

Jornadas de Automática

Enseñanza de robótica móvil en el Robotarium-UCM

Villar Galán, Diego^a, García Pérez, Lía^{a,*}, Chacón Sombría, Jesús^{a, **}

^aDepartamento de Arquitectura de Computadores y Automática, Universidad Complutense de Madrid (UCM),
Plaza de las Ciencias 1, 28040, Madrid, España.

To cite this article: Villar, Diego, García-Pérez, Lía, Chacón, Jesús. 2025. Teaching Multi-Agent Robotics in the Robotarium-UCM. Jornadas de Automática, 46. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2025.46.12223>

Resumen

Este artículo presenta una extensión de la plataforma Robotarium-UCM orientada a la enseñanza de robótica multiagente, mediante la integración de un sistema de comunicaciones distribuido basado en la librería 0MQ. La arquitectura propuesta se fundamenta en un servidor central que actúa como un conmutador lógico, permitiendo definir topologías de comunicación entre agentes a través de grafos dirigidos. Estas estructuras no solo permiten implementar interacciones flexibles y realistas entre robots, sino que reflejan directamente los modelos usados en teoría de consenso y control multiagente, facilitando el análisis de estabilidad mediante operadores como el laplaciano. La implementación de esta arquitectura ha permitido diseñar prácticas docentes más cercanas al estado del arte en investigación y desarrollo de sistemas cooperativos.

Palabras clave: Robótica, Sistemas robóticos autónomos, Robots móviles, Educación en Control, Sistemas multiagente.

Teaching Multi-Agent Robotics in the Robotarium-UCM

Abstract

This paper presents an extension of the Robotarium-UCM platform aimed at teaching multi-agent robotics through the integration of a distributed communication system based on the 0MQ library. The proposed architecture is built around a central server that acts as a logical switch, allowing the definition of virtual communication topologies between agents via directed graphs. These structures not only enable the implementation of flexible and realistic interactions between robots but also directly reflect the models used in consensus theory and multi-agent control, facilitating stability analysis through the Laplacian and similar tools. The implementation of this architecture has enabled the design of educational practices that are more closely aligned with the state of the art in cooperative systems research and development.

Keywords: Robotics, Autonomous robotic system, Mobile robots, Control education, Multiagent systems, Coordination of multiple vehicle systems.

1. Introducción

La robótica multiagente constituye un área clave en la formación de ingenieros en automatización y control (Mañas-Álvarez et al., 2023), con aplicaciones en logística, exploración cooperativa, robótica social y sistemas autónomos distribuidos. En el ámbito académico, es fundamental disponer de plataformas que permitan experimentar de forma accesible con algoritmos de consenso, cobertura, formación y otras ta-

reas distribuidas. El Robotarium-UCM (Figura 1) es una plataforma de robótica educativa desarrollada en la Universidad Complutense de Madrid (García-Pérez et al., 2023) que adapta el modelo del Robotarium original del Georgia Institute of Technology (Egerstedt et al., 2017), con el objetivo de facilitar la enseñanza práctica de algoritmos multiagente. Este entorno permite a los estudiantes programar y ejecutar estrategias cooperativas sobre un conjunto de robots reales, con garantías de seguridad y supervisión.

* Autor para correspondencia: liagar05@ucm.es

** Autor para correspondencia: jeschaco@ucm.es



Figura 1: Plataforma Robotarium-UCM.

Sin embargo, a medida que se abordan temas más avanzados en la teoría de sistemas distribuidos, surge la necesidad de modelar de manera precisa las restricciones de comunicación entre agentes, así como los efectos que dichas restricciones tienen sobre la dinámica global del sistema. En particular, la teoría de consenso y los sistemas multiagente heterogéneos requieren representar explícitamente las topologías de comunicación (Jin et al., 2022), que en muchos casos son dirigidas, asimétricas y cambiantes en el tiempo (Olfati-Saber et al., 2007; Ren and Beard, 2008).

La simulación de distintas topologías de red en un entorno educativo resulta fundamental para exponer al alumnado a escenarios de comunicación que, aunque comunes en la investigación y en aplicaciones reales, son difíciles de reproducir en entornos físicos controlados. Por ejemplo, situaciones como la pérdida parcial de conectividad entre agentes, la presencia de retardos en la transmisión de información o el despliegue de un gran número de robots distribuidos en áreas extensas, plantean desafíos técnicos y logísticos significativos. Al permitir la definición flexible de grafos de comunicación, el sistema propuesto facilita el estudio de estos fenómenos sin las limitaciones materiales o económicas de una implementación real, ofreciendo así una plataforma realista y accesible para comprender el impacto de la topología en el comportamiento colectivo y la estabilidad de sistemas multiagente.

