistencia físico-algebraica de las ganancias. Estos problemas se ilustraron con aplicaciones prácticas. La charla abordó también el caso de la optimización económica en un entorno integrado MPC_RTO.

*Autor para correspondencia: cesar.deprada@uva.es

Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)



Universidad
Zaragoza

II Simposio CEA de los GT: Ingeniería de Control - Modelado, Simulación y Optimización - Educación en Automática (2026)

Observadores robustos/no lineales para modelos algebraico-diferenciales

Sala, A.^{a,*}

^aDepartamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universitat Politècnica de Valencia, Camino de Vera s/n, 46022, Valencia, España.

To cite this article: Sala, A. 2026. Robust/Nonlinear Observers for Algebraic-Differential Models. Actas del II Simposio CEA de los GT: Ingeniería de Control - Modelado, Simulación y Optimización - Educación en Automática. Zaragoza, España.

Resumen

El objetivo de esta presentación fue introducir los modelos de Ecuaciones Algebraico-Diferenciales (DAEs) no lineales, y abordar la estimación de estado (observadores) en ellos. A diferencia de los modelos en ecuaciones diferenciales (ecuación de estado, ecuación de salida), las DAEs son la formulación natural para muchos modelos de primeros principios; además, despejar la derivada del estado puede no ser posible explícitamente en sistemas no lineales. Se exploraron técnicas heredadas de los sistemas lineales, enfocándose en las Desigualdades Matriciales Lineales (LMIs). El uso de LMIs permite trasladar las herramientas de control multivariable lineal clásicas.^a análisis robusto no lineal, en particular sistemas con no-linealidad de “sector”. Se discutió cómo las LMIs proporcionan garantías de estabilidad y prestaciones.

*Autor para correspondencia: asala@isa.upv.es



Universidad
Zaragoza

II Simposio CEA de los GT: Ingeniería de Control - Modelado, Simulación y Optimización - Educación en Automática (2026)

Control por adelanto para rechazo de perturbaciones medibles: reglas de sintonía y aspectos de implementación

Guzmán, J. L.^{a,*}

^aDepartamento de Informática, Universidad de Almería, Ctra. Sacramento s/n, 04120, Almería, España.

To cite this article: Guzmán, J.L. 2026. Feedforward Control for Rejection of Measurable Disturbances: Tuning Rules and Implementation Aspects. Actas del II Simposio CEA de los GT: Ingeniería de Control - Modelado, Simulación y Optimización - Educación en Automática. Zaragoza, España.

Resumen

Se presentó una visión general del control por adelanto or feedforward como técnica eficaz para el rechazo de perturbaciones medibles en problemas de regulación, complementando a los esquemas clásicos de realimentación. Se mostró el potencial de esta estrategia y su amplio uso en aplicaciones industriales. Se revisaron distintas reglas de sintonía del controlador por adelanto, poniendo énfasis tanto en los fundamentos teóricos como en su interpretación práctica. Asimismo, se abordaron aspectos clave de implementación, facilitando su aplicación en sistemas reales y exponiendo algunos ejemplos de experiencias industriales.

*Autor para correspondencia: joguzman@ual.es



Universidad
Zaragoza

II Simposio CEA de los GT: Ingeniería de Control - Modelado, Simulación y Optimización - Educación en Automática (2026)

Hacia la simplicidad en el diseño y control de robots blandos

Monje, C. A.^{a,*}

^aDepartamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Carlos III of Madrid, Av. Universidad 30, 28911 Leganés, Madrid, España.

To cite this article: Monje, C.A. 2026. Towards Simplicity in the Design and Control of Soft Robots. Actas del II Simposio CEA de los GT: Ingeniería de Control - Modelado, Simulación y Optimización - Educación en Automática. Zaragoza, España.

Resumen

Esta charla introdujo el concepto de robot blando y aborda el problema del diseño y control de este tipo de robots. Frente a diseños complejos que requieren el uso de técnicas basadas en Inteligencia Artificial para su modelado y control efectivo, se presentó un diseño de articulación robótica blanda versátil y simple, que permite el uso de técnicas analíticas para su modelado y control. Se introdujo el concepto de controlador PID fraccionario, una versión generalizada del conocido controlador PID, y se demostró cómo los órdenes de integración y derivación del mismo pueden otorgar al robot blando la robustez necesaria sin necesidad de recurrir a técnicas basadas en datos.

*Autor para correspondencia: cmonje@ing.uc3m.es

Resúmenes

Planitud diferencial para planificar trayectorias en puentes grúa con fricción y obstáculos.

Vicente Martínez, J.^{a,*}, Ramírez Laboreo, É.^a

^aDepartamento de Informática e Ingeniería de Sistemas (DIIS) e Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A),
Universidad de Zaragoza, Calle María de Luna 1, 50018, Zaragoza, España

To cite this article: Vicente Martínez, J., Ramírez Laboreo, É., 2026. Differential flatness for trajectory planning on overhead cranes with friction and obstacles. Actas del II Simposio CEA de los GT: Ingeniería de Control - Modelado, Simulación y Optimización - Educación en Automática. Zaragoza, España.

Resumen

Los puentes grúa son equipos fundamentales para el transporte de cargas pesadas en entornos industriales. La automatización de estos dispositivos presenta desafíos significativos debido a su naturaleza subactuada, comportamiento no lineal y la presencia de fricción en sus ejes. Los trabajos existentes (Wang et al., 2021; Nguyen et al., 2024) han priorizado tradicionalmente la supresión de oscilaciones de la carga durante todo el movimiento, buscando garantizar la seguridad, lo que a menudo resulta en trayectorias conservadoras que no optimizan tiempos ni energía. Además, es común simplificar los modelos dinámicos omitiendo la fricción o tratándola como una perturbación externa, e ignorar las posibles colisiones del cable con los obstáculos, al asumir ángulos pequeños de oscilación que mantienen la carga debajo del carro. Asimismo, la mayoría de enfoques requieren conocer la posición de la carga para posteriormente hacer el control, bien de forma indirecta (midiendo los ángulos de inclinación) o bien de forma directa (con cámaras u otros sistemas de posicionamiento). Sin embargo, estos no suelen estar disponibles en entornos industriales estándar, donde las únicas salidas típicas son la posición del carro y la longitud de la cuerda (x_t, y_t, L).

Para abordar estos retos, este trabajo presenta un método de planificación de trayectorias eficientes para puentes grúa 3D que explota la propiedad de planitud diferencial del sistema (Vu et al., 2022). A diferencia de los enfoques clásicos, este método permite oscilaciones controladas durante el trayecto para aprovechar la dinámica natural del sistema, garantizando la eliminación de la oscilación al llegar al punto final. La planificación se formula como una optimización sobre la salida plana (posición de la carga) y sus derivadas. Para ello, se establece el punto inicial y final de la carga, y los obstáculos presentes en el entorno. La optimización se lleva a cabo utilizando el modelo dinámico del sistema, con su correspondiente modelo de fricción, las restricciones físicas del sistema (límites de acción, posición del carro y longitud de la cuerda) y evitando choques de la carga como de la cuerda con los obstáculos. Esto se consigue gracias a la planitud, que permite, para cada instante, conociendo posición de la carga y sus derivadas, conocer la posición del carro y la acción que se tiene que aplicar a los motores del sistema (u_x, u_y, u_r). Para asegurar la convergencia de la optimización en entornos complejos, se utiliza el algoritmo RRT* para calcular una trayectoria geométrica inicial factible.

Un aspecto central del estudio es el análisis del impacto de la fricción en la trayectoria planificada. A partir de datos experimentales obtenidos de un prototipo de puente grúa de laboratorio (Vicente-Martínez and Ramírez-Laboreo, 2025), se proponen tres modelos de fricción con distinto nivel de fidelidad: (i) un modelo completo, que incorpora fricción seca dependiente tanto de la posición como del sentido de movimiento, y fricción viscosa dependiente del sentido; (ii) un modelo simplificado, que asume coeficientes constantes por eje para las componentes seca y viscosa; y (iii) un modelo sin fricción seca que considera únicamente un coeficiente viscoso constante para cada eje.

Teniendo en cuenta las medidas disponibles, el método propuesto calcula la acción a aplicar a los motores del sistema a partir del término de prealimentación calculado por la optimización, y un término de control en bucle cerrado. Se podría argumentar que un control en bucle cerrado lo suficientemente bueno podría compensar las carencias de un modelo de fricción simplificado, pero en este trabajo, queremos demostrar que confiar en el control en bucle cerrado en muchos casos no es suficiente para corregir las dinámicas causadas por la fricción. Para ello, el control por realimentación se realiza con tres controladores PI ajustados que permitan seguir la trayectoria objetivo para el carro y la cuerda. El esquema de control completo se muestra en la Figura 1.

*Autor para correspondencia: j.vicente@unizar.es

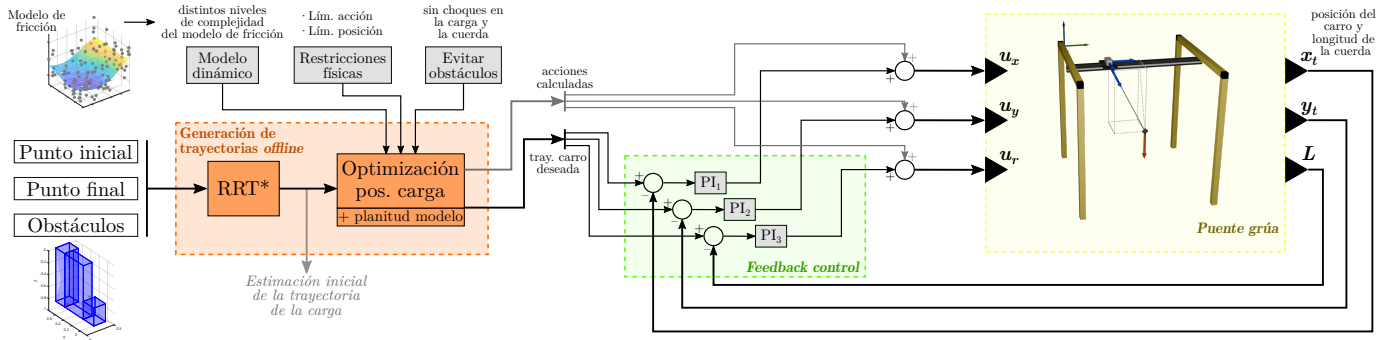


Figura 1: Esquema de generación de la trayectoria de referencia y control para el puente grúa 3D.

Siguiendo este esquema se han obtenido resultados tanto por simulación, utilizando un simulador con una fricción modelada igual a la del modelo completo, como con el prototipo real. En las simulaciones se han generado escenarios donde la fricción real del sistema difiere aleatoriamente de la utilizada en la planificación, con variaciones de hasta el 100% en el valor de fricción seca. Los resultados indican que omitir el término de fricción seca en el modelo de planificación puede generar trayectorias que provocan colisiones durante la ejecución. Las simulaciones demuestran que, incluso ante discrepancias entre la fricción seca real y la modelada, incorporar una estimación aproximada de la fricción seca reduce la oscilación residual y acelera su extinción, en comparación con ignorarla por completo. Finalmente, los experimentos en el prototipo real, utilizando los parámetros identificados, confirman que tanto el modelo completo como el simplificado logran seguir la trayectoria correctamente (Figura 2). Por contra, el modelo sin fricción seca genera soluciones con mayor cantidad de oscilaciones finales y, en algunos casos, colisiones de la carga con los obstáculos. En definitiva, se ha comprobado que, aunque no es necesario un gran nivel de detalle en la fricción, sí que es necesario incluirla, teniendo en cuenta la fricción seca para garantizar una trayectoria eficiente y segura.

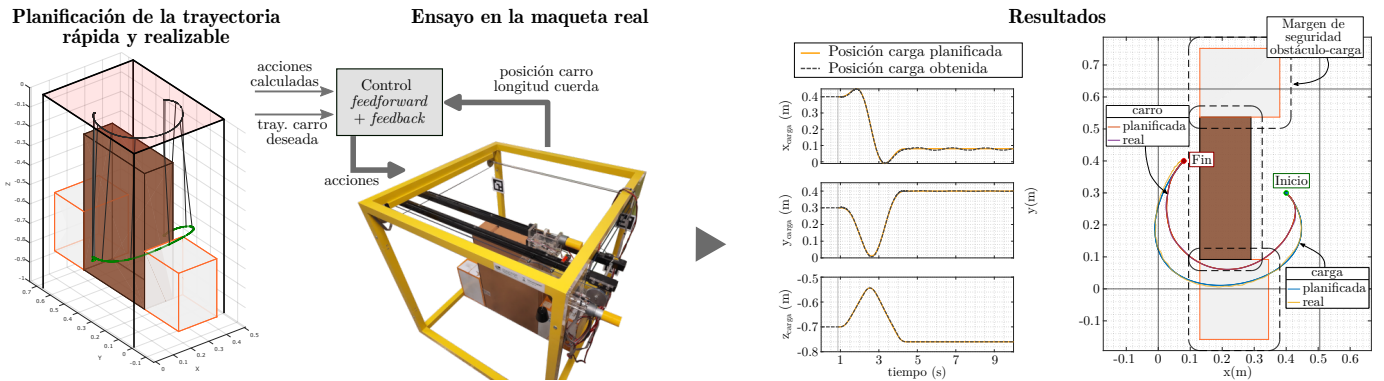


Figura 2: Esquema de funcionamiento y resultados obtenidos en la maqueta real para uno de los escenarios en los que la trayectoria ha sido planificada con el modelo de fricción seca completo.

Agradecimientos

Esta publicación ha sido parcialmente financiada por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades a través de la ayuda FPU24/01878. Además, esta publicación es parte de los proyectos PID2021-124137OB-I00 y PID2024-159279OB-I00, financiados por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y FEDER Una manera de hacer Europa.

Referencias

Nguyen, V. C., Thi, H. L., Khanh, H. B. T., Danh, H. N., Duc, D. P., Nguyen, T. L., Nov. 2024. An integrated solution for 3D overhead cranes: Time-optimal motion planning, obstacle avoidance, and anti-swing. *Eng. Sci. Technol. Int. J.* 59, 101852. DOI: 10.1016/j.jestch.2024.101852

Vicente-Martínez, J., Ramírez-Laboreo, E., 2025. A hybrid dynamic model and parameter estimation method for accurately simulating overhead cranes with friction. *ArXiv preprint*. DOI: 10.48550/arXiv.2509.13330

Vu, M., Schwegel, M., Hartl-Nesic, C., Kugi, A., 2022. Sampling-based trajectory (re)planning for differentially flat systems: Application to a 3D gantry crane. *IFAC-PapersOnLine* 55 (38), 33–40. DOI: 10.1016/j.ifacol.2023.01.130

Wang, X., Liu, J., Dong, X., Peng, H., Li, C., Jul. 2021. An energy-time optimal autonomous motion control framework for overhead cranes in the presence of obstacles. *Proc. Inst. Mech. Eng., Part C: J. Mech. Eng. Sci.* 235 (13). DOI: 10.1177/0954406220954502

Estructura flexible de control adaptativo ciclo a ciclo para sistemas electromecánicos

Serrano Seco, E.^{a,*}, Moya Lasheras, E.^a, Ramirez Laboreo, É.^a

^aDepartamento de Informática e Ingeniería de Sistemas (DIIS) e Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A),
Universidad de Zaragoza, Zaragoza 50018, España.

To cite this article: Serrano Seco, E., Moya Lasheras, E., Ramírez Laboreo, É. 2026. Flexible Run-to-Run Adaptive Control Structure for Electromechanical Systems. Actas del II Simposio CEA de los GT: Ingeniería de Control - Modelado, Simulación y Optimización - Educación en Automática. Zaragoza, España.

Resumen

La creciente adopción de técnicas de fabricación automatizada ha incrementado de forma notable la dependencia de sistemas mecatrónicos complejos, como brazos robóticos industriales, máquinas herramienta multieje y otros dispositivos electromecánicos. Estos sistemas se caracterizan por ejecutar de manera repetitiva un conjunto reducido de movimientos o acciones. De forma análoga, esta repetitividad también está presente en subsistemas embebidos de bajo coste—sensores, actuadores o elementos de transmisión—cuyo uso se ve impulsado por la necesidad de reducir costes y aumentar la escalabilidad.

En ambos casos, bien por la complejidad o por reducción de costes, los modelos considerados de estos sistemas no reproducen fielmente la dinámica real del sistema. Aunque estos dispositivos se diseñan a partir de modelos geométricos, cinemáticos y de control bien definidos, en la práctica aparecen desviaciones inevitables debidas a imperfecciones constructivas, tolerancias de fabricación, desgaste y a la simplificación de ciertos efectos dinámicos. Como consecuencia, una calibración final o mejora continua del control se convierten en procesos indispensables para corregir errores sistemáticos y mejorar tanto la exactitud de la tarea como el rendimiento global del sistema. En este contexto, las estrategias de control ciclo a ciclo (Sachs et al., 1991)—también conocidas por la terminología inglesa *run-to-run* (R2R)—resultan especialmente adecuadas cuando, por limitaciones técnicas o económicas, no se dispone de información fiable del elemento final a controlar en tiempo real. Este enfoque de control de procesos (ver Fig. 1(a)) ajusta los parámetros de operación θ entre ciclos consecutivos para reducir la variabilidad y mantener el proceso cerca del valor objetivo, a partir de J la evaluación del desempeño al final de cada ciclo.

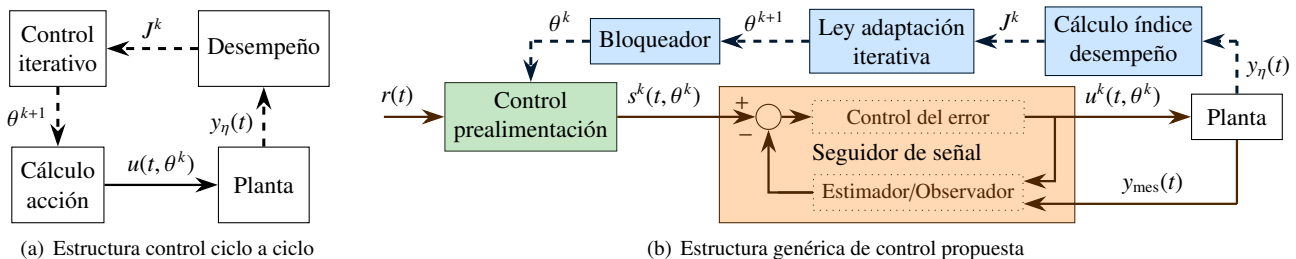


Figura 1: Diagrama general de control. El superíndice k se utiliza para denotar las variables de la operación k -ésima.

En esta charla se presenta un enfoque general de una estructura de control ciclo a ciclo (ver Fig. 1(b)) especialmente versátil para dispositivos electromecánicos—por una propiedad estructural de sus modelos—de comportamiento repetitivo. Dicha estructura combina dos niveles claramente diferenciados: un control en tiempo real y un control iterativo. El control en tiempo real se basa en un esquema de prealimentación, que puede complementarse opcionalmente con un seguidor de señal, y se encarga de generar la acción de control u necesaria para reproducir la referencia deseada r . El control iterativo (bloques azules del esquema de Fig.1(b)), por su parte, actúa tras cada repetición del proceso, modificando los parámetros que definen el control en tiempo real a partir de un índice de desempeño J calculado mediante señales medibles y_η , que pueden ser continuas o discretas y estar disponibles en tiempo real o con retardo. Gracias a esta separación, la estructura propuesta ofrece una elevada flexibilidad tanto en el diseño del control en tiempo real como en la elección de la ley de adaptación iterativa y el cálculo del índice de desempeño. En particular, al no presuponer una relación analítica explícita entre el índice de desempeño J y los parámetros del control θ , la adaptación se formula

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

como un problema de optimización numérica, permitiendo el uso de métodos de optimización sin derivadas, técnicas bayesianas u otros algoritmos específicos desarrollados para este fin.

Para el diseño del control en tiempo real nos basamos en la estructura del modelo que describe un sistema electromecánico genérico. Este se define mediante las ecuaciones $M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + F(\dot{q}) = \tau(e)$, y $f(q, \dot{q}, e, \dot{e}) = u$, donde q y \dot{q} representan las coordenadas y velocidades mecánicas, e una variable de la dinámica eléctrica, y u la tensión eléctrica, entrada del sistema. Este modelo genérico se puede expresar en forma de espacio de estados no lineal con $x = [q, \dot{q}, e]^T$ como variables de estado. Considerando q la salida del sistema a controlar—hecho común en estos sistemas—, el modelo resulta diferencialmente plano. Esta propiedad estructural—*planitud diferencial*—está presente en aquellos sistemas de orden n en los que la derivada n -ésima de la salida es la primera en la que aparece explícitamente la entrada (Lévine, 2011). Dicha propiedad permite expresar tanto el estado x como la entrada u en función de la salida plana $y(t) = q(t) = r(t)$ y sus derivadas, habilitando el diseño directo de leyes de control por prealimentación sin integrar la dinámica no lineal acoplada. De este modo, la entrada u puede calcularse de forma explícita o, en presencia de medidas y_{mes} de variables relacionadas con x , acoplar en serie un seguidor de la señal s calculada por prealimentación.

Como ejemplo representativo para ilustrar la versatilidad de la estructura propuesta, se aplica el enfoque a un relé electromecánico comercial. Aunque estos dispositivos son funcionales, presentan comportamientos no óptimos al producirse fuertes impactos y rebotes de los componentes móviles al final de la conmutación, lo que da lugar a desgaste prematuro y posible degradación del rendimiento del sistema en el que se encuentran embebidos. El objetivo del control es lograr que el componente móvil finalice la conmutación con velocidad nula, a través de una trayectoria de aterrizaje suave. Sin embargo, la posición de dicho componente no está disponible. El modelo considera como variables de estado la posición, la velocidad y el flujo magnético λ , generado por la aplicación de la tensión eléctrica. Como señales medibles se emplea una señal acústica obtenida mediante un micrófono, la cual proporciona información indirecta sobre la velocidad de impacto y se utiliza como indicador de desempeño. Opcionalmente se puede medir la corriente eléctrica $i = h(x)$.

Las estructuras implementadas corresponden a aquellas donde la salida del control por prealimentación es la tensión ($s = u$)—no necesita seguidor de señal—(Moya-Lasheras et al., 2023), la corriente eléctrica ($s = i$)—el seguidor de señal está compuesto por un control PI—(Serrano-Seco et al., 2023a), y el flujo magnético ($s = \lambda$)—el seguidor de señal está compuesto por un control PI y un estimador a partir de la tensión y la corriente—(Serrano-Seco et al., 2023b). Las leyes de adaptación empleadas se han basado en el método de Nelder-Mead (opt. NM) y el algoritmo presentado en Serrano-Seco et al. (2025) (opt. AC), con el cual se aumenta la velocidad de convergencia frente al Nelder-Mead. Debido a la estocasticidad de estos dispositivos y la variabilidad entre dispositivos por las tolerancias de fabricación cada estructura se ha implementado 10 veces sobre 10 dispositivos comerciales.

Los resultados experimentales muestran mejoras significativas respecto a la activación sin control o a la situación inicial de control, independientemente de la variante de la estructura de control considerada, poniendo de manifiesto el potencial del enfoque propuesto para la calibración final y la mejora continua de sistemas electromecánicos de comportamiento repetitivo.

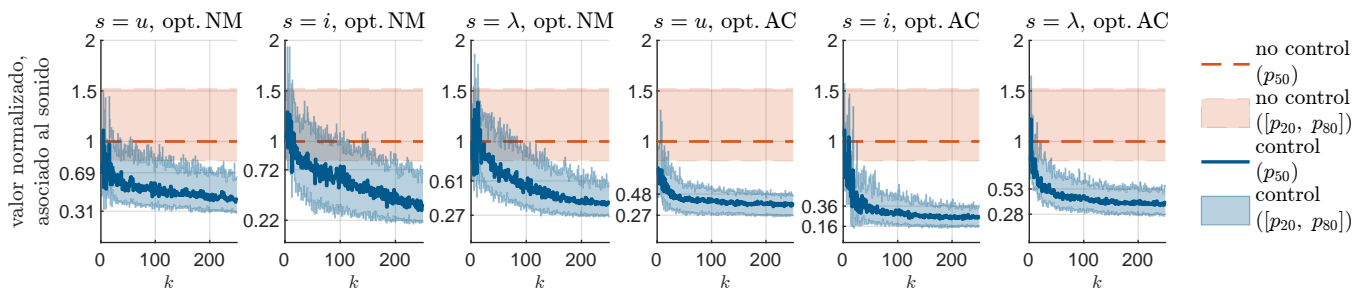


Figura 2: Integral normalizada de la señal acústica en función del número de repeticiones con control por ensayo. El gráfico incluye la mediana (p_{50}) y el intervalo entre el percentil 20 y 80 ($[p_{20}, p_{80}]$). El gráfico de costes muestra los valores obtenidos aplicando control y aplicando una señal de activación de tensión cuadrada.

Agradecimientos

Esta publicación es parte de los proyectos de I+D+i PID2024-159279OB-I00 y CPP2024-011615, financiados por MICIU/AEI/10.13039/501100011033, por FEDER Una manera de hacer Europa y por la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR.

Referencias

- Lévine, J., 2011. On necessary and sufficient conditions for differential flatness. *Appl. Algebra Eng., Commun. Comput.* 22 (1), 47–90. DOI: 10.1007/s00200-010-0137-x
- Moya-Lasheras, E., Ramirez-Laboreo, E., Serrano-Seco, E., 2023. Run-to-Run Adaptive Nonlinear Feedforward Control of Electromechanical Switching Devices. *IFAC-PapersOnLine* 56 (2), 5358–5363. DOI: 10.1016/j.ifacol.2023.10.181
- Sachs, E., Guo, R.-S., Ha, S., Hu, A., 1991. Process control system for VLSI fabrication. *IEEE Trans. Semicond. Manuf.* 4 (2), 134–144. DOI: 10.1109/66.79725
- Serrano-Seco, E., Moya-Lasheras, E., Ramirez-Laboreo, E., 2023a. Control adaptativo ciclo a ciclo de relés electromecánicos. *XLIV Jornadas de Automática*, 364–369. DOI: 10.17979/spudc.9788497498609.364
- Serrano-Seco, E., Moya-Lasheras, E., Ramirez-Laboreo, E., 2025. A hybrid algorithm for iterative adaptation of feedforward controllers: An application on electro-mechanical switches. *Eur. J. Control* 86, 101305, special Issue on the European Control Conference 2025. DOI: 10.1016/j.ejcon.2025.101305
- Serrano-Seco, E., Ramirez-Laboreo, E., Moya-Lasheras, E., Sagues, C., Dec. 2023b. An audio-based iterative controller for soft landing of electromechanical relays. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 70 (12), 12730–12738. DOI: 10.1109/TIE.2022.3231254



II Simposio CEA de los GT: Ingeniería de Control - Modelado, Simulación y Optimización - Educación en Automática (2026)

Learning discrete event simulation with open-source tools: A ten-year experience

Teruel, Enrique *

Dpto. de Informática e Ingeniería de Sistemas, Universidad de Zaragoza, C/ María de Luna nº 3, 50018, Zaragoza, España.

To cite this article: Teruel, Enrique. 2026. Learning discrete event simulation with open-source tools: A ten-year experience. II Simposio CEA de los GT: Ingeniería de Control - Modelado, Simulación y Optimización - Educación en Automática. Zaragoza, España.

Abstract

When I assumed responsibility for the Modeling and Simulation of Dynamic Systems course in 2016, I felt that utilizing open-source tools was essential. The rationale behind this decision, along with insights from the course's inaugural year, was previously documented by Teruel and Aragues (2017), presented in the "Jornadas de Automática".

The objective of this presentation is to reflect on the experience gained over the past ten editions, detailing the course's evolution and its current organizational structure. The course maintains high satisfaction levels among students and instructors alike. In addition to formal surveys, we leverage qualitative student feedback to ensure continuous programmatic evolution.

An international version of the curriculum was launched in 2025 as an Erasmus+ Blended Intensive Programme. This is a collaborative project involving Università degli Studi del Piemonte Orientale "Amedeo Avogadro" (Italy), Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași (Romania) and Université Sorbonne Paris Nord (France). Following a highly successful first edition, after some adaptations suggested by this first experience, the second edition is scheduled to take place from next March, concluding with a residential week in Zaragoza, Spain, starting at June 29th.

In brief, I believe the **primary strengths** of the course are as follows:

- **The selection of JaamSim** (<https://jaamsim.com/>), a powerful and user-friendly open-source tool with an intuitive GUI. Independent studies (Dagkakis and Heavey, 2016; Vieira *et al.*, 2019; Lang *et al.*, 2021; and Kristiansen *et al.*, 2022) consistently identify it as a leading open-source alternative to commercial software. The platform has seen steady improvement over the years, driven by a development team that is highly responsive to community feedback.
- **Integrated hands-on learning:** The course emphasizes practical learning by seamlessly integrating hands-on work into every session. Using a flipped classroom approach, students bring their laptops to class, and "lecture" time is prioritized for clarifying concepts and demonstrating best practices. This moves away from rote theory, as students are expected to study foundational topics independently using provided (open-access) resources: some video lessons and the textbook by Rossetti (2021).
- **Project-Oriented Focus:** The curriculum is designed around the development of a significant final project, at the level of the [IISE/Rockwell Student Simulation Competition](#).

The primary drawback remains the lack of a dedicated textbook or a comprehensive repository of case studies for JaamSim. This stands in contrast to Arena, a commercial tool, featured in many textbooks, that offers a limited student version. However, we have developed a sufficient set of internal examples for this course. In any case, the ability to adapt to different software environments is, in itself, a critical professional competence for students to master.

Acknowledgements

This work was supported via projects PID2021-124137OB-I00 and PID2024-159279OB-I00 funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033, by ERDF "A way of making Europe" and by the European Union NextGenerationEU/PRTR.

* eteruel@unizar.es

References

- Teruel, E., Aragues, R., 2017. Aprendiendo simulación de eventos discretos con JaamSim. En Actas de las XXXVIII Jornadas de Automática, Gijón, 6-8 de Septiembre de 2017 (pp.522-527). DOI: <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497497749.0522>
- Dagkakis, G., Heavey, C., 2016. A review of open source discrete event simulation software for operations research. *Journal of Simulation*. 10 (3). Palgrave Macmillan UK: 193–206. <https://doi.org/10.1057/jos.2015.9>
- Vieira, A. *et al.*, 2019. A ranking of the most known freeware and open source discrete-event simulation tools. *The European Modeling and Simulation Symposium*. pp. 200–209. <https://doi.org/10.46354/i3m.2019.emss.029>
- Lang, S. *et al.*, 2021. Open-source discrete-event simulation software for applications in production and logistics: An alternative to commercial tools?. *Procedia Computer Science*. 180. Elsevier: 978–987. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.349>
- Kristiansen, O. *et al.*, 2022. Experimental Comparison of Open Source Discrete-Event Simulation Frameworks. *Simulation Tools and Techniques. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*. Vol. 424. Springer. pp. 315–330. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97124-3_24
- Rossetti, M.D., 2021. *Simulation Modeling and Arena, 3rd and Open Text Edition*. Retrieved from <https://rossetti.github.io/RossettiArenaBook/>

Autoregressive Physics-Informed Neural Networks for Modeling Dynamical Systems

Fañanás-Anaya, J.*, López-Nicolás, G., Sagüés, C.

Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A), Universidad de Zaragoza, Mariano Esquillor, 50018 Zaragoza, Spain.

To cite this article: Fañanás-Anaya, J., López-Nicolás, G., Sagüés, C. 2026. Autoregressive Physics-Informed Neural Networks for Modeling Dynamical Systems. Actas del II Simposio CEA de los GT: Ingeniería de Control - Modelado, Simulación y Optimización - Educación en Automática. Zaragoza, España.

Abstract

Accurate and efficient modeling of dynamical systems is essential for simulation, state prediction, and control applications. Analytical or physics-based models provide strong interpretability and robustness, but can become computationally expensive or unfeasible for complex dynamics. Data-driven approaches, such as Neural Networks (NNs), offer computational efficiency and flexibility in these scenarios, though they require large datasets and may suffer from limited interpretability and generalization.

When we know the equations of the system but an analytical solution is not feasible, Physics-Informed Neural Networks (PINNs), introduced by Raissi et al. (2019), are a powerful alternative that combine physics with data. Compared to traditional data-based NNs, PINNs are more robust and have better generalization capabilities. They also require smaller datasets and result in lighter models. Their main drawback lies in training, as standard PINNs often struggle to converge compared to a data-driven NN.

PINNs approximate solutions to systems defined by Ordinary Differential Equations (ODEs) or Partial Differential Equations (PDEs). They estimate states over the continuous time horizon $t \in [0, T]$, performing a direct mapping from time to state. This approach can fail for long prediction horizons, as PINNs may not capture temporal causality, reducing long-term accuracy. They also struggle to generalize beyond the training horizon. Additionally, standard PINNs do not support control inputs.

In view of the limitations of PINNs in the context of control, Antonelo et al. (2024) proposes PINC. To improve accuracy over long prediction horizons, PINC introduces block prediction. Each block estimates a time interval $t \in [0, T]$, where a sequence of K blocks yields a prediction horizon $H = K \cdot T$. The final state of each block initializes the next one, resulting in an autoregressive scheme. PINC addresses the limitation of control inputs in PINNs by supporting the use of a constant control input per block.

However, PINC has two main limitations. The first is that, although the model is used autoregressively during the testing phase, it is not trained in this way. During training, the states predicted in the previous block are not used; instead, they are randomly sampled. This simplifies training and improves convergence, but results in error accumulation in long prediction horizons, since it is not optimized to use its own predictions. The second limitation is that PINC requires a constant control input per block. This means that if in an application the control input change with a high frequency, the size of the time interval T of each block will be small. Having small blocks involves more autoregressive connections, which amplify error accumulation.

In this work we propose a new framework, the Autoregressive Physics-Informed Neural Network (AR-PINN). Our contributions are: (i) AR-PINN incorporates block prediction but introduces an autoregressive training scheme, improving accuracy over long prediction horizons; (ii) AR-PINN supports varying control inputs in each prediction block, allowing larger time intervals T per block. This reduces the number of autoregressive steps and mitigates error accumulation over long prediction horizons; and (iii) we validated AR-PINN by modeling a Robotic Serial Manipulator System, with better results than PINC.

We define the AR-PINN model by f_{ar} . For block k , its output is the estimated system states $\hat{Y}_k \in \mathbb{R}^{m \times n_t}$, given by:

$$\hat{Y}_k = f_{ar}(\hat{y}_{k-1}, U_{k-1}, t) \quad (1)$$

Where $\hat{y}_{k-1} \in \mathbb{R}^m$ is the final estimated state of the previous block (autoregressive input), and $U_{k-1} \in \mathbb{R}^{n \times c}$ is the control sequence for block k with c control changes. The vector of time instants for each block is defined as $t \in \mathbb{R}^{1 \times n_t}$, where n_t denotes the number of time steps per block and the elements are sampled within the interval $[0, T]$, not necessarily uniformly. Fig. 1 shows a scheme of how our proposed block prediction works, as well as the information that is transmitted between blocks.

*Corresponding author: javierfa@unizar.es

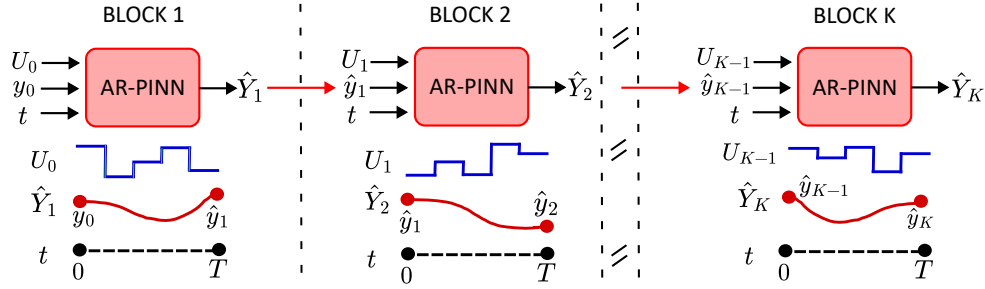


Figure 1: Scheme of the proposed AR-PINN framework for K blocks. For simplicity, both the control signals U_k and the system states Y_k are assumed to be one-dimensional ($n = 1, m = 1$). In this example, each block includes $c = 5$ control changes. For the first block, the AR-PINN takes as inputs the real system state y_0 , the control inputs of the block from that initial state U_0 , and n_t time instants sampled from the interval $t \in [0, T]$. AR-PINN is evaluated n_t times to estimate the solution at the selected time instants, resulting in \hat{Y}_1 for block 1. The final estimation \hat{y}_1 of block 1 is used as the initial state for the subsequent block, forming the autoregressive connection. The same procedure is repeated for the remaining blocks, with the initial state given by the last predicted state of the previous block.

As an example of a real-world scenario, we have worked with the equations and simulations of a Two-Link Manipulator, previously studied with PINC by Nicodemus et al. (2022). The system is identified in the cited work with the following dynamics:

$$M(q)\ddot{q} + N(q, \dot{q}) = h(q, \dot{q}) + B u \quad (2)$$

Where $q = [\alpha, \beta]^\top \in \mathbb{R}^2$ are the generalized coordinates, $M(q) \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ is the nonsingular mass matrix, $N(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^2$ is the vector of centrifugal, coriolis, and gyroscopic forces, $h(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^2$ is the vector of applied forces, $B \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ is the input matrix, and $u \in \mathbb{R}^2$ is the input vector, which are the motor currents. The generalized coordinates are our system state: $y = q = [\alpha, \beta]^\top$.

For a block k , AR-PINN uses a Multi-Layer Perceptron to estimate the states \hat{Y}_k of the system. During training, we also calculate the derivatives needed to compute the physical loss \mathcal{L}_P using automatic differentiation. The physical loss is defined as $\mathcal{L}_P = \text{MSE}(\hat{\mathcal{F}}, 0)$, where $\hat{\mathcal{F}}$ is the physics residual estimated by AR-PINN. For this second-order system, we calculate $\frac{d\hat{Y}_k}{dt}$ and $\frac{d^2\hat{Y}_k}{dt^2}$ from \hat{Y}_k using automatic differentiation. Then we define $\hat{\mathcal{F}}$, based on (2) as:

$$\hat{\mathcal{F}} = M(\hat{Y}_k) \frac{d^2\hat{Y}_k}{dt^2} + N(\hat{Y}_k, \frac{d\hat{Y}_k}{dt}) - h(\hat{Y}_k, \frac{d\hat{Y}_k}{dt}) - B U_{T(k-1), T_k} \quad (3)$$

The data-based loss component \mathcal{L}_D is computed only from the estimated initial and final states of the block, and the reference values. Thus, for a block k , we define it as $\mathcal{L}_D = \text{MSE}(\hat{y}_{k-1}, y_{k-1}) + \text{MSE}(\hat{y}_k, y_k)$. Finally, combining the physical and data-based terms, the total loss is defined as $\mathcal{L} = \lambda_P \mathcal{L}_P + \lambda_D \mathcal{L}_D$, where λ_P and λ_D are the values used to weigh \mathcal{L}_P and \mathcal{L}_D .

In this example, we found the best results with 3 layers of 64 units, with hyperbolic tangent (tanh) as activation function. We used the Adam optimizer for 2,000 epochs, with learning rates 10^{-3} and 10^{-4} for the first and last 1,000 epochs, respectively. Training concludes with an LBFSG phase using: learning rate of 1.0, history size of 100, and 500 maximum iterations. Inputs and states were normalized to $[-1, 1]$, and the losses were weighted with $\lambda_P = 1$ and $\lambda_D = 2 \times 10^4$ to balance their contributions.

For the simulations, we set the prediction horizon to $H = 10$ s. Each prediction block covers $T = 1$ s, resulting in $K = H/T = 10$ blocks. The control signal is updated every 0.2 s, yielding $c = 5$ control changes per block. We generate 3,000 simulations for training, and 300 for testing. Each simulation starts from a random initial state y_0 , sampled component-wise from the interval $[-\pi, \pi]$. At every control update the input u is sampled component-wise from $[-0.5, 0.5]$.

In the 300 test simulations, AR-PINN shows strong performance, with a MAE of 0.08 rad, maintaining accuracy for different types of control inputs and avoiding error accumulation over 10 s. In contrast, PINC starts accumulating errors after 4 s. AR-PINN also has a lower computational cost than PINC. In this example, AR-PINN has 9,346 parameters, compared to 12,994 for PINC, and simulating 1 s requires approximately 1 ms for AR-PINN compared to 5.8 ms for PINC on the same hardware.

Acknowledgements

This work was supported via project REMAIN - S1/1.1/E0111 (Interreg Sudoe Programme, ERDF), via projects CPP2024-011615, PID2021-124137OB-I00 and PID2024-159279OB-I00 funded by MICIU/AEI/10.13039/501100011033, by ERDF A way of making Europe, by the European Union NextGenerationEU/PRTR, and by the Gobierno de Aragón under Project DGA T45_23R.

References

- Antonelo, E. A., Camponogara, E., Seman, L. O., Jordanou, J. P., De Souza, E. R., Hübner, J. F., 2024. Physics-informed neural nets for control of dynamical systems. *Neurocomputing* 579, 127419.
DOI: 10.1016/j.neucom.2024.127419
- Nicodemus, J., Kneifl, J., Fehr, J., Unger, B., 2022. Physics-informed Neural Networks-based Model Predictive Control for Multi-link Manipulators. *IFAC-PapersOnLine* 55 (20), 331–336.
DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.09.117
- Raissi, M., Perdikaris, P., Karniadakis, G. E., 2019. Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational Physics* 378, 686–707.
DOI: 10.1016/j.jcp.2018.10.045

Modelo dinámico de un equipo deshidratador por vacío

Monzon-Marin, J.^{a,b,*}, Royo-Pascual, L.^b, Ramírez-Laboreo, E.^c

^aNortek Fluids Technology, Polígono los Leones, 37, 50298 Pinseque, Zaragoza (Spain)

^bElectroingeniería Industrial XCLC S.L., María Zambrano, 31 Torre Oeste Planta 12, 50018 Zaragoza (Spain)

^cDepartamento de Informática e Ingeniería de Sistemas (DIIS) e Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A), Universidad de Zaragoza, Calle María de Luna 1, 50018, Zaragoza, España

To cite this article: Monzon-Marin, J., Royo-Pascual, L., Ramírez-Laboreo, E. 2026. Dynamic model of a vacuum dehydrator unit. Actas del II Simposio CEA de los GT: Ingeniería de Control - Modelado, Simulación y Optimización - Educación en Automática. Zaragoza, España.

Resumen

Los equipos de deshidratación de aceite por vacío son fundamentales para eliminar agua en procesos industriales, pero su control resulta complejo debido a fenómenos como la generación de espuma y la variabilidad del aceite tratado. Este trabajo presenta un modelo preliminar del equipo cuyo objetivo final es desarrollar un algoritmo de control que haga más eficiente el proceso. Para el modelado se emplea Python junto con la librería de simulación Gekko (Beal, 2026) y Julia con la librería ModellingToolkit (Rackauckas et al., 2026).

El sistema está compuesto por diversos componentes que pueden observarse en la Figura 1: la cámara de deshidratación, donde el agua contenida en el aceite pasa al aire en forma de vapor, dos bombas (una de aspiración y otra de impulsión) encargadas de la circulación del aceite, una bomba de vacío encargada de generar una depresión en la cámara de deshidratación (y extraer el aire), una válvula de regulación que controla la presión del proceso y una válvula de seguridad que garantiza que no se baja de un umbral de presión.

El proceso de deshidratación por vacío presenta una dinámica compleja debido a fenómenos como la evaporación de agua y la posible generación de espuma, difíciles de describir con modelos puramente físicos. Por ello, se propone un modelo preliminar simplificado formulado mediante balances de masa para la fase aire y el aceite, asumiendo sistema adiabático y sin evaporación. Los componentes también se simplifican. La curva de la bomba de vacío se modela con un comportamiento lineal. Las válvulas se modelan de forma análoga a la conductividad de una resistencia eléctrica siendo en este caso el caudal equivalente a la intensidad y la caída de presión a la caída de tensión. Para modelar la apertura de la válvula de seguridad se emplea una función sigmoidea que representa la apertura y cierre del obturador. La bomba de impulsión se modela como una acción de caudal. La bomba de aspiración se modela como una acción cuyo valor debe ser cero si la altura del aceite es cero.

El modelo se evalúa simulando variaciones de presión en operación normal mediante cambios en la apertura de la válvula de control (u_1). El caudal de aceite es constante tanto a la entrada como a la salida del sistema. Las condiciones iniciales del sistema son presión atmosférica en la cámara de deshidratación (P_{aire}) con la válvula de control abierta de forma parcial ($u_1 = 0,7$). El valor de u_1 esta comprendido entre 0 (totalmente cerrado) y 1 (totalmente abierta). La posición del obturador cambia en los instantes (A) en el que se cierra completamente la válvula ($u_1 = 0$), (B) cuando se abre parcialmente ($u_1 = 0,1$) y (C) instante en el que se abre hasta la mitad ($u_1 = 0,5$). La Figura 2 muestra la evolución de las variables más interesantes del sistema.

*Autor para correspondencia: jmonzon@nortek.es; jorge.monzon@electroingenium.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

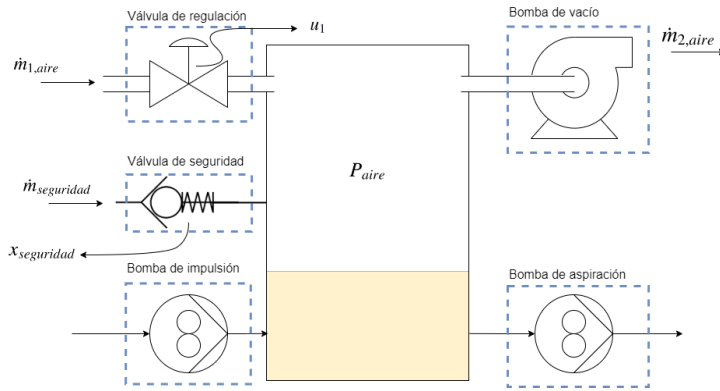


Figura 1: Representación del sistema

La simulación comienza con el encendido de la bomba de vacío lo que produce una disminución en la masa de aire y la presión. Al cerrar la válvula de control en el instante (A), la válvula de seguridad se abre de forma parcial para permitir la entrada de aire y mantener la presión por encima del umbral. Otra consecuencia del cierre de la válvula es el corte de la entrada de aire. Al abrir la válvula en (B) se permite la entrada de aire, lo que implica que la válvula de seguridad pueda cerrarse ligeramente manteniendo la presión por encima del umbral. En el instante (C) la válvula abre hasta la mitad del recorrido facilitando una mayor entrada de aire y haciendo que la presión aumente nuevamente.

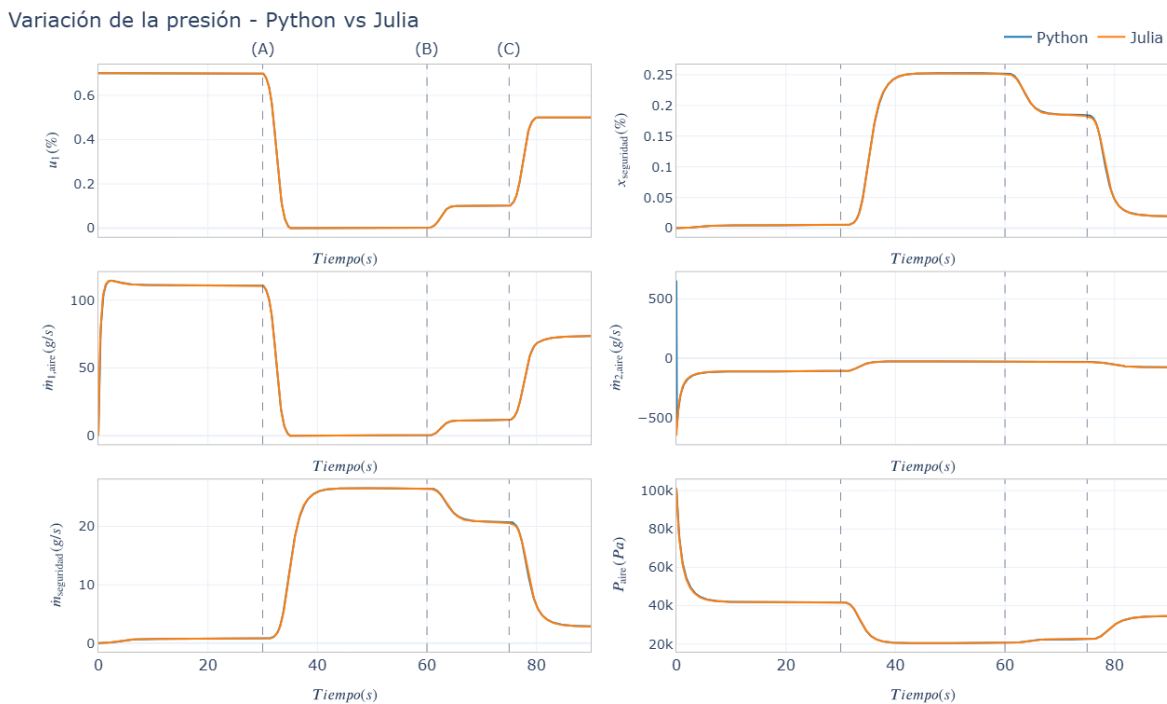


Figura 2: Resultados de la simulación con cambios en la presión de vacío

Las diferencias entre las simulaciones en Python y Julia son inferiores al 0.05 % en las variables de proceso consideradas, lo que confirma la consistencia de ambas implementaciones del modelo. Además, se observa una mejora sustancial en el rendimiento computacional, reduciéndose el tiempo de ejecución en Julia en aproximadamente dos órdenes de magnitud respecto a Python.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Nortek el apoyo económico para la asistencia al II Simposio CEA de los GT.

Referencias

Beal, D. R., 2026. Gekko optimization suite. <https://github.com/BYU-PRISM/GEKKO>, accessed: 2026-01-13.
 Rackauckas, C., et al., 2026. Modelingtoolkit.jl: A composable graph transformation system for equation-based modeling. <https://github.com/SciML/ModelingToolkit.jl>, accessed: 2026-01-13.



Universidad
Zaragoza

II Simposio CEA de los GT: Ingeniería de Control - Modelado, Simulación y Optimización - Educación en Automática (2026)

Parameter estimation for event-triggered sensor fusion.

Méndez-Castillo, A.^{a,b,*}, Perez-Salesa, I.^b, Aldana-Lopez, R.^b, Ramirez-Treviño, A.^a, Aragues, R.^b

^aDepartamento de ingeniería Eléctrica, Cinvestav-Guadalajara, Jalisco, 45019, México (e-mail: ariana.mendez@cinvestav.mx, antonio.ramirez@cinvestav.mx)

^bDepartamento de Informática e Ingeniería de Sistemas - I3A, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 50018, España (e-mail: i.perez@unizar.es, raldana@unizar.es, raragues@unizar.es)

To cite this article: Méndez-Castillo, A., Perez-Salesa, I., Aldana-Lopez, R., Ramírez-Treviño, A., Aragues, R. 2026. Parameter estimation for event-triggered sensor fusion. Actas del II Simposio CEA de los GT: Ingeniería de Control - Modelado, Simulación y Optimización - Educación en Automática. Zaragoza, España.

Resumen

This paper studies event-triggered parameter estimation in sensor fusion systems where sensors transmit measurements to a gradient based estimator. We introduce a regressor-driven local triggering rule that requires no knowledge of the current parameter estimate and depends solely on the regressor signals. Under a persistent excitation condition on the aggregate regressor, we derive explicit design inequalities on the estimator gain and event thresholds that guarantee global exponential convergence. We further provide a sufficient condition on the regressor dynamics that enforces a uniform lower bound on inter-event times, excluding Zeno behavior. Simulations show substantial communication savings while preserving exponential convergence.

Este trabajo estudia la estimación de parámetros por eventos en sistemas de sensores fusionados, donde los sensores transmiten sus mediciones a un estimador basado en gradiente. Introducimos una regla de disparo local basada en regresores que no requiere conocer el valor actual de la estimación y que depende únicamente de la señal del regresor. Bajo la condición de Persistent excitation en el regresor agregado, obtenemos de manera explícita desigualdades de diseño sobre la ganancia del estimador y los umbrales de eventos que garantizan la convergencia exponencial global. Además, ofrecemos una condición suficiente en la dinámica del regresor que fuerza un umbral inferior uniforme en cualquier tiempo entre eventos, evitando así el comportamiento Zeno. La simulación muestra que se puede reducir substancialmente la comunicación preservando la convergencia exponencial.

Introduction

Parameter estimation is a data regression problem appearing in adaptive control, sensor networks, and unmanned surface vehicles (Shen et al., 2024). Precise knowledge of the unknown parameters is required to guarantee stability and closed loop performance in several applications (Olfati-Saber et al., 2007). In certain sensor networks, sensing units and processing units are spatially distributed. In these networks, the information available at an individual sensor is often insufficient to estimate the unknown parameters of interest. In these cases, a sensor fusion scheme can be employed, in which each sensor transmits its measurements to a centralized estimator (Sasiadek, 2002; Kocić et al., 2018). To reduce the communication and computational load, Event-triggering mechanisms (ETMs) have been proposed that limit transmissions to selected instants. Existing ETMs include send-on-delta (Miskowicz, 2014), stochastic (Diao et al., 2018; Shen et al., 2024), dynamic (Perez-Salesa et al., 2025), and consensus-based triggering rules (Geng and Zhao, 2025). While these approaches effectively reduce communication, they are largely developed for state estimation, often rely on Kalman filter structures, require access to the current parameter estimate, and typically guarantee only asymptotic convergence (Shen et al., 2024; Geng and Zhao, 2025).

We propose an event-triggered gradient-based estimator for sensor fusion, motivated by the exponential stability guarantees provided by gradient estimators under the persistence of excitation (PE) condition (Anderson, 2003; Sastry and Bodson, 2011). Sensors employ local triggering rules based on regressor variations, while a fusion unit performs a continuous-time gradient update using piecewise-constant aggregated data. Explicit conditions on the estimator gain and triggering thresholds are derived to ensure global exponential convergence under PE, and a sufficient condition is established to exclude Zeno behavior. Numerical simulations demonstrate that exponential convergence is preserved while significantly reducing sensor transmissions.

*Autor para correspondencia: 950989@unizar.es

Problem Statement and Main Result

We consider a sensor network with N agents. Each agent $i \in \{1, \dots, N\}$ collects measurements $\mathbf{y}_i(t) = \mathbf{C}_i(t) \boldsymbol{\theta}$, where $\mathbf{y}_i(t) \in \mathbb{R}^{p_i}$ is the measurement vector, $\mathbf{C}_i(t) \in \mathbb{R}^{p_i \times n}$ is a time-varying regressor, and $\boldsymbol{\theta} \in \mathbb{R}^n$ is the unknown parameter vector of interest.

Local estimation of $\boldsymbol{\theta}$ is often infeasible because an individual regressor may not have enough richness or satisfy persistent excitation conditions. Moreover, individual agents may have limited computational capabilities to process all collective information, particularly for large N . Therefore, agents forward information to an aggregator node, which computes a global estimate of $\boldsymbol{\theta}$ using all data received up to time $t \geq 0$. To reduce network load, we adopt event-triggered communication so that transmissions occur only when a prescribed triggering condition is satisfied. We propose the following local ETM and estimator algorithm:

$$\text{Local event-triggering mechanism:} \quad \tau_{k+1}^i = \sup \left\{ t \geq \tau_k^i : \left\| \mathbf{C}_i(\tau_k^i)^\top \mathbf{C}_i(\tau_k^i) - \mathbf{C}_i(t)^\top \mathbf{C}_i(t) \right\| \geq \bar{\Delta}_i \right\} \quad (1a)$$

$$\text{Information from agent } i \text{ used by the estimator:} \quad \begin{aligned} \tilde{\mathbf{C}}_i(t) &= \mathbf{C}_i(\tau_k^i), & \text{for } t \in [\tau_k^i, \tau_{k+1}^i) \\ \tilde{\mathbf{y}}_i(t) &= \mathbf{y}_i(\tau_k^i) & \text{for } t \in [\tau_k^i, \tau_{k+1}^i) \end{aligned} \quad (1b)$$

$$\text{Estimator:} \quad \dot{\hat{\boldsymbol{\theta}}}(t) = -\gamma \tilde{\mathbf{C}}(t)^\top (\tilde{\mathbf{C}}(t) \hat{\boldsymbol{\theta}}(t) - \tilde{\mathbf{y}}(t)) \quad (1c)$$

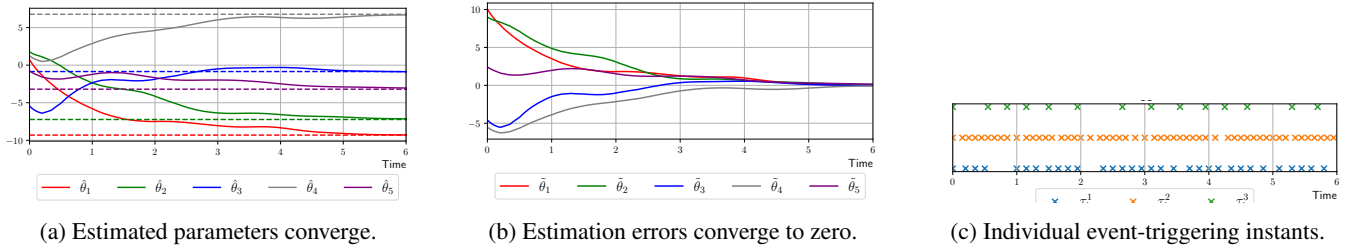
where τ_k^i denotes the k -th triggering instant of sensor i , at which the sensor transmits $\mathbf{y}_i(\tau_k^i)$ and $\mathbf{C}_i(\tau_k^i)$ to the aggregator node. Consequently, $\tilde{\mathbf{y}}_i(t)$ and $\tilde{\mathbf{C}}_i(t)$ represent the most recently received information from sensor i , and therefore remain piecewise constant between two successive triggering instants (τ_k^i, τ_{k+1}^i) for each i . The aggregate quantities are defined as $\tilde{\mathbf{C}}(t) = [\tilde{\mathbf{C}}_1(t)^\top \dots \tilde{\mathbf{C}}_N(t)^\top]^\top$, and $\tilde{\mathbf{y}}(t) = [\tilde{\mathbf{y}}_1(t)^\top \dots \tilde{\mathbf{y}}_N(t)^\top]^\top$, which collect the latest information recovered from all sensors at time t and are used collectively in (1c). Moreover, $\bar{\Delta} \geq 0$ and $\gamma > 0$ are design parameters.

It is possible to prove that the event times generated by (1a) satisfy $\tau_{k+1}^i - \tau_k^i \geq \underline{\tau}$ for some $\underline{\tau} > 0$ and all $i \in \{1, \dots, N\}$, provided that there exist constants $b_i > 0$ and $c_i > 0$ such that $\|\mathbf{C}_i(t)\| \leq b_i$ and $\|\dot{\mathbf{C}}_i(t)\| \leq c_i$ for all $t \geq 0$.

We now consider $\mathbf{C}(t) = [\mathbf{C}_1(t)^\top \dots \mathbf{C}_N(t)^\top]^\top$. Under the assumptions that there exist constants $m > 0$, $b > 0$, and $T > 0$ such that $m\mathbf{I}_n \leq \int_{-T}^t \mathbf{C}(\tau)^\top \mathbf{C}(\tau) d\tau$ and $\|\mathbf{C}(t)\| \leq b$ for all $t \geq 0$, and defining $\beta = \frac{\gamma T^2 b^3}{2}$, $k_1 = \frac{1}{2\gamma} \left(\frac{2\beta^2}{m} + T \right)$, and $k_2 = k_1 + \frac{T^2 b^2}{2}$ with the design conditions $\gamma > 0$ and $\bar{\Delta}_i \leq \frac{m}{4\gamma k_2 \sqrt{N}}$, it can be proved that the origin of the estimation error $\tilde{\boldsymbol{\theta}}(t) := \hat{\boldsymbol{\theta}}(t) - \boldsymbol{\theta}$ is globally exponentially stable under the dynamics defined in (1).

For the simulation, we consider a network with $N = 3$ sensors and one estimator. The unknown parameter vector $\boldsymbol{\theta} \in \mathbb{R}^n$ is drawn from a uniform distribution on $[-10, 10]^n$. Each sensor i has a regressor matrix $\mathbf{C}_i(t) \in \mathbb{R}^{p_i \times n}$ with entries of the form $A + B \sin(\omega t) + C \cos(\omega t)$, where ω, A, B, C are sampled from uniform distributions over $[0, 3]$, $n = 5$ and $p_i = 2$. From simulations, we obtain $T = 5$, $b = 6.82$, and $m = 19$. For simplicity, we set $\gamma = 0.1$, $\bar{\Delta} = 2.8$ and $\bar{\Delta}_i = \bar{\Delta}$ for all sensors where $\bar{\Delta} := \max_{i \in \{1, \dots, N\}} \bar{\Delta}_i$.

Figure (a) and (b) show that each component of the estimation vector $\hat{\boldsymbol{\theta}}(t)$ approaches the true parameter vector $\boldsymbol{\theta}$ and that the estimation error converges to zero, respectively. This convergence occurs despite the estimator receiving measurements only at discrete event times, illustrated in Figure (c), where sensors trigger at different rates according to their local dynamics.



Acknowledgments

This work was supported in part by the Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), México, previously administered by the Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías with grant number 1229622, and in part by projects PID2021-124137OB-I00 and PID2024-159279OB-I00 funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033, by ERDF A way of making Europe, and by the European Union NextGenerationEU/PRTR, and via project T45_23R (Gobierno de Aragón).

Referencias

- Anderson, B., 2003. Exponential stability of linear equations arising in adaptive identification. *IEEE Transactions on Automatic Control* 22 (1), 83–88.
- Diao, J.-D., Guo, J., Sun, C.-Y., 2018. Event-triggered identification of fir systems with binary-valued output observations. *Automatica* 98, 95–102.
- Geng, X., Zhao, W., 2025. Distributed System Identification for Linear Stochastic Systems Under an Adaptive Event-Triggered Scheme. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing* 39 (3), 471–488.
- Kocić, J., Jovičić, N., Drndarević, V., 2018. Sensors and sensor fusion in autonomous vehicles. In: 2018 26th Telecommunications Forum (TELFOR), pp. 420–425.
- Miskowicz, M., 2014. Event-based sampling strategies in networked control systems. *IEEE Int. Workshop Fact. Commun. Syst.– Proc. WFCS*.
- Olfati-Saber, R., Fax, J. A., Murray, R. M., 2007. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems. *Proceedings of the IEEE* 95 (1), 215–233.
- Perez-Salesa, I., Aldana-López, R., Sagüés, C., 2025. Bounding Uncertainty in State Estimation Under Dynamic Event-Triggered Communication. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems* 55 (1), 209–220.
- Sasiadek, J., 2002. Sensor fusion. *Annual Reviews in Control* 26 (2), 203–228.
- Sastry, S., Bodson, M., 2011. *Adaptive control: stability, convergence and robustness*. Courier Corporation.
- Shen, H., Wen, G., Lv, Y., Zhou, J., 2024. A Stochastic Event-Triggered Robust Unscented Kalman Filter-Based USV Parameter Estimation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 71 (9), 11272–11282.

Control multi-robot para formaciones flexibles

García-Lechuz, Juan*, Aragüés, Rosario, López-Nicolás, Gonzalo

Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A), Universidad de Zaragoza, España

To cite this article: García-Lechuz, J., Aragüés, R., López-Nicolás, G. 2026. Control multi-robot para formaciones flexibles. Actas del II Simposio CEA de los GT: Ingeniería de Control - Modelado, Simulación y Optimización - Educación en Automática. Zaragoza, España.

Resumen

El control de formación en equipos multirobot y el control de las maniobras que estas formaciones realizan para trasladarse por el espacio suponen un reto considerable cuando se trata de seguir trayectorias complejas. Algunos métodos permiten cambiar el tamaño y la orientación de la formación para ajustarla al entorno (Zhao (2018); Wang et al. (2024)). Sin embargo, tienen dificultades para describir curvas de forma flexible. Este tipo de maniobra implica reorientar dinámicamente la formación mientras se desplaza. Para abordar este problema, este resumen presenta una visión general de un trabajo en el que se propone un enfoque distribuido líder-seguidor (*leader-follower*), con un diseño específico de las ganancias, en el control de formación de un equipo multiagente. Este diseño de ganancias permite a los agentes describir deformaciones cuadráticas de una formación objetivo en 2D, lo que se traduce en la capacidad de curvar una formación de referencia de manera organizada. Esta característica puede ser de utilidad en multitud de escenarios que involucran equipos de robots. La figura 1 muestra dos de estos escenarios: el transporte de objetos deformables, estudiado en Herguedas et al. (2023), aprovechando la deformabilidad del objeto para adaptar la trayectoria de los agentes a entornos restringidos (lado izquierdo de la Fig. 1) y el diseño de patrones colectivos en ejambres de robots para describir movimientos complejos como la cola de un dragón en un espectáculo de drones (lado derecho de la Fig. 1).



Figura 1: Izquierda: Equipo multi-robot transporta un objeto textil deformable a lo largo de una curva. Derecha: Espectáculo con un enjambre de drones representando un dragón.

Vamos a considerar un equipo de $n \in \mathbb{N}$ agentes con sus estados definidos como posiciones en \mathbb{R}^2 y formalmente representados por el vector columna $q = [q_1^T, q_2^T, \dots, q_n^T]^T \in \mathbb{R}^{2n}$. Vamos a considerar también una formación de referencia $q^* = [q_1^{*T}, q_2^{*T}, \dots, q_n^{*T}]^T \in \mathbb{R}^{2n}$, en coordenadas globales. El espacio vectorial de las deformaciones cuadráticas de una formación de referencia q^* depende no sólo de la referencia, sino también de términos *cuadráticos* q_{xx}^* (contribuciones independientes de cada variable al elevarse al cuadrado) y términos *mixtos* q_{xy}^* (producto de dos variables diferentes) y puede definirse como:

$$\mathcal{Q}(q^*) = \{q \in \mathbb{R}^{2n} : q = (I_n \otimes L_1)q^* + (I_n \otimes L_2)q_{xx}^* + (I_n \otimes L_3)q_{xy}^* + (1_n \otimes h), L_1, L_2, L_3 \in \mathbb{R}^{2 \times 2}, h \in \mathbb{R}^2\}, \quad (1)$$

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

donde $h \in \mathbb{R}^2$ es un vector de traslación, 1_n es el vector columna de unos de tamaño n , $I_n \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es la matriz de identidad, el símbolo \otimes es el producto Kronecker y $L_1, L_2, L_3 \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ son matrices de coeficientes. Si el estado de cada agente en q pertenece a $Q(q^*)$, los n agentes forman una deformación cuadrática de q^* . La figura 2 muestra cómo los términos que dependen de q_{xx}^* y q_{xy}^* afectan a la deformación de referencia mostrada en el lado izquierdo de la figura. A la derecha de la referencia se muestra una deformación en la que sólo intervienen los términos cuadráticos, a la derecha de esta gráfica se muestra una deformación en la que sólo intervienen los términos mixtos y, por último, en el lado derecho de la figura se muestra una deformación en la que intervienen ambos tipos de términos.

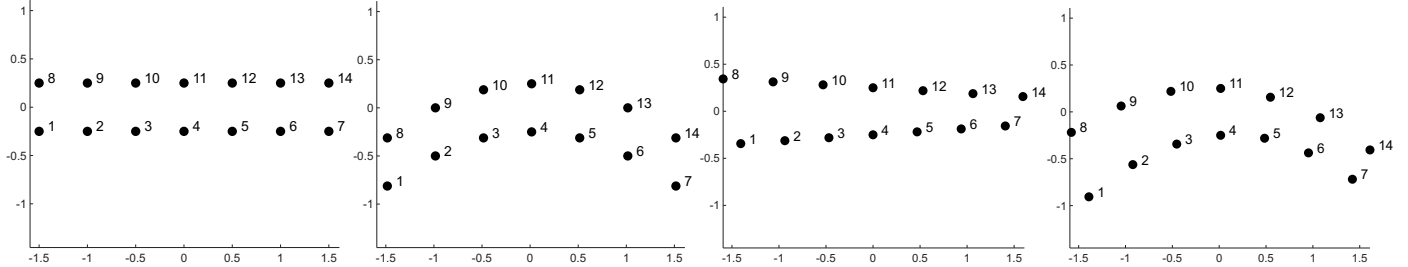


Figura 2: De izquierda a derecha: Formación de referencia, deformación en la que sólo intervienen términos cuadráticos, deformación en la que sólo intervienen términos mixtos, deformación en la que intervienen tanto términos cuadráticos como mixtos.

Si modelamos el equipo multi-robot como un sistema lineal, su dinámica está determinada por la siguiente ley de control:

$$\dot{q} = A q, \quad (2)$$

donde A es la matriz de ganancias del control. Por tanto, para permitir la convergencia a deformaciones cuadráticas en $Q(q^*)$, el cálculo de las ganancias de control tiene como objetivo garantizar que la matriz A (2) anule la dinámica del sistema en $Q(q^*)$ (1), lo cual equivale formalmente a que $Q(q^*) = \text{Null}(A)$ (espacio nulo de la matriz A). Esta condición se puede traducir en un problema de optimización convexa, resoluble utilizando el método de programación semidefinida (SDP) propuesto por primera vez por Lin et al. (2015) y desarrollado por Fathian et al. (2018) para cumplir otras condiciones en el núcleo (*kernel*) de A .

Una vez diseñadas las ganancias del control, si únicamente utilizamos (2) como dinámica del sistema, los agentes convergen en una configuración en $Q(q^*)$ que no es única y depende de la configuración al inicio del control y de la formación de referencia q^* . La forma propuesta para restringir la solución a una única configuración es anclar un subconjunto de 4 agentes (líderes) a posiciones fijas, lo que se ha demostrado que garantiza la convergencia asintótica a la misma solución rígida para cada configuración inicial de los $n - 4$ seguidores restantes. Cuando los líderes no son estáticos, los seguidores pueden adaptarse a las deformaciones cuadráticas impuestas por ellos, reduciendo el error de seguimiento mediante un control proporcional-integral.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado a través del proyecto REMAIN - S1/1.1/E0111 (Interreg Sudoe Programme, ERDF), vía proyectos PID2021-124137OB-I00 y PID2024-159279OB-I00 financiados por MCIN/AEI/10.13039/501100011033, por ERDF A way of making Europe y por la European Union NextGenerationEU/PRTR, por el Gobierno de Aragón, bajo el proyecto DGA T45.23R, y por el Ministerio de Ciencia e Innovación, vía la subvención PRE2022-10422 (Gobierno de España).

Referencias

- Fathian, K., Summers, T. H., Gans, N. R., 2018. Robust distributed formation control of agents with higher-order dynamics. *IEEE Control Syst. Lett.* 2 (3), 495–500. DOI: 10.1109/LCSYS.2018.2841941
- Herguedas, R., Aranda, M., López-Nicolás, G., Sagiús, C., Mezouar, Y., 2023. Double-integrator multirobot control with uncoupled dynamics for transport of deformable objects. *IEEE Robot. Automat. Lett.* 8 (11), 7623–7630. DOI: 10.1109/LRA.2023.3320430
- Lin, Z., Wang, L., Han, Z., Fu, M., 2015. A graph laplacian approach to coordinate-free formation stabilization for directed networks. *IEEE Trans. Autom. Control* 61 (5), 1269–1280. DOI: 10.1109/TAC.2015.2454711
- Wang, T., Shi, Z., Dong, X., Hua, Y., Lü, J., Wang, D., Ren, Z., 2024. Output affine formation maneuver control for heterogeneous multiagent systems with nonautonomous leaders. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. DOI: 10.1109/TIE.2024.3476910
- Zhao, S., 2018. Affine formation maneuver control of multiagent systems. *IEEE Trans. Autom. Control* 63, 4140–4155. DOI: 10.1109/TAC.2018.2798805



Universidad
Zaragoza

II Simposio CEA de los GT: Ingeniería de Control - Modelado, Simulación y Optimización - Educación en Automática (2026)

Morphing de formaciones en sistemas multi-agente robóticos

Mañas-Alvarez, F.J.^{a,*}, García-Lechuz, J.^b, Aragues, R.^b, López-Nicolás, G.^b, Guinaldo, M.^a, Dormido, R.^a

^aDepartamento de Informática y Automática, E.T.S.I. Informática, Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED),
C/ Juan del Rosal, nº 16, 28040, Madrid, España.

^bDepartamento de Informática e Ingeniería de Sistemas e Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A), Universidad de Zaragoza,
C/María de Luna 1, 50018, Zaragoza, España.

To cite this article: Mañas-Álvarez, F.J., García-Lechuz, J., Aragues, R. López-Nicolás, G., Guinaldo, M., Dormido, R. 2026. Morphing of formations in multi-agent robotic systems. Actas del II Simposio CEA de los GT: Ingeniería de Control - Modelado, Simulación y Optimización - Educación en Automática. Zaragoza, España.

Resumen

Los sistemas multi-agente robóticos han adquirido una relevancia creciente en el ámbito del control distribuido y la robótica cooperativa, especialmente en aplicaciones donde la distribución espacial de los agentes resulta determinante. En escenarios dinámicos y no estructurados, las formaciones estáticas pueden resultar ineficientes o inviables, lo que motiva el desarrollo de estrategias capaces de adaptar la geometría de la formación en tiempo real. En este trabajo se introduce el concepto de *morphing* aplicado al control de formaciones multi-agente, entendido como una transición continua y controlada entre distintas geometrías que preserva tanto la coherencia del grafo de interacción como los objetivos globales del sistema. Se presentan los principales retos de control asociados a este enfoque, tales como la definición de objetivos variantes en el tiempo, la gestión de restricciones dinámicas y la garantía de propiedades de estabilidad, cohesión y convergencia. Finalmente, el trabajo propone un marco general para el *morphing* de formaciones distribuidas ilustrado mediante un ejemplo preliminar en simulación desarrollado en MATLAB.

En las últimas décadas, los sistemas multi-agente robóticos han despertado un interés creciente en los campos del control distribuido y la robótica cooperativa, motivado por su amplia gama de aplicaciones en exploración, vigilancia, transporte coordinado y redes de sensores (Oh et al., 2015). En este contexto, el control de formaciones es una herramienta fundamental para aquellos casos en los que la distribución de agentes juega un papel clave. Un ejemplo representativo se encuentra en la monitorización de una superficie por parte de un conjunto de agentes aéreos. En este caso, la distribución de agentes debe generarse y mantenerse optimizando la superficie cubierta considerando el campo de visión de los sensores equipados (Wang et al., 2022). Cuando el entorno es estructurado o las regiones de interés son estáticas, las formaciones pueden definirse de forma estática al iniciar el sistema para satisfacer las restricciones geométricas que encontrarán durante sus desplazamientos. Sin embargo, en escenarios más complejos donde los obstáculos pueden ser dinámicos se exige mayor flexibilidad. En ellos, deben cubrir puntos de interés dinámicos (Xiao et al., 2023), o transportar objetos deformables que requieren pequeños ajustes en la formación para superar caminos que con formaciones estáticas provocarían un bloqueo (Herguedas et al., 2023).

En este trabajo se introduce el concepto de *morphing* aplicado al control de formaciones de sistemas multi-agente robóticos, entendido como la metodología para alcanzar una transición continua y controlada entre distintas geometrías de formación a lo largo del tiempo, preservando la coherencia del grafo del sistema y los objetivos globales de su misión. Este tipo de transición dota a las formaciones de un mayor grado de flexibilidad y adaptabilidad frente a entornos dinámicos y no estructurados, en los que una geometría fija resulta insuficiente o ineficiente y requiere la aplicación de técnicas avanzadas y resolución de problemas de optimización para modificar la formación (Sun and Cassandras, 2016). El *morphing* ha sido ampliamente estudiado en otros campos, como la animación por ordenador (Botsch et al., 2010), donde se emplea para interpolar suavemente entre distintas formas, así como *soft robotics* (Kim et al., 2020) para el modelado de estructuras deformables y sistemas mecánicos adaptativos.