Diversos trabajos recientes han abordado la simulación y análisis de sistemas multirrobot desde la perspectiva de la integración entre el control distribuido y las redes de comunicación. Propuestas como CORNET Acharya et al. (2020), SynchroSim Dey et al. (2022) o ROS-NetSim Calvo-Fullana et al. (2021) han desarrollado arquitecturas de co-simulación que combinan entornos físicos (como Gazebo) con simuladores de red (Mininet-WiFi, NS-3), permitiendo experimentar con diferentes topologías y condiciones de enlace de manera realista. En la misma línea, herramientas como BotNet Selden

et al. (2021) y SimGrid Casanova et al. (2008) destacan por su capacidad para representar redes dinámicas y evaluar su impacto en el comportamiento colectivo. Desde un enfoque más conceptual, revisiones como la de Milutinović y Rosen Milutinović and Rosen (2013) o estudios sobre arquitecturas MANET y protocolos geográficos Zhao and Tang (2020) subrayan la importancia de la comunicación como factor estructural en el diseño de algoritmos multiagente.

Motivados por estas necesidades, se ha desarrollado una extensión del Robotarium-UCM que incorpora un sistema de comunicaciones distribuido basado en la librería *ZeroMQ* (*ZeroMQ* community, 2025). Este sistema actúa como una capa de abstracción que permite definir redes virtuales de comunicación mediante grafos dirigidos. Cada agente se conecta a un servidor central que actúa como intermediario, permitiendo simular de forma precisa una topología de interacción específica. Esta arquitectura facilita la implementación y análisis de algoritmos inspirados en modelos matemáticos teóricos, brindando al estudiante una experiencia formativa completa que abarca desde la formulación teórica hasta la validación experimental.

En la Sección 2 se describe con detalle la arquitectura propuesta, en la Sección 3 las posibilidades de aplicación docente en cursos de robótica y finalmente en la Sección 4 las conclusiones y líneas de trabajo futuro.

2. Sistema de comunicaciones basado en 0MQ

En la arquitectura de comunicaciones previa del Robotarium-UCM García-Pérez et al. (2023) la única tipología de red permitida era la topología en estrella (Figura 2), con el switch recibiendo los mensajes de todos los agentes y enviándolos a todos los que lo solicitan. Para poder simular otro tipo de topologías de red ha sido necesario implementar un cambio en el sistema de gestión de los mensajes que permite tener en cuenta distintas topologías de red definidas.

La arquitectura desarrollada se basa en el uso de *ZeroMQ* (*ZeroMQ* community, 2025) como sistema de mensajería de alto rendimiento, en modo *publish/subscribe*, *push/pull* o *request/reply*, según el patrón requerido por el experimento o práctica docente. En el núcleo del sistema se encuentra un servidor central, que funciona como "switch lógico": una entidad intermedia que enruta los mensajes entre los agentes de acuerdo con una topología de comunicación virtual definida por un grafo dirigido.

Cada agente (robot físico o proceso simulado) se conecta al servidor mediante sockets 0MQ, y puede tanto enviar como recibir mensajes según las reglas definidas en el grafo. Estas topologías pueden ser modificadas dinámicamente y representan explícitamente la estructura de interacción que se desea estudiar: cadenas, anillos, árboles, grafos completos o estructuras dinámicas con enlaces que varían en el tiempo.

Este enfoque permite vincular directamente la implementación práctica con los modelos matemáticos clásicos de la teoría de consenso. Así, el comportamiento global del sistema puede analizarse mediante herramientas como el espectro del laplaciano, el grado de conectividad o las matrices de adyacencia, facilitando una comprensión profunda del impacto de la estructura de comunicación sobre la dinámica del sistema.

Desde un punto de vista más técnico, la arquitectura de comunicaciones propuesta se basa en la definición de una red

lógica de interacciones entre agentes, modelada mediante un grafo dirigido (Figura 3) en el que cada arista representa la posibilidad de comunicación desde un nodo origen a un nodo destino. Esta representación permite especificar de forma explícita y flexible la estructura de conectividad deseada para cada experimento, independientemente de la infraestructura física subyacente. Un enrutador implementado en el servidor de RobotariumUCM expone su funcionalidad a través de sockets XPUB/XSUB, de manera que las publicaciones y suscripciones de los agentes se realizan de forma semitransparente a estos, siendo el enrutador el encargado de filtrar o reenviar las comunicaciones en base al grafo de conexiones.