No obstante, su aplicación al control de formaciones multi-agente plantea desafíos específicos que van más allá de la mera interpolación geométrica. En particular, resulta necesario definir objetivos de control variantes en el tiempo que guíen la evolución de la formación sin introducir discontinuidades en las señales de control, la evitación de obstáculos, la gestión de las limitaciones

*Autor para correspondencia: fjmanas@dia.uned.es

dinámicas de los agentes y de la comunicación entre ellos. Asimismo, es importante garantizar la preservación de propiedades fundamentales como la estabilidad, la cohesión del grupo y la convergencia, aspectos ampliamente discutidos en la literatura sobre consenso y control distribuido (Li and Tan, 2019). En trabajos previos, estos procesos de modificación de la geometría aparecen bajo distintas denominaciones, como *topologías conmutadas* o *reconfiguración de formaciones*, donde el sistema conmuta entre un conjunto discreto de configuraciones predefinidas modificando los objetivos de control entre agentes (Liu et al., 2021). Otros enfoques, como el *formation mapping*, se centran en la reasignación de agentes a posiciones objetivo en una nueva geometría que guarda una relación de transformación con la inicial (Zhang et al., 2021). Frente a estos enfoques, el *morphing* enfatiza la continuidad de la transición con una perspectiva de control progresiva y orientada a la adaptación dinámica de la formación.

Este trabajo constituye un primer paso hacia el desarrollo de estrategias de *morphing* más avanzadas para sistemas multi-agente robóticos. Por lo tanto, el trabajo expuesto se presenta como un marco general para el *morphing* de formaciones, considerando tanto arquitecturas de control centralizadas como distribuidas, así como distintos enfoques de transición entre geometrías. En este marco se pone especial énfasis en la suavidad de la evolución y en la viabilidad desde el punto de vista del control, así como en su combinación con otras técnicas clásicas en sistemas multi-agente, como el consenso. Finalmente, la Figura 1 muestra una única experiencia de control de formaciones basado en distancias dividida en dos fases consecutivas. En una primera etapa (Figura 1(a)), los agentes convergen hacia una geometría cuyas distancias finales entre agentes están precalculadas. Se emplea un controlador equivalente al desarrollado en (Guinaldo et al., 2024). Una vez alcanzada esta configuración, se modifica de forma distribuida la geometría de la formación, segunda fase (Figura 1(b)), donde las posiciones finales de (a) actúan como condiciones iniciales. El *morphing* se introduce para garantizar una transición suave entre ambas geometrías, evitando configuraciones singulares y deformaciones no deseadas, y permitiendo tanto trayectorias continuas de los agentes como una adaptación progresiva del algoritmo de consenso aplicado a las distancias entre agentes.

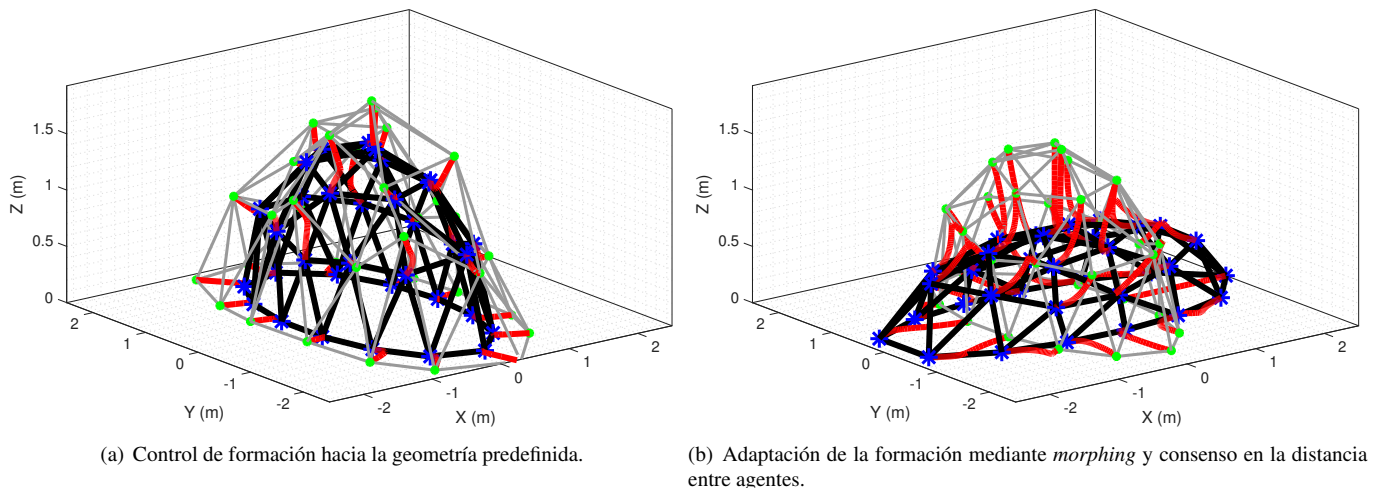


Figura 1: Ejemplo de *Morphing* en formación 3D. Leyenda: Geometría inicial, geometría final, trayectorias de los agentes, posiciones iniciales y posiciones finales.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado en parte por la Agencia Estatal de Investigación (AEI) a través de los proyectos PID2021-124137OB-I00, PID2022-139187OB-I00, PID2024-156427OB-I00 y PID2024-159279OB-I00.

Referencias

- Botsch, M., Kobbelt, L., Pauly, M., Alliez, P., Lévy, B., 2010. Polygon mesh processing. CRC press.
- Guinaldo, M., Sánchez-Moreno, J., Zaragoza, S., Mañas-Álvarez, F. J., 2024. Distributed multi-uav shield formation based on virtual surface constraints. *Robotics and Autonomous Systems* 176, 104684.
- Herguedas, R., Aranda, M., López-Nicolás, G., Sagiés, C., Mezouar, Y., 2023. Double-integrator multirobot control with uncoupled dynamics for transport of deformable objects. *IEEE Robotics and Automation Letters* 8 (11), 7623–7630.
- Kim, H., Ahn, S.-k., Mackie, D. M., Kwon, J., Kim, S. H., Choi, C., Moon, Y. H., Lee, H. B., Ko, S. H., 2020. Shape morphing smart 3d actuator materials for micro soft robot. *Materials Today* 41, 243–269.
- Li, Y., Tan, C., 2019. A survey of the consensus for multi-agent systems. *Systems Science & Control Engineering* 7 (1), 468–482.
- Liu, Y., Shi, P., Lim, C.-C., Yu, H., 2021. A new approach of formation control for multi-agent systems with environmental changes. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers* 68 (8), 3449–3459.
- Oh, K.-K., Park, M.-C., Ahn, H.-S., 2015. A survey of multi-agent formation control. *Automatica* 53, 424–440.
- Sun, X., Cassandras, C. G., 2016. Optimal dynamic formation control of multi-agent systems in constrained environments. *Automatica* 73, 169–179.
- Wang, B., Li, S., Battistelli, G., Chisci, L., Yi, W., 2022. Multi-agent fusion with different limited fields-of-view. *IEEE Transactions on Signal Processing* 70, 1560–1575.
- Xiao, P., Li, N., Xie, F., Ni, H., Zhang, M., Wang, B., 2023. Clustering-based multi-region coverage-path planning of heterogeneous uavs. *Drones* 7 (11), 664.
- Zhang, W., Chipade, V. S., Panagou, D., 2021. Herding an adversarial swarm in three-dimensional spaces. In: 2021 American Control Conference (ACC). IEEE, New Orleans, LA, USA, pp. 4722–4728.

Remanufactura robótica de productos industriales deformables

López-Nicolás, Gonzalo*, Aranda, Miguel, Aragüés, Rosario, Sagüés, Carlos

Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A), Universidad de Zaragoza, España

To cite this article: López-Nicolás, G., Aranda, M., Aragüés, R., Sagüés, C. 2026. Robotic remanufacturing of deformable industrial products. Actas del II Simposio CEA de los GT: Ingeniería de Control - Modelado, Simulación y Optimización - Educación en Automática. Zaragoza, España.

Resumen

La remanufactura es un proceso mediante el cual los productos usados se restauran hasta dejarlos como nuevos. Habitualmente esto implica desmontar el producto, limpiarlo, reparar o sustituir las piezas desgastadas o dañadas, volver a montarlo y someterlo a pruebas para garantizar que cumple con las especificaciones y los estándares de rendimiento originales. Un aspecto clave es que los productos remanufacturados suelen venir con garantías similares a las de los productos nuevos. Algunos ejemplos de remanufactura se pueden encontrar en la industria aeronáutica (diversas empresas aeronáuticas remanufacturan componentes como por ejemplo trenes de aterrizaje), maquinaria pesada (por ejemplo equipos de minería tales como cilindros hidráulicos y piezas de motores) o instrumentos quirúrgicos (remanufactura de instrumentos quirúrgicos de alta calidad mediante la limpieza, el afilado y la sustitución de piezas).

En este contexto se puso en marcha en 2024 el proyecto REMAIN (Robotic Remanufacturing of Deformable Industrial Products), una colaboración de tres años con socios de España, Francia y Portugal. Junto con la Universidad de Zaragoza e INESCOP, que lidera el consorcio del proyecto REMAIN, las entidades que participan en el proyecto son FICE (Federación de Industrias del Calzado Español), AIDA-CCI (Cámara de Comercio e Industria del Distrito de Aveiro), la Universidad de Alicante, la Universidad de Coimbra, el centro universitario Clermont Auvergne INP, la empresa española ACN (Automática y Control Numérico SL), y la empresa francesa SMA-RTY. El proyecto pretende detectar automáticamente daños en productos usados y desarrollar un sistema multi-robot para desmontar y preparar artículos para su remanufactura. Juega un papel especial la asociación social española Proyecto Lázaro, que se centra en la creación de oportunidades de empleo para personas en circunstancias vulnerables, al tiempo que aborda los problemas medioambientales relacionados con los residuos textiles y de calzado.

El proyecto REMAIN forma parte del programa Interreg Sudoeste, que apoya el desarrollo regional mediante la cofinanciación de proyectos transnacionales por parte del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER). La Universidad de Zaragoza aporta a este proyecto su experiencia en robótica industrial, robótica móvil, sistemas de percepción, Cuiral-Zueco and López-Nicolás (2023), sistemas multi-robot, Herguedas et al. (2019), y manipulación de productos deformables, Cuiral-Zueco and López-Nicolás (2024). Esta tecnología permitirá procesos de remanufactura que pueden reincorporar a la cadena de producción productos deteriorados. En particular, el objetivo de REMAIN es dar una segunda vida a los productos manufacturados, especialmente a los de la industria del calzado, que genera importantes residuos. Se pretende que la remanufactura de productos sea una alternativa económicamente viable para los consumidores y con un impacto positivo en el medio ambiente, al tiempo que beneficia a las industrias al reducir el uso de materias primas.

Entre las principales tareas a considerar está el desarrollo de nuevos métodos y herramientas que permitan detectar los daños en productos usados y un sistema multi-robot que sea capaz de desensamblarlos y prepararlos para su reintroducción en las cadenas de fabricación de dichos productos. Se trata de problemas multidisciplinares que abarcan aspectos de percepción, modelado y control (ver ejemplos en la Figura 1). En particular, para la manipulación robótica de objetos lineales deformables en 3D se ha desarrollado un modelo geométrico “offline” de deformación elástica, Burgh-Oliván et al. (2025). También se ha trabajado en la estimación de deformaciones respecto al objeto de referencia mediante mapas funcionales para estimar, por ejemplo, deformaciones y defectos en el objeto manipulado, Cuiral-Zueco and López-Nicolás (2025). Teniendo en cuenta la manipulación de objetos deformables sin

*Autor para correspondencia: gonlopez@unizar.es

textura, una nueva estrategia de control multi-escala basada en Procrustes se presentó para manipular objetos en 3D mediante dos brazos robóticos, Cuiral-Zueco and López-Nicolás (2024). La tarea de manipulación de objetos deformables es aún más compleja cuando el objeto también es frágil y es necesario limitar la deformación permitida. En este contexto, se ha investigado un método de manipulación basado en la ejecución de acciones de empuje en los bordes del objeto con un brazo robótico, Herguedas et al. (2024). Por otro lado, cuando el objeto a manipular es grande o pesado, puede ser necesario utilizar un sistema multi-robot para realizar las tareas de manipulación o transporte, Aranda et al. (2024) y de percepción, Pardina et al. (2025). En este problema, es relevante no sólo controlar la formación sino permitir cierta flexibilidad mediante modos de deformación que permitan preservar la integridad del objeto al tiempo que se consigue un sistema de transporte altamente flexible, Marcos-Saavedra et al. (2025).

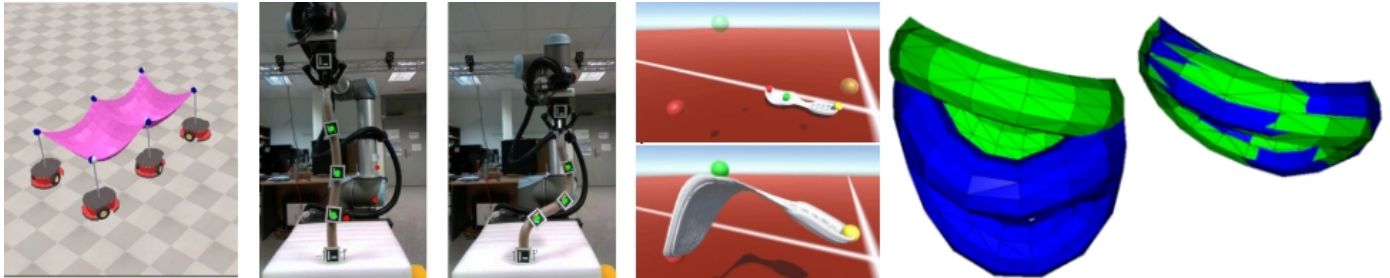


Figura 1: Ejemplos de trabajos realizados en el marco del proyecto REMAIN. De izquierda a derecha: Transporte multi-robot de objetos deformables, Marcos-Saavedra et al. (2025); Control de la forma de objetos lineales. Se muestra el estado inicial y final del objeto después del control con la deformación deseada, Burgh-Oliván et al. (2025); Control de deformación con restricciones de fuerza. Se deforma una suela flexible desde un estado inicial (arriba) al estado deseado (debajo) analizando que las fuerzas internas no superen el umbral que pueda dañar la integridad del objeto, Zafra-Navarro et al. (2025); Modelos geométricos para la manipulación de objetos deformables. En verde, el objeto flexible de referencia sometido a gravedad, y en azul el objeto con el modelo propuesto de ARAP dinámico con gravedad antes y después de optimizar sus parámetros, Margalejo et al. (2025).

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado a través del proyecto REMAIN - S1/1.1/E0111 (Programa Interreg Sudoe, FEDER) y de los proyectos PID2021-124137OB-I00 y PID2024-159279OB-I00 financiados por MCIN/AEI/10.13039/501100011033, por FEDER “A way of making Europe” y por la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR, por el Gobierno de Aragón en el marco del proyecto DGA T45_23R, y a través de la ayuda RYC2024-051408-I, financiada por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por el FSE+.

Referencias

- Aranda, M., Aragüés, R., López-Nicolás, G., 2024. Shape control of maneuvering planar formations based on distributed deformation minimization. In: Marques, L., Santos, C., Lima, J. L., Tardioli, D., Ferre, M. (Eds.), Robot 2023: Sixth Iberian Robotics Conference. Springer Nature Switzerland, Cham, pp. 338–350.
- Burgh-Oliván, M., Aranda, M., López-Nicolás, G., 2025. Controlling the shape of deformable linear objects in 3-D with a simple geometric model. In: 2025 IEEE 30th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), pp. 1–8.
DOI: 10.1109/ETFA65518.2025.11205790
- Cuiral-Zueco, I., López-Nicolás, G., 2023. Elastic contour mapping for the estimation of abrupt shape deformations. In: Marques, L., Santos, C., Lima, J. L., Tardioli, D., Ferre, M. (Eds.), Robot 2023: Sixth Iberian Robotics Conference. Springer Nature Switzerland, Cham, pp. 400–408.
- Cuiral-Zueco, I., López-Nicolás, G., 2024. Multiscale Procrustes-based 3-D shape control. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 29 (3), 1738–1748.
DOI: 10.1109/TMECH.2023.3325934
- Cuiral-Zueco, I., López-Nicolás, G., 2024. Taxonomy of deformable object shape control. IEEE Robotics and Automation Letters 9 (10), 9015–9022.
DOI: 10.1109/LRA.2024.3455770
- Cuiral-Zueco, I., López-Nicolás, G., 2025. Time consistent surface mapping for deformable object shape control. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering 22, 11099–11111.
DOI: 10.1109/TASE.2025.3529180
- Herguedas, R., López-Nicolás, G., Aragüés, R., Sagüés, C., 2019. Survey on multi-robot manipulation of deformable objects. In: 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA, Zaragoza, Spain, September 10–13. pp. 977–984.
DOI: 10.1109/ETFA.2019.8868987
- Herguedas, R., Sundaram, A. M., López-Nicolás, G., Roa, M. A., Sagüés, C., 2024. Adaptive bayesian optimization for robotic pushing of thin fragile deformable objects. In: Marques, L., Santos, C., Lima, J. L., Tardioli, D., Ferre, M. (Eds.), Robot 2023: Sixth Iberian Robotics Conference. Springer Nature Switzerland, Cham, pp. 351–362.
- Marcos-Saavedra, R., Aranda, M., López-Nicolás, G., 2025. Multirobot control with deformation modes for transport of deformable objects. International Journal of Systems Science, 1–17.
DOI: 10.1080/00207721.2025.2559138
- Margalejo, E., Aranda, M., López-Nicolás, G., 2025. Adaptable geometric models for handling deformable objects. Jornada de Jóvenes Investigadores del I3A 13.
DOI: 10.26754/jji-i3a.202511968
- Pardina, S., Aragüés, R., López-Nicolás, G., 2025. Dynamic consensus for deformable body centroid estimation. Jornada de Jóvenes Investigadores del I3A 13.
DOI: 10.26754/jji-i3a.202511904
- Zafra-Navarro, A., Aragüés, R., López-Nicolás, G., 2025. Overstress avoidance on flexible object manipulation. Jornada de Jóvenes Investigadores del I3A 13.
DOI: 10.26754/jji-i3a.202511906

Percepción distribuida mediante consenso dinámico

Pardina, S.*, Aragüés, R., López-Nicolás, G.

Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A), Universidad de Zaragoza, España

To cite this article: Pardina, S., Aragüés, R., López-Nicolás, G. 2026. Distributed perception via dynamic consensus. Actas del II Simposio CEA de los GT: Ingeniería de Control - Modelado, Simulación y Optimización - Educación en Automática. Zaragoza, España.

Resumen

En este trabajo presentamos un método de estudio para el consenso dinámico múltiple. Diferentes agentes han de concordar en su estimación de una variable objetivo, como el centro de un cuerpo deformable o centroide, a pesar de que no perciben su totalidad y por tanto sólo conocen información parcial. Para ello se valen de su señal de referencia propia, generada a partir de sus observaciones, y de la estimación de los agentes con los que se comunican. Proponemos un método mediante el cual los agentes observan una región parcial del entorno, dentro de la cual identifican uno o varios puntos de interés a seguir y construyen su propia señal de referencia. Esto difiere de trabajos previos, en los que se asume que la observación y la señal de referencia de cada agente son únicas y equivalentes (Pardina et al. (2025)). El objetivo es permitir que, aun cuando los agentes puedan observar múltiples puntos de interés, estos no queden sobrerrepresentados en las señales de referencia construidas, evitando así efectos adversos durante el proceso de consenso. Es decir, la estimación del centroide por los agentes no debería verse afectada por el hecho de que haya elementos del entorno que puedan verse varias veces por diferentes agentes.

Sea un sistema multi-agente formado por N agentes identificados como $i = 1, \dots, N$ y comunicaciones descritas por un grafo bidireccional \mathcal{G} . Los agentes buscan estimar el centroide de un objeto y que su estimación o bien coincida con el centroide real o esté dentro de una cota de error aceptable: $\lim_{t \rightarrow \infty} |x_i - x_{cen}| < \varepsilon$, donde x_i denota la estimación del estado del centroide realizada por el agente i , y x_{cen} representa el estado real del centroide. Para ello se valdrán de un algoritmo de consenso basado en la discretización clásica de Euler (Zhu and Martínez (2010)). El algoritmo de consenso se aprovechará de dos elementos para lograr el objetivo. La comunicación entre agentes según el grafo \mathcal{G} y una señal de referencia propia s_i de cada agente. Esta señal será generada por el agente i a partir de sus observaciones o_i^k , el superíndice indica el punto de interés observado, el subíndice especifica qué agente está usando esa observación para construir su propia señal de referencia s_i . Se muestra en la Figura 1 un esquema de una posible aplicación de la idea (triangulación del origen de un incendio forestal) así como un esquema de la relación agente-sígnal de referencia-observaciones.

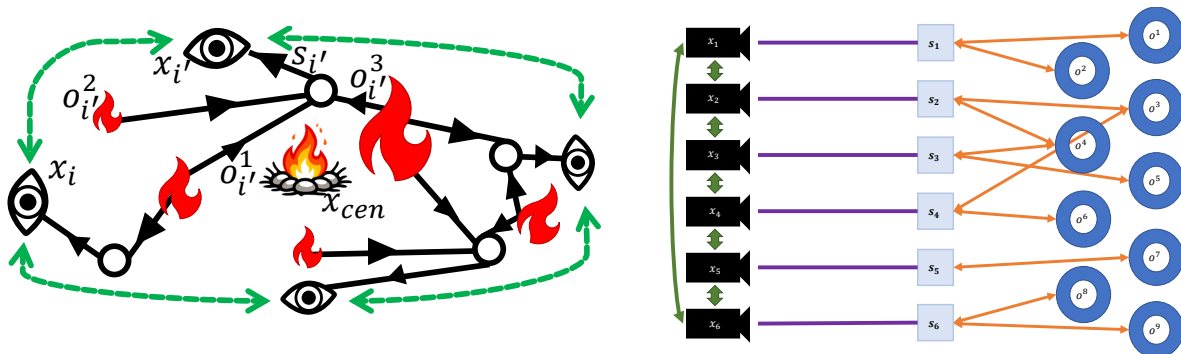


Figura 1: Esquema del problema. (Izquierda) Ejemplo de aplicación en el que múltiples agentes observan distintas perspectivas de un incendio forestal, con observaciones parciales y compartidas; el objetivo es alcanzar consenso sobre el centroide x_{cen} . (Derecha) Representación simplificada de las relaciones entre observaciones, señales de referencia y comunicaciones entre agentes.

*Autor para correspondencia: spardina@unizar.es

Para evitar que los agentes generen señales de referencia alteradas, se introduce una transformación no lineal f_i , aplicada a las observaciones de cada agente. Con esto se ponderan las observaciones (o_i^k) al construir la señal de referencia individual de cada agente (s_i) y ésta se regulariza para evitar divergencias. A partir de esta función transformadora y de la identificación de las observaciones, se construye la matriz que modela la generación de señales de referencia de los agentes para representar el sistema de forma vectorial.

El sistema resultante, gracias a la regularización incorporada, permite analizar su estabilidad de forma análoga a trabajos previos como Kia et al. (2019). En consecuencia, se garantiza la existencia de una cota superior para error máximo entre la estimación del centroide de cada agente y el centroide real en todo momento.

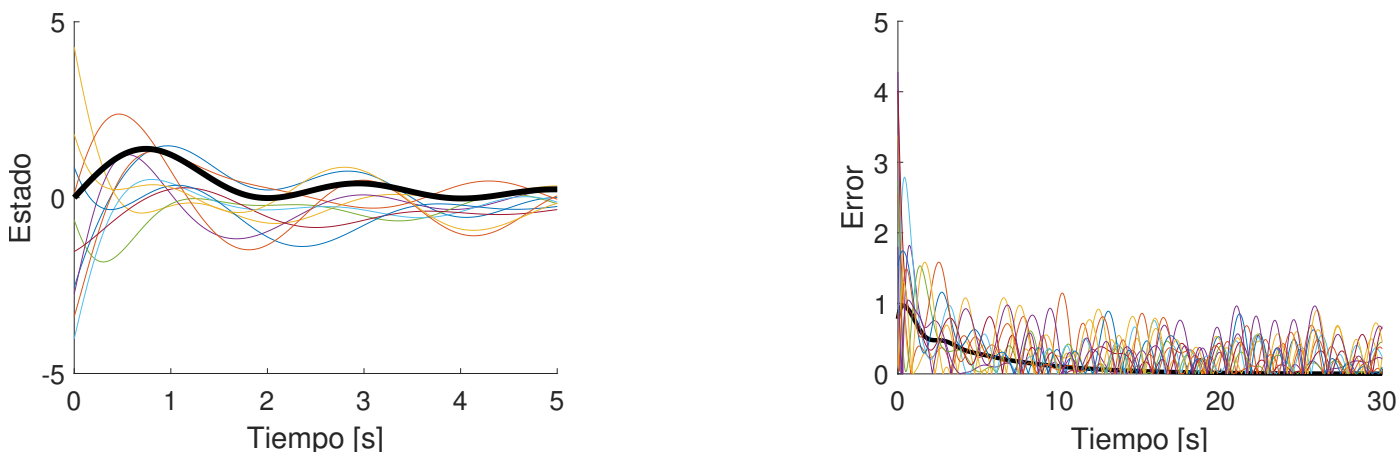


Figura 2: Evolución temporal de las estimaciones del centroide. Izquierda: estimaciones de cada agente y valor real del centroide (línea negra gruesa) durante los primeros 5 s. Derecha: evolución del error de estimación de cada agente, definido como $e_i = |x_i - x_{cen}|$. Tras un transitorio corto, los errores convergen a un régimen estacionario no nulo debido a la dinámica de las señales.

Un ejemplo de los resultados, mostrado en la Figura 2, avala la viabilidad del método propuesto. Se ha simulado un caso de 10 agentes que buscan alcanzar un consenso con respecto al centroide de un objeto deformable delimitado por 12 puntos de interés. Definimos el centroide del objeto como el estado promedio de los puntos que lo delimitan. Estos puntos oscilan armónicamente de forma independiente con diferentes frecuencias y desplazamientos iniciales. Los errores iniciales entre la estimación de cada agente x_i y el centroide real x_{cen} disminuyen rápidamente hasta llegar a un estado estacionario. En el estado estacionario, el único error residual se debe a la dinámica persistente de las señales. El sistema mostrado es unidimensional pero puede extender a más dimensiones sin pérdida de generalidad.

La obtención de cotas superiores más ajustadas para el error, así como la aplicación de este método a sistemas de consenso dinámico con retardos (Aragues et al. (2024)) o el estudio del desempeño de este método para observaciones con incertidumbre, constituyen posibles líneas de investigación futura.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado a través del proyecto REMAIN - S1/1.1/E0111 (Programa Interreg Sudoe, FEDER), PID2021-124137OB-I00 y PID2024-159279OB-I00 financiados por MCIN/AEI/10.13039/501100011033, por el FEDER ‘A way of making Europe’ y por la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR, y por el Gobierno de Aragón en el marco del proyecto DGA T45_23R.

Referencias

Aragues, R., González, A., López-Nicolás, G., Sagiés, C., 2024. Convergence speed of dynamic consensus with delay compensation. *Neurocomputing* 570, 127130. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925231223012535>
 DOI: 10.1016/j.neucom.2023.127130

Kia, S. S., Van Scoy, B., Cortes, J., Freeman, R. A., Lynch, K. M., Martinez, S., Jun. 2019. Tutorial on Dynamic Average Consensus: The Problem, Its Applications, and the Algorithms. *IEEE Control Systems Magazine* 39 (3), 40–72. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8716798/>
 DOI: 10.1109/MCS.2019.2900783

Pardina, S., Aragüés, R., López-Nicolás, G., 2025. Dynamic consensus for deformable body centroid estimation. *Jornada de Jóvenes Investigadores del I3A* 13. DOI: 10.26754/jji-i3a.202511904

Zhu, M., Martínez, S., Feb. 2010. Discrete-time dynamic average consensus. *Automatica* 46 (2), 322–329. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0005109809004828>
 DOI: 10.1016/j.automatica.2009.10.021

Estimación fiable y tolerante a fallos de la actitud en UAVs con IMUs redundantes

Gil-Martínez, M.^{a,*}, Rico, R.^a, Rico-Azagra, J.^a, Nájera, S.^a, Elvira, C.^a

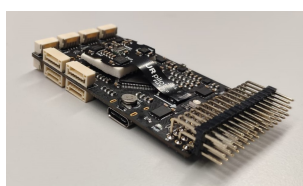
^aGrupo de Ingeniería de Control, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de la Rioja,
Edificio Departamental - C/ San José de Calasanz, 31, 26004, Logroño, España.

To cite this article: Gil-Martínez, M., Rico, R., Rico-Azagra, J., Nájera, S., Elvira, C. 2026. Reliable and fault-tolerant attitude estimation in UAVs with redundant IMUs. Actas del II Simposio CEA de los GT: Ingeniería de Control - Modelado, Simulación y Optimización - Educación en Automática. Zaragoza, España.

Resumen

La adopción generalizada de vehículos aéreos no tripulados (UAVs) en aplicaciones profesionales y de carácter crítico impone requisitos cada vez más exigentes en términos de fiabilidad, precisión y disponibilidad de las funciones de navegación y control a bordo. En particular, la estimación de la actitud basada en sensores inerciales microelectromecánicos (MEMS) de bajo coste es altamente sensible al ruido, las derivas, las vibraciones y los fallos de sensor, lo que puede comprometer la estabilidad en lazo cerrado y la seguridad de la misión. Aunque la redundancia sensorial constituye una vía prometedora para mitigar estas limitaciones, su aprovechamiento efectivo requiere arquitecturas hardware específicas y marcos de estimación capaces de gestionar explícitamente inconsistencias, incertidumbre y fallos. En este contexto, este trabajo presenta un resumen del estado actual de una línea de investigación consolidada sobre estimación de la actitud en UAVs mediante múltiples unidades de medida inercial (IMU), desarrollada en el marco de un proyecto más amplio centrado en la fiabilidad y la precisión del control de vuelo.

La primera etapa de esta investigación se centró en el desarrollo de una controladora de vuelo propia que integra IMUs redundantes (Figura 1), concebida específicamente para dar soporte a algoritmos de estimación tolerantes a fallos bajo restricciones de tiempo real. La arquitectura hardware incorpora IMUs heterogéneas y estrategias de desacoplo mecánico orientadas a mitigar perturbaciones inducidas por vibraciones, mientras que el diseño software embebido permite la adquisición determinista, el procesamiento y la estimación paralela a partir de múltiples fuentes inerciales (Rico et al., 2022). Esta plataforma proporcionó una base experimental validada para analizar el impacto de la redundancia en la calidad de las señales y en la robustez global del sistema.



(a) URpilot.

Platform	MCU	Interfaces*	Sensors**	Dimensions (mm)	Weight (g)
URpilot	STM32F767	s, i, u, us, c	im, b, m	80×41×10	63.8
Pixhawk 4	STM32F767	s, i, u, us, c	im, b, m	84×44×12	38.8
CUAV v5+	STM32F767	s, i, u, us, c	im, b, m	85.5×42×33	91
Erle-Brain 3	Raspberry Pi	i, u, us, c	im, b, m	95×70×23.8	100

* Interfaces abbreviations: s→SPI, i→I2C, U→UART, us→USB, c→CAN.

** Sensors abbreviations: im→IMU, b→barometer, m→magnetometer.

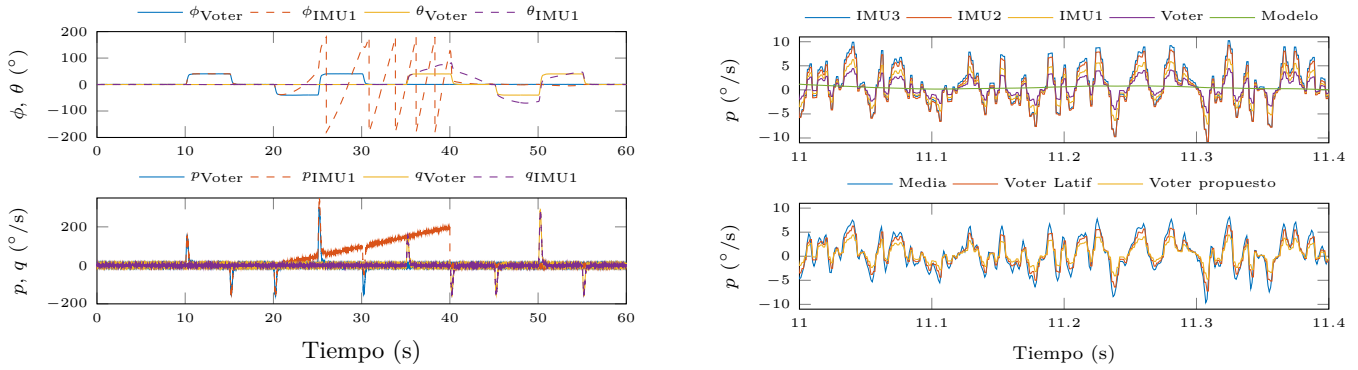
(b) Comparativa con controladoras comerciales 2022.

Figura 1: Controladora de vuelo de desarrollo propio (Rico et al., 2022).

Sobre esta plataforma experimental, una segunda etapa abordó la explotación explícita de la redundancia mediante una arquitectura de fusión sensorial tolerante a fallos para la estimación de la actitud (Rico et al., 2024). Estimadores de actitud independientes (basados en filtros complementarios de Madgwick), asociados a cada IMU, se combinan a nivel de estimación mediante mecanismos de votación ponderada, en lugar de fusionar directamente las medidas en crudo, lo que permite gestionar modos de fallo complejos más allá de simples pérdidas de señal. Los pesos asignados dependen de: (i) una cuantificación en línea de la discrepancia entre estimaciones (Hamadi et al., 2022), evaluada mediante la norma euclídea, y (ii) la confiabilidad de las fuentes (de Alteriis et al., 2023), determinada a partir de la caracterización estocástica de sensores y estimadores mediante análisis de varianza de Allan. La arquitectura resultante demostró mejoras significativas de precisión en condiciones nominales, así como capacidades efectivas de detección y aislamiento de fallos ante distintos escenarios de degradación y fallo de sensores (Figura 2).

* Autor para correspondencia: montse.gil@unirioja.es

Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)



(a) Tolerancia a fallos: Deriva en la velocidad de rotación en el eje X de la IMU 1 desde $t = 20s$ a $t = 40s$.

(b) En ausencia de fallo: (Sup) Fusión de estimaciones (voter). (Inf) Comparativa con otros algoritmos.

Figura 2: Resultados de fusión sensorial tolerante a fallos en Rico et al. (2024).

Los resultados obtenidos en estas etapas ponen de manifiesto que la estimación fiable de la actitud con sensores inerciales redundantes no depende únicamente de la duplicación hardware, sino también de una integración cuidadosa de la gestión de la redundancia, la caracterización de la incertidumbre y el tratamiento explícito de fallos a nivel de estimación. En particular, la experiencia adquirida evidencia que la coherencia estadística entre estimaciones redundantes constituye un elemento crítico para discriminar degradaciones reales de discrepancias nominales debidas al ruido y a la heterogeneidad de los sensores. Asimismo, se ha identificado la necesidad de dotar a los mecanismos de diagnóstico de una base estadística más consistente y adaptativa, capaz de evolucionar con las condiciones de operación y el estado del sistema.

A partir de estas conclusiones, el trabajo actualmente en curso (Figura 3) se orienta a reforzar la interacción entre estimación redundante, redundancia analítica y gestión dinámica de la incertidumbre, incorporando criterios de consistencia estadística más rigurosos y mecanismos de diagnóstico y supervisión mejor integrados. El objetivo es mejorar la capacidad de aislamiento de fallos, reducir la propagación de estimaciones degradadas y preservar la continuidad y calidad de la estimación en escenarios complejos. Estos desarrollos se plantean manteniendo la viabilidad para su implementación en tiempo real a bordo y están concebidos como un paso necesario hacia arquitecturas de guiado y control tolerantes a fallos más avanzadas en aplicaciones profesionales de UAVs.

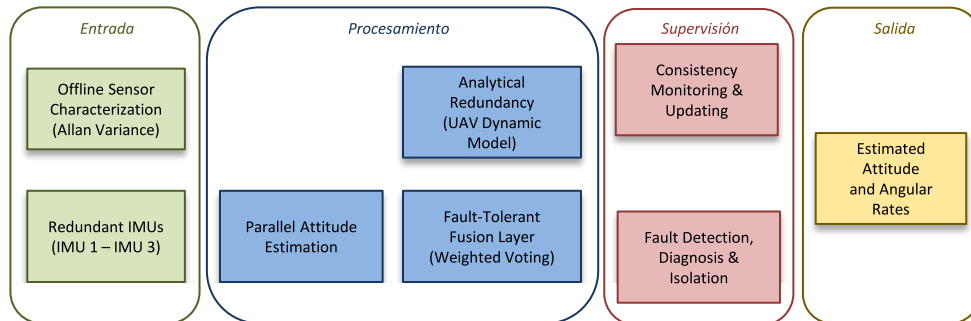


Figura 3: Esquema conceptual del trabajo en curso sobre estimación de actitud multi-IMU para UAVs.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias al apoyo del Gobierno de la Rioja (proyecto FORTALECE 2024/03) y de la Universidad de La Rioja (Ayuda a Grupos de Investigación REGI 25/69).