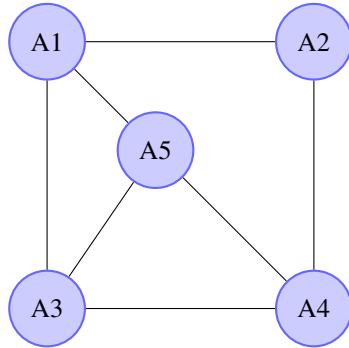


Figura 3: Grafo de conexiones entre agentes.

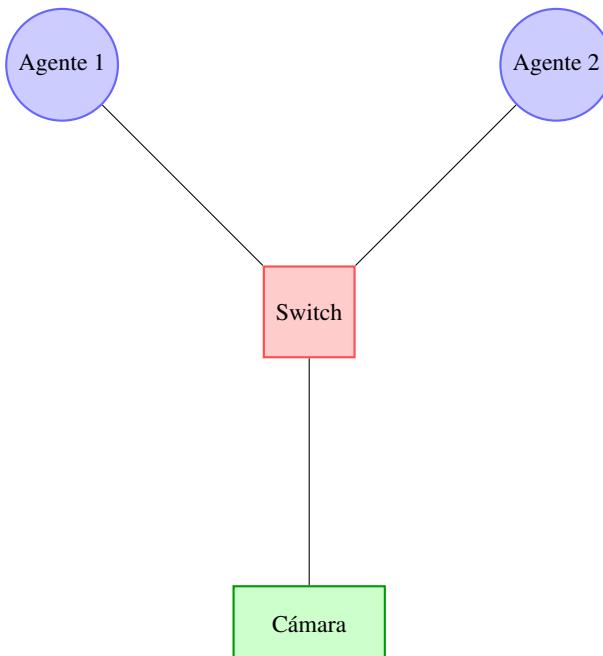


Figura 2: Topología en estrella: switch central con dos agentes robóticos y una cámara de posicionamiento.

En la práctica, todos los agentes se conectan a un servidor central en una topología física en estrella, que actúa como intermediario en la transmisión de mensajes. Sin embargo, gracias al uso del grafo dirigido, es posible construir una topología virtual dinámica y reconfigurable, donde se pueden simular de forma controlada distintos escenarios: enlaces unidireccionales o bidireccionales, grafos dispersos o completamente conectados, fallos temporales de comunicación, o incluso la evolución temporal del grafo como en entornos móviles o dinámicos.

Esta separación entre topología física (Figura 2) y topología lógica (Figura 3) se implementa de manera transparente para los agentes, que interactúan únicamente con el sistema de mensajería sin necesidad de conocer los detalles del enrute ni la configuración de red. Desde el punto de vista funcional, el sistema actúa de forma análoga a una red definida por software (Software Defined Network, SDN), en la que se separan claramente el plano de control y el plano de datos.

El plano de control se implementa mediante sockets con patrón request/reply, que permiten a los agentes y a los controladores externos consultar, modificar o monitorizar la topología virtual. Por otro lado, el plano de datos se construye utilizando el patrón extendido publicador/suscriptor (XPUB/XSUB) de 0MQ, que permite un enruteamiento eficiente y flexible de mensajes según las reglas impuestas por el grafo. Esta combinación habilita una plataforma potente y versátil para la experimentación con algoritmos de control distribuido y protocolos de comunicación multiagente en contextos académicos y de investigación.

3. Aplicaciones docentes

La nueva arquitectura ha permitido diseñar prácticas docentes orientadas a objetivos específicos del aprendizaje en sistemas distribuidos. Algunas de las actividades implementadas incluyen:

- Ejecución de algoritmos de consenso en media, con topologías cambiantes definidas por el docente o por los propios estudiantes.
- Formación de patrones geométricos (círculos, líneas, enjambres) mediante interacciones locales limitadas a los vecinos definidos por el grafo.
- Coordinación de tareas distribuidas como cobertura de áreas o seguimiento de trayectorias con redundancia.
- Evaluación experimental de la conectividad de la red y su influencia en la convergencia del sistema.

Estas prácticas han sido integradas tanto en asignaturas de grado como de posgrado, y se han utilizado como base para trabajos de fin de grado y máster. El nivel de abstracción alcanzado por la arquitectura permite que los estudiantes se centren en el diseño del algoritmo sin verse limitados por la infraestructura de comunicaciones.

Además, la posibilidad de modificar la topología de forma dinámica y controlada ha facilitado la formulación de experimentos relacionados con robustez, tolerancia a fallos, y evaluación de resiliencia frente a pérdidas de conectividad. Esto ha dado lugar a discusiones en el aula sobre la relación entre la estructura de la red y la estabilidad del sistema, fomentando una comprensión más profunda de los principios del control distribuido.

Desde el punto de vista pedagógico, la arquitectura también ha permitido adoptar metodologías activas como el aprendizaje basado en proyectos. Se han propuesto retos en los que los estudiantes deben diseñar, implementar y validar su propia estrategia multiagente, partiendo de una especificación funcional y estructural. La visualización en tiempo real del estado de los agentes y de la red ha reforzado el carácter interactivo y motivador de estas actividades.

Por último, la flexibilidad de la arquitectura ha hecho posible integrar simuladores de software con robots reales, facilitando una transición fluida entre etapas de prueba virtual y validación experimental. Esta continuidad ha contribuido a consolidar el aprendizaje y ha acercado al estudiante a los procesos reales de investigación en robótica distribuida.

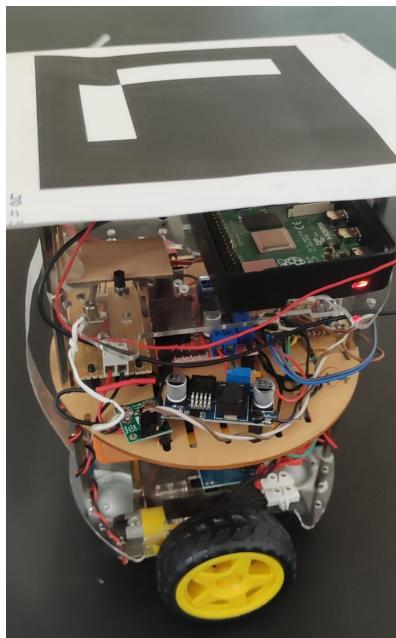


Figura 4: Robot

4. Ejemplos de Actividades

Entre los robots disponibles en el Robotarium-UCM, contamos con un conjunto de 5 unidades similares a la mostrada en la Figura 4. Estos robots constan de un Arduino Nano 33 IoT que implementa el control a bajo nivel, y una Raspberry PI que les dota de mayor capacidad de procesamiento y versatilidad en las comunicaciones. La plataforma admite una gran variedad de experimentos y actividades, a continuación ilustramos algunas posibilidades.

4.1. Cola de gusano

Una actividad sencilla pero interesante es la formación que llamamos *cola de gusano*, en la que un robot actúa de líder y otros dos tratan de seguirse a una distancia fija, formando así una línea. Se propone un escenario en el que los robots deben mantener una distancia de 0.2 m entre sí. El líder seguirá un trayectoria predefinida, por ejemplo un cuadrado dentro de los límites de la arena.

Los alumnos deben implementar el controlador del líder para que realice el seguimiento de la trayectoria especificada,

implementar el controlador de los seguidores para que mantengan la distancia con el robot al que siguen, y detectar las necesidades de comunicación y definir el correspondiente grafo de conexiones.

Una vez que han realizado estas actividades cabe la posibilidad de realizar variaciones, como por ejemplo desconectar, a partir de un tiempo determinado, las suscripciones del agente intermedio, para ver como afecta al funcionamiento de la formación.

4.2. Rendezvous

Todos los agentes deben moverse de forma cooperativa hasta encontrarse en un único punto común (Figura 5), usando solo información local o distribuida.

Los alumnos deben implementar el controlador de cada robot para que realicen el acercamiento al punto de encuentro. Con la ayuda de la arquitectura desarrollado, se simula la pérdida de conexión temporal entre algunos agentes, y se analiza el efecto en el sistema.