Referencias

- de Alteriis, G., Silvestri, A. T., Conte, C., Bottino, V., Caputo, E., Squillace, A., Accardo, D., Schiano Lo Moriello, R., 2023. Innovative fusion strategy for mems redundant-imu exploiting custom 3d components †. *Sensors* 23 (5). DOI: 10.3390/s23052508
- Hamadi, H., Lussier, B., Fantoni, I., Francis, C., 2022. Data fusion fault tolerant strategy for a quadrotor uav under sensors and software faults. *ISA Transactions* 129, 520–539. DOI: 10.1016/j.isatra.2022.01.007
- Rico, R., Gil-Martínez, M., Rico-Azagra, J., 2024. Fault-tolerant sensor fusion architecture for uav attitude estimation. *Jornadas de Automática* 45. DOI: 10.17979/ja-cea.2024.45.10941
- Rico, R., Rico-Azagra, J., Gil-Martínez, M., 2022. Hardware and rtos design of a flight controller for professional applications. *IEEE Access* 10, 134870 – 134883. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3232749

Artículos



Universidad
Zaragoza

II Simposio CEA de los GT: Ingeniería de Control - Modelado, Simulación y Optimización - Educación en Automática (2026)

RA para mejorar el aprendizaje en prácticas de Ingeniería Industrial

Martínez-Gila, D.M.^{a,*}, Ruano-Ruano, I.^b, Illana-Rico, S.^a, Satorres-Martínez, S.^a

^a Dpto. de Ingeniería Electrónica y Automática, Universidad de Jaén, EPS de Jaén, A3-402, Campus las Lagunillas s.n., 23071 Jaén, España.

^b Dpto. de Ingeniería de Telecomunicación, Universidad de Jaén, EPS de Jaén, A3-402, Campus las Lagunillas s.n., 23071 Jaén, España.

To cite this article: Martínez-Gila, D.M., Ruano-Ruano, I.*, Illana-Rico, S. 2026, Satorres-Martínez, S. AR to improve learning in Industrial Engineering practices. II Simposio CEA de los GT: Ingeniería de Control - Modelado, Simulación y Optimización - Educación en Automática. Zaragoza, España.

Resumen

La desconexión existente entre los contenidos teóricos y las prácticas relacionadas con los mismos dificulta en gran medida el aprendizaje efectivo y real del alumnado de educación superior, especialmente en estudios de ingeniería debido a la dificultad de algunas materias. El uso de dispositivos adaptados para ofrecer experiencias de realidad aumentada permite al alumnado acceder a información digital superpuesta en el mundo real, constituido por el laboratorio y todos los dispositivos, herramientas y componentes con los que trabajan en prácticas. Este trabajo constituye la primera fase de una investigación que propone una innovación docente que trata de cerrar el hueco teoría-práctica existente y facilitar el aprendizaje mediante el uso de herramientas de realidad aumentada durante el desarrollo de las prácticas de laboratorio del alumnado de Ingeniería Industrial. En este trabajo se incluye un caso de estudio en el que se hace uso de dispositivos cotidianos más sencillos, como son los móviles inteligentes, aunque el objetivo final es ofrecer una experiencia lo más avanzada posible, gracias al uso de gafas inteligentes.

Palabras clave: Realidad Aumentada, Educación, Prácticas de ingeniería, Gafas de RA, Ingeniería Industrial, teléfonos inteligentes.

AR to improve learning in Industrial Engineering practices

Abstract

The disconnect between theoretical content and its practical application significantly hinders effective and practical learning for higher education students, especially in engineering studies due to the difficulty of some subjects. The use of devices adapted to offer augmented reality experiences allows students to access digital information superimposed on the real world, which consists of the laboratory and all the devices, tools, and components they use in practical exercises. This work constitutes the first phase of a research project that proposes a teaching innovation aimed at bridging the existing theory-practice gap and facilitating learning through the use of augmented reality tools during laboratory sessions for Industrial Engineering students. This work includes a case study using simpler, everyday devices such as smartphones, although the ultimate goal is to offer the most advanced experience possible through the use of AR glasses.

Keywords: Augmented Reality, Education, Engineering practices, AR Glasses, Industrial Engineering, smartphones.

1. Introducción

En el contexto actual de la educación superior, y particularmente en las titulaciones técnicas, persiste una dificultad ampliamente reconocida: la desconexión entre los contenidos teóricos impartidos en el aula y su aplicación efectiva en entornos prácticos (Korthagen, 2010). Esta brecha

resulta especialmente patente en asignaturas con un alto componente experimental, donde el alumnado, a pesar de dominar la simbología, las estructuras lógicas o los esquemas conceptuales, presenta limitaciones al enfrentarse a equipos reales, a montajes físicos o a sistemas automatizados. Esta dificultad compromete la adquisición de competencias técnicas fundamentales como la interpretación de planos, la resolución de problemas en tiempo real, la manipulación de

sistemas complejos o la toma de decisiones basada en la observación directa del funcionamiento de los equipos.

Desde una perspectiva pedagógica, esta problemática es especialmente relevante en el área de conocimiento de la ingeniería, ya que impacta negativamente en el desarrollo competencial del alumnado y en su preparación para abordar contextos laborales reales (Trevelyan, 2010) (Duffy and Bowe, 2010) (Satorres, 2025). Asimismo, responde a una necesidad institucional ampliamente identificada: la mejora de la calidad de la docencia práctica, el fomento de metodologías activas y la incorporación de tecnologías educativas alineadas con los principios de sostenibilidad, accesibilidad y mejora continua.

Este trabajo se basa en el uso de Realidad Aumentada (RA) en sesiones prácticas de laboratorio para tratar de reducir o cerrar completamente, cuando sea posible, el hueco existente entre los contenidos teóricos impartidos en las clases magistrales de Ingeniería Industrial y las prácticas correspondientes. Conviene antes recordar la diferencia que hay entre el uso de Realidad Virtual (RV), Realidad Aumentada (RA) y Realidad Mixta (RM) en un entorno docente. Este ha sido un tema ampliamente debatido en múltiples trabajos (Milgram and Kishino, 1994) (Skarbez et al., 2021). Cuando se usa RV se produce la inmersión del alumno en un entorno digital totalmente artificial, cuando es RA la inmersión del alumno se realiza en un entorno real al que se añaden objetos virtuales superpuestos y cuando se tiene RM existe una inmersión en un entorno virtual en el que se combinan elementos reales de diversas maneras.

Tanto la RA como la RV han demostrado ser propuestas muy válidas y efectivas (Li et al. 2025), a pesar de la existencia de algunas barreras que pueden surgir (costes elevados, limitaciones técnicas y preocupaciones éticas sobre la privacidad) (Thangavel et al. 2025). Sin embargo, como ya se ha comentado anteriormente, con este trabajo se trata de ofrecer al alumnado de ingeniería industrial una experiencia de RA. Se presenta la inmersión en un mundo real formado por los laboratorios de prácticas, en los que se encuentran bancos de pruebas y los elementos que los componen (dispositivos, conectores y demás componentes), superponiendo elementos virtuales que ayudan a la comprensión y entendimiento de los mismos.

A modo de ejemplo, ¿cuántas veces se ha explicado en las clases de teoría los componentes que conforman un sistema como puede ser el mostrado en la Figura 1, y cuando el alumnado llega al laboratorio y ve el banco de pruebas correspondiente, no son capaces de identificar los componentes que incluye?.

En este escenario, las tecnologías de RA, ofrecen un enfoque innovador para reducir la brecha entre teoría y práctica que enriquece su interacción con el entorno real, pudiendo facilitar la identificación de componentes físicos, proporcionar apoyo audiovisual contextualizado o incluso guiar procesos técnicos paso a paso. La literatura reciente respalda la eficacia de este enfoque: la RA mejora significativamente la motivación, la comprensión y el rendimiento académico (Chang et al., 2022) (Lampropoulos et al., 2025) (Rodríguez-Saavedra et al., 2025), además de fomentar el aprendizaje significativo y facilitar la adquisición

de competencias espaciales y procedimentales (Suhail et al., 2024).

1.1. Dispositivos de RA

Para ofrecer una experiencia de RA hay que utilizar, como es evidente, dispositivos tecnológicos. Los dispositivos usados en la RA deben disponer de un elemento de captura de imágenes del entorno real en el que se produce la experiencia y un medio capaz de visualizar dicho entorno superponiendo los elementos virtuales que justifican la RA. Opcionalmente se pueden usar elementos de captura y reproducción de audio.



Figura 1. Banco de pruebas de un laboratorio docente.

Pueden ser teléfonos móviles inteligentes, tabletas, portátiles o gafas inteligentes o de RA (smart glasses or AR glasses). Cada uno de ellos ofrece distintas experiencias debido a las diferentes características que ofrecen, tanto del hardware incluido como del uso que se debe hacer del mismo. Entre las características del hardware están el tamaño del medio de visualización (normalmente pantalla, mayor en portátil o tabletas que en un móvil o unas AR glasses), la capacidad de cómputo, la conexión a Internet o la resolución de las imágenes que puede capturar (normalmente dada por la cámara). Entre las características de uso sobresale la forma de mantener el dispositivo para realizar las capturas del medio real. No es lo mismo sostener un portátil o tablet, que suele requerir el uso de las dos manos, que un móvil, que puede

usarse ocupando únicamente una mano, o que se usen unas gafas inteligentes, que permiten la movilidad de las dos manos mientras se puede trabajar en el laboratorio.

La investigación en la que se enmarca este trabajo se desarrolla en distintas fases en las que se ha tratado de validar distintos dispositivos y ofrecer distintos servicios de ayuda al estudiante. El objetivo final es que la experiencia sea lo más cómoda, enriquecedora y productiva posible, y para ello los dispositivos a usar deberían ser capaces de ofrecer una experiencia de RA completa y permitir la movilidad para trabajar en los medios del laboratorio lo cual se puede conseguir más fácilmente cuando los dispositivos usados son AR glasses. Este trabajo se encuentra en una fase inicial de la investigación en la que se hace uso de móviles como dispositivos facilitadores de la RA. El resto de la comunicación se ha estructurado de la siguiente forma: en el apartado 2 se muestra la metodología propuesta, incluyendo la arquitectura utilizada, la percepción del entorno y la toma de decisiones. El apartado 3 muestra un sencillo caso de uso que ayuda a entender los objetivos buscados y, finalmente, en el apartado 4, se incluyen las conclusiones y trabajos futuros.

2. Metodología propuesta

La metodología seguida en este trabajo se basa en el diseño, desarrollo y validación progresiva de un sistema de RA orientado a mejorar el aprendizaje del alumnado durante las prácticas de laboratorio en titulaciones de Ingeniería Industrial. El enfoque adoptado combina principios de innovación docente con técnicas propias de la automática, la visión por computador y los sistemas inteligentes, priorizando la interacción natural con el entorno físico real.

2.1 Enfoque general del sistema

El sistema propuesto se concibe como una plataforma de Realidad Aumentada basada en una arquitectura cliente-servidor, en la que el dispositivo móvil del alumnado actúa como interfaz de acceso a la experiencia aumentada, mientras que un servidor central se encarga del procesamiento intensivo de la información visual y de la gestión de los contenidos educativos.

A diferencia de otros enfoques basados en aplicaciones específicas o entornos cerrados, el sistema ha sido diseñado para funcionar directamente a través del navegador web del dispositivo móvil, sin necesidad de instalar software adicional. Esta decisión metodológica reduce las barreras tecnológicas de entrada y facilita su integración en el contexto docente habitual, donde conviven dispositivos heterogéneos.

Desde el punto de vista funcional, el sistema se estructura siguiendo un esquema clásico de percepción-decisión-acción, ampliamente utilizado en sistemas de automática y robótica, en el que la información del entorno se procesa para generar una respuesta adaptada al contexto y a la interacción del usuario.

2.2 Arquitectura hardware-software

La arquitectura del sistema se compone de tres elementos principales (Figura 2):

- **Entorno real del laboratorio**, constituido por los bancos de prácticas y los componentes físicos con los que interactúa el alumnado.
- **Dispositivo móvil**, encargado de capturar imágenes del entorno real y de mostrar la información aumentada superpuesta.
- **Servidor de procesamiento**, responsable del análisis visual, la toma de decisiones y la gestión de los contenidos educativos.

El dispositivo móvil transmite al servidor una secuencia de imágenes capturadas por su cámara. Estas imágenes representan la señal de entrada del sistema y son procesadas en tiempo real en el servidor, donde se ejecutan los algoritmos de visión por computador y aprendizaje profundo. Como salida, el servidor devuelve al dispositivo móvil la información aumentada, que se presenta superpuesta al entorno real visualizado por el alumnado.

Esta separación de responsabilidades permite reducir la carga computacional en el cliente y facilita la actualización y escalabilidad del sistema, tanto desde el punto de vista técnico como docente.

2.3 Percepción del entorno mediante visión por computador

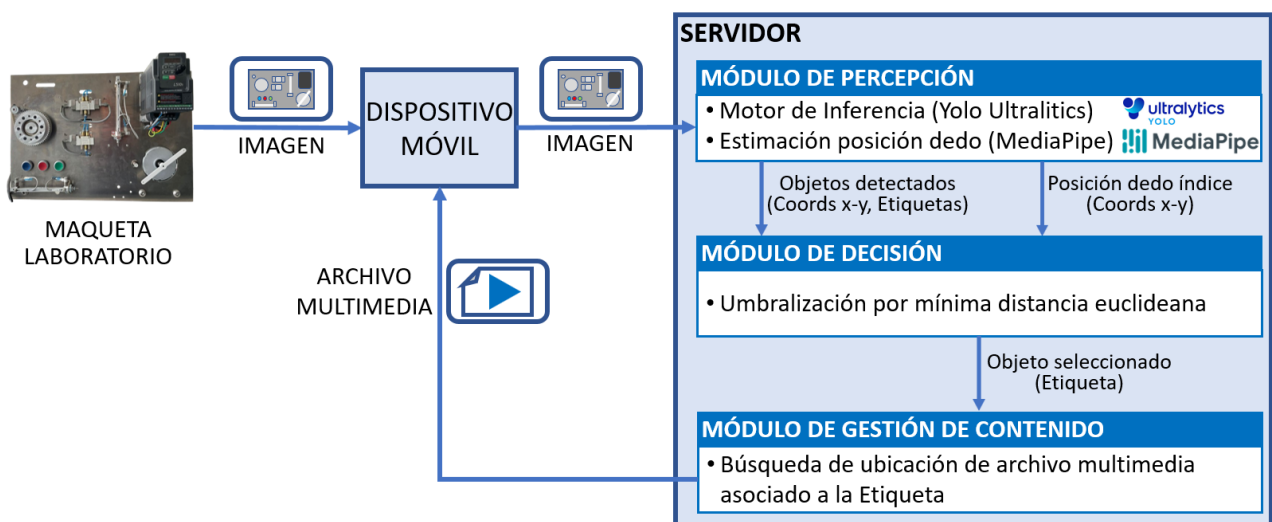


Figura 2. Arquitectura HW-SW del sistema

Por un lado, se emplean modelos de detección de objetos basados en aprendizaje profundo, concretamente arquitecturas del tipo You Only Look Once (YOLOv8n) (Jocher *et al.*, 2023), que permiten identificar en tiempo real los componentes físicos presentes en los bancos de prácticas. Estos modelos proporcionan, para cada objeto detectado, su localización espacial en la imagen y su identificación semántica. El entrenamiento y la inferencia de los modelos se han realizado utilizando la plataforma Ultralytics (Jocher *et al.*, 2025), lo que facilita la adaptación del sistema a nuevos componentes y escenarios prácticos.

El proceso de entrenamiento se apoya en conjuntos de imágenes reales del laboratorio, debidamente anotadas siguiendo flujos estándar de visión artificial. En este contexto, herramientas de etiquetado visual como Label Studio resultan especialmente adecuadas para la generación de datos de entrenamiento, al permitir una anotación eficiente y reproducible de los objetos de interés.

Por otro lado, el sistema incorpora un módulo de estimación de la posición de la mano del usuario basado en la detección de puntos clave (Cao *et al.*, 2021) (Zhang *et al.*, 2020) (hand landmarks), utilizando la biblioteca MediaPipe (Google, 2025). Este módulo permite obtener en tiempo real la localización de la punta del dedo índice, que se emplea como principal elemento de interacción entre el alumno y el sistema.

2.4 Lógica de decisión e interacción alumno-sistema

La información procedente de los módulos de detección de objetos y de estimación de la posición de la mano se integra en una etapa de decisión que determina la interacción alumno-sistema. Para ello se define un criterio de proximidad espacial entre la posición del dedo índice y las regiones de interés asociadas a los objetos detectados.

Cuando la distancia entre el punto de interacción y uno de los objetos se sitúa por debajo de un umbral establecido, el sistema interpreta que el alumno ha seleccionado intencionalmente dicho componente. Esta lógica puede modelarse como un sistema de eventos discretos con memoria de estado, en el que la selección de un objeto permanece activa hasta que se produce una nueva selección sobre otro componente.

Este comportamiento de selección persistente evita transiciones rápidas no deseadas y proporciona una interacción estable y coherente, especialmente adecuada en el contexto de las prácticas de laboratorio, donde el alumnado necesita disponer de tiempo para observar, reflexionar y manipular los sistemas físicos.

2.5 Generación de la información aumentada

Una vez seleccionado un componente, el sistema activa la visualización de información educativa asociada al mismo. En la fase actual del desarrollo, dicha información se presenta en forma de vídeos explicativos breves, alojados en el servidor y enviados al dispositivo móvil bajo demanda.

Estos contenidos se muestran superpuestos al entorno real visualizado por el alumnado, constituyendo una experiencia de Realidad Aumentada en la que la información digital se integra de forma contextualizada con los objetos físicos del laboratorio. Este enfoque permite reforzar la comprensión

conceptual del alumnado en el mismo momento en que interactúa con el sistema real, contribuyendo a cerrar la brecha entre teoría y práctica.

3. Caso de estudio: práctica de neumática industrial

Como caso de estudio para validar la propuesta de Realidad Aumentada desarrollada, se ha seleccionado una práctica habitual de automática industrial basada en la construcción de circuitos neumáticos (Terschüren *et al.*, 2024). En esta práctica, al alumnado se le facilita un esquema neumático normalizado, incluido en el guion de la sesión (Figura 3), que describe el funcionamiento de un sistema neumático concreto.

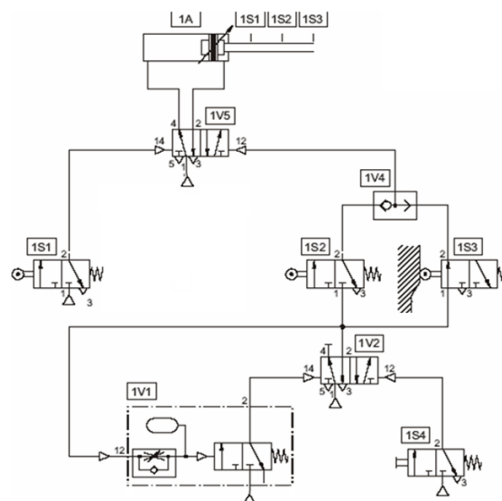


Figura 3. Esquema neumático propuesto en el guion de la práctica

Durante la sesión práctica, los estudiantes disponen sobre la mesa de trabajo de un conjunto de componentes neumáticos reales —válvulas, actuadores, reguladores, conexiones, entre otros— y de un panel neumático sobre el que deben montar físicamente el circuito correspondiente. El objetivo de la práctica es que el alumnado sea capaz de interpretar correctamente el esquema teórico, identificar los componentes necesarios y realizar el montaje adecuado del sistema, tal y como se muestra en la Figura 4.

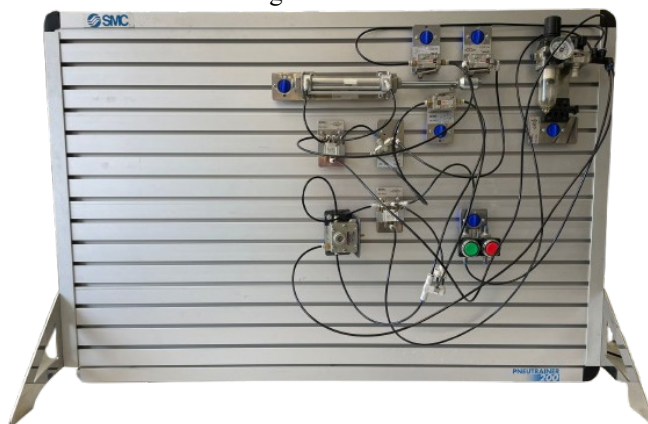


Figura 4. Resultado final esperado del sistema

Sin embargo, en la metodología tradicional, esta tarea presenta diversas dificultades recurrentes. El alumnado suele mostrar problemas para relacionar los símbolos del esquema

neumático con los componentes físicos reales, identificar correctamente cada elemento o comprender su función dentro del sistema global. Estas dificultades provocan errores en el montaje, aumentan el tiempo necesario para completar la práctica y, en muchos casos, generan frustración y dependencia constante del profesorado.

La Figura 5 muestra el entorno real de la práctica, donde se aprecia la complejidad asociada a la identificación y selección de componentes cuando no se dispone de apoyo contextual adicional. Este escenario constituye un ejemplo representativo de la brecha existente entre la representación teórica de los sistemas de automática industrial y su implementación práctica en el laboratorio.



Figura 5. Componentes neumáticos disponibles y panel de montaje en el laboratorio

3.1 Integración de la RA en la práctica

Con el objetivo de reducir las dificultades detectadas en la metodología tradicional, la práctica descrita se ha complementado con el sistema de Realidad Aumentada propuesto en este trabajo. Durante el desarrollo de la sesión, el alumnado dispone de un dispositivo móvil desde el cual accede al sistema de RA a través de un navegador web, sin necesidad de instalar aplicaciones adicionales.

Mediante la cámara del dispositivo móvil, el alumno visualiza el entorno real del laboratorio, que incluye el panel neumático y los distintos componentes disponibles para el montaje. El sistema analiza en tiempo real las imágenes capturadas, identificando automáticamente los componentes neumáticos presentes, como se muestra en la Figura 6, tras lo cual permite la interacción del alumno mediante el gesto natural de señalar con el dedo índice.

Cuando el alumno apunta a uno de los componentes neumáticos, el sistema lo reconoce y lo selecciona, activando la visualización de información multimedia asociada al mismo. Esta información se presenta superpuesta a la imagen real visualizada en el dispositivo móvil, proporcionando al alumno un apoyo contextual inmediato que facilita la identificación del componente, la comprensión de su función y su relación con el esquema neumático teórico.

La Figura 7 muestra un ejemplo de esta interacción, en la misma se aprecia la visualización en el dispositivo móvil del entorno real del laboratorio junto con el contenido multimedia explicativo asociado a un componente neumático concreto.

Aprendizaje interactivo por selección

Apunta con el **índice** a un objeto.
La explicación permanece visible hasta que selecciones otro.

Cámara OK

Vídeo procesado (Servidor)

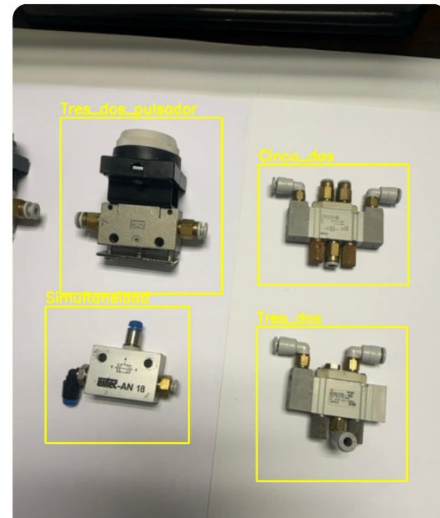


Figura 6. Captura de pantalla de dispositivo móvil. Identificación de componentes

Aprendizaje interactivo por selección

Apunta con el **índice** a un objeto.
La explicación permanece visible hasta que selecciones otro.

Cámara OK

Vídeo procesado (Servidor)

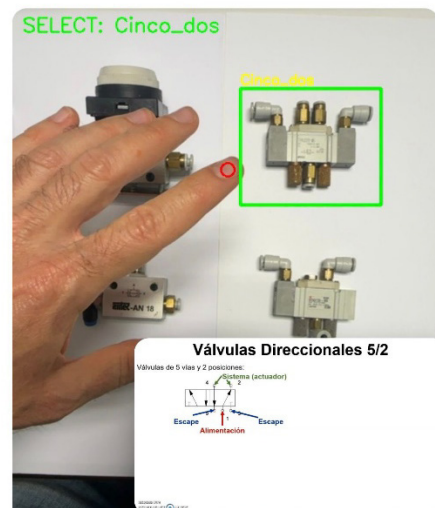


Figura 7. Captura de pantalla de dispositivo móvil. Identificación confirmada y visualización de información asociada

4. Conclusiones y Trabajos futuros

El trabajo realizado hasta el momento ha permitido constatar la viabilidad de las hipótesis iniciales, si bien debe tenerse en cuenta que se está en una fase preliminar de un

proyecto mucho más amplio. Las librerías utilizadas han permitido que, desde un dispositivo móvil cotidiano como el que dispone la práctica totalidad del alumnado, se pueda realizar la captación de imágenes, identificación de componentes mediante el señalamiento del mismo, procesamiento de la información asociada y visualización de la información asociada al componente. Lo que constituye un ejemplo de uso de técnicas de RA.

Esto significa que, a pesar de éxito cosechado hasta el momento, se debe seguir trabajando con el fin de obtener un sistema estable, operativo y mucho más funcional que el obtenido hasta ahora. Para ello se plantean las siguientes líneas de trabajo futuro:

- Mejora de la arquitectura del servidor para la contención y estructuración de materiales formativos.
- Creación de materiales didácticos a mostrar como elementos embebidos en distintos formatos multimedia.
- Desarrollo de metodología para creación de nuevas prácticas.
- Formación al profesorado sobre la creación de nuevas prácticas.
- Realizar recursos y metodologías para el control de evidencias de buenas prácticas, como es el análisis de rendimiento del alumnado y detección de posibles mejoras.
- Adaptación del sistema para utilizar nuevos dispositivos que faciliten su uso, como son las gafas inteligentes, las cuales han demostrado en otros muchos trabajos que producen mejoras significativas (Díaz González *et al.*, 2025) (Koutromanos and Kazakou, 2023).

Cuando se consigan implementar estas líneas de futuro se espera obtener buenos resultados que permitan explorar nuevas líneas y establecer nuevos objetivos como podría ser el desarrollo de prácticas basadas en RA con gamificación (Czok and Weitzel, 2025) o basadas en localización (Fonseca *et al.*, 2025).

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al apoyo de los Proyectos PDC2022-133995-I00 y PID2023-150832OB-I00 del Plan Nacional de I+D+I del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España, del Proyecto de Investigación Aplicada y Desarrollo Experimental DGP_PIDI_2024_01419 (Orden 23 de abril de 2024) de la Junta de Andalucía y del Proyecto de Innovación Docente PID2025_37 del Plan de Innovación Docente de la Universidad de Jaén.

Referencias

Cao Z., Hidalgo G., Simon T., Wei S.-E., Sheikh Y., 2021. OpenPose: Realtime Multi-Person 2D Pose Estimation using Part Affinity Fields. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 43(1):172–186. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2019.2929257>

Chang H-Y, Binali T, Liang J-C, Chiou G-L, Cheng K-H, Lee SW-Y, Tsai C-C., 2022. Ten years of augmented reality in education: A meta-analysis of (quasi-) experimental studies to investigate the impact. *Computers & Education* 191:104641. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2022.104641>

Czok V., Weitzel H., 2025. Impact of Augmented Reality and Game-Based Learning for Science Teaching: Lessons from Pre-Service Teachers. *Applied Sciences* 15(5):2844. <https://doi.org/10.3390/app15052844>

Díaz González E.M., Belaroussi R., Soto-Martín R., Acosta M., Martín-Gutiérrez J., 2025. Effect of Interactive Virtual Reality on the Teaching of Conceptual Design in Engineering and Architecture Fields. *Applied Sciences* 15(8):4205. <https://doi.org/10.3390/app15084205>

Duffy G., Bowe B., 2010. Bridging the Gap Between Engineering Workforce Needs and Student Engagement. *International Symposium for Engineering Education: 1–6*. Accedido online (17-12-2025): <https://arrow.tudublin.ie/cgi/viewcontent.cgi?article=1006&context=st2>

Fonseca X., Spangenberg P., Baer M., Schmidt R., Söbke H., 2025. Location-based augmented reality in education: A systematic literature review. *Computers and Education Open* 9:100277. <https://doi.org/10.1016/j.caeo.2025.100277>

Google, Google Developers, 2025. MediaPipe Hand Landmarker. Google AI Edge. Accedido online (17-12-2025): https://ai.google.dev/edge/mediapipe/solutions/vision/hand_landmarker

Jocher G., Chaurasia A., Qiu J., 2023. Ultralytics YOLOv8 [Software]. Accedido online (17-12-2025): <https://github.com/ultralytics/ultralytics>

Jocher G., Chaurasia A., Qiu J., 2025. Ultralytics YOLO. GitHub. Accedido online (17-12-2025): <https://github.com/ultralytics/ultralytics>

Korthagen F.A.J., 2010. The relationship between theory and practice in teacher education. *Building bridges* 1:98–136. Accedido online (17-12-2025) <https://korthagen.nl/en/wp-content/uploads/2018/07/The-relationship-between-theory-and-practice-in-teacher-education.pdf>

Koutromanos G., Kazakou G., 2023. Augmented reality smart glasses use and acceptance: A literature review. *Computers & Education: X Reality* 2:100028. <https://doi.org/10.1016/j.cexr.2023.100028>

Lampropoulos G., del Bosque A., Fernández-Arias P., Vergara D., 2025. Augmented Reality in Engineering Education: A Bibliometric Review. *Information* 16(10):859. <https://doi.org/10.3390/info16100859>

Li P, Zhang X, Hu X, Xu B, Zhang J., 2025. Theoretical Model and Practical Analysis of Immersive Industrial Design Education Based on Virtual Reality Technology. *International Journal of Technology and Design Education* 35:1543-1570. <https://doi.org/10.1007/s10798-024-09946-x>

Milgram P, Kishino F., 1994. A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. *IEICE Transactions on Information Systems* E77-D(12):1321–1329.

Satorres S., Martínez D.M., Estévez E., Dorado R., Moilanen T., Rad C., and Lapusan C., 2025. International Co-teaching Experience in the NextGEng European Project: A Contribution to Engineering Education 5.0. *International Journal of Engineering Education*, 41, 5.

Skarbez R, Smith M, Whitton MC., 2021. Revisiting Milgram and Kishino's Reality-Virtuality Continuum. *Frontiers in Virtual Reality* 2:647997. <https://doi.org/10.3389/frvir.2021.647997>

Suhail N., Bahroun Z., Ahmed V., 2024. Augmented reality in engineering education: enhancing learning and application. *Frontiers in Virtual Reality* 5:1461145. <https://doi.org/10.3389/frvir.2024.1461145>

Rodríguez-Saavedra M.O., Barrera Benavides L.G., Cuentas Galindo I., Campos Ascuña L.M., Morales Gonzales A.V., Lopez J.W.M., Arguedas-Catani R.W., 2025. Augmented Reality as an Educational Tool: Transforming Teaching in the Digital Age. *Information* 16(5):372.

Terschüren J.-N., Varney V., Müller L., 2024. How Can Pneumatics Be Trained with Augmented Reality in the Context of Training for Industrial-Technical Professions? *STE 2024, LNNS 1027*, pp. 344–355. https://doi.org/10.1007/978-3-031-61891-8_34

Thangavel S, Sharmila K, Sufina K., 2025. Revolutionizing Education Through Augmented Reality (AR) and Virtual Reality (VR): Innovations, Challenges and Future Prospects. *Asian Journal of Interdisciplinary Research* 8(1):1-28. <https://doi.org/10.54392/ajir2511>

Trevelyan J., 2010. Mind the Gaps: Engineering Education and Practice. *Proceedings of the 21st Annual Conference for the Australasian Association for Engineering Education: 385–390*. Accedido online (17-12-2025)

Zhang F., Bazarevsky V., Vakunov A., Tkachenka A., Sung G., Chang C.-L., Grundmann M., 2020. MediaPipe Hands: On-device Real-time Hand Tracking. *arXiv preprint arXiv:2006.10214*. Accedido online (17-12-2025): <https://arxiv.org/abs/2006.10214>

Spiking control: bioinspired solution to address nonlinearities in control systems

Serrano-Balbontín, A.J.*, Tejado, I., Vinagre, B.M.

Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Extremadura, 06006 Badajoz, Spain.

To cite this article: Serrano-Balbontín, A.J., Tejado, I., Vinagre, B.M. 2026. Spiking control: a bioinspired solution to address nonlinearities in control systems. Actas del II Simposio CEA de los GT: Ingeniería de Control - Modelado, Simulación y Optimización - Educación en Automática. Zaragoza, España.

Resumen

La ingeniería neuromórfica proporciona mecanismos de inspiración biológica para procesar información de manera eficiente, ofreciendo nuevas oportunidades para sistemas de control que operan bajo dinámicas no lineales y dependientes del estado. En este contexto, el control pulsátil o *spiking control* (SC), basado en modulación por eventos tipo *spiking*, codifica las señales de control en trenes de pulsos que se adaptan de forma natural a la dinámica del sistema, reducen el consumo de energía y reducen los efectos de las no linealidades. Este trabajo resume las principales contribuciones de los autores al SC (también conocido como *neuromorphic control*) mediante varios ejemplos de aplicación que demuestran su potencial para mejorar la eficiencia en escenarios de control no lineal.

Palabras clave: Control pulsátil, Ingeniería neuromórfica, Sistemas de control, Aplicaciones, Neurona, PFM, Estrategias bioinspiradas, Modulación por pulsos, Motor DC, Válvula solenoide

Spiking control: bioinspired solution to address nonlinearities in control systems

Abstract

Neuromorphic engineering provides biologically inspired mechanisms for processing information efficiently, offering new opportunities for control systems operating under nonlinear and state-dependent dynamics. In this context, spiking control (SC), based on spiking, event-driven modulation, encodes control signals into pulse trains that naturally adapt to system dynamics, reduce energy consumption, and directly shape input nonlinearities. This paper reviews the authors' main contributions to SC (also known as neuromorphic control) through several application examples that demonstrate its potential for improving efficiency in nonlinear control scenarios.

Keywords: Spiking control, Neuromorphic engineering, Control systems, Applications, Neuron, PFM, Bioinspired strategies, Pulse modulation, DC motor, Solenoid valve.

1. Introduction

Neuromorphic engineering draws inspiration from the principles of nervous systems to develop more efficient hardware and software architectures. Carver Mead, who argued that the brain could outperform digital technology by several orders of magnitude, advocated for analog silicon systems capable of emulating neural computation. Since then, neuromorphic engineering has advanced primarily through low-power microelectronics that seek to replicate neural topology and processing.

Although standard neural networks were initially developed as a parallel field rooted in mathematics and statistics, these paths have merged through Spiking Neural Networks (SNNs), combining brain-inspired processing with modern algorithmic success.

Among the many concepts emerging from neuromorphic research, this work is motivated by the way biological neurons transmit information through pulse trains. Pulse-frequency modulation (PFM) was originally formulated as an abstraction of neural communication in physiological control systems, and

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

it has since demonstrated practical benefits. For example, PFM can improve power efficiency in switching regulators, especially at low load, because power losses scale with the number of switching events. It is also inherently robust to noise, as information is encoded in pulse timing rather than amplitude, and it provides advantages in actuator precision. Notably, PFM naturally handles static friction in DC motors by allowing the energy of each pulse to be tuned to overcome static friction. Several commercial converters now combine PFM and pulse-width modulation (PWM) to exploit the strengths of both.

However, conventional pulse-width modulation (PWM) schemes, which rely on fixed switching frequency, are inherently ill-suited to systems exhibiting nonlinear, state-dependent dynamics. Attaining satisfactory control performance under such conditions generally necessitates the introduction of additional compensation mechanisms. Dead-zone effects are frequently treated by incorporating feedforward offsets; nevertheless, this strategy alone is insufficient to guarantee consistent behavior, as the resulting system response remains highly sensitive to the current operating state. To alleviate this dependence, more advanced feedback architectures—most notably adaptive and robust control frameworks—have been proposed and investigated.

The advantages of using a bioinspired solution is that the efficiency and robustness attributed to the biological process can be expected to appear as a positive side effect.

In control systems, the idea of spiking control (SC) has recently gained traction as a neuron-inspired modulation technique that encodes the output of a main controller into pulses. SC is inherently a form of spiking, event-based control, in which actuation is triggered only when required by the system dynamics, leading to asynchronous, state-dependent switching that can reduce energy consumption and directly shape input nonlinearities (Sepulchre, 2022; Schmetterling et al., 2024). Recent studies show that spiking controllers can exploit the intrinsic dynamics of robotic bodies, pointing toward a new class of efficient and robust control strategies (Arbeláiz et al., 2025a; Yoshioka et al., 2024).

The term neuromorphic control (NC) is also employed in the literature as a broader concept that may encompass additional forms of bioinspired strategies. In the present work, however, the term SC has been adopted preferentially in order to emphasize the specific mechanism by which the control signal is transmitted. It should be explicitly noted that this study focuses on providing experimental evidence and establishing design criteria for addressing nonlinearities, rather than conducting a formal stability analysis.

The remainder of this paper is organized as follows. Section 2 introduces the fundamentals of silicon neurons. Section 3 presents the principles of spiking control. Section 4 summarizes the authors' main contributions to this research area and illustrates them through several application examples. Finally, Section 5 summarizes the main conclusions.

2. Fundamentals of silicon neurons

The current landscape of neuronal modeling presents a spectrum of abstractions. First, mathematical models based on

neuron structure provide high biological accuracy but entail significant computational overhead. Second, abstract input-output descriptions, such as integral PFM (IPFM), focus on functional signaling by simplifying complex neuronal dynamics. Lastly, analog implementations constitute a hardware-centric approach, leveraging the intrinsic physical properties of electronic devices to achieve energy-efficient neuromorphic computing. However, the boundaries between these categories are often blurred, as many practical models frequently overlap or integrate elements from different approaches to balance biological realism with technical constraints.