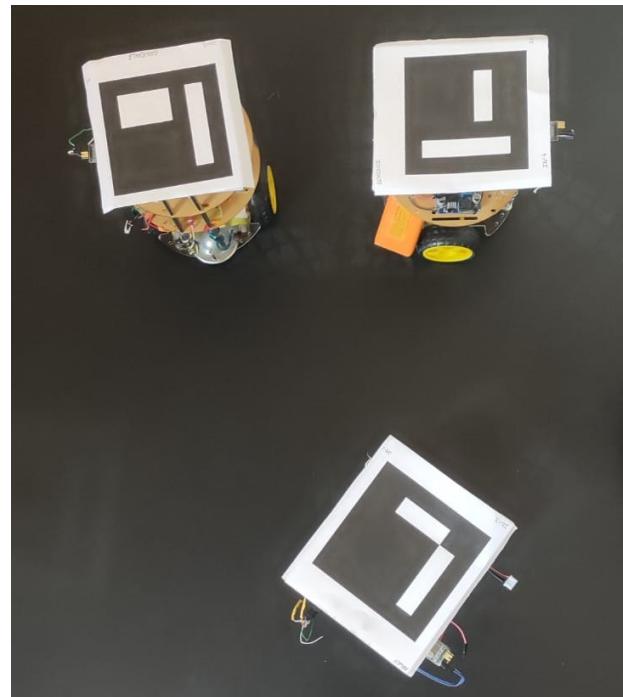


Figura 5: Experimento con tres robots.

5. Conclusiones y trabajo futuro

La extensión del Robotarium-UCM con una arquitectura de comunicaciones basada en 0MQ ha demostrado ser una herramienta eficaz para la enseñanza de sistemas multiagente. La posibilidad de modelar topologías de interacción mediante grafos dirigidos, vinculando la implementación práctica con los modelos matemáticos de la teoría de consenso, ha enriquecido significativamente la experiencia docente.

Como líneas futuras se propone:

- Integrar mecanismos de configuración dinámica de la topología a través de una interfaz web.
- Evaluar el impacto del enfoque en el aprendizaje mediante encuestas y análisis de resultados académicos.

- Explorar la integración con entornos como ROS 2 y otros marcos de desarrollo robótico distribuidos.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al apoyo de la Agencia Nacional en el proyecto PID2021-127648OB-C33, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033.

Referencias

- Acharya, S., Bharadwaj, A., Simmhan, Y., Gopalan, A., Parag, P., Tyagi, H., 2020. Comet: A co-simulation middleware for robot networks. In: 2020 International Conference on COMmunication Systems & NETworkS (COMSNETS). IEEE, pp. 245–251.
- Calvo-Fullana, M., Mox, D., Pyatyaev, A., Fink, J., Kumar, V., Ribeiro, A., 2021. Ros-netsim: A framework for the integration of robotic and network simulators. *IEEE Robotics and Automation Letters* 6 (2), 1120–1127.
- Casanova, H., Legrand, A., Quinson, M., 2008. Simgrid: A generic framework for large-scale distributed experiments, 126–131.
- Dey, E., Hossain, J., Roy, N., Busart, C., 2022. Synchrosim: An integrated co-simulation middleware for heterogeneous multi-robot system. In: 2022 18th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS). IEEE, pp. 334–341.
- Egerstedt, M., Reiss, J., Notomista, G., Schwager, M., Ames, A., 2017. The robotarium: A remotely accessible swarm robotics research testbed. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). pp. 1699–1706.
- García-Pérez, L., Sombría, J. C., Fontán, A. G., Castellanos, J. F. J., 2023. Collaborative construction of a multi-robot remote laboratory: Description and experience. In: International Conference on Robotics in Education (RiE). Springer, pp. 243–254.
- Jin, L., Qi, Y., Luo, X., Li, S., Shang, M., 2022. Distributed competition of multi-robot coordination under variable and switching topologies. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 19 (4), 3575–3586. DOI: 10.1109/TASE.2021.3126385
- Mañas-Álvarez, F.-J., Guinaldo, M., Dormido, R., Dormido, S., 2023. Robotic park: Multi-agent platform for teaching control and robotics. *IEEE Access* 11, 34899–34911.
- Milutinović, D., Rosen, P., 2013. Redundancy in Robot Manipulators and Multi-Robot Systems. Springer.
- 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.
- Ren, W., Beard, R. W., 2008. Distributed Consensus in Multi-vehicle Cooperative Control. Springer.
- Selden, M., Zhou, J., Campos, F., Lambert, N., Drew, D., Pister, K. S. J., 2021. Botnet: A simulator for studying the effects of accurate communication models on multi-agent and swarm control. In: 2021 International Symposium on Multi-Robot and Multi-Agent Systems (MRS). pp. 101–109. DOI: 10.1109/MRS50823.2021.9620611
- ZeroMQ community, 2025. ZeroMQ documentation. <https://zeromq.org/>, accessed: 2025-06-26.
- Zhao, X., Tang, J., 2020. Networking of multi-robot systems: Architectures and requirements. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 22 (4), 2765–2790.