The realization of these diverse paradigms is encapsulated into the concept of silicon neurons. Whether implemented as analog, digital, or hybrid circuits, they function as the core building blocks for neuromorphic architectures. There are many types of silicon neurons that vary in complexity depending on the application. In particular, biophysically realistic models that emulate the detailed internal dynamics of the neuron can be found in the literature, such as the Hodgkin-Huxley model as well as basic circuits that attempt to directly mimic the spike-like output of real neurons, such as integrate-and-fire (I&F) circuits. For convenience, those most closely related to our developments are described below:

- *Leaky integrate-and-fire neuron*: early designs of silicon neurons were used to mimic the firing frequency of real neurons by simply using a resistor-capacitor (RC) circuit, leading to the concept of I&F neuron models:

$$C \frac{dV(t)}{dt} + \frac{V(t)}{R} = i(t) \quad (1)$$

where C is the neuron membrane capacitance, R is the membrane resistance, $V(t)$ is the membrane voltage and $i(t)$, the input current (Abbott, 1999).

- *Fractional-order integrate-and-fire neuron*: introduces the fractional order in the derivative to model the spike frequency variation in response to constant stimuli, also known as adaptation or accommodation, observed in some types of real neurons:

$$C \frac{d^\alpha V(t)}{dt^\alpha} = i(t) \quad (2)$$

where $\alpha \in (0, 1)$ is the fractional order (Teka et al., 2014).

- *Hodgkin-Huxley neuron*: is considered the most realistic and precise model of a biological neuron, given by:

$$C \frac{dV(t)}{dt} = \sum_i g_i(V(t))(V(t) - V_i) + i(t) \quad (3)$$

where V_i and g_i are the reversal potentials and the conductances, respectively, of the potassium and sodium channels, as well as the leaky terms (Gerstner et al., 2014). The complex neuron dynamics are well represented, such as bifurcations and accommodation. Although being the most accurate becomes impractical for control purposes due to its high-dimensional nonlinearities. In engineering, approximations of this expression are preferred when bifurcations are helpful, such as the FitzHugh-Nagumo model (Arbeláiz et al., 2025b).

- *Axon-Hillock neuron*: represents one of the most compact implementations of a self-resetting neuron. It is typically realized using two capacitors and a small number of transistors, and its dynamical behavior can be described in terms of two principal phases, conventionally referred to as depolarization and repolarization (Mead, 1989). During depolarization the voltage evolves as:

$$\frac{dV(t)}{dt} = \frac{i(t)}{C_1 + C_2} \quad (4)$$

where C_1 and C_2 are the capacitances. During repolarization:

$$\frac{dV(t)}{dt} = \frac{-I_{dis} + i(t)}{C_1 + C_2} \approx \frac{-I_{dis}}{C_1 + C_2} \quad (5)$$

where I_{dis} is a discharging current.

3. Spiking control

The strategy exploits neuron dynamics to counteract actuator nonlinearities. It uses a main controller (e.g., a classical proportional-integral PI controller) in cascade with a neuron-like element that converts the control signal into a two-state signal, as shown in Figure 1.

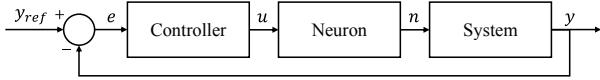


Figure 1: Spiking control closed loop scheme.

The integral PFM (IPFM) neuron is described by the following two equations (Jones et al., 1961; Li and Jones, 1963). The first, describes the integration of the input up to a threshold:

$$s(t) = \int_{t_{k-1}}^t u(t)dt < K_{ti} \quad (6)$$

where $u(t)$ is the control signal, $s(t)$ is the integral (similar to membrane voltage in previous models), K_{ti} is the threshold, and t_k is the k -th time $s(t)$ crosses the value K_{ti} ($s(t_k) = K_{ti}$). At each t_k instant, the integral is reset:

$$s(t_k^+) \leftarrow 0 \quad (7)$$

The second, describes the output which is a pulse train:

$$n(t) = A \sum_{k=1}^N [H(t - t_k) - H(t - t_k - t_h)] \quad (8)$$

where A is the pulse amplitude, t_h is the pulse width, N is the number of pulses during the experiment.

The three main parameters of the neuron are: the pulse amplitude A , the pulse width, t_h , and the threshold, K_{ti} . Parameters A and t_h determine the power delivered by each pulse, and hence, the intensity of the response every time the neuron internal variable, $s(t)$, crosses the threshold. The threshold determines the firing frequency by:

$$f = \frac{\bar{u}_k}{K_{ti}} \quad (9)$$

where \bar{u}_k is the average of input u in $[t_{k-1}, t_k]$.

For unitary modulation the average of the control signal and the average of the pulse train signal must be equal: $\bar{u}_k = \bar{n}_k$. Then, the threshold value must be $K_{ti} = At_h$. For any other value of the threshold, the neuron introduces a gain, denoted as G : if $K_{ti} = GAt_h$, then $\bar{n}_k = \bar{u}_k/G$.

The usual utility of a pulse modulator is to encode the control signal into a two state level. The output signal is aimed to be a representation of the input with sufficient accuracy to translate the capabilities of the controller into the two state domain, such as digital. In our work, we explore that it has an additional use, which is the linearization of the average system response with regard to controller output signal. It is achieved by exploiting the nonlinearities of the neuron.

Based on the previous rationale, the spiking controller is designed following a two-step procedure. In order to treat as the neuron and the main controller as decoupled subsystems and design them separately, the neuron dynamics is intentionally made faster than that of the desired closed loop dynamics. First, the neuron parameters are selected to counteract system nonlinearities. Then, the linear controller is tuned to regulate the resulting neuron-plant combination, which can be regarded as an approximately linear system.

4. Application examples

This section reviews several application examples that illustrate the breadth and potential of NC in practical scenarios. First, NC is applied to the low-velocity control of DC motors, where pulse-based actuation naturally compensates static friction. Second, its use in soft pneumatic systems is examined, enabling improved pressure regulation in solenoid valves. Third, an event-based anti-windup strategy is presented, demonstrating how spiking mechanisms can enhance nonlinear compensation in saturated systems. Finally, applications within a fractional-order framework are discussed, including the introduction of fractional dynamics in both the neuron and the main controller, as well as an analog hardware implementation.

4.1. Control of DC motors at low velocities

The analog controller requires a relatively high reference signal to overcome the static friction of the motor. When the reference velocity is reduced, the system tends to stick. In contrast, each pulse in the pulse servo provides enough energy for the motor to overcome static friction (De Weerth et al., 1990).

The DC motor can be modeled as a linear system with static friction, acting like a dead-zone at zero velocity. To surpass dead-zone, the actuation signal must surpass a threshold, and, due to the transients of motor states, there is also a minimum time required under such excitation. We can design neurons to produce pulses that satisfy both conditions, such that each pulse is sufficient to surpass the dead-zone. For a detailed explanation of the theoretical aspects and tuning procedure, readers are referred to (Serrano-Balbontín et al., 2025a).

Figure 2 shows the application of spiking control to a DC motor that runs at low velocities. In Figure 2 (a) The closed-loop diagram is presented, and in Figure 2 (b) the position response and the neuron output (n) are presented. The effect of the friction almost vanishes, while the transient is similar to that of linear systems.

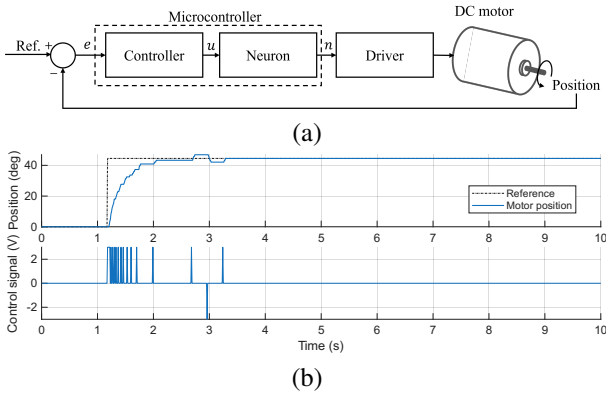


Figure 2: Example of DC motor position control at low velocities: (a) closed loop scheme (b) system response under static friction.

4.2. Control of solenoid valves in soft pneumatic systems

On/off solenoid valves are electromechanical binary devices that allow to alternate between air flow paths.

Analogously to DC motors, the electromechanical components of a solenoid valve require a minimum excitation level to overcome frictional effects and opposing pressure forces. However, the dynamic behavior of solenoid valves is more complex. In particular, there exists a minimum deactivation threshold required to restore the initial position, which gives rise to a saturation phenomenon. Moreover, in contrast to DC motors, even when dead-zone and saturation effects are compensated for or eliminated, the system remains strongly nonlinear.

To effectively address the nonlinearities, both excitation and recovery times are ensured by encoding the control signal through a neuron-based representation, thereby eliminating dead-zone and saturation effects. Moreover, the neuronal encoding mitigates the remaining nonlinear behaviors. In closed-loop operation, the overall system performance becomes more consistent. All information about this application can be found in (Serrano-Balbotín et al., 2025b,c).

Figure 3 shows the application of the spiking control strategy to the pressurization process of a soft pneumatic actuator (SPA) driven by a solenoid valve. Figure 3 (a) the schematic is depicted, and in Figure 3 (b) the response of the pressure inside a SPA that is controlled by a solenoid valve is shown. The nonlinearities are addressed such that a PI controller is sufficient to control the pressure while consistently satisfying the prescribed control specifications.

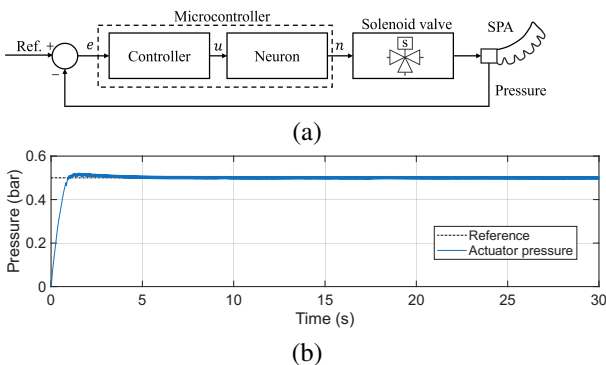


Figure 3: Example of soft actuator pressure under spiking control: (a) closed loop scheme (b) system response under static friction.

4.3. Event-based anti-windup strategy

A major source of performance degradation in practical PID controllers is integral windup, which arises when the controller output saturates due to actuator limits, thereby inducing excessive overshoot and prolonged settling times. A conventional design procedure consists of first tuning the controller under the assumption of linear actuators, and subsequently augmenting the classical proportional-integral-derivative (PID) algorithm with an anti-windup mechanism to handle integrator saturation. In the proposed approach, a neuron is employed to encode the saturation error-defined as the difference between the controller output and the actuator output-into a sequence of pulses, such that the back-calculation is activated intermittently in accordance with the magnitude of this error, as shown in Figure 4.

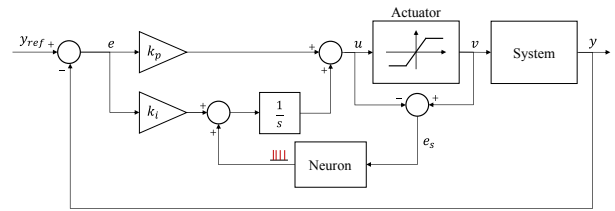


Figure 4: Spiking back-calculation anti-windup strategy applied to a PI controller.

It has been observed that the incorporation of neurons into the anti-windup loop, with an appropriate selection of their parameters, yields performance comparable to that of the standard back-calculation algorithm. Moreover, when the amplitude or width of the neuron-generated pulses is increased, the number of time instants at which the controller signal must be recomputed is significantly reduced.

This is a step towards using a control scheme that simultaneously encoding the controller signal in neurons combined with a back-calculation strategy to design a spiking controller that handles friction-limited systems with saturation-constrained actuators.

Figure 5 shows the effect of varying t_h on the output. For narrow pulses, the output closely matches the continuous case, and the neuron acts as a good modulator with little distortion. As t_h increases while keeping the neuron gain constant, the pulses generally reduce output smoothness. For larger values, such as $t_h = 1$ s, the output leaves the saturation path earlier than in previous cases, producing a backward movement not seen in the traditional back-calculation structure. Note that the variation of parameter A has similar effects.

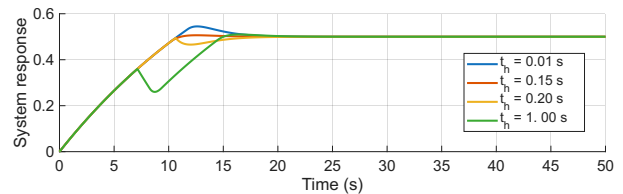


Figure 5: System response for various pulse intensities under spiking back-calculation.

For a more detailed treatment, the reader is referred to (Serrano-Balbotín et al., 2024b).

4.4. Fractional-order approach

Fractional-order control works with control systems that use derivatives and integrals of non-integer order, which considerably broadens the horizons of control engineering. The convenience of applying fractional-order control (FOC) in different control systems has been widely demonstrated in e.g. (Feliu-Talegon et al., 2019; Hosseinnia et al., 2014; Monje et al., 2010, 2008).

The authors' early contributions within this framework established the foundations of fractional neuromorphic control (FNC) by combining pulse-based neuromorphic modulation with FOC to address nonlinear and friction-dominated systems (Serrano-Balbontín et al., 2023a). In particular, a fractional-order controller generates a continuous control signal that is subsequently encoded into spike trains by silicon neurons, yielding an event-driven actuation strategy capable of overcoming static friction while preserving robustness against load variations. Simulation results on low-speed DC motor control demonstrate that FNC maintains a nearly constant overshoot under significant parameter changes, outperforming classical integer-order controllers in scenarios dominated by nonlinear friction effects.

Building on this concept, an analog implementation of FNC was proposed in (Serrano et al., 2023) and systematically analyzed. The implementation of NC using analogue circuits also offers the ability to create regulators with few components and low energy (De Weerth et al., 1990). In this context, the spiking controller is realized using analog fractional-order operators and Axon-Hillock-type neurons, providing a fully asynchronous, low-power solution suitable for hardware implementation. A detailed design methodology is presented, linking control specifications to neuron parameters such as pulse amplitude, pulse width, and inter-spike interval scaling. Physical modeling using Simscape validates the analog realization, showing close agreement with ideal fractional-order behavior and confirming the feasibility of implementing spiking control strategies in continuous-time analog hardware.

Complementarily, the hardware feasibility and flexibility of neuromorphic and fractional concepts were further explored in (Serrano-Balbontín et al., 2024a) through a field-programmable analog array (FPAA) implementation of silicon neurons with fractional dynamics. An FPAA is an integrated circuit using switched capacitor technology that provides the ability to configure an analog signal processing system. This work demonstrates how neuromorphic pulse-based modulation can be rapidly prototyped using reconfigurable analog hardware, implementing both classical Axon-Hillock neurons and a true pulse-frequency modulation neuron that preserves correct frequency encoding even for non-negligible pulse widths. Fractional dynamics is incorporated at block-diagram level by combining integer-order neuron models with fractional-order operators, enabling the reproduction of spike-frequency adaptation under constant or periodic inputs. The FPAA-based results highlight the suitability of this platform for validating low-complexity neuromorphic circuits with fractional memory effects and bridging the gap between conceptual NC designs and practical hardware realizations.

A further step was taken in (Serrano-Balbontín et al., 2023b) by introducing fractional-order integrate-and-fire (FO

I&F) neurons that inherently exhibit adaptation, a key feature observed in biological neurons. An analog realization of an FO I&F neuron with reset was developed, overcoming the classical difficulty of preserving fractional memory under reset conditions. By combining a fractional derivative with an integer-order integrator, the proposed neuron reproduces spike-frequency adaptation while remaining compatible with closed-loop control. When integrated into NC schemes, fractional neurons reduce steady-state chattering without degrading tracking performance, highlighting their potential for improving efficiency and smoothness in spiking control systems.

5. Conclusions

Our research approach commences with the election of the most simple, yet powerful model of neuron (IPFM) to study the problem in its simpler form. Once the effect of this type of information handling is fully understood we proceed with the addition of further realistic dynamics of the neuron in order to explore their additional advantages: leaky as noise filtering, fractional as input relevancy.

Overall, these works demonstrate that spiking control (SC), particularly when enriched with fractional-order dynamics at both the controller and neuron level, constitutes a powerful bioinspired solution to cope with nonlinearities, friction, and robustness requirements in control systems. Beyond performance improvements, the proposed strategies emphasize hardware efficiency and implementability, ranging from fully analog realizations to reconfigurable FPAA-based prototypes that enable rapid validation of neuromorphic and fractional concepts. In particular, FPAA implementations show how silicon neurons with fractional dynamics and spike-frequency adaptation can be realized with low complexity, providing an intermediate step between theoretical designs and custom analog VLSI solutions. Together, these contributions highlight spiking control as a flexible, energy-efficient, and hardware-oriented control paradigm, well suited for future embedded and resource-constrained applications where nonlinearities and efficiency are critical.

Acknowledgements

This research was funded by the Agencia Estatal de Investigación (Ministerio de Ciencia e Innovación) through project PID2022-141409OB-C22/AEI/10.13039/501100011033/FEDER, UE, by the Junta de Extremadura through grant GR24059 within "Ayudas a Grupos de Investigación", and by the European Regional Development Fund (FEDER) "A way to make Europe". Andrés Serrano would like to thank the Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades for its support through the scholarship no. FPU22/00885 of the FPU Program.

References

- Abbott, L., 1999. Lapicque's introduction of the integrate-and-fire model neuron (1907). *Brain Research Bulletin* 50 (5), 303–304. DOI: 10.1016/S0361-9230(99)00161-6
- Arbelalaz, J., Franci, A., Leonard, N. E., Sepulchre, R., Bamieh, B., 2025a. Spiking control systems for soft robotics: a rhythmic case study in a soft robotic crawler.

- Arbelaz, J., Franci, A., Leonard, N. E., Sepulchre, R., Bamieh, B., 2025b. Spiking control systems for soft robotics: A rhythmic case study in a soft robotic crawler. DOI: 10.48550/arXiv.2509.02968
- De Weerth, S., Nielsen, L., Mead, C., Astrom, K., 1990. A neuron-based pulse servo for motion control. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Vol. 3. pp. 1698–1703. DOI: 10.1109/ROBOT.1990.126254
- Feliu-Talegon, D., Feliu-Battle, V., Tejado, I., Vinagre, B. M., HosseinNia, S. H., 2019. Stable force control and contact transition of a single link flexible robot using a fractional-order controller. ISA Transactions 89, 139–157. DOI: 10.1016/j.isatra.2018.12.031
- Gerstner, W., Kistler, W. M., Naud, R., Paninski, L., 2014. Neuronal dynamics: From single neurons to networks and models of cognition. Cambridge University Press.
- Hosseinnia, S. H., Tejado, I., Milanés, V., Villagrà, J., Vinagre, B. M., 2014. Experimental application of hybrid fractional-order adaptive cruise control at low speed. IEEE Transactions on Control Systems Technology 22 (6), 2329–2336. DOI: 10.1109/TCST.2014.2308837
- Jones, R. W., Li, C. C., Meyer, A. U., Pinter, R. B., 1961. Pulse modulation in physiological systems, phenomenological aspects. IRE Transactions on Bio-Medical Electronics 8 (1), 59–67. DOI: 10.1109/TBME.1961.4322853
- Li, C., Jones, R., 1963. Integral pulse frequency modulated control systems. IFAC Proceedings Volumes 1 (2), 186–195. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)69653-8
- Mead, C. A., 1989. Analog vlsi and neural systems (invited presentation). In: Proceedings of the decennial Caltech conference on VLSI on Advanced research in VLSI. p. 1.
- Monje, C. A., Chen, Y., Vinagre, B. M., Xue, D., Feliu, V., 2010. Fractional-order Systems and Controls. Springer London. DOI: 10.1007/978-1-84996-335-0
- Monje, C. A., Vinagre, B. M., Feliu, V., Chen, Y., 2008. Tuning and auto-tuning of fractional order controllers for industry applications. Control Engineering Practice 16 (7), 798–812. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2007.08.006>
- Schmetterling, R., Forni, F., Franci, A., Sepulchre, R., 2024. Neuromorphic control of a pendulum. IEEE Control Systems Letters 8, 1235–1240. DOI: 10.1109/LCSYS.2024.3409093
- Sepulchre, R., 2022. Spiking control systems. Proceedings of the IEEE 110 (5), 577–589. DOI: 10.1109/JPROC.2022.3163926
- Serrano, A. J., Vinagre, B. M., Tejado, I., 2023. Fractional neuromorphic controller for a servomotor: Analog implementation. IFAC-PapersOnLine 56 (2), 4301–4306. DOI: 10.1016/j.ifacol.2023.10.1799
- Serrano-Balbontín, A. J., Mérida, L., Vinagre, B. M., Feliu-Battle, V., Tejado, I., 2025a. Neuromorphic control of dc motors with static friction-dominated dynamics. IEEE Transactions on Control Systems Technology (2nd review).
- Serrano-Balbontín, A. J., Tejado, I., Mancha-Sánchez, E., Vinagre, B. M., 2023a. Introducing fractional order dynamics in neuromorphic control: Application to a velocity servomotor. In: Proceedings of the 2023 European Control Conference (ECC'23). pp. 738–743. DOI: 10.23919/ECC57647.2023.10178322
- Serrano-Balbontín, A. J., Tejado, I., Vinagre, B. M., 2023b. Fractional integrate-and-fire neuron: Analog realization and application to neuromorphic control. In: Proceedings of the 2023 International Conference on Fractional Differentiation and Its Applications (ICFDA'23). DOI: 10.1109/ICFDA58234.2023.10153307
- Serrano-Balbontín, A. J., Tejado, I., Vinagre, B. M., 2024a. Field-programmable analog array implementation of neuromorphic silicon neurons with fractional dynamics. Fractal and Fractional 8 (4). DOI: 10.3390/fractalfract8040226
- Serrano-Balbontín, A. J., Tejado, I., Vinagre, B. M., 2024b. A neuron-based back-calculation anti-windup strategy: First results. IFAC-PapersOnLine 58 (7), 388–393. DOI: 10.1016/j.ifacol.2024.08.093
- Serrano-Balbontín, A. J., Tejado, I., Vinagre, B. M., Aphale, S. S., San-Milan, A., 2025b. Open-loop characterisation of soft actuator pressure regulated by pulse-driven solenoid valve. Robotics 14 (12). DOI: 10.3390/robotics14120177
- Serrano-Balbontín, A. J., Tejado, I., Vinagre, B. M., Aphale, S. S., San-Milan, A., 2025c. Spiking control of a solenoid valve for high-precision pressure regulation in soft robotics. IEEE Control Systems Letters (submitted).
- Teka, W., Marinov, T. M., Santamaria, F., 2014. Neuronal spike timing adaptation described with a fractional leaky integrate-and-fire model. PLoS computational biology 10 (3), e1003526. DOI: 10.1371/journal.pcbi.1003526
- Yoshioka, S., Iwata, T., Maruyama, Y., Miki, D., 2024. Spiking neural networks-based generation of caterpillar-like soft robot crawling motions. Artificial Life and Robotics 29 (4), 519–527. DOI: 10.1007/s10015-024-00970-7

Elastic Deformable Material Simulation in Unity based on Mass-Spring-Damper Models

Sellart, K. D.*, Oña, E. D., Łukawski, B., Jardón, A.

RoboticsLab, University Carlos III of Madrid, Avda. de la Universidad, 30, 28911 Leganés, Madrid, España.

To cite this article: Sellart, K. D., Oña, E. D., Łukawski, B., Jardón, A. 2026. Elastic Deformable Material Simulation in Unity based on Mass-Spring-Damper Models. Actas del II Simposio CEA de los GT: Ingeniería de Control - Modelado, Simulación y Optimización - Educación en Automática. Zaragoza, España.

Resumen

La simulación de materiales elásticos deformables es relevante para el desarrollo de aplicaciones robóticas que involucren contacto utilizando motores de videojuegos como Unity. Este trabajo aborda el desarrollo de un modelo de material deformable basado íntegramente en las primitivas físicas nativas de Unity (*Rigidbody*s y *Joints*). El modelo propuesto está basado en sistemas Masa-Muelle-Amortiguador (MSD) para mallas planas y multicapa generadas proceduralmente. Este modelo proporciona un método simplificado y computacionalmente más ligero, que permite una simulación adecuada con menos recursos y alto realismo en la deformación. Los resultados demuestran la viabilidad de generar y manipular materiales con propiedades mecánicas configurables en tiempo real, ofreciendo una herramienta eficiente y transparente para la investigación en robótica.

Palabras clave: Deformación elástica, Unity, Sistemas Masa-Muelle-Amortiguador, Robótica, Modelado 3D

Abstract

The simulation of deformable elastic materials is relevant for the development of robotic applications involving contact using game engines like Unity. This paper addresses the development of a deformable material model based entirely on Unity's native physics primitives (*Rigidbody*s and *Joints*). To achieve this, a deformable elastic material model based on Mass-Spring-Damper (MSD) systems is implemented for procedurally generated planar and multilayer meshes. This model provides a simplified and computationally lighter method, enabling adequate simulation with fewer resources and high realism in deformation. The results demonstrate the feasibility of generating and manipulating materials with configurable mechanical properties in real time, offering an efficient and transparent tool for robotics research.

Keywords: Elastic deformation, Unity, Mass-Spring-Damper Systems, Robotics, 3D Modeling

1. Introduction

The simulation of soft bodies and deformable materials has acquired critical importance across various engineering and computer science disciplines, particularly in the fields of robotics and medical simulation (Qin et al., 2024). The ability to accurately predict a deformable material's response to external forces is fundamental for developing complex robotic applications, such as force-control systems.

Although there is specific software designed for soft material simulation, most are costly or possess a very steep learning curve. An example is the case of SOFA (SOFA, 2006), an open-source framework renowned for complex physical simulations,

particularly within the medical field. It supports both Mass-Spring-Damper (MSD) models for faster, real-time simulations, and Finite Element Method (FEM) for high-fidelity, complex scenarios. Additionally, SOFA includes plugins to interact with game engines such as Unity, running the SOFA simulation in the background to compute deformation. However, this solution reduces Unity's simulation performance due to two-way communication with the external tool.

In this regard, simulation of material deformation in the native environment of Unity would improve the real-time simulation performance. Thus, various packages such as *Obi* (Obi, 2019) or *DefKit* (Defkit, 2016) are available in the game en-

*Corresponding author: kenjisellart@gmail.com

gine. The Obi package consists of several modules including cloth, fluid, and soft body simulations, among others. It is a high-fidelity tool with a highly successful real-time simulation, however it is a commercial (paid) solution. This tool operates using Position Based Dynamics (PBD), which, while allowing for very stable simulations (especially in highly rigid materials and fluids) and superior quality, has a steeper initial learning curve due to its more complex mathematical foundations.

On the other hand, the DefKit tool utilizes an MSD model based on native primitives (Rigidbody, Collider, and Spring Joint), but relies on tetrahedral formations. Although it integrates native Unity components, it exhibits deficiencies in simulations involving 2D and 3D objects with large flat surfaces.

In this context, this paper focuses on creating an elastic deformable material model based on a procedural mesh generation method for Unity game engine. Physics of the proposed model will be managed by the native physics engine (NVIDIA PhysX, integrated into Unity) since its core is based on MSD links built with native primitives such as *Rigidbodies* and *Joints*. Besides, the MSD model offers a favorable balance between physical accuracy and computational efficiency (Nealen et al., 2006). Therefore, this approach aims to replicate as realistically as possible the behavior of elastic deformable materials in Unity. However, the goal is not exact material fidelity, but operational realism for interactive simulation of robotic applications that involve physical contact or textile garment manipulation.

2. Architecture for procedural mesh generation

The mesh model presented in this article is fundamentally based on the use of native Unity *GameObjects* to generate a grid structure using the MSD model as its operational logic. Due to the high density of elements required to form the mesh, this process has been entirely automated through a procedural script. Consequently, Unity's physics engine assumes the primary role in the dynamic simulation, while the code performs an auxiliary function focused on element generation and data acquisition. Furthermore, it is important to highlight that the code¹ is responsible for generating and updating the visual representation of the mesh in real-time.

2.1. Mesh unit architecture

The mesh unit architecture consists of four fundamental components: nodes, *Rigidbody* (mass), *Spring Joint* (linkage), and *Sphere Collider* (collision volume). Nodes constitute the basic unit of the mesh and are generated in an ordered quadrangular or rectangular layout. To maintain a structured hierarchy, they are grouped under parent objects termed *Mesh*. Each node is assigned a *Rigidbody* to grant it mass attributes and gravity response. Finally, *Sphere Colliders* are added to nodes to provide them with a physical body for environmental interaction.

To link these nodes and provide the mesh with elastic behavior, the *Spring Joint* (SJ) component is utilized. This element integrates both a spring and a damper within a single component. By joining two nodes through this linkage, the basic modular architecture of the mesh is established, as shown in Figure 1(a).

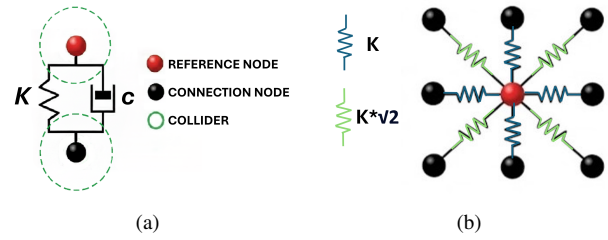


Figure 1: Architecture composition of the mesh. a) Basic connection joint. b) Possible connections from reference node to surrounding nodes.

The union of these units forms the complete structure, where each node connects with all its contiguous neighbors, resulting in a maximum 8-connectivity (Moore neighborhood). Given the orthogonal arrangement of the nodes, connectivity could be restricted to 4 or extended to 8; the latter was chosen as it allows for a more uniform force distribution and higher deformation precision, as illustrated in Figure 1(b).

2.2. Mesh generation procedure

Mesh generation begins by defining the base and height of the mesh, as well as the spacing between nodes (scale), to calculate the total number of nodes. In the mesh, each node is an independent object; therefore, a script vector is initialized to store node references for easier access. During this first step of node generation, *Rigidbody* and *Sphere Collider* components are added to each node, while simultaneously setting it as a child of an *Empty Object* for better organization.

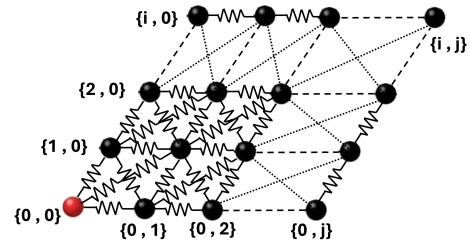


Figure 2: Architecture of the single-layer mesh structure.

Once all nodes have been processed, a second iteration is performed to add the SJ components between all the adjacent nodes, which provide the mesh with its elastic properties. To avoid adding redundant springs and compromising the mesh's isotropy, the nodes in the vector are traversed in order following a specific pattern during spring instantiation. This ensures that all necessary springs are generated to maintain the 8-connectivity mentioned in the previous section, allowing the resulting mesh to exhibit an isotropic load distribution, as illustrated in Figure 2. Note that nodes located at the edges and corners have fewer adjacent neighbors, resulting in a reduced number of connections for these specific elements.

The final step involves the visual rendering of the mesh. Although this does not influence the physical behavior of the

¹The code developed in this paper is available in https://github.com/KenjiDavid/unity_deformable_material_simulation.

model, it allows for a more intuitive visualization of its changes. This procedure relies on Unity's *Mesh* class, which utilizes triangle-based topology to generate and model various geometries, ranging from terrains to character meshes. Since the material in this work is also based on triangles, this system is used to generate the visual representation of the mesh. This is the base procedure that repeats in all different versions of this work, which are attained through modification of this template, as shown in Algorithm 1.

Algorithm 1: MSD-based Mesh Generation

Data:

1. Mesh Base (B) and Height (H)
2. Grid Scale (S) (distance between nodes)
3. Layer count (L) and separation (D) for multilayer meshes

Result: Instantiated Unity Mesh structure

Calculate total number of nodes and initialize vector V to store references;

for each node in V do

- Create *Empty Object* named "Node_x";
- Set *Mesh GameObject* as parent at assigned grid coordinates;
- Assign *Rigidbody* and *Collider* components to the node;

end

for each node in V do

- if neighboring node exists then**
 - Add *Spring Joint* component between current node and neighbor;
 - if system is multilayer (Based on algorithm) then**
 - Add *Spring Joint* between nodes;
 - Add *Spring Joint* between nodes in adjacent layers (Multi-layer);

end

end

end

Execute *Mesh Generation* update (layer by layer for multilayer structures);

2.3. Multi-layer models for volumetric simulation (3D)

To extend the MSD model to the 3D domain and simulate materials with volume, multi-layer architectures were developed to introduce effective resistance along the vertical axis. The adopted approach consists of stacking multiple 2D meshes and interconnecting them via SJ (similar to Figure 1(a)) using a 1:1 connection where each node in the lower layer is linked to its corresponding node in the upper layer.

This initial model faced two primary drawbacks: penetration resistance and the effect of shear forces. On the one hand, utilizing colliders only on the top layer with 1:1 vertical connections proved insufficient, as the lower layers failed to interact with external objects, allowing them to penetrate the mesh more easily. This issue was resolved by adding colliders to every layer; although this increases computational cost, it significantly enhances the mesh's penetration resistance.

On the other hand, applying forces with a component parallel to the mesh makes it susceptible to shear forces, as shown in Figure 3(a), which weakens the isotropic component of the structure. To correct this defect, strategic diagonal springs were

incorporated between layers, moving beyond a simple 1:1 connection to a multiple-link arrangement. Regarding the diagonal springs, the decision again arose between using a 4-connectivity or 8-connectivity (excluding the direct vertical node). In this case, 8-connectivity was deemed unsuitable, as its implementation represents a substantial increase in computational cost compared to its marginal effect on mesh behavior. Therefore, a 5-connectivity was chosen, consisting of one vertical and four diagonal links (to nodes on the perpendicular axes of the plane), as illustrated in Figure 3(b).

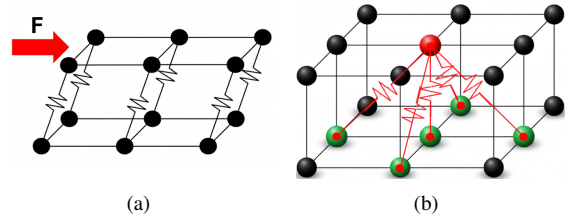


Figure 3: Multiple layer Mesh. a) Schematic of shear force effect on the multi-layer mesh, b) Generated *Spring Joints* on multi-layer mesh

Ultimately, this yields a 3D model with solidity and penetration resistance consistent with 3D objects, while maintaining the elastic behavior. Although this feature is beyond the current scope of study, it represents a functional optimization intended for future research on complex 3D interactions.

3. Possible optimizations to baseline model

3.1. Introducing angular stiffness

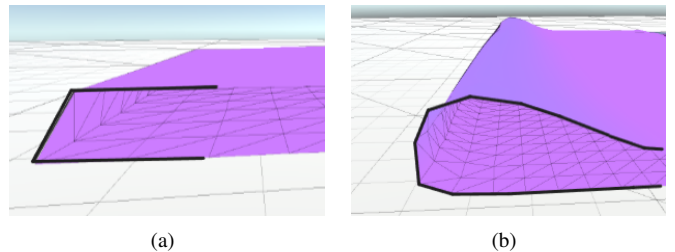


Figure 4: Behavioral difference between joints. a) Using SJ: the material collapses due to lack of angular stiffness b) Using CJ: the material doesn't collapse thanks to CJ torque.

The previous MSD model has relied on the SJ component for physical interaction. However, this element only applies an axial force (tension/compression) proportional to the distance between the two connected *Rigidbodies*. When applied to planar and volumetric meshes, this stiffness proves insufficient: while the material resists stretching, it lacks bending resistance. This technical deficiency leads to unrealistic physical behavior in certain cases where the structure collapses immediately under gravity or manipulation, similar to a sheet of paper lacking structural integrity (Figure 4(a)).

To mitigate this effect, the SJ can be replaced by the *Configurable Joint* (CJ) component during the execution of Algorithm 1. This component accurately models the bending stiffness required for a realistic physical representation of elastic materials (Figure 4(b)).

3.2. Structural optimization: the beehive mesh

As the mesh grows in size, the computational cost of MSD models scales rapidly with the number of nodes and springs; therefore, structural topology optimization is essential for high-resolution simulations. While a traditional quadrangular grid requires eight connections per internal node, the proposed beehive mesh —inspired by honeycomb structures— utilizes a hexagonal topology where each central node connects to only its six nearest neighbors (Figure 5(a)).

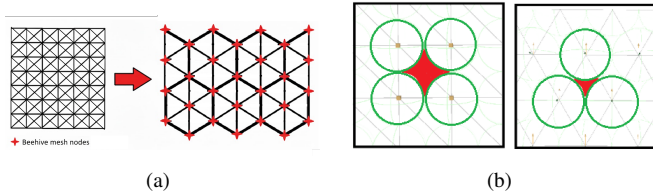


Figure 5: Structural comparison of mesh types. a) Traditional quadrangular mesh (8-connectivity) to beehive mesh (6-connectivity). b) Space between colliders in beehive mesh.

The mesh generation process for the beehive mesh is adapted by generating triangles from rhombuses instead of squares. Although the 6-connectivity topology introduces a slight increase in anisotropy compared to the eight-connection model, this trade-off is negligible in high-resolution meshes, where the collective behavior of nodes dilutes individual connection effects. Consequently, the beehive mesh not only increases computational efficiency, but also organizes the nodes more effectively to maximize spatial coverage (Figure 5(b)).

This hexagonal optimization enhances performance by significantly reducing the number of components required for a given resolution, as illustrated in Table 1. This reduction directly alleviates the load on Unity’s physics engine, enabling the simulation of high-density meshes that would be infeasible with a traditional grid structure.

Table 1: Comparison of employed resources in beehive model.

Metric	Grid (6x7)	Beehive (6x7)	Δ (%)
Rigidbody (<i>Physics</i>)	56	28	~50%
Total Springs (<i>Joints</i>)	181	63	~65%
Connectivity \times Node	8	6	~25%

4. Preliminary analysis of mesh elastic response

Several experiments have been performed in order to preliminarily evaluate the elastic capabilities of the proposed model. Note that the goal at this stage is not to analyze the performance with absolute mathematical rigor nor material properties. Thus, the elastic response of the mesh is analyzed using an equivalent simplified model of vertical spring deformation. A specific load will be dropped onto the generated mesh. Once stabilized, deformation data will be collected by calculating the mean vertical displacement of all nodes. This experiment will be replicated using three different loads and four distinct volumes, as well as varying mesh resolutions for both the SJ and CJ models.

4.1. Experimental protocol

The experimental procedure has consisted of placing an external object (a cube) on the generated mesh (Figure 6(a)). Once it has reached a state of rest, the deformations of each node relative to a zero reference line have been extracted. Mean deformation (D_{mean}) has been calculated as the average vertical position of all nodes, omitting the fixed nodes at the perimeter of the structure (Figure 6(b)).

For the various simulation conditions, the base mesh has been fixed at a size of 20×20 units, with grid resolutions varying from 5×5 to 50×50 nodes. In these experiments, the *Spring* property in the generated mesh has been defined with a stiffness of 10 N/m and $\sqrt{2} \cdot 10 \text{ N/m}$ for the diagonal springs. Static loads have been applied using cubes with controlled masses of 1 kg , 5 kg , and 10 kg ; simultaneously, their volumes have been varied from $1 \times 1 \times 1$ to $8 \times 8 \times 8$ to analyze how load distribution affects mesh deformation.

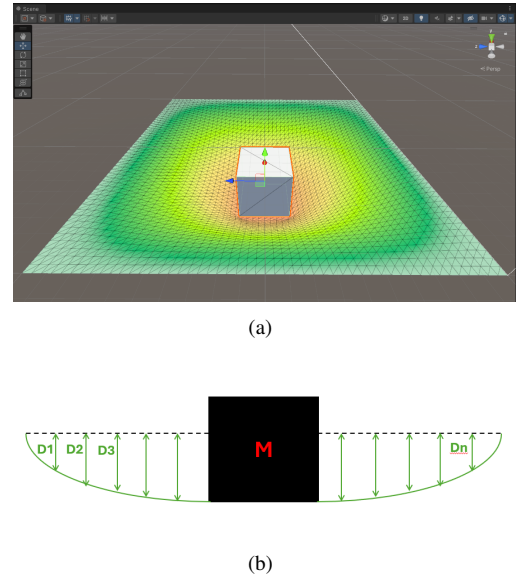


Figure 6: Experimental protocol: a) Simulation of elastic response; b) Estimated mean deformation.

For this preliminary study, the mesh has been analyzed at rest; thus, only the equivalent stiffness (K_{eq}) is considered, avoiding more complex calculations such as damping effects or elastic coefficients used in more rigorous frameworks (in materials sciences such as Poisson Coefficient). It should be noted that K_{eq} is not an intrinsic physical property of the material, but rather a simplified parameter introduced to enable an internal comparative analysis. Although the load is not a point load, we analyzed it as such; consequently, the analysis of the mesh elastic response is based on the following Equation 1:

$$\sum F = 0 \Rightarrow m \cdot g - K_{eq} \cdot D_{mean} = 0 \Rightarrow K_{eq} = \frac{m \cdot g}{D_{mean}} \quad (1)$$

In other words, the system is analyzed in the static case when the load and mesh are balanced according to Equation 1. In accordance with this protocol, two independent series of measurements have been performed on the single-layer mesh: the first using the SJ component and the second employing the CJ.

4.2. Results using the SJ-based model

Table 2 presents a sample of the raw data for the averaged deformation (D_{mean}) for each tested mesh and the K_{eq} estimated using the simplified Spring model, namely, we calculate the K_{eq} through Equation 1. It can be observed that as the mesh resolution increases, the D_{mean} value tends to stabilize. However, the values obtained from the lowest resolution mesh (5×5) are notably inconsistent with the average results of the remaining cases.

Table 2: Elastic response for Spring Joint and 10 kg load

Grid	Param.	Cube-1	Cube-2	Cube-4	Cube-8
5x5	D_{mean} [m]	1.399	1.384	1.383	1.368
	K_{eq} [N/m]	70.115	70.860	70.932	71.700
10x10	D_{mean} [m]	0.834	0.823	0.811	0.764
	K_{eq} [N/m]	117.630	119.167	120.904	128.403
20x20	D_{mean} [m]	0.603	0.605	0.595	0.552
	K_{eq} [N/m]	162.557	162.143	164.897	177.800
40x40	D_{mean} [m]	0.553	0.551	0.543	0.506
	K_{eq} [N/m]	177.439	177.879	150.582	193.769
50x50	D_{mean} [m]	0.563	0.560	0.554	0.516
	K_{eq} [N/m]	174.290	175.118	177.199	190.004

Table 3 is created by further simplifying all data from the test by calculating the mean of all K_{eq} from every load mass excluding (5×5) mesh resolution for further analysis. It reveals an interesting fact: the K_{eq} of the global system increases drastically with the applied load. When increasing the mass from 1 kg to 10 kg, an increase in K_{eq} of approximately 203% has been measured. This suggests that the simplified model might not work in this case because K_{eq} does not remain constant.

Table 3: Analysis of equivalent stiffness dependence on load

Load (Kg)	Fc (N)	D_{mean} (m)	K_{mean} (N/m)	Δ (%)
1	9.81	0.199	53.57	Base (0%)
5	49.05	0.395	125.11	~ 133%
10	98.10	0.621	162.49	~ 203%

4.3. Results using the CJ-based model

By repeating the loading protocol using the CJ component, Table 4 presents a sample of the raw data for the D_{mean} and K_{eq} . In this case, as the mesh resolution increases, the D_{mean} also increases, which translates into a decrease in the K_{eq} . However these values also tend to stabilize. Similar to the previous section, the values obtained from the lowest resolution mesh (5×5) are notably inconsistent.

Table 5 is also created by simplifying data from the tests of the mesh with CJ, and reveals similar results as those for SJ: the K_{eq} of the global system increases with the applied load. However, the increments are not as drastic as in the one obtained for SJ. This indicates, as in the previous subsection, that the simplified model is not accurate for this approach, although the variation of K_{eq} is lower due to the higher accuracy of CJ in physical fidelity simulations as CJs have more degrees of freedom.

Table 4: Elastic response for Configurable Joint and 10 kg load

Grid	Param.	Cube-1	Cube-2	Cube-4	Cube-8
5x5	D_{mean} [m]	1.092	1.087	1.087	0.993
	K_{eq} [N/m]	89.834	90.218	90.276	98.758
10x10	D_{mean} [m]	1.079	1.042	1.006	0.816
	K_{eq} [N/m]	90.935	94.175	97.521	120.201
20x20	D_{mean} [m]	1.442	1.458	1.422	1.200
	K_{eq} [N/m]	68.041	67.303	69.001	81.726
40x40	D_{mean} [m]	1.667	1.692	1.708	1.664
	K_{eq} [N/m]	58.860	57.963	57.421	58.960
50x50	D_{mean} [m]	1.719	1.736	1.744	1.693
	K_{eq} [N/m]	57.055	56.508	56.238	57.953

Table 5: Analysis of equivalent stiffness dependence on load

Load (Kg)	Fc (N)	D_{mean} (m)	K_{mean} (N/m)	Δ (%)
1	9.81	0.324	47.62	Base (0%)
5	49.05	0.94	60.18	~ 26%
10	98.10	1.44	71.87	~ 51%

5. Discussion

This article analyzes the feasibility of Unity as a simulation environment for elastic materials using the elemental MSD model and native Unity primitives. Some preliminary experiments were conducted to compare the performance in mesh deformation during interaction with a static load.

The results presented in this study suggest that the Unity engine's capabilities are adequate for simulating deformable objects in real-time, similar to another internal package such as Obi or related work (Mohan et al., 2024). This approach may improve the simulation performance compared with using a plugin with an external tool such as SOFA to manage the material deformation.

Given the K_{eq} , it can be concluded that increasing the mesh resolution leads to a stabilization of the results, as observed in Tables 2 and 4. However, the results of the two tests exhibit a marked difference: the mesh utilizing CJ tends to undergo significantly greater deformation than the SJ mesh. This can be attributed to the additional degrees of freedom (DoF) provided by the CJ. Consequently, the applied force is distributed across the mesh more effectively, resulting in higher overall deformation. This leads to K_{eq} for the CJ that are considerably lower than those of its counterpart, which must be interpreted as a structural characteristic rather than an error.

Another conclusion is that it is not accurate to approximate the mesh with a simplified vertical MSD system. A more detailed analysis of the results reveals an increase in the K_{eq} across different resolutions and volumes as a function of the object's mass; a higher mass results in a higher K_{eq} as demonstrated in Table 3 and Table 5. This confirms the existence of geometric nonlinearity within the model, a desirable feature in such simulations (though not an intended outcome in this paper) due to its closer approximation of real world physics, yet a significant challenge for the analytical formalization of the model due to the difficulty of extrapolating constituent properties. However, this challenge is a way to scale this work to a higher step. In this aspect, the choice between an SJ or CJ model based on test results depends on the application. While SJ is more suitable

for general-purpose simulations focusing on simplicity, CJ is preferable for scenarios requiring higher structural rigor.

It is worth noting that existing models within the Unity platform for practical applications are diverse and functional. For instance, the Va et al. (2021) study demonstrates the efficacy of MSD systems applied to cloth, achieving optimizations via GPU computation. Other approaches, such as the Va et al. (2023b) study, employ tetrahedral methods for soft body generation, presenting a structural alternative to the procedural triangular/hexagonal mesh generation used in this study. Both these works and prior literature confirm that implementing MSD models in Unity allows for the development of fully functional elastic materials. This article aligns with this research line by providing a connectivity architecture (quadrangular and hexagonal) that balances physical stability with simplicity of implementation, facilitating integration into general-purpose systems without relying on complex external libraries.

Although the result of this work is a fully functional mesh with broad prospects for potential applications, the system is not without limitations such as: the difficulty of mathematical formalization, computational cost, and micro-scale applicability. The first aspect arises from the experimental analysis, which concludes that the mesh design cannot be reduced to a vertical MSD system. The critical point is the geometric non-linearity under different loads; while desirable for realism, this characteristic complicates the translation of real material properties into a mathematical model (Nedel and Thalmann, 1998), adding structural complexity. This aspect will be included in future work towards simulating physically-based materials.

The second limitation lies within Unity's internal processing. Although the MSD model is more comprehensible than other theoretical approaches, increasing the resolution significantly increases the number of elements the engine must manage. Since Unity defaults to CPU-based physics processing, the system reaches a saturation point that slows down the simulation once certain node thresholds are exceeded. This is exacerbated by the fact that, to ensure numerical stability, this study uses a reduced fixed timestep of 0.01s, effectively doubling the physics calculations per second compared to the Unity default. A potential solution involves off-loading the computation of the *Game Objects* from the CPU to the GPU. This aspect could be relevant in the development of VR-based telepresence applications involving force-control (Lukawski et al., 2025).

Finally, the precision analysis of the SJ component at micro-scales (0.1 and 0.01) showed unacceptable relative errors. This limitation is numerical in nature, stemming from PhysX's management of minuscule displacements and high parameter contrasts. For high-fidelity applications, the integration of dynamics solvers decoupled from Unity, such as PBD, is suggested. PBD offers unconditional stability and robust time-step management, overcoming the numerical instabilities inherent in native joints in boundary scenarios (Obi, 2019; Va et al., 2023a; Zhang et al., 2022) and is a different approach to model improvement.

6. Conclusions

This paper has presented an architecture for the simulation of deformable elastic materials using the Mass-Spring-Damper

(MSD) system within the Unity engine. The proposed model can enable simulations of soft materials in robotic applications; for example, deformable object manipulation by robotic arms, as well as cloth simulations. However, further testing is required in order to model the inherent material properties for more fidelity force-control simulations. The model proposed in this work has the potential to scale into a more comprehensive framework while maintaining the objectives of open accessibility and user simplicity.

Acknowledgments

This research has been partially financed by “iREHAB: AI-powered Robotic Personalized Rehabilitation” project DTS22/00105, financed by Instituto de Salud Carlos III (ISCIII) and EU; and partially financed by FotoArt5.0-CM project (TEC-2024/TEC-308) via the program of I+D activities “Tecnologías 2024” from the Comunidad de Madrid.

References

- Defkit, 2016. Defkit – Deformable (Soft) Bodies Toolkit. Unity Community, online; Accessed: Apr. 26, 2025.
URL: <https://discussions.unity.com/t/defkit-deformable-soft-bodies-toolkit-released/630100>
- Lukawski, B., Montesino, I., Oña, E. D., Victores, J. G., Balaguer, C., Jardón, A., 2025. Towards the development of telepresence applications with TIAGo and TIAGo++ using a virtual reality headset. In: 2025 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC). IEEE, pp. 192–197.
DOI: 10.1109/ICARSC65809.2025.10970173
- Mohan, D. M., Zhong, Y., Smith, J., Ehrampoosh, A., Shirinzadeh, B., 2024. Soft-tissue deformation model for virtual reality-based surgery training using Unity3D. In: 2024 IEEE 18th International Conference on Advanced Motion Control (AMC). IEEE, pp. 1–6.
DOI: 10.1109/AMC58169.2024.10505703
- Nealen, A., Müller, M., Keiser, R., Boxerman, E., Carlson, M., 2006. Physically based deformable models in computer graphics. In: Computer graphics forum. Vol. 25. Wiley Online Library, pp. 809–836.
DOI: 10.1111/j.1467-8659.2006.01000.x
- Nedel, L. P., Thalmann, D., 1998. Real time muscle deformations using mass-spring systems. In: Proceedings. computer graphics international (cat. no. 98ex149). IEEE, pp. 156–165.
DOI: 10.1109/CGI.1998.694263
- Obi, 2019. Obi – Unified Particle Physics for Unity. Virtual Method Studio, online; Accessed: Apr. 26, 2025.
URL: <https://obi.virtualmethodstudio.com/>
- Qin, L., Peng, H., Huang, X., Liu, M., Huang, W., 2024. Modeling and simulation of dynamics in soft robotics: A review of numerical approaches. Current Robotics Reports 5 (1), 1–13.
DOI: 10.1007/s43154-023-00105-z
- SOFA, 2006. SOFA framework, simulation open-framework architecture. GitHub, online; Accessed: Apr. 26, 2025.
URL: <https://github.com/sofa-framework/sofa>
- Va, H., Choi, M.-H., Hong, M., 2021. Real-time cloth simulation using compute shader in Unity3D for AR/VR contents. Applied Sciences 11 (17), 8255.
DOI: 10.3390/app11178255
- Va, H., Choi, M.-H., Hong, M., 2023a. Efficient simulation of volumetric deformable objects in Unity3D: Gpu-accelerated position-based dynamics. Electronics 12 (10), 2229.
DOI: 10.3390/electronics12102229
- Va, H., Choi, M.-H., Hong, M., 2023b. Real-time surface-based volume constraints on mass-spring model in Unity3D. IEEE Access 11, 17857–17869.
DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3245130
- Zhang, F., Sun, Z., Wang, T., 2022. Brain modeling for surgical training on the basis of Unity 3D. In: International Symposium on Artificial Intelligence and Robotics. Springer, pp. 1–8.
DOI: 10.1007/978-981-19-7943-9_1

Assessing Student Satisfaction and System Usability in Industrial Robotics Education

Łukawski, B.* , Oña, E. D., Vicores, J. G., Balaguer, C., Jardón, A.

RoboticsLab, Department of Systems Engineering and Automation, Universidad Carlos III de Madrid, Avda. Universidad, 30, 28911, Leganés, Spain.

To cite this article: Łukawski, B., Oña, E. D., Vicores, J. G., Balaguer, C., Jardón, A. 2026. Assessing Student Satisfaction and System Usability in Industrial Robotics Education. Actas del II Simposio CEA de los GT: Ingeniería de Control - Modelado, Simulación y Optimización - Educación en Automática. Zaragoza, España.

Resumen

Este trabajo analiza las sesiones de laboratorio de robótica industrial diseñadas para estudiantes de grado y máster de la Universidad Carlos III de Madrid. Las sesiones involucran un manejo práctico de robots CRB 15000-5 “GoFa” de ABB con herramientas personalizadas (rotulador, electroimán) para tareas de dibujo y pick-and-place, con especial énfasis en la programación manual y mediante RAPID, la simulación en RobotStudio y la sincronización con el robot real. Adicionalmente, se ha utilizado el robot TIAGo++ de PAL Robotics para ilustrar posibles aplicaciones médicas. Se realizó una encuesta de satisfacción y usabilidad a 97 estudiantes a lo largo de 2025 para evaluar la experiencia. Los cuestionarios consistieron en entre 10 y 15 elementos evaluados en una escala Likert de cinco niveles. Los resultados indican que las sesiones han tenido buena acogida, estimulan la participación y refuerzan conceptos teóricos clave. La programación en RAPID y la simulación han sido identificadas como los elementos que más dificultades han supuesto.

Palabras clave: Robótica educativa, Robótica industrial, Robótica colaborativa, Estudio de usabilidad y satisfacción.

Abstract

This work evaluates industrial robotics laboratory sessions designed for undergraduate and graduate students at Universidad Carlos III de Madrid. The sessions involved hands-on exercises using ABB CRB 15000-5 “GoFa” collaborative robots and custom tools (pen, electromagnet) for drawing and pick-and-place tasks, emphasizing manual and RAPID programming, simulation through RobotStudio and synchronization with the real robot. Additionally, the TIAGo++ robot by PAL Robotics was introduced for broader context in potential medical applications. To assess the experience, a satisfaction and usability survey was conducted with 97 students in 2025. The questionnaires consisted of 10 to 15 items rated on a five-point Likert scale. Results indicate that the sessions were well-received, boosting engagement and reinforcing key theoretical concepts. Students identified RAPID programming step and simulation as the most challenging components.

Keywords: Educational robotics, Industrial robotics, Collaborative robotics, Usability and satisfaction survey.

1. Introduction

At Universidad Carlos III de Madrid, several academic degrees offer an Industrial Robotics course based on a common theoretical framework. However, theory and problem-solving classes are best complemented with laboratory sessions, essential for effective training with professional tools. The design of these sessions must address the differences across these degrees, ensuring maximum value is provided to students with diverse academic backgrounds.

To evaluate the effectiveness of the sessions and plan future improvements, it was deemed necessary to collect student feedback regarding their impressions. Key aspects analyzed included the level of preparation prior to the sessions, the most challenging components, and the attitudes towards the proposed tasks. The study also considered whether specific groups might require a tailored approach due to curricular differences. Ultimately, these laboratory sessions aim to align with course goals and prepare students for examinations and final projects.

*Corresponding author: blukawsk@ing.uc3m.es

The document is organized as follows. Section 2 provides background on educational robotics, while Section 3 describes the tools used. The methodology is laid out in Section 4, followed by the survey results in Section 5 and discussion in Section 6. Finally, conclusions are drawn in Section 7.

2. Background

Educational literature draws a distinction between “robotics in education” and “educational robotics”. Whereas the former encompasses a broader scope, covering any way a robot can help the student or educator, the latter refers specifically to STEM applications designed to “create meaningful experiences on robotics since an early age”. It is therefore within the context of educational robotics that learning frameworks can be established, enabling the development of pedagogical strategies that leverage robotic technologies to foster specific competencies (Scaradozzi et al., 2019).

In the specific context of higher education and industrial engineering, previous works analyze and discuss the development of hands-on robotics courses. A study conducted at the University of Louisiana, Lafayette, which introduced a fully-equipped laboratory with ScorBot-ER robots and RoboCell simulation software, revealed that student response was highly favorable. The study highlighted the enjoyment and perseverance participants showed during the completion of various projects. The engaging nature of the proposed tasks encouraged students to overcome initial difficulties regarding the subject’s complexity, allowing them to appreciate the practical challenges these sessions posed (Rawat and Massiha, 2004).

Assessment of student satisfaction is key to understanding the effectiveness of the laboratory sessions. In this context, a study in 2019 evaluated the performance of young STEM students (primary and secondary school) programming an educational robot for an international competition held in Portugal. The competition challenged students to program a fully autonomous micro-robot to identify the most effective route through a maze. The complexity of the task is mitigated through the adoption of visual programming languages. Crucially, usability tests were conducted with a small group of students aged 11–17 to rate the prototype using Brooke’s System Usability Scale (SUS) (Barradas et al., 2019).

Complementing these pedagogical and assessment frameworks, recent technical research has sought to lower the barrier to entry for novice users through advanced control strategies. Specific approaches have adopted intuitive learning from demonstration (LfD) techniques combined with learning by exploration (LbE) force-based algorithms, with a focus on collaborative robotics. These methods aim to assist users with arbitrary backgrounds in handling robot manipulators during contact-rich tasks. A visual servoing algorithm complemented with a reinforcement learning policy was proposed as an alternative to standard manual operation via teach-pendant or hand guiding in gravity compensation mode (Shi et al., 2021).

Ultimately, combining pedagogical frameworks with intuitive control strategies mitigates the cognitive load of complex hardware. This reduction in technical barriers significantly improves user experience and student satisfaction, justifying the assessment methodology proposed in this work.

3. Materials

3.1. Robots

The ABB CRB 15000-5 “GoFa” industrial manipulator (Figure 1(a)) is the central element in the proposed laboratory sessions. It features six degrees of freedom (DoF) in the usual arm configuration (shoulder, elbow, wrist), to which an offset has been added between the last two axes in order to mitigate the effects of wrist singularities. Hardware and software safety mechanisms are implemented to ensure compliance with collaborative robotics safety standards, thus making it suitable for hands-on handling during the sessions. Manual teleoperation is possible through a tablet-like device with a built-in joystick. Automated tasks can be programmed by means of the proprietary RAPID language, and simulated before its execution on the real robot. Four GoFa robots are available at our facilities, each having an external computer with the RobotStudio simulator installed and assigned to it.

In addition, the mobile service bi-manipulator TIAGo++ by PAL Robotics (Figure 1(b)) is used to provide a brief introduction to robotic medical scenarios for bioengineering students.

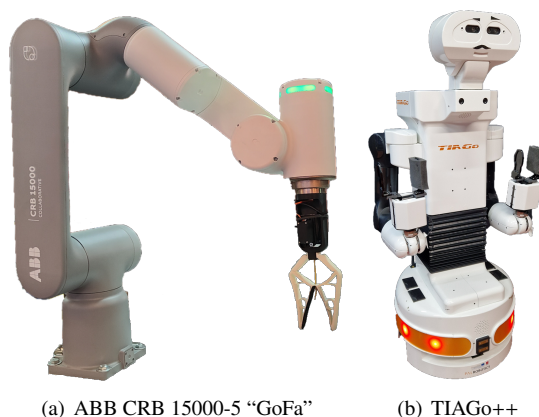


Figure 1: Robot platforms used during laboratory sessions.

3.2. Tools

A flexible 1-DoF gripper tool (Figure 2(a)) was designed and built to be used in the first iterations of the pick-and-place task, and in various student projects (Łukawski et al., 2025a).

In order to combine grabbing and drawing capabilities, a double tool was introduced by merging a pen holder and a digitally-actuated electromagnet (Figure 2(b)). A compliant design featuring movable elements and springs allows both ends to slightly retract upon pressing against an obstacle.

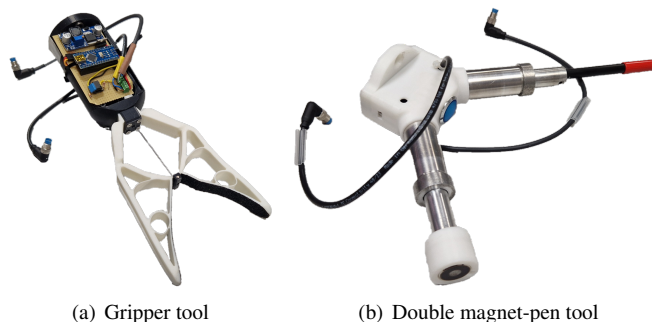


Figure 2: Tools mounted on the end-effector of the GoFa robot.

4. Methods

4.1. Targeted student groups

The statistical study presented in this work targeted a total of 97 students of four university degrees, covering the Bachelor’s and Master’s degree levels. It was conducted in 2025 at Universidad Carlos III de Madrid, during the academic years 2024–25 and 2025–26.

The groups were selected due to the inclusion of a course on Industrial Robotics in their academic plan, to be detailed below (in chronological order regarding the time of the year the sessions had been carried out):

- Bachelor in Robotics Engineering (later labeled as “Rob (B)”): second-year required course. A second session was added to expand on the programming aspects of ABB robots with RAPID and RobotStudio.
- Bachelor in Industrial Technologies Engineering (“Ind (B)”): fourth-year elective course included in the Automation and Electronics specialization.
- Master in Robotics and Automation (“Rob (M)”): first-year elective course. An introductory pick-and-place task through interactive block programming is conducted before the main drawing task session.
- Bachelor in Biomedical Engineering (“Bio (B)”): required course on Robotics that transitioned from the fourth to the third year during this study due to a revision of the degree plan. Students from both old and new plans were targeted and treated indistinguishably.

Prior to the execution of the sessions, our students were familiarized with the morphology of industrial robots (including sensors and actuators), basic mathematical tools (such as homogeneous transformation matrices and quaternions), and RAPID programming, in theory and problem-solving classes. Shortly before, they must have completed two sessions in a computer room for an introduction to RobotStudio and simulated robots.

4.2. Proposed tasks

The laboratory sessions evolved from previous iterations using a legacy dual-pen tool (for drawing) and a separate flexible gripper (for pick-and-place). Since the deformation of the flexible material hindered object grasping, different designs were explored. Figure 3(a) depicts a visual servoing application featuring this tool (Łukawski et al., 2025b).

In 2025, a new magnet-pen tool was introduced to eliminate tool changes and improve performance in pick-and-place tasks. For the latter, simple 3D-printed geometric shapes (40×40×40 mm cubes and cylinders) were fitted with metal screws to facilitate electromagnetic lifting.

The drawing task is mandatory for all students to review basic concepts. Additionally, the pick-and-place task was added to the specialized Rob (B) and Rob (M) degrees to provide deeper programming insight.

These two-hour sessions were held near the midterm period. The infrastructure consisted of four workstations equipped with a GoFa robot and an external computer with a RobotStudio installation, intended for groups of 4–6 participants.

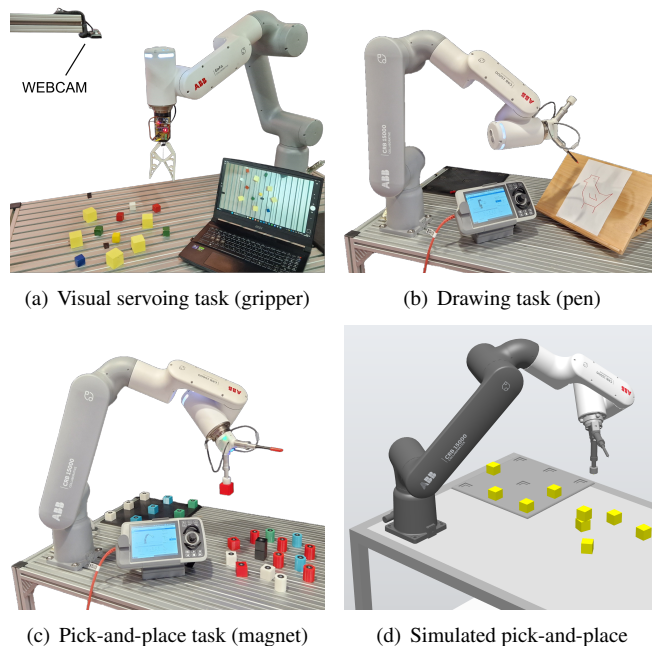


Figure 3: Various real and simulated didactic use cases.

4.2.1. Drawing task

Figure 3(b) depicts the setup: a standard paper sheet is attached to a flat surface, on which a drawing must be made using the pen tool connected to the robot. The robot and the paper are fixed on a table. The drawing should be reasonably simple and attained through the connection of several points. Points are defined manually, while the paths between them are drawn by the robot through motion instructions programmed in RAPID.

The session is organized as follows:

1. Introductory talk to provide context on industrial robotics. A classical industrial ABB robot is placed nearby the GoFa models. Differences between factory-constrained environments and modern human-robot collaborative workspaces are highlighted.
2. Hardware and software description. The main components are pointed out: robot links and joints, the controller cabinet, inherent safety mechanisms (internal sensors, safety controller), the FlexPendant tablet as a human-robot interface (HRI).
3. Joystick control via tablet and kinesthetic guidance in gravity compensation mode. The students are instructed on the presence of singularities with a practical example in which the fourth and sixth axes are aligned during linear mode in joystick operation.
4. Tool definition and calibration. The tip of the pen tool is determined using the built-in four-point procedure.
5. Work object definition and calibration. A user frame is defined along the sides of the paper sheet.
6. Point definition. Using the kinesthetic mode, several points are defined on the paper’s surface, in addition to an initial position above it.
7. Synchronization with RobotStudio, offline programming. Motion instructions are created and tested in simulation.
8. Synchronization with the robot. The code has been verified by the instructor and the instructions are performed by the real robot. Adjustments are made if necessary.

Throughout the session, the instructor reviewed several basic concepts, reinforcing the fundamentals taught in theoretical lectures while providing a practical approach to robot control, RAPID programming, data synchronization and task execution on a real robot. Particular emphasis was placed on the correct motion sequence applied during the execution of the task: the definition of an initial resting point, speed reduction during approach, introduction of “fine” points and linear paths where applicable, and the use of offsets to minimize unnecessary targets. Furthermore, students were guided through the simulation-to-reality transfer process, adapting code prepared in RobotStudio for execution on the real robot.

4.2.2. Pick-and-place task

An additional session was added in the Rob (B) and Rob (M) groups to expand the hands-on experience with robots on these specialized degrees. Stemming from the drawing scenario and layout, Figure 3(c) depicts a similar setup in which several 3D-printed elements (cubes and cylinders) are scattered over the table. The goal of the proposed task is to pick them from a storage area using the electromagnet end of the dual tool, and build a stack afterwards.

Rob (B) students are provided with a code template filled with basic instructions that must be completed in the RobotStudio editor with a simulated robot. Basic RAPID programming concepts are reviewed, with a focus on control flow loops and variable handling. Once the task has been fulfilled, the program is transferred and tested on the real robot. Adjustments are made if necessary. A reverse, unstacking operation is proposed if the main task was completed successfully.

Rob (M) students, on the other hand, receive this session before the drawing one. In contrast, it is aimed to be an introductory practice class on block programming through a built-in wizard in the robot’s tablet device.

4.3. TIAGo++

Exceptionally, Bio (B) students receive a preceding ten-minute talk and presentation of robot TIAGo++ to establish a tighter connection between the mainly industrial-focused theme of the session and the biomedical context of their degree. The robot is introduced by the instructor and real use cases are presented such as an assistive robotic task executed in a rehabilitation center in Madrid (Naranjo-Campos et al., 2024). A demo application is launched afterwards during which the robot describes itself using predefined motion sequences and dialogue lines synthesized using a built-in text-to-speech engine.

4.4. Survey

The students were requested to fill out a questionnaire composed of 10 to 15 items, depending on the degree and number of sessions. The form was shaped after the system usability scale (SUS), expanding on the original 10 items to account for satisfaction-related questions (Brooke et al., 1996). Similarly to the SUS, a five-level Likert scale was adopted to qualitatively assess the attitude of the students towards the session, with the following allowed responses: strongly disagree, mildly disagree, neutral, mildly agree, and strongly agree.

5. Results

The R programming language was used to plot the resulting graphs. The “HH” package was selected for its effectiveness and suitability in correctly representing the Likert scale (Heiberger and Robbins, 2014). Original survey items, collected anonymous responses and R scripts have been uploaded to a public GitHub repository.¹

In the following figures, survey items have been categorized according to the topic they relate to, ranging a different number of targeted student groups:

- The drawing task (Figure 4) using the pen tool was performed by all groups.
- Only specialized Rob (B) and Rob (M) groups completed the pick-and-place task (Figure 5) with the magnet tool.
- A subset of items unrelated to a specific task was included in the survey for all groups (Figure 6).
- Individual miscellaneous items were directed at the Rob (M) and Bio (B) groups (Figure 7).

6. Discussion

Students across all groups found the laboratory sessions engaging and illustrative of theoretical concepts. Similar satisfaction and success rates were observed in both the drawing and pick-and-place tasks. These were completed with minimal supervision, despite occasional difficulties in executing programmed trajectories in the simulator and on the real robot.

Notably, the slightly superior results in the Rob (M) group regarding the drawing session can be attributed to their prior introductory pick-and-place session. Conversely, these students found the simulation and robot synchronization more challenging, a result that might be counterintuitive for a Master’s in Robotics. However, it must be noted that incoming students do not necessarily possess a robotics background; in fact, many entrants lack specialized prior training.

Bio (B) students required more instructor assistance, likely due to the reduced course load compared to other groups. Specifically, the credit load is half that of the other cases, there is no final assignment to be delivered at the end of the semester (consisting of a RAPID programming project), and the introductory computer lab sessions were omitted due to time constraints.

Finally, the Ind (B) group achieved slightly better results in simulation-to-reality code transfer. As with other metrics, this could be linked to the lower student-to-workstation ratio in this group, which allowed for more personalized assistance from the instructor.

Prior preparation helped students feel confident and competent using available tools, while the sessions also provided the instructor an opportunity to review key concepts prior to assessments and final class projects. The drawing task boosted engagement and motivated more complex designs. New elements introduced in 2025, such as the introductory talk on TIAGo++, were well-received.

¹<https://github.com/roboticslab-uc3m/gofa-lab-surveys>

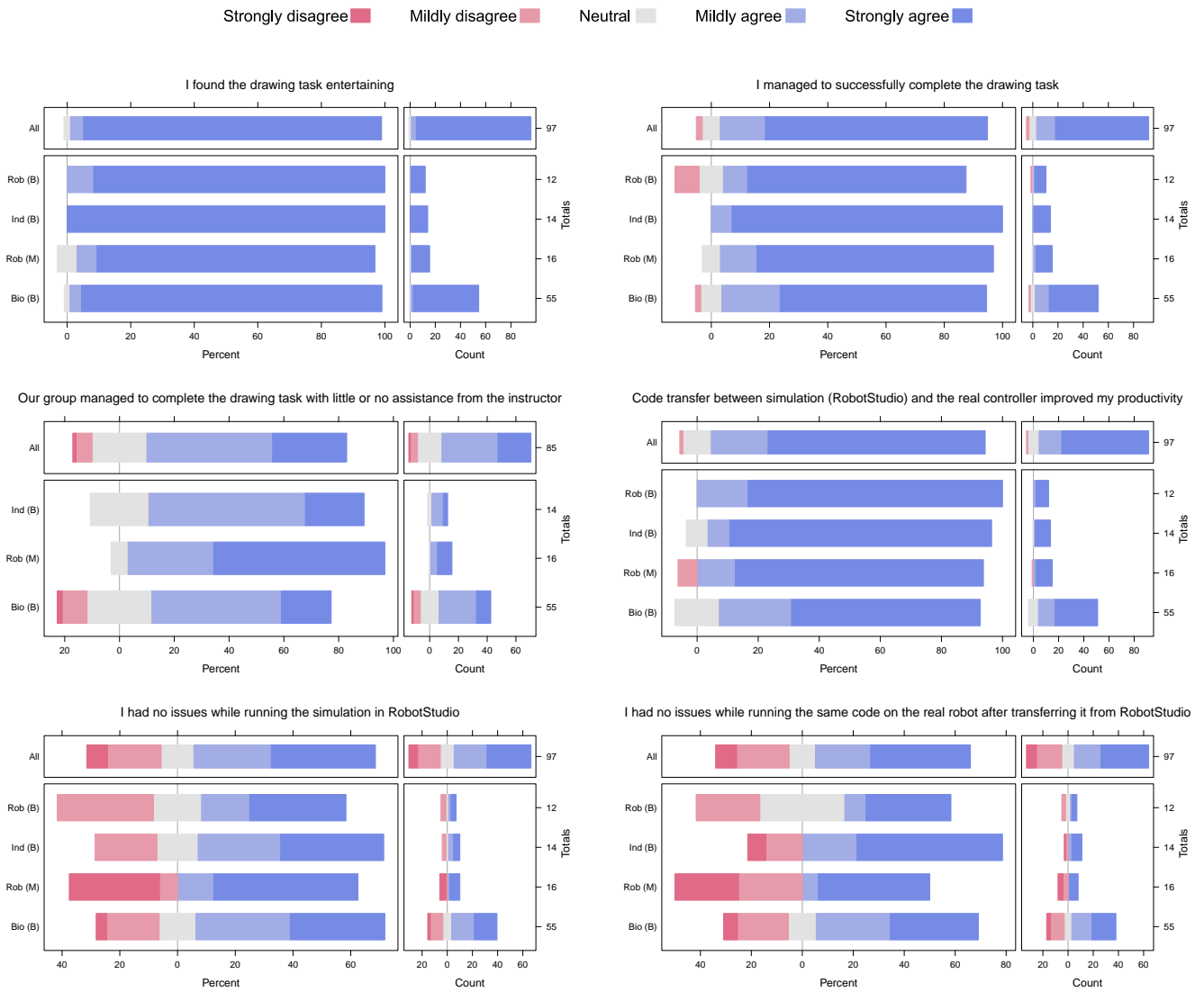


Figure 4: Survey results: items related to the drawing task. Responses are aligned with a five-level Likert scale in which negative feedback corresponds to red tones and positive feedback to blue tones, distributed on the left and right sides of the central neutral gray tone, respectively. More intense tones reflect a stronger feedback. A dual diagram is shown reflecting percentages (left graph) and response count (right graph). Targeted group names are abbreviated: “Rob (B)” for the Bachelor in Robotics Engineering, “Ind (B)” for the Bachelor in Industrial Technologies Engineering, “Rob (M)” for the Master in Robotics and Automation, and “Bio (B)” for the Bachelor in Biomedical Engineering. Certain items did not target all groups. An additional row is added to measure the overall response of all surveyed students. These graphical results have been produced with the “HH” package for the R programming language.

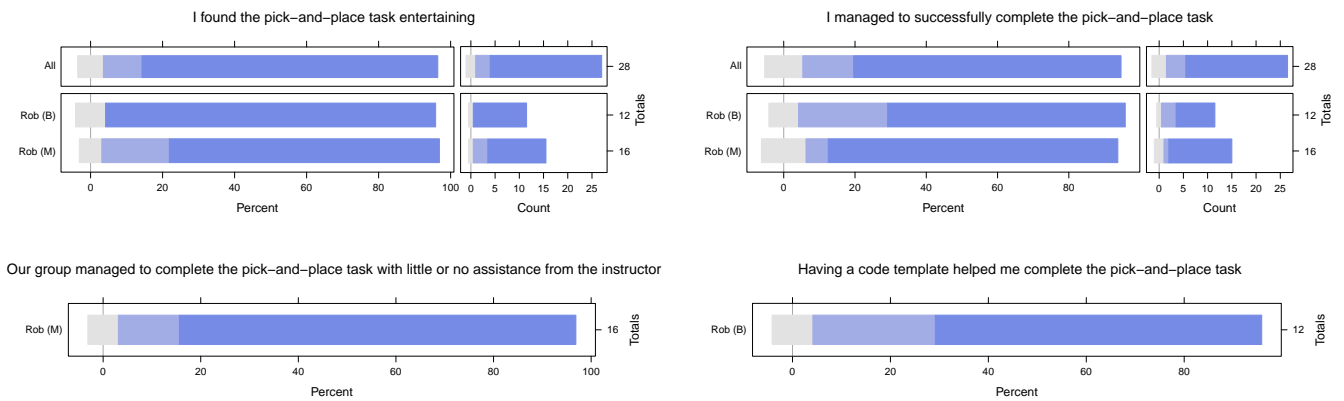


Figure 5: Survey results: items related to the pick-and-place task. See Figure 4 for description.

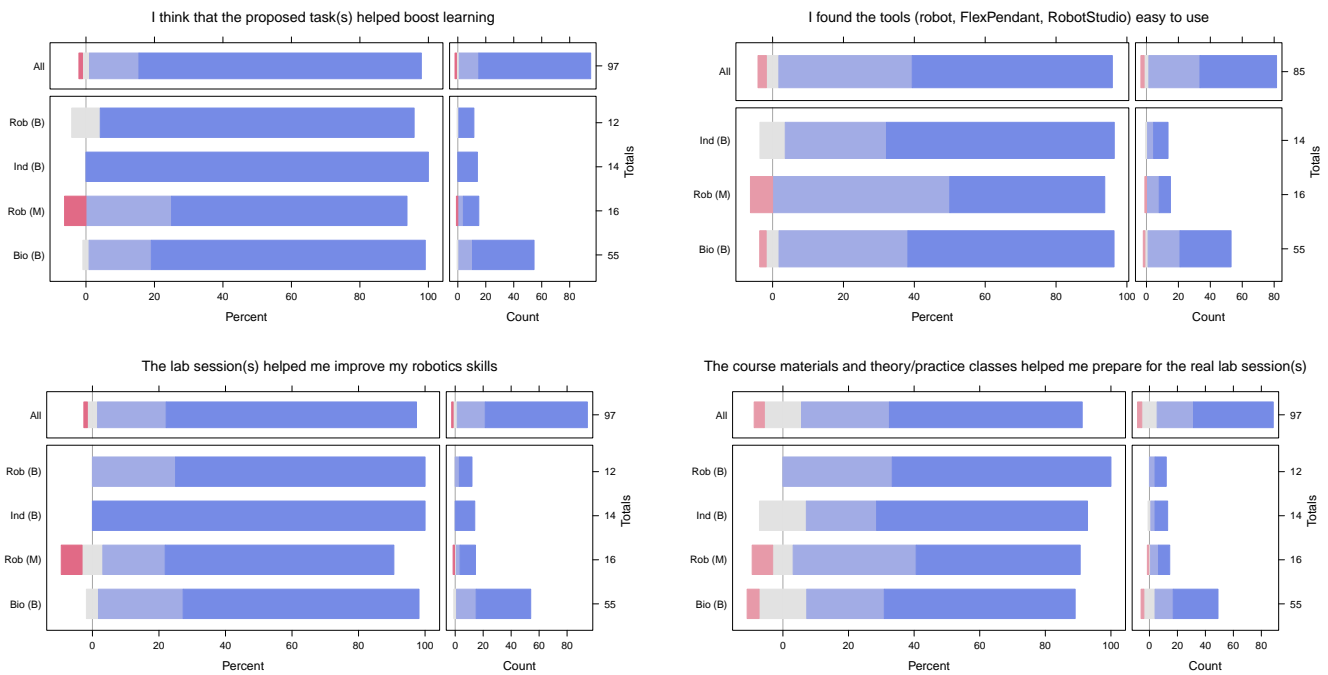


Figure 6: Survey results: common items. See Figure 4 for description.

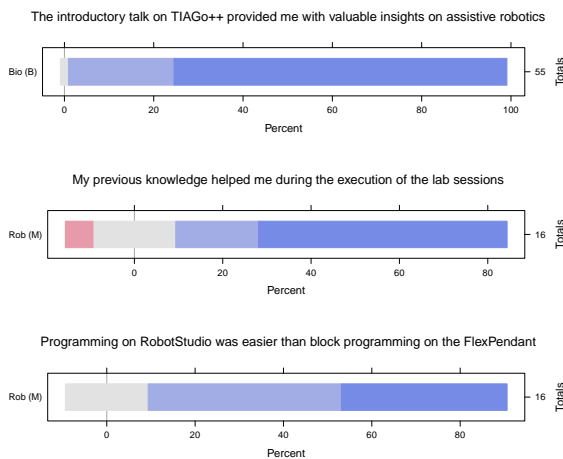


Figure 7: Survey results: miscellaneous items. See Figure 4 for description.

7. Conclusions

While academic performance has remained consistently high in recent years, quantitative grades alone do not fully capture the student experience. Consequently, this study aimed to evaluate student perception of the laboratory sessions, introducing an assessment tool based on established metrics.

In conclusion, the dual focus on system usability and student satisfaction provides a robust framework for evaluating educational robotics. Students welcomed this practice-oriented method, which allows them to simulate and deploy applications in a real setup using custom, easily simulated 3D-printed tools.

Regarding future iterations, instructors should allocate more time for the RAPID programming and simulation steps. Furthermore, future work will aim to analyze the correlation between academic results (grades and pass rates) and student's subjective self-assessment of their performance.

Acknowledgments

The research leading to these results was supported in part by “FotoArt5.0-CM, Laboratorios inteligentes para la ciencia del futuro” (TEC-2024/TEC-308) and “iRoboCity2030-CM, Robótica Inteligente para Ciudades Sostenibles” (TEC-2024/TEC-62), funded by “Programas de Actividades I+D en Tecnologías de la Comunidad de Madrid”.

References

Barradas, R., Lencastre, J. A., Soares, S., Valente, A., 2019. Usability evaluation of an educational robot for STEM areas. In: *Int. Conf. on Computer Supported Education (CSEDU)*. SCITEPRESS, pp. 218–225. DOI: 10.5220/0007675102180225

Brooke, J., et al., 1996. SUS – A quick and dirty usability scale. *Usability evaluation in industry* 189 (194), 4–7.

Heiberger, R., Robbins, N., 2014. Design of diverging stacked bar charts for Likert scales and other applications. *Journal of Statistical Software* 57 (5). DOI: 10.18637/jss.v057.i05

Łukawski, B., Cervera, M. M., Pascual, C. M., Oña, E. D., Victores, J. G., Jardón, A., 2025a. Espresso macchiato, por favore: collaborative robotic coffee-making for education. In: *Jornadas de Automática. CEA*. DOI: 10.17979/ja-cea.2025.46.12274

Łukawski, B., Oña, E. D., Jardón, A., Victores, J. G., Balaguer, C., 2025b. Development of educational applications with ABB GoFa collaborative robot using Externally Guided Motion. In: *Int. Conf. on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD)*. IEEE, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICCAD64771.2025.11099395

Naranjo-Campos, F. J., De Matías-Martínez, A., Victores, J. G., Gutiérrez Dueñas, J. A., Alcaide, A., Balaguer, C., 2024. Assistance in picking up and delivering objects for individuals with reduced mobility using the TIAGo robot. *Applied Sciences* 14 (17), 7536. DOI: 10.3390/app14177536

Rawat, K. S., Massiha, G. H., 2004. A hands-on laboratory based approach to undergraduate robotics education. In: *Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*. Vol. 2. IEEE, pp. 1370–1374. DOI: 10.1109/ROBOT.2004.1308015

Scaradozzi, D., Screpanti, L., Cesaretti, L., 2019. Towards a definition of educational robotics: a classification of tools, experiences and assessments. In: *Smart learning with educational robotics*. Springer, pp. 63–92. DOI: 10.1007/978-3-030-19913-5_3

Shi, Y., Chen, Z., Wu, Y., Henkel, D., Riedel, S., Liu, H., Feng, Q., Zhang, J., 2021. Combining learning from demonstration with learning by exploration to facilitate contact-rich tasks. In: *Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, pp. 1062–1069. DOI: 10.1109/IROS51168.2021.9636417



Universidad
Zaragoza

II Simposio CEA de los GT: Ingeniería de Control - Modelado, Simulación y Optimización - Educación en Automática (2026)

Técnicas de control inteligente aplicadas al robot educativo Lego Mindstorms EV3

Arambarri, Javier^{a,*}, Hernández, Ignacio^a, Cabanes, Itziar^a, Mancisidor, Aitziber^a, Santos, Matilde^b

^aDepartamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela de Ingeniería de Bilbao, Universidad del País Vasco (UPV/EHU), 48013-Bilbao, España.

^bInstituto de Tecnología del Conocimiento, Universidad Complutense de Madrid, 28040-Madrid, España.

To cite this article: Arambarri, J., Hernández, I., Cabanes, I., Mancisidor, A., Santos, M. 2026. Intelligent control techniques applied to the educational robot Lego Mindstorms EV3. Actas del II Simposio CEA de los GT: Ingeniería de Control - Modelado, Simulación y Optimización - Educación en Automática. Zaragoza, España.

Resumen

Este trabajo presenta una experiencia docente para la enseñanza de conceptos avanzados de automática mediante la experimentación directa con un robot educativo Lego Mindstorms EV3. Se emplean técnicas de control inteligente —control borroso o *fuzzy* y control proporcional optimizado mediante algoritmos genéticos— con el objetivo de corregir desviaciones de trayectoria derivadas de imperfecciones reales del sistema, como diferencias entre motores, rozamientos y perturbaciones externas. La propuesta se fundamenta en el aprendizaje basado en experimentación, permitiendo al estudiante confrontar modelos teóricos con el comportamiento de un sistema físico real, y analizar de forma crítica las limitaciones de la modelización y la sintonización manual de controladores clásicos. La experiencia presentada es fácilmente reproducible y adaptable a asignaturas universitarias de automática y control, constituyendo una alternativa atractiva a la enseñanza basada exclusivamente en simulación.

Palabras clave: robótica educativa, control inteligente, controlador borroso, optimización genética.

Intelligent control techniques applied to the educational robot Lego Mindstorms EV3

Abstract

This paper presents a teaching experience for advanced concepts of automation through direct experimentation with a Lego Mindstorms EV3 educational robot. Intelligent control techniques —fuzzy control and proportional control optimized using genetic algorithms— are used to correct trajectory deviations resulting from real imperfections in the system, such as differences between motors, friction and external disturbances. The proposal is based on experiential learning, allowing students to compare theoretical models with the behavior of a real physical system and critically analyze the limitations of modeling and manually tuning classical controllers. The experience presented is easily reproducible and adaptable to university courses in automation and control, constituting an attractive alternative to teaching based exclusively on simulation.

Keywords: educational robotics, intelligent control, fuzzy controller, genetic optimization.

1. Introducción

La enseñanza de la automática y el control en titulaciones de ingeniería se enfrenta habitualmente a la dificultad de trasladar los conceptos teóricos a situaciones reales. Gran parte de la docencia práctica se apoya en simuladores, lo que limita la exposición del alumnado a las incertidumbres, no linealidades y perturbaciones propias de los sistemas físicos reales. Esta brecha entre teoría y práctica puede dificultar la comprensión

profunda de los principios de control y reducir la motivación del estudiantado.

En este contexto, la robótica educativa se ha consolidado como una herramienta especialmente adecuada para la docencia en automática (Zhang and Wan, 2023), al permitir la experimentación directa con sistemas reales de forma segura, accesible y motivadora. Plataformas como Lego Mindstorms EV3 (Lego Education, 2013) ofrecen un entorno ideal para

*Autor para correspondencia: javier.arambarri@ehu.eus
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

introducir conceptos de modelado, control y optimización, ya que presentan imperfecciones reales —diferencias entre motores, fricciones o errores de medida— que rara vez se consideran en simulación, pero que resultan fundamentales desde el punto de vista formativo.

Este trabajo presenta una experiencia docente basada en la implementación y comparación de distintos controladores sobre un robot móvil diferencial, combinando técnicas de control clásico e inteligente. Se desarrollan un controlador borroso (*fuzzy*) y un controlador proporcional optimizado mediante algoritmos genéticos, con el objetivo de corregir desviaciones de trayectorias rectilíneas sin depender exclusivamente de modelos ideales ni de sintonizaciones manuales.

Más allá de los resultados técnicos, la propuesta destaca por su valor formativo: permite al alumnado analizar las limitaciones del modelo geométrico, contrastar estimaciones con medidas reales y comprender la influencia de las ganancias, los criterios de rendimiento y las perturbaciones del entorno. Todo ello favorece un aprendizaje activo y crítico alineado con los objetivos de las asignaturas de automática y control.

La implementación de la algoritmia del presente trabajo se encuentra en la rama “sime-2026” del siguiente repositorio:

<https://github.com/arambarricalvoj/eduROS2/tree/sime-2026>.

Se propone que el alumnado utilice *ROS2 Jazzy Jalisco* (Macenski et al., 2022) como marco de integración, junto con programación en *Python* y *C++*. A tal fin, el controlador borroso se codificará haciendo uso de la librería *fuzzylite* (Rada-Vilela, 2018) mientras que para el algoritmo genético utilizará como referencia Gutiérrez Reina et al. (2020). El esquema de control estará basado en Arambarri Calvo and Arambarri Calvo (2024) y la comunicación con el *hardware* se gestionará mediante el puente *eduROS2* (Arambarri Calvo, 2025).

Este artículo está organizado de la siguiente manera: en la Sección 2 se describe el modelo geométrico del robot diferencial. En la Sección 3 se presenta el controlador borroso diseñado e implementado. En la Sección 4 se expone la optimización desarrollada mediante un algoritmo genético para la sintonización de un controlador proporcional. Finalmente, en las Secciones 5 y 6 se presentan los resultados y las conclusiones de trabajo, respectivamente.

2. Modelo geométrico del robot diferencial

El modelo geométrico del robot diferencial se basa en la relación entre las velocidades de sus dos ruedas y la trayectoria resultante, Figura 1, y ha sido ampliamente estudiado en la literatura (Siegwart et al., 2011).

Cada rueda, de diámetro D , genera una velocidad lineal, $v_{\text{Left}}(t)$ y $v_{\text{Right}}(t)$, Ecuación (1), proporcional a su velocidad angular $\omega_{\text{Left}}(t)$ y $\omega_{\text{Right}}(t)$, mientras que la diferencia entre ambas velocidades lineales determina la velocidad angular del chasis (*yaw rate*, símbolo $\omega(t)$), Ecuación (2), donde L es la distancia

entre ruedas, denominada *axle track*. La velocidad lineal total del robot se obtiene como una media de ambas, Ecuación (3).

$$v_{\text{Left}}(t) = \omega_{\text{Left}}(t) \frac{D}{2}, \quad v_{\text{Right}}(t) = \omega_{\text{Right}}(t) \frac{D}{2} \quad (1)$$

$$\omega(t) = \frac{v_{\text{Left}}(t) - v_{\text{Right}}(t)}{L} \quad (2)$$

$$v(t) = \frac{v_{\text{Left}}(t) + v_{\text{Right}}(t)}{2} \quad (3)$$

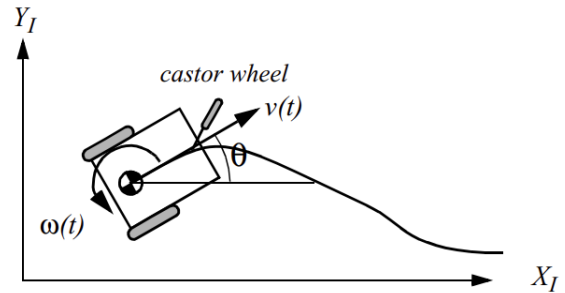


Figura 1: Cinemática diferencial (Siegwart et al., 2011).

La orientación del robot, $\theta(t)$, puede actualizarse de dos formas complementarias: a partir de distancias recorridas, o a partir de velocidades instantáneas. A continuación se resume el modelo geométrico del robot para ambas aproximaciones en la orientación.

■ A partir de distancias recorridas

Si $d_{\text{Left}}(t)$ y $d_{\text{Right}}(t)$ representan las distancias lineales recorridas por las ruedas izquierda y derecha, respectivamente, el incremento angular del robot en un intervalo de tiempo se calcula como la Ecuación (4). La orientación acumulada se obtiene sumando sucesivamente estos incrementos, como se muestra en la Ecuación (5).

$$\Delta\theta(t) = \frac{d_{\text{Left}}(t) - d_{\text{Right}}(t)}{L} \quad (4)$$

$$\theta(t) = \sum \Delta\theta(t) \quad (5)$$

■ A partir de velocidades instantáneas

Si se consideran las velocidades lineales de cada rueda $v_{\text{Left}}(t)$ y $v_{\text{Right}}(t)$, la velocidad angular instantánea del robot se expresa como la Ecuación (6), donde $\dot{\theta}(t)$ representa la velocidad de giro del chasis (*yaw rate*). En este caso, la orientación se obtiene integrando la velocidad angular en el tiempo, como se muestra en la Ecuación (7).

$$\dot{\theta}(t) = \frac{v_{\text{Left}}(t) - v_{\text{Right}}(t)}{L} \quad (6)$$

$$\theta(t) = \int \dot{\theta}(t) dt \quad (7)$$

De esta forma, el modelo permite trabajar tanto con incrementos discretos de distancia como con velocidades instantáneas, adaptándose a diferentes modos de lectura de los *encoders*. Una vez calculada la orientación, se obtiene el error en la trayectoria rectilínea mediante la Ecuación (8), donde θ_0 es

la orientación inicial del robot en reposo, previo a comenzar el movimiento:

$$\theta(t)_{\text{error}} = \theta(t) - \theta_0 \tag{8}$$

Una vez obtenido el modelo geométrico del robot con dos aproximaciones en el cálculo de la orientación, se expone a continuación la implementación de diferentes estrategias de control avanzado y la comparativa entre ellas. El diámetro de las ruedas del robot utilizado es $D = 62.4$ milímetros (mm) y la separación entre ambas es $L = 110$ milímetros (mm).

3. Control fuzzy

El propósito del control *fuzzy* o borroso es manejar la incertidumbre y la imprecisión en sistemas dinámicos (Wang et al., 2025), permitiendo diseñar controladores que no requieren un modelo matemático exacto del proceso. Se basa en la lógica borrosa, introducida por (Zadeh, 1965), que permite representar conocimiento mediante reglas lingüísticas.

Este tipo de control resulta especialmente útil cuando la relación entre las variables de entrada y salida es no lineal o difícil de caracterizar, como ocurre en el caso de los motores Lego Mindstorms EV3, cuyos comportamientos pueden variar por desgaste o diferencias de fabricación. Por tanto, se emplea un controlador borroso para obtener la corrección que se debe aplicar en la velocidad angular del robot (*yaw rate*, $\omega(t)$) de forma que se mantenga una trayectoria recta.

Este controlador se presenta en tres variantes: a) utilizando el modelo geométrico a partir de distancias recorridas, b) a partir de velocidades instantáneas y c) utilizando directamente un sensor de giro. Para sintonizar el controlador a cada una ellas se utilizan ganancias, lo que permite adaptar la salida del controlador sin modificar las funciones de pertenencia.

Diseño del controlador borroso

El controlador se concibe como un esquema genérico, aplicable a distintos casos de uso, por lo que su única variable de entrada es el error expresado en porcentaje. En la implementación propuesta este error de entrada corresponde siempre al error de orientación $\theta(t)_{\text{error}}$ y se denota $e_\theta(t)$.

De esta forma, la salida del controlador representa el porcentaje de corrección que debe aplicarse sobre la velocidad angular del robot, $\Delta\omega(t)$. Por ejemplo, si el controlador devuelve una salida del 30 % y la velocidad lineal, de avance o movimiento, deseada es de 25 unidades, la velocidad angular aplicada será el 30 % de dicho valor, es decir, 7.5 unidades.

Se definen funciones de pertenencia triangulares solapadas, tal y como se muestra en las Figuras 2 y 3, de modo que cualquier valor dentro del rango de entrada activa al menos un conjunto difuso y produce una salida.

Las reglas lingüísticas definidas para la fase de inferencia se presentan en la Tabla 1, donde $e_\theta(t)$ es el error en porcentaje de la orientación, esto es, la entrada definida, y $\Delta\omega(t)$ el

porcentaje de corrección que debe aplicarse sobre la velocidad angular del robot, es decir, la salida definida. Para combinar las reglas activadas en una única salida, $\Delta\omega(t)$, el operador de agregación empleado es el máximo, que selecciona el mayor grado de pertenencia aportado por las reglas (Kozielski et al., 2024).

Tabla 1: Reglas lingüísticas del controlador borroso.

Condición en $e_\theta(t)$	Acción en $\Delta\omega(t)$
muy bajo	negativo fuerte
bajo	negativo suave
medio	nulo
alto	positivo suave
muy alto	positivo fuerte

Finalmente, la *defuzzificación* se realiza mediante el método del centroide (Ross, 2010) con 200 muestras, con el objetivo de conseguir suficiente resolución que asegure transiciones suaves entre las acciones de control.

El resumen de los parámetros principales para configurar el controlador se presenta en la Tabla 2 y los conjuntos borrosos junto con sus rangos en las Tablas 3 y 4, donde a y c son los vértices de la base del triángulo.

Tabla 2: Parámetros del controlador borroso.

Parámetro	Valor o rango
Entrada: $e_\theta(t)$ en %	[-100, 100]
Salida: corrección vel. angular en %, $\Delta\omega(t)$	[-100, 100]
Defuzzificación	Centroide
Operador de agregación	Máximo
Ganancia variante velocidad	1.0
Ganancia variante distancias	0.4
Ganancia variante sensor de giro	2.5

Tabla 3: Funciones de pertenencia definidas para la variable de entrada $e_\theta(t)$.

Conjunto	Rango (a,b,c)
muy bajo	(-100, -80, -40)
bajo	(-60, -30, 0)
medio	(-20, 0, 20)
alto	(0, 30, 60)
muy alto	(40, 80, 100)

Tabla 4: Funciones de pertenencia definidas para la variable de salida $\Delta\omega(t)$.

Conjunto	Rango (a,b,c)
negativo fuerte	(-100, -100, -50)
negativo suave	(-60, -30, 0)
nulo	(-20, 0, 20)
positivo suave	(0, 30, 60)
positivo fuerte	(50, 100, 100)

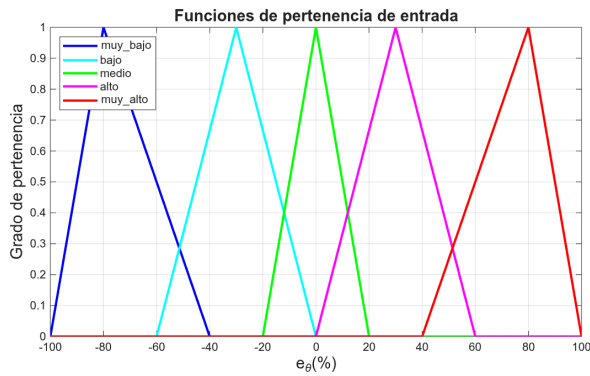


Figura 2: Funciones de pertenencia de entrada del controlador borroso.

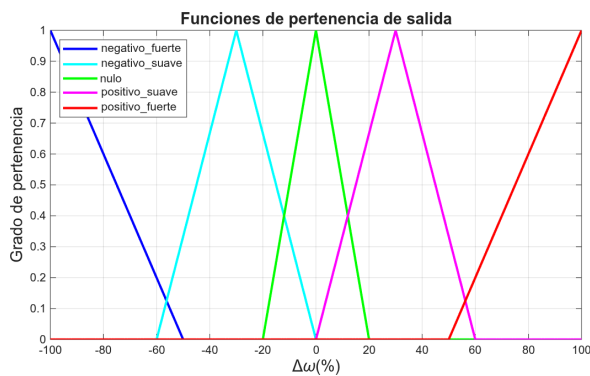


Figura 3: Funciones de pertenencia de salida del controlador borroso.

4. Control basado en algoritmos genéticos

El propósito de los algoritmos genéticos es optimizar parámetros de control mediante técnicas inspiradas en la evolución natural (Waysi et al., 2025), evitando la necesidad de una sintonización manual. En este trabajo se emplea un algoritmo genético (GA) para ajustar el parámetro K_p de un controlador proporcional encargado de corregir las desviaciones de trayectoria utilizando el sensor de giro. En este tipo de controlador la corrección aplicada sobre la velocidad angular del robot, $\Delta\omega(t)$ se calcula como la Ecuación (9),

$$\Delta\omega(t) = K_p \cdot e_\theta(t), \quad (9)$$

donde $e_\theta(t)$ es el error de orientación. En este caso no se plantea utilizar el modelo geométrico en ninguna de sus versiones ya que como se observa en los resultados del controlador borroso, Sección 5.1, el controlador que utiliza el sensor de giro presenta un considerable mejor desempeño.

El proceso evolutivo comienza con una población inicial de valores candidatos de K_p , que se evalúan en función de su desempeño en mantener la trayectoria recta del robot. Del conocimiento de *eduROS2* (Arambarri Calvo, 2025) y la dinámica del robot, se puede acotar el rango de valores posibles de la población, en este caso, $[2.0, 9.0]$, ya que con ese mínimo el robot tarda en corregir y con ese máximo genera demasiadas oscilaciones.

Después, se aplican los operadores de *selección*, *cruce* y *mutación* para generar nuevas poblaciones, favoreciendo aquellos individuos con mejor rendimiento. De esta forma, el algoritmo converge hacia un valor óptimo de K_p que mejora la estabilidad del controlador proporcional. Cada individuo se evalúa por episodios de 4 segundos y cada generación se configura con una población de 6 individuos, estableciéndose un máximo de 5 generaciones.

A continuación se detalla el diseño de las operaciones propuestas.

Función de aptitud

Evalúa el rendimiento de cada individuo y es única para cada aplicación. Se ha diseñado para evaluar las oscilaciones (*osc*) que genera el individuo en estudio y el tiempo de recuperación (*TR*) necesario por el robot. Las oscilaciones se obtienen como la variación media entre salidas consecutivas del controlador, y el tiempo de recuperación como el número de muestras fuera del rango de error permitido, $\pm 2^\circ$. La función de aptitud diseñada se calcula como:

$$fitness = w_{osc} \cdot osc + w_{TR} \cdot TR, \quad (10)$$

donde $w_{osc} = 0.2$ y $w_{TR} = 0.5$ son los pesos asignados a cada criterio. Como $w_{TR} > w_{osc}$, se le da mayor importancia al tiempo de recuperación. Los individuos con menor valor de *fitness* son considerados más aptos.

Selección

Tras evaluar todos los individuos de una generación, estos se ordenan en función de su idoneidad y se conservan los dos de menor valor, ya que son los dos más aptos.

Cruce

A partir de los individuos seleccionados se generan nuevos candidatos combinando los valores de K_p de los dos progenitores. El cruce implementado es de tipo interpolación (Herrera et al., 2004), donde el nuevo individuo (descendiente) se obtiene como una combinación lineal de los progenitores:

$$K_p^{desc.} = \beta \cdot K_p^{progen.1} + (1 - \beta) \cdot K_p^{progen.2} \quad (11)$$

con $\beta \in [0, 1]$ elegido arbitrariamente en cada cruce. Este operador permite explorar nuevos valores en el rango delimitado por sus progenitores, favoreciendo la convergencia hacia regiones prometedoras del espacio de búsqueda.

Mutación

Para mantener diversidad en la población y evitar la convergencia prematura, se aplica un operador de mutación que introduce una pequeña variación aleatoria sobre el valor de K_p del individuo generado. La mutación se implementa añadiendo ruido uniforme (Corne and Lones, 2025) en el rango $[-0.5, 0.5]$, con una probabilidad de aplicación del 10%. De esta forma se asegura que el algoritmo pueda explorar nuevas soluciones fuera de las combinaciones lineales de los ascendientes, evitando estancamientos en óptimos locales.

5. Análisis de los resultados

Los experimentos muestran que los controladores propuestos logran mantener la trayectoria rectilínea en presencia de diferencias entre motores y perturbaciones externas. Las señales de error se representan en grados (°) respecto del tiempo.

5.1. Control fuzzy

La Figura 4 muestra la evolución de la señal de error para los controladores borrosos implementados en las tres aproximaciones presentadas: a) el basado en el modelo geométrico de velocidades (en color rojo), b) el basado en las posiciones de los motores (en color verde) y c) el que emplea directamente el sensor de giro (en color azul). Se aprecia claramente cómo la elección de la ganancia influye de manera decisiva en la estabilidad de la respuesta. En particular, el controlador que utiliza las posiciones de los motores presenta una oscilación significativamente mayor, lo que evidencia la necesidad de ajustar cuidadosamente la ganancia para evitar sobrecompensaciones. Aun así, la no linealidad de los motores hace que el modelo geométrico genere un error de orientación incluso cuando no existe un error real.

En contraste, el controlador con sensor de giro y una ganancia de 2.5 ofrece la mejor respuesta, ya que utiliza información que refleja con mayor precisión el estado real del robot en cada instante. Esta señal apenas oscila y mantiene una trayectoria estable, corrigiendo las desviaciones de forma rápida y eficaz.

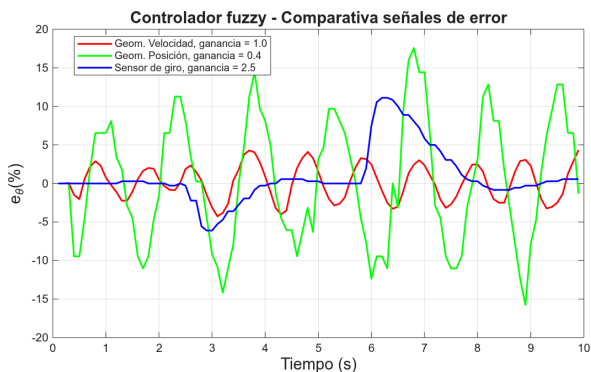


Figura 4: Comparativa de señales de error del controlador fuzzy para las 3 aproximaciones: a) en rojo, b) en verde, c) en azul.

5.2. Algoritmos genéticos

La Tabla 5 muestra la evolución de la población en distintas generaciones, donde se aprecia cómo los valores de K_p tienden progresivamente hacia regiones más estables y con menor fitness. Este comportamiento refleja la capacidad del algoritmo para explorar el espacio de búsqueda y converger hacia parámetros que mejoran la respuesta del controlador. En particular, se observa que valores intermedios de K_p ofrecen un equilibrio adecuado entre rapidez de corrección y ausencia de oscilaciones excesivas, estando en $K_p = 5.31$ el óptimo logrado.

En la Figura 5 se representa la señal del error respecto al tiempo, utilizando los valores poblacionales límite 2.0 y 9.0

junto con el valor óptimo obtenido 5.31. Se observa que este último (curva verde) constituye efectivamente una solución adecuada, ya que proporciona una respuesta relativamente rápida con menor nivel de oscilación. En cambio, la señal correspondiente a $K_p = 2.0$ (curva roja) muestra una corrección demasiado lenta, mientras que la de $K_p = 9.0$ (curva azul) presenta un exceso de oscilaciones, generando picos más pronunciados y elevados que los observados en la señal verde correspondiente a $K_p = 5.31$.

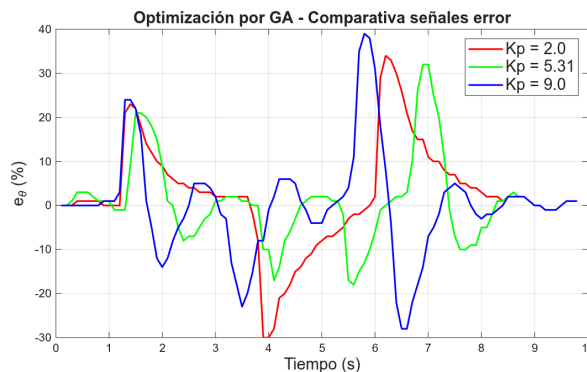


Figura 5: Comparativa de señales de error con K_p optimizado por un algoritmo genético (GA).

Tabla 5: Evolución del algoritmo genético en las distintas generaciones.

Gen.	Indiv.	K_p	Fitness
0	0	8.1319	10.7280
0	1	6.6784	8.9099
0	2	4.0937	12.3187
0	3	5.4566	11.2959
0	4	5.7875	11.3842
0	5	5.0053	14.5987
1	0	6.6784	12.0384
1	1	8.1319	9.8214
1	2	5.2523	10.1088
1	3	5.3148	7.3046
1	4	5.5053	11.2158
1	5	7.8817	11.3902
2	0	5.3148	6.7274
2	1	8.1319	9.1407
2	2	5.3319	8.6478
2	3	5.4473	7.4172
2	4	5.2687	9.8123
2	5	7.6908	13.5509
3	0	8.1319	10.1570
3	1	5.3148	9.1667
3	2	7.9424	13.0775
3	3	5.2710	11.1285
...			

5.3. Comparativa entre las diferentes estrategias

La Figura 4 para el controlador borroso y la Figura 5 para $K_p = 5.31$, ambos para la aproximación c), es decir, utilizando el sensor de giro, muestran los resultados de los mejores controladores obtenidos. A simple vista, el controlador fuzzy

parece responder mejor a las perturbaciones, pero no se puede confirmar con dichos gráficos porque el controlador proporcional tradicional está haciendo frente a perturbaciones mayores.

Por tanto, en la Figura 6 se presenta la comparativa del controlador borroso con sensor de giro y el controlador proporcional con sensor de giro sintonizado con algoritmos genéticos, ambos sometidos a perturbaciones similares. Las señales de error se han desfasado para comparar con mayor claridad, y aunque el controlador borroso, señal azul, se enfrenta a perturbaciones algo mayores, muestra la misma estabilidad que el controlador proporcional, siendo este un claro indicador de la robustez del controlador basado en lógica difusa desarrollado.

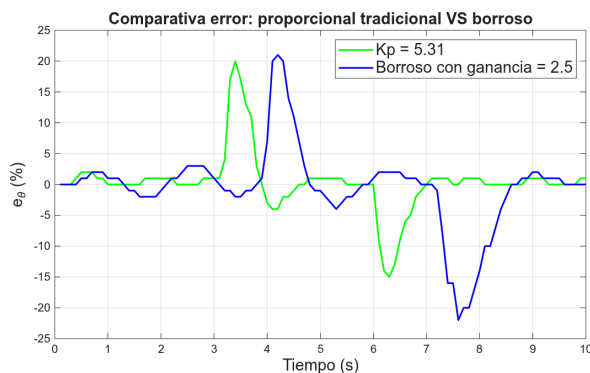


Figura 6: Comparativa de los controladores proporcional tradicional y borroso.

6. Conclusiones

El trabajo presentado demuestra la viabilidad y el valor didáctico de emplear un robot educativo de bajo coste como plataforma para la enseñanza práctica de técnicas avanzadas de control en el ámbito universitario. La experimentación directa con el Lego Mindstorms EV3 permite al alumnado enfrentarse a problemas reales de control, caracterizados por incertidumbres, perturbaciones y limitaciones de los modelos teóricos, aspectos difíciles de reproducir mediante simulación exclusivamente.

Desde un punto de vista educativo, los resultados ponen de manifiesto la utilidad de combinar enfoques de control clásico e inteligente en un mismo entorno experimental. El controlador borroso facilita la introducción de conceptos de control no lineal y razonamiento basado en reglas lingüísticas, mientras que la optimización mediante algoritmos genéticos permite abordar de forma sistemática la sintonización de parámetros y reflexionar sobre la definición de criterios de rendimiento. Esta combinación favorece una comprensión más profunda de los compromisos inherentes al diseño de sistemas de control.

Asimismo, la comparación entre estimaciones basadas en modelos geométricos y medidas directas obtenidas a partir del sensor de giro resulta especialmente enriquecedora desde el punto de vista formativo, al evidenciar las limitaciones de la modelización ideal y la importancia de la instrumentación en sistemas reales. El uso de ganancias externas en los controladores borrosos permite, además, reutilizar el diseño del motor de inferencia en distintos contextos docentes, simplificando su

integración en prácticas de laboratorio.

En conjunto, la experiencia presentada contribuye a reducir la brecha entre teoría y práctica en la enseñanza de la automática, incrementa la motivación del alumnado y facilita la adquisición de competencias prácticas en control y robótica. Por todo ello, se considera que este enfoque constituye una alternativa sólida y replicable para la docencia en asignaturas de automática y control, complementando de manera eficaz el uso tradicional de herramientas de simulación.

Las líneas futuras del artículo se centran en tres direcciones principales: la simulación mediante herramientas como Gazebo para generar perturbaciones homogéneas y controladas, sintonización de un controlador PID mediante algoritmos genéticos y desarrollo de controladores neuronales, así como la exploración de enfoques basados en aprendizaje por refuerzo.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Gobierno Vasco: proyectos Ref. SENDOA KK-2025/00102 y Ref. AURRERA KK-2024/0024.

Referencias

- Arambarri Calvo, J., 2025. eduros2: robótica educativa lego con ros2. Repositorio en GitHub.
URL: <https://github.com/arambarri-calvo/eduROS2/tree/ROSConEs25>
- Arambarri Calvo, J., Arambarri Calvo, J., 2024. Explorando la Robótica: Guía para First Lego League y World Robot Olympiad. Amazon KDP, España.
URL: <https://www.amazon.es/dp/B0DJJ1J8>
- Corne, D., Lones, M. A., 2025. Evolutionary algorithms. In: Handbook of Heuristics. Springer Nature Switzerland, Cham, pp. 125–146.
- Gutiérrez Reina, D., Tapia Córdoba, A., Rodríguez del Nozal, Á., 2020. Algoritmos Genéticos con Python: Un enfoque práctico para resolver problemas de ingeniería. Marcombo, Barcelona.
- Herrera, F., Lozano, M., Sánchez, A. M., 2004. Operadores de cruce con múltiples descendientes para algoritmos genéticos con codificación real: Estudio experimental. In: Congreso Español sobre Metaheurísticas, Algoritmos Evolutivos y Bioinspirados (MAEB).
- Kozielski, M., Prokopowicz, P., Mikołajewski, D., 2024. Aggregators used in fuzzy control—a review. Electronics 13 (16), 3251.
DOI: 10.3390/electronics13163251
- Lego Education, 2013. Lego Mindstorms EV3. Robotics kit and programming platform.
- Macenski, S., Foote, T., Gerkey, B., Lalancette, C., Woodall, W., 2022. Robot operating system 2: Design, architecture, and uses in the wild. Science Robotics 7 (66), eabm6074.
DOI: 10.1126/scirobotics.abm6074
- Rada-Vilela, J., 2018. The fuzzyLite libraries for fuzzy logic control.
URL: <https://fuzzylite.com>
- Ross, T. J., 2010. Fuzzy Logic with Engineering Applications, 3rd Edition. Wiley.
- Siegeart, R., Nourbakhsh, I., Scaramuzza, D., 2011. Introduction to Autonomous Mobile Robots. MIT Press.
- Wang, C., Xu, X., Kao, Y., Xia, H., 2025. Analysis and Design for Fuzzy Systems. Springer.
- Waysi, D., Ahmed, B. T., Ibrahim, I. M., 2025. Optimization by nature: A review of genetic algorithm techniques. The Indonesian Journal of Computer Science 14 (1).
- Zadeh, L., 1965. Fuzzy logic. Fuzzy Sets and Systems, 100–106.
- Zhang, M., Wan, Y., 2023. Improving learning experiences using lego mindstorms ev3 robots in control systems course. International Journal of Electrical Engineering & Education 60 (4), 329–351.
DOI: 10.1177/00207209211055343

Seguimiento de trayectorias autónomo en una grúa robótica hidráulica

Arzola, César^{a,*}, Rodríguez-Fortún, José-Manuel^a, Iglesias, Javier^a, Canalis, Pablo^a, Navarro, Juan^b

^aInstituto Tecnológico de Aragón, María de Luna, 7-8, 50018, Zaragoza, España.

^bMAXAM Terra Solutions, Avda del Partenón, 16, 28042, Madrid, España.

To cite this article: Arzola, C., Rodríguez-Fortún, J.-M., Iglesias, J., Canalis, P., Navarro, J.. 2026. Autonomous trajectory tracking in a hydraulic crane. Actas del II Simposio CEA de los GT: Ingeniería de Control - Modelado, Simulación y Optimización - Educación en Automática. Zaragoza, España.

Resumen

El presente trabajo muestra el proceso de automatización de una grúa hidráulica para seguir de manera autónoma trayectorias definidas por el usuario en un entorno minero. Así, se describe la arquitectura hardware implementada a fin de poder comandar los actuadores y los sensores que hacen posible cerrar los diferentes bucles de control. El trabajo se ha implementado en una grúa de grandes dimensiones lo que obliga a la utilización de soluciones específicas para evitar las oscilaciones de la estructura y sus posibles efectos negativos.

Palabras clave: Control robusto, command shaping, generación de trayectorias, actuadores hidráulicos, grúa

Autonomous trajectory tracking in a hydraulic crane

Abstract

The present work describes the automation process of a hydraulic crane to follow user-defined trajectories in a mining environment. The text shows the developed hardware architecture to command the actuators and sensors to close the feedback loops. The presented work has been implemented in a large crane, which makes it necessary to use specific solutions for avoiding structural oscillations and their potential negative effects.

Keywords: Robust control, command shaping, trajectory generation, hydraulic actuators, crane

1. Introducción

El trabajo aquí presentado se orienta a la robotización y automatización de una grúa hidráulica para minería. Este tipo de aplicaciones ha suscitado gran interés en los últimos años debido a la posibilidad de aumentar la seguridad en la operación al alejar a los operarios humanos de zonas de trabajo potencialmente peligrosas, a la par que mejorar la eficiencia de procesos caracterizados por largas jornadas de trabajo donde el cansancio puede afectar negativamente a la productividad. Dada su importancia, es posible encontrar ejemplos de aplicación en la literatura reciente. Por ejemplo, Duz et al. (2024) describe la robotización en entornos de la construcción, y Bonchis et al. (2014) la automatización en el proceso de colocación de cargas explosivas en minería.

La automatización de este tipo de grúas no es una tarea sencilla dado que se trata de maquinaria de grandes dimensiones con actuadores hidráulicos altamente no lineales en su curva de comportamiento. El tamaño de la maquinaria es causa frecuente de vibraciones durante el movimiento, ya sea por la flexibilidad de las uniones o por la propia esbeltez de la estructura. En Riboli et al. (2023) se distingue entre métodos en bucle abierto y cerrado para evitar las oscilaciones, y usan trayectorias suaves definidas mediante funciones spline. En otros casos, se integran elementos que amortigüen el movimiento, como en el caso de Lima et al. (2019), que añaden actuadores magnetorreológicos en las uniones entre eslabones de la cadena cinemática. De manera similar, García-Pérez et al. (2019) combina el control en bucle cerrado basado en sliding con el uso de actuadores piezoeléctricos en los elementos esbeltos para reducir su oscilación

*Autor para correspondencia: carzola@ita.es



Figura 1: Grúa hidráulica sobre la que se realiza el control

propia usando PPF (Positive Position Feedback). Una complejidad añadida en el control de elementos flexibles es la necesidad de medir la posición del extremo afectada por la flexión de la estructura. Para ello, se incluyen a veces sensores adicionales como en Sahu et al. (2020) o Bonchis et al. (2014) donde se aplica visual servoing con una cámara en el extremo.

En el enfoque propuesto se combinan tres estrategias complementarias. Por un lado, se emplean dos técnicas en bucle abierto: la generación de trayectorias articulares suaves y la actuación mediante *command shaping*, con el objetivo de limitar la excitación dinámica del sistema y cuyo detalle se describe en Khorshid et al. (2020) y Conker et al. (2016). Por otro lado, el posicionamiento del cabezal se realiza en bucle cerrado, utilizando información de la configuración articular del manipulador y mediciones directas del entorno obtenidas mediante un sensor láser instalado en el extremo del brazo.

De forma complementaria, el control de sistemas hidráulicos constituye un problema común en maquinaria de minería y construcción. En Mattila et al. (2017) se describen sistemas de control en posición y velocidad para movimientos libres, así como controles en fuerza cuando se restringe el movimiento. En la literatura se identifican distintos algoritmos, desde el control tradicional basado en la linealización del sistema y el uso de PID's descrito en Manring and Fales (2020), hasta métodos más avanzados como el control adaptativo en Nurmi and Mattila (2017), el uso de redes neuronales propuesto por Nan and Hutter (2024), Reinforcement Learning como en Pascal and Hutter (2020), entre otros. Con objeto de mejorar la eficiencia del sistema, Mattila et al. (2017) propone el uso de SMISMO, que aplica un control diferencial de las presiones en las cámaras del actuador tal y como describe Koivumäki et al. (2019).

El presente trabajo realiza el control de los actuadores mediante control robusto H_∞ debido a la elevada incertidumbre en los actuadores y la evolución de su comportamiento a lo largo del tiempo en condiciones de operación difíciles.

A continuación se describe la robotización de una grúa de grandes dimensiones para minería y cómo se ha logrado cumplir con los objetivos funcionales de posicionado mediante una estructura de control que combina generación de trayectorias con dos modos de funcionamiento para el posicionamiento grueso y de precisión del extremo de la grúa. El sistema sobre el que se realiza la implementación se describe en la sección 2. Se

incluye el detalle de la arquitectura de control en la sección 3, así como los resultados de la validación en condiciones reales en la sección 4. Finalmente, la sección 5 resume el trabajo realizado.

2. Descripción del sistema

La Fig. 1 muestra la grúa sobre la cual se desarrolla este trabajo. Se trata de una estructura que puede alcanzar los 5 m de longitud con tres grados de libertad, correspondientes a la rotación respecto a su base, la elevación a través de un cilindro vertical y la extensión. El objeto de la máquina es posicionar el extremo sobre los barrenos de una mina a cielo abierto.

La grúa inicialmente no tiene ningún tipo de sensorización, por lo que es necesario dotarla de sensores para conocer la posición articular de cada grado de libertad. Para ello se instala un encóder para medir el primer giro, un inclinómetro para el nivel de inclinación y un sensor de hilo para la extensión.

El detalle del cabezal aparece en la Fig. 2, cuya posición y orientación se obtiene a partir de dos antenas GPS, y un sensor láser que permite detectar el barreno una vez el cabezal está lo suficientemente cerca.



Figura 2: Detalle del cabezal de la grúa donde se observan los sensores GPS y láser

El objetivo de la máquina es, partiendo de una posición objetivo GPS para el barreno, colocarse sobre el mismo de manera automática. Debido a que la posición inicialmente considerada

puede diferir de la real, se requiere el sensor láser que localiza el barreno y permite asegurar el correcto posicionamiento del cabezal.

3. Sistema de control

En esta sección se describe la arquitectura de control implementada en el sistema, la cual se ilustra en la Figura 3. El esquema propuesto combina una etapa de planificación, un control *grueso* en espacio articular, y un control *fino* en espacio cartesiano, permitiendo posicionar el cabezal de forma precisa y robusta a partir de las referencias definidas en el espacio de trabajo. La estructura modular del control facilita la compensación de errores debidos a inexactitudes del modelo cinemático utilizado y a efectos dinámicos no modelados, como la flexibilidad estructural del brazo.

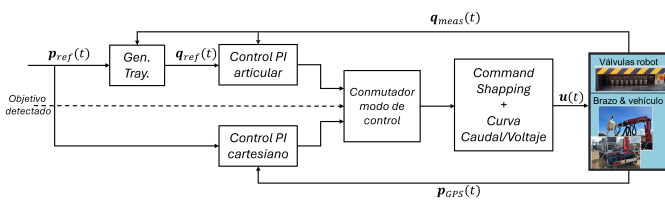


Figura 3: Bucle de control

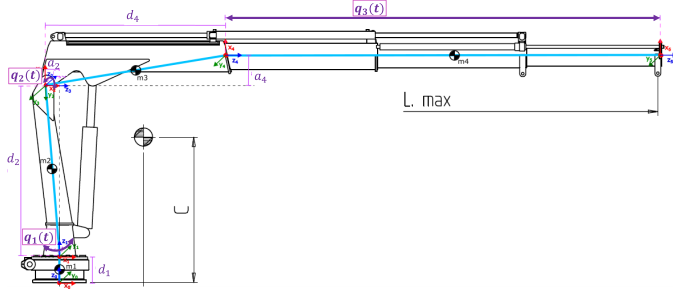


Figura 4: Principales dimensiones y grados de libertad de la grúa

3.1. Generación de trayectorias

El generador de trayectorias constituye la primera etapa del bucle de control y tiene como objetivo producir referencias articulares suaves que conduzcan al efector final hacia una posición deseada en el espacio cartesiano, minimizando la excitación dinámica del sistema. Los grados de libertad principales del manipulador se agrupan en el vector de estados articulares medidos

$$\mathbf{q}_{meas}(t) = [q_1(t) \quad q_2(t) \quad q_3(t)]^T \quad (1)$$

donde q_1 , q_2 y q_3 corresponden a la medición del ángulo de rotación, ángulo de elevación y longitud de extensión, respectivamente.

Dada una posición objetivo del efector final en el espacio cartesiano

$$\mathbf{p}_{ref} = [x_{ref} \quad y_{ref} \quad z_{ref}]^T \quad (2)$$

se obtiene una configuración articular objetivo \mathbf{q}^* resolviendo el problema de cinemática inversa mediante el método de Denavit-Hartenberg, $\mathbf{q}^* = \mathbf{f}^{-1}(\mathbf{p}_{ref})$. La solución obtenida se utiliza como referencia para la planificación del movimiento grueso, sin considerar efectos de flexibilidad estructural.

La planificación del movimiento se realiza de manera secuencial, evitando la activación simultánea de múltiples grados de libertad. A partir de la configuración inicial, la estrategia prioriza secuencias de movimiento que mantienen el brazo en una configuración lo más retraída posible antes de alcanzar la posición y orientación finales. Esta aproximación reduce los momentos generados por la masa del brazo y, por ende, la excitación de modos flexibles.

Para cada articulación i , el tiempo total de ejecución T_i se calcula en función de la distancia a recorrer y de una velocidad promedio máxima permitida,

$$T_i = \frac{|q_i^* - q_i(0)|}{\bar{v}_i} \quad (3)$$

donde $q_i(0)$ representa la posición articular inicial y \bar{v}_i la velocidad promedio deseada para la articulación i .

Las trayectorias articulares se generan mediante interpolación polinómica de quinto orden:

$$q_{i,ref}(t) = c_{i,0} + c_{i,1}t + c_{i,2}t^2 + c_{i,3}t^3 + c_{i,4}t^4 + c_{i,5}t^5, \quad t \in [t_i^{start}, t_i^{end}], \quad (4)$$

donde t_i^{start} y $t_i^{end} = t_i^{start} + T_i$ definen la ventana temporal de ejecución de la articulación i .

Los coeficientes $c_{i,j}$ se calculan de manera que se cumplan las siguientes condiciones de frontera:

$$\begin{aligned} q_{i,ref}(t_i^{start}) &= q_i(0), & \dot{q}_{i,ref}(t_i^{start}) &= 0, & \ddot{q}_{i,ref}(t_i^{start}) &= 0, \\ q_{i,ref}(t_i^{end}) &= q_i^*, & \dot{q}_{i,ref}(t_i^{end}) &= 0, & \ddot{q}_{i,ref}(t_i^{end}) &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Cada articulación ejecuta su movimiento de forma secuencial dentro de su ventana temporal. Esto asegura perfiles suaves y minimiza la excitación dinámica del manipulador.

3.2. Control grueso en espacio articular

En esta fase, el objetivo es asegurar que cada articulación siga su referencia de forma estable y robusta. Definiendo el vector de referencias articulares generado por el planificador como

$$\mathbf{q}_{ref}(t) = [q_{1,ref}(t) \quad q_{2,ref}(t) \quad q_{3,ref}(t)]^T, \quad (6)$$

el error articular se obtiene directamente como

$$\mathbf{e}_q(t) = \mathbf{q}_{ref}(t) - \mathbf{q}_{meas}(t). \quad (7)$$

El control se implementa utilizando un controlador PI independiente para cada uno de los tres grados de libertad principales. El ajuste de las ganancias de los controladores se realizó utilizando técnicas de control robusto. En particular, el proceso de ajuste se formuló desde una perspectiva de diseño H_∞ , considerando las oscilaciones estructurales del brazo, caracterizadas experimentalmente, como perturbaciones aditivas en la salida de cada articulación, así como la presencia de incertidumbre en los parámetros de los actuadores. A partir de esta formulación, se definieron funciones de sensibilidad y sensibilidad complementaria con el objetivo de atenuar la influencia de dichas perturbaciones en las bandas de frecuencia asociadas a los modos flexibles identificados experimentalmente.

De este modo, los parámetros de cada controlador PI fueron seleccionados para garantizar un compromiso adecuado entre rapidez de seguimiento, rechazo de perturbaciones y estabilidad robusta.

3.3. Control fino en espacio cartesiano

Una vez que el control grueso posiciona el brazo en las proximidades del objetivo y se detecta el barreno objetivo mediante el LIDAR, se activa un lazo de control fino en espacio cartesiano destinado a compensar los errores residuales debidos a diferencias entre el modelo cinemático ideal y el comportamiento real del sistema. Dado que la posición actual del cabezal está dada por:

$$\mathbf{p}_{\text{gps}}(t) = \begin{bmatrix} x_{\text{gps}}(t) & y_{\text{gps}}(t) & z_{\text{gps}}(t) \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

el error cartesiano se define como:

$$\mathbf{e} = \mathbf{p}_{\text{ref}} - \mathbf{p}_{\text{gps}} \quad (9)$$

Por simplicidad, en esta fase solo se consideran correcciones en el plano horizontal:

$$\mathbf{e}_{XY} = \begin{bmatrix} e_x & e_y \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

asumiendo $e_z = 0$.

Aunque el error se expresa en coordenadas cartesianas, la actuación se realiza sobre los grados de libertad articulares. Para ello, el error cartesiano se proyecta sobre las direcciones radial y tangencial asociadas a la posición instantánea del cabezal. Definiendo el vector radial:

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} x_{\text{gps}} \\ y_{\text{gps}} \end{bmatrix}, \quad r = \|\mathbf{r}\| \quad (11)$$

y los vectores unitarios asociados son:

$$\mathbf{u}_r = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} x_{\text{gps}} \\ y_{\text{gps}} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}_t = \begin{bmatrix} -u_{r_y} \\ u_{r_x} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Luego, la proyección del error cartesiano en coordenadas articulares equivalentes se puede representar como:

$$\Delta q_3 = e_x u_{r_1} + e_y u_{r_2} \quad (13)$$

$$\Delta q_1 = \frac{e_x u_{t_1} + e_y u_{t_2}}{r} \quad (14)$$

donde Δq_3 corresponde a la corrección requerida en extensión y Δq_1 a la corrección requerida en rotación.

Estas señales de error articular alimentan controladores PI independientes para los movimientos de rotación y extensión. Dichos controladores fueron ajustados siguiendo el mismo procedimiento que en el caso del control grueso.

3.4. Control Activo de Vibraciones

Debido a la flexibilidad estructural del manipulador, los movimientos de rotación y elevación pueden excitar modos de vibración dominantes, especialmente cuando el brazo se encuentra extendido. Con el fin de mitigar estas oscilaciones sin incrementar la complejidad del controlador en lazo cerrado, se implementó una técnica de *command shaping* aplicada a los movimientos articulares. En este trabajo se utilizó un filtro del tipo ZVD (Zero Vibration Derivative), definido por la secuencia de impulsos:

$$\text{ZVD} = \begin{bmatrix} A_j \\ t_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1+2K+K^2} & \frac{2K}{1+2K+K^2} & \frac{K^2}{1+2K+K^2} \\ 0 & T_d/2 & T_d \end{bmatrix} \quad (15)$$

donde

$$K = e^{-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}}, \quad T_d = \frac{2\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} \quad (16)$$

siendo ω_n la frecuencia natural dominante y ζ el coeficiente de amortiguamiento estimado experimentalmente.

Los parámetros necesarios para el diseño del filtro se obtuvieron a partir de ensayos experimentales realizados sobre el sistema real. La identificación de modos se realizó mediante análisis modal operacional y ensayos con martillo de impacto, midiendo la respuesta del cabezal mediante sensores inerciales.

Nº Seg.	Long. (m)	Y1	Y2	Z1	Z2
0	0.00	2.15	3.22	3.71	7.52
1	1.30	1.76	2.93	2.93	6.93
2	2.65	1.17	2.73	2.34	7.13
3	3.95	0.88	2.64	1.46	6.25
4	4.48	0.78	2.54	1.37	5.96

Tabla 1: Frecuencias de los modos de vibración dominantes (Hz.) identificados experimentalmente para distintas longitudes de brazo. Y1, Y2 se corresponden con el primer y segundo modos de vibración en la dirección horizontal; idénticamente, Z1 y Z2 se refieren a los dos primeros modos verticales

A partir de los resultados en la Tabla 1 y del análisis de la respuesta temporal del sistema, se seleccionaron los parámetros necesarios para el diseño de los filtros. Se tomó como referencia la frecuencia del primer modo de vibración correspondiente a la configuración de máxima longitud de brazo, al ser esta la condición más desfavorable desde el punto de vista dinámico.

Para el movimiento de rotación, se utilizó la frecuencia dominante identificada en el eje horizontal (Y), mientras que para el movimiento de elevación se empleó la frecuencia dominante asociada al eje vertical (Z). El coeficiente de amortiguamiento requerido para el diseño del filtro ZVD se estimó a partir de la respuesta temporal del sistema ante movimientos de rotación y elevación ejecutados a velocidad máxima, observando la envolvente de decaimiento de las oscilaciones residuales.

Finalmente, los filtros diseñados se implementan en serie con los controladores en lazo cerrado de rotación y elevación. La señal de referencia generada por los controladores PI se pasa primero por el filtro ZVD, de manera que la trayectoria final que sigue el efector reduce la excitación de los modos de vibración identificados. Esta configuración permite mantener la simplicidad de los controladores en lazo cerrado mientras se atenúan las oscilaciones estructurales, actuando únicamente como un preprocesamiento de la señal de control.

3.5. Caracterización curva voltaje/caudal

Si bien el manipulador hidráulico presenta una dinámica inherentemente no lineal, el ajuste de los controladores PI se realizó utilizando modelos linealizados simplificados, válidos en torno a los puntos de operación habituales. En particular, se consideró la dinámica de cada actuador en términos de posición y velocidad articular, asumiendo que su evolución puede representarse de forma lineal. Bajo esta hipótesis, la señal de control generada por los PI se interpreta como una referencia de velocidad del actuador, o, de manera equivalente, como una demanda de caudal hidráulico.

No obstante, la variable de control aplicada al sistema real corresponde al voltaje de accionamiento de las válvulas hidráulicas, cuya relación con el caudal es no lineal. Por este motivo, es necesario realizar una caracterización experimental de la curva voltaje/caudal mediante ensayos con el prototipo real. Se hizo una caracterización sobre la válvula de rotación a lo largo de todo su rango de operación. A partir de los datos obtenidos, se construyó una aproximación estática de dicha relación, empleada posteriormente para implementar su inversa dentro del esquema de control (Figura 5).

Esta compensación no lineal se aplica justo antes de la entrada a la planta, permitiendo que el diseño de los controladores PI se mantenga independiente de la no linealidad de la válvula, al tiempo que se preserva un comportamiento cercano al sistema real. La misma caracterización se implementó en el resto de los grados de libertad, asumiendo un comportamiento hidráulico equivalente entre actuadores.

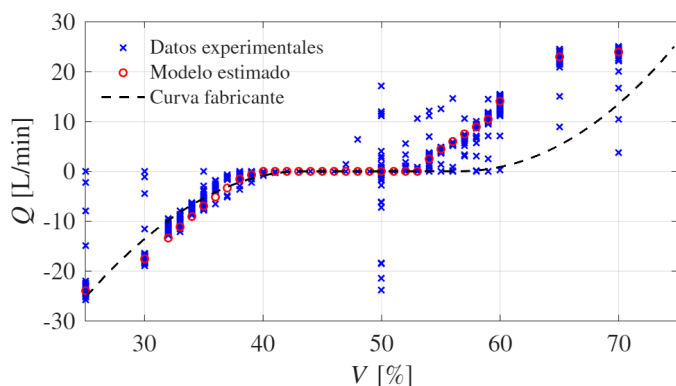


Figura 5: Curva característica de uno de los actuadores hidráulicos

4. Implementación y validación del esquema propuesto

En esta sección se describe la implementación en hardware del sistema de control, así como las pruebas de validación en el prototipo final.

4.1. Implementación en Hardware

Las pruebas funcionales se llevaron a cabo sobre el prototipo del camión equipado con el brazo robotizado, en un entorno controlado de ensayo. El sistema implementa la arquitectura mostrada en la Figura 6, donde el bucle de control completo se ejecuta en una unidad electrónica de control, programada en CODESYS.

La ECU recibe las mediciones de los sensores articulares del brazo, encargados de proporcionar la configuración del manipulador, así como la información de localización del sistema de referencia global. La detección del barreno se realiza mediante un sensor dedicado instalado en el cabezal de la grúa, mientras que la posición y orientación del conjunto camión-brazo se obtienen mediante un sistema GPS-RTK, con antenas montadas sobre la cabina y electrónica asociada ubicada en el cuadro eléctrico.

El control hidráulico se implementa directamente desde la ECU, que genera las señales de mando para las válvulas proporcionales. Un PC robótico industrial actúa como unidad de supervisión y soporte de alto nivel, mientras que la interfaz hom-

bre-máquina permite la monitorización y operación del sistema durante los ensayos.

La comunicación entre los distintos subsistemas se realiza mediante buses industriales CAN y Ethernet. Todo el conjunto se alimenta a través de una unidad de potencia dedicada integrada en el cuadro eléctrico, garantizando un suministro estable para los sensores y unidades de control.

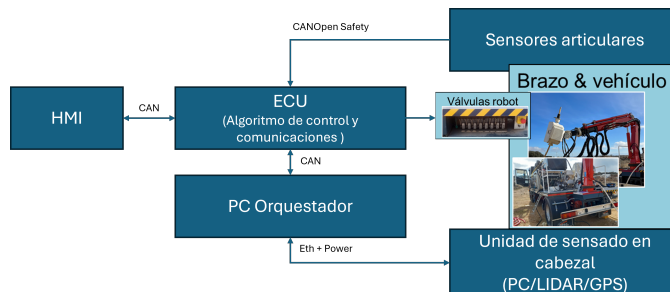


Figura 6: Arquitectura Hardware utilizada en la implementación final

4.2. Pruebas funcionales

El ensayo experimental se inicia desde una configuración inicial definida por el operador, con el manipulador situado en su posición *home*. A partir de esta condición, se selecciona el barreno objetivo mediante la interfaz de usuario, que proporciona la posición deseada del cabezal, p_{ref} (posición final aproximada).

Durante el intervalo inicial del ensayo (aprox. 0–30 s en Figura 7), se calculan las trayectorias articulares necesarias para mover el cabezal hacia la posición objetivo. En la Figura 7 se observan las trayectorias calculadas por el sistema, la evolución de las posiciones articulares, las señales de control demandadas durante el modo de control grueso, así como la evolución de la posición del cabezal medida por el GPS.

En esta prueba también se utiliza un mock-up de barreno (Figura 8, con el objetivo marcado con una *x*) para poder validar el correcto funcionamiento de todos los sistemas. Una vez que el cabezal se encuentra cercano al barreno, se activa el control fino (30s-42s en Figura 7) basado en medición directa del entorno. En este momento se actualiza la señal p_{ref} por la detectada del barreno (posición final real). Las diferencias entre la posición actual del cabezal y la posición detectada del barreno se utilizan para generar correcciones incrementales en el espacio cartesiano. Esta etapa asegura un posicionamiento final exacto, corrigiendo las desviación residuales.

5. Conclusiones

El presente trabajo describe una solución de automatización para maquinaria de grandes dimensiones con actuación hidráulica. El objetivo del sistema es el movimiento autónomo de una grúa en entornos mineros. La solución propuesta combina la integración de componentes industriales en el brazo, con algoritmos de monitorización, generación de trayectorias y control robusto. El sistema desarrollado ha sido implementado y probado en condiciones realistas con resultados positivos.

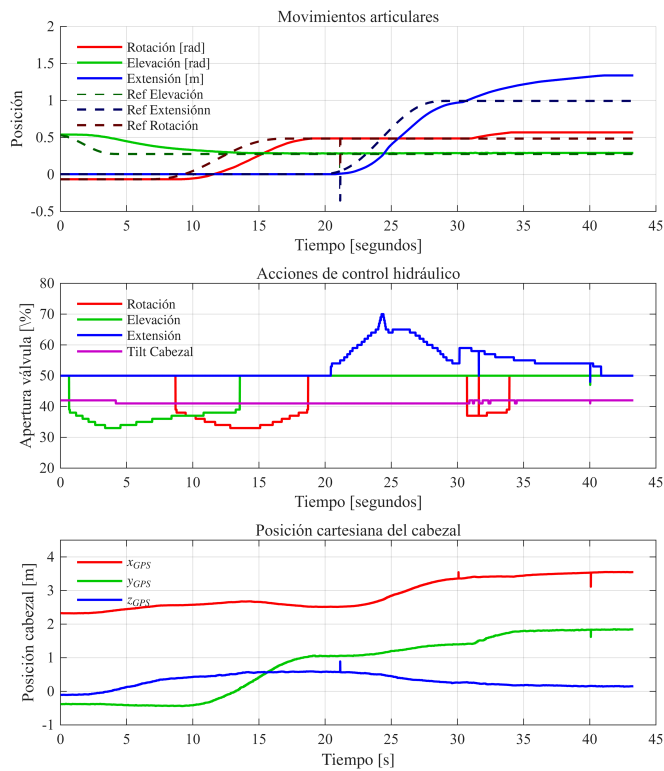


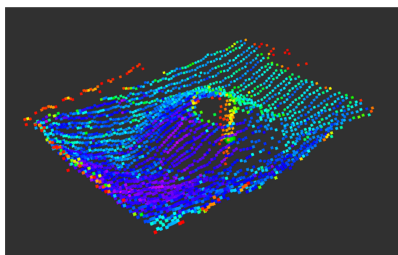
Figura 7: Detalle del seguimiento de trayectorias: posición en coordenadas articulares (arriba); apertura de las válvulas hidráulicas (centro); posición cartesiana del extremo de la grúa (abajo). Durante los primeros 30 s se aplica el modo de control grueso, mientras que a partir de $t = 30$ s se activa el modo fino.



a)



b)



c)

Figura 8: Entorno de ensayos: (a) posición inicial; (b) posición final; (c) nube de puntos láser obtenido de la posición final

Agradecimientos

El trabajo descrito en el presente artículo se ha realizado en el marco del proyecto "XMINENERGY:DESARROLLO EXPERIMENTAL DE SISTEMA DE CARGA INTELIGENTE DE EXPLOSIVOS PARA MINERÍA 4.0"(CPP2021-008981). La preparación de la publicación se ha realizado con el soporte de los Fondos Europeos para el Desarrollo Regional (FEDER) para la región de Aragón (España).

Referencias

Bonchis, A., Duff, E., Roberts, J., Bosse, M., 2014. Robotic explosive charging in mining and construction applications. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 11 (1), 245 – 250. DOI: 10.1109/TASE.2013.2241425

Conker, C., Yavuz, H., Bilgic, H. H., 2016. A review of command shaping techniques for elimination of residual vibrations in flexible-joint manipulators. *Journal of Vibroengineering* 18 (5), 2947 – 2958. DOI: 10.21595/jve.2016.16725

Duz, A., Negrello, F., Rucodainii, A., Lanzoni, D., Corsanici, M., Iapichino, A., Vitali, A., Regazzoni, D., Birolini, V., Signori, R., Ceresoli, R., Grioli, G., Bicchi, A., Catalano, M. G., 2024. From construction machines to remote construction robots: control, interfaces, and usability of the cranebot. *Frontiers in Robotics and AI* 11 (1504317). DOI: 10.3389/frobt.2024.1504317

Garcia-Perez, O., Silva-Navarro, G., Peza-Solis, J., 2019. Flexible-link robots with combined trajectory tracking and vibration control. *Applied Mathematical Modelling* 70, 285 – 298. DOI: 10.1016/j.apm.2019.01.035

Khorshid, E., Al-Fadhli, A., Alghanim, A., Baroon, J., 2020. Command shaping with reduced maneuvering time for crane control. *Journal of Vibration and Control* -, 1311–1323. DOI: 10.1177/1077546320940872

Koivumäki, J., Zhu, W.-H., Mattila, J., 2019. Energy-efficient and high-precision control of hydraulic robots. *Control Engineering Practice* 85, 176 – 193. DOI: 10.1016/j.conengprac.2018.12.013

Lima, J. J., Balthazar, J. M., Rocha, R. T., Janzen, F. C., Bernardini, D., Litak, G., Bassinello, D., Dailhane, G., Tusset, A. M., 2019. On positioning and vibration control application to robotic manipulators with a nonideal load carrying. *Shock and Vibration* 5408519. DOI: 10.1155/2019/5408519

Manring, N. D., Fales, R. C., 2020. *Hydraulic control systems*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken.

Mattila, J., Koivumäki, J., Caldwell, D., Semini, C., 2017. A survey on control of hydraulic robotic manipulators with projection to future trends. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 22, 669 – 680. DOI: 10.1109/TMECH.2017.2668604

Nan, F., Hutter, M., 2024. Learning adaptive controller for hydraulic machinery automation. *IEEE Robotics and Automation Letters* 9 (4), 3972 – 3979. DOI: 10.1109/LRA.2024.3372831

Nurmi, J., Mattila, J., October 2017. Automated feed-forward learning for pressure-compensated mobile hydraulic valves with significant dead-zone. In: *Proceedings of the ASME/BATH 2017 Symposium on Fluid Power and Motion Control*. ASME.

Pascal, E., Hutter, M., October 2020. Towards rl-based hydraulic excavator automation. In: *Proceedings of 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE.

Riboli, M., Manconi, E., Fusai, D., Silvestri, M., Aimi, A., 2023. Vibration minimisation of moving flexible slender structures based on time-parameterised b-spline. *Vibration* 6, 743 – 761. DOI: 10.3390/vibration6040046

Sahu, U. K., Patra, D., Subudhi, B., 2020. Vision-based tip position tracking control of two-link flexible manipulator. *IET Cyber-Syst. Robot.* 2, 53 – 66. DOI: 10.1049/iet-csr.2019.0035

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.

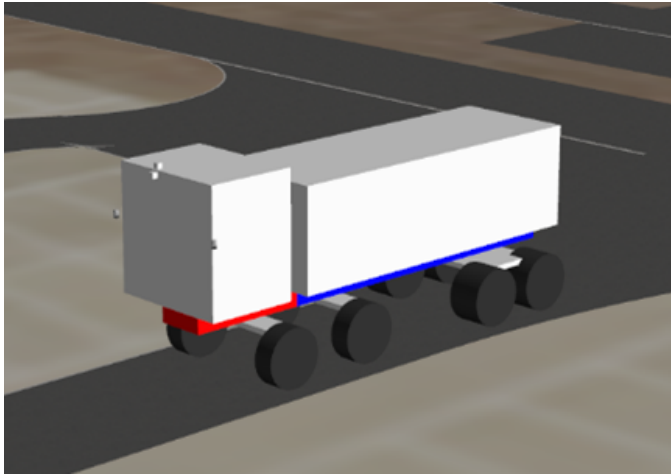


Figura 1: Modelo virtual del camión autónomo en Gazebo.

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.

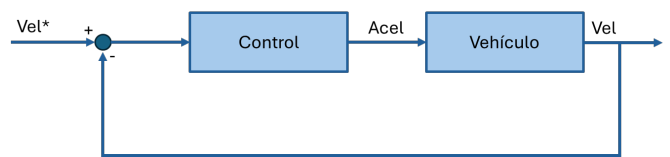


Figura 3: Esquema simplificado del control de velocidad longitudinal.

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 en 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:

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

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 :

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

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

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

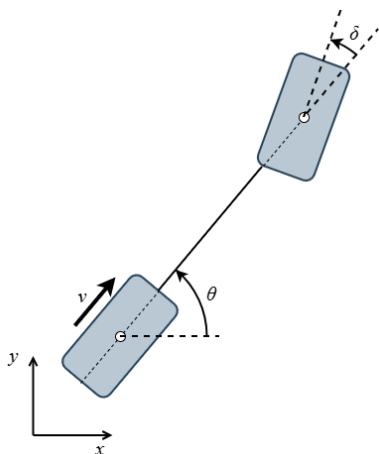


Figura 4: Modelo cinemático de tipo bicicleta.

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.).

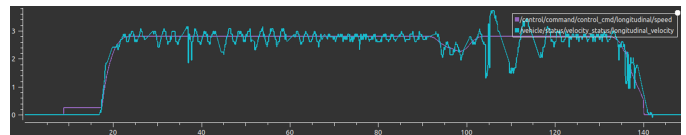


Figura 5: Curvas de velocidad en el eje vertical en [m/s], calculada por el planificador (morado, trazo recto) y alcanzada por el camión (azul), a lo largo del tiempo en el eje horizontal en [s].

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).

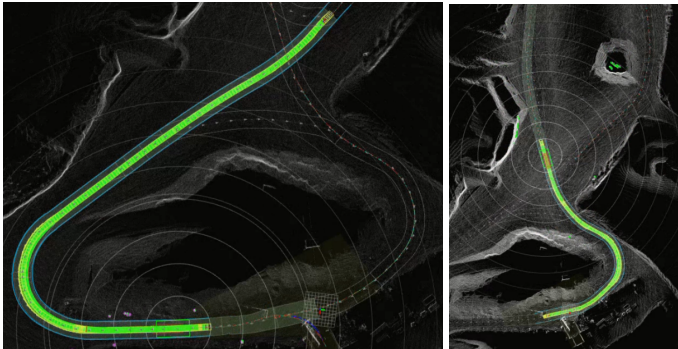


Figura 6: Rutas calculadas desde la zona de carga hasta la de descarga (izquierda) y viceversa (derecha).

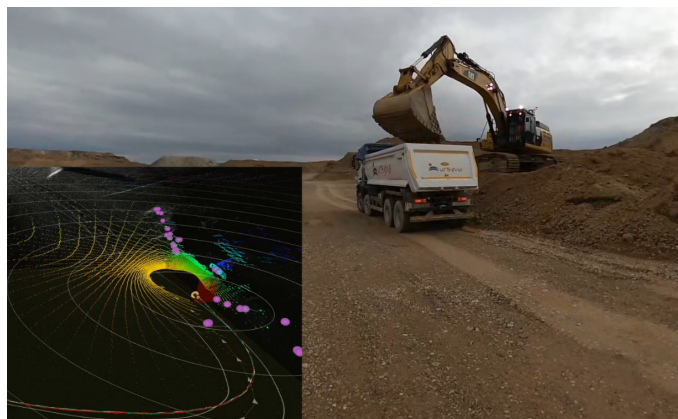


Figura 7: Carga del camión en modo autónomo con retroexcavadora.



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://gazebosim.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/>.



Servicio de Publicaciones
Universidad Zaragoza