ISSN: 1692-7257 - Volumen 1 – Número 47 - 2026

ORIGINAL

RCTA
Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada
UNIPAMPLONA

Caracterización y comisionamiento de una plataforma robótica móvil para aplicaciones orientadas a enjambres

Characterization and commissioning of a mobile robot platform for swarm-oriented applications

Ana Valentina Montañez Cuellar[1]
Hernán David Sánchez restrepo[1]
Yennifer Yuliana Ríos Diaz[1]

[1] **Universidad Industrial de Santander, Grupo de investigación de Diseño y Manufactura, Bucaramanga, Santander, Colombia.**

Recibido: 26 agosto 2025. Revisado: 26 octubre 2025. Aceptado: 20 diciembre 2025. Publicado: 01 enero 2026.
Autor de correspondencia: Hernán David Sánchez restrepo

Cómo citar: A. V. Montañez Cuellar and Y. Y. Ríos Diaz, "Caracterización y comisionamiento de una plataforma robótica móvil para aplicaciones orientadas a enjambres", *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA)*, vol. 1, no. 47, ene. 2026, art. no. 4152, doi: 10.24054/rcta.v1i47.4152

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0.

Resumen:

La detección precisa y el control fiable son esenciales para el funcionamiento de robots móviles autónomos en entornos restringidos. Este trabajo presenta la caracterización y puesta en marcha de una plataforma robótica móvil como etapa inicial hacia estrategias de localización de inventario basadas en enjambres. Los sensores infrarrojos, de luz y acústicos integrados fueron evaluados experimentalmente para determinar sus rangos operativos, sensibilidad ambiental y fiabilidad. Se implementó un controlador proporcional-derivativo y se calibró el sistema de detección de luz para mejorar la estabilidad de la navegación, mientras que un mecanismo acústico permitió la detección entre robots sin contacto físico. Los resultados evidencian que la combinación de caracterización exhaustiva y ajustes de control incrementa la robustez y el rendimiento del sistema, proporcionando una base sólida para la implementación futura de comportamientos de coordinación y agrupamiento en enjambre.

Palabras clave: robótica en enjambre, navegación autónoma, robots móviles.

Abstract:

Accurate sensing and reliable control are essential for the effective operation of autonomous mobile robots, particularly in constrained environments where navigation errors and detection failures can significantly affect performance. This work presents the characterization and commissioning of a mobile robot platform as a foundational stage toward swarm-based inventory localization strategies. The onboard infrared, light, and acoustic sensors were experimentally evaluated to determine their operational ranges, environmental sensitivity, and detection reliability. A Proportional-Derivative controller was implemented and tuned to enhance trajectory stability, while light-sensing calibration ensured robust operation under varying ambient illumination. Additionally, an acoustic detection mechanism was integrated to enable robot-to-robot detection without physical contact. Experimental results confirmed that thorough sensor characterization, combined with targeted control adjustments, improved navigation stability and detection robustness. These developments establish a solid technical basis for the subsequent implementation of swarm coordination and clustering behaviors in autonomous inventory localization applications.

Keywords: swarm robotics, autonomous navigation, mobile robots.

INTRODUCCIÓN

La gestión de inventarios desempeña un papel fundamental en las operaciones agrícolas, donde la logística de los almacenes influye directamente en la productividad, las ventas y la rentabilidad general[1]. A pesar de su importancia, mantener un control de inventario preciso y eficiente suele requerir una considerable inversión de recursos humanos y materiales. Problemas comunes, como la ubicación incorrecta de productos, la desorganización o un flujo ineficiente de pedidos, pueden ocasionar retrasos, entregas incompletas y pérdidas económicas significativas.

Los sistemas convencionales, incluidos los escáneres de códigos de barras y los mecanismos de transporte, han contribuido a mitigar algunos de estos inconvenientes; sin embargo, siguen siendo susceptibles a errores humanos y con frecuencia requieren modificaciones sustanciales en la infraestructura. En este sentido, se han propuesto enfoques más avanzados, como marcos basados en IoT, los cuales son pilares de las iniciativas de la Industria 4.0 y buscan incrementar la eficiencia en los procesos industriales[2].

La tecnología de Identificación por Radiofrecuencia (RFID) ha surgido como una solución más sofisticada, al permitir un seguimiento del inventario en tiempo real con mayor precisión[3]. Sin embargo, su elevado costo de implementación y la complejidad de su despliegue la hacen poco viable en contextos agrícolas rurales o de pequeña escala.

En respuesta a estas limitaciones, la investigación ha orientado sus esfuerzos hacia la robótica móvil como una alternativa flexible y escalable para la automatización de procesos de inventario. Los robots autónomos son capaces de desplazarse en entornos no estructurados con un mínimo de infraestructura y reducida intervención humana [4][5][6]. No obstante, la efectividad de estos sistemas depende en gran medida de sus capacidades de percepción y control, las cuales deben ser robustas, precisas y estar adaptadas a las características del entorno de trabajo.

Este artículo se centra en la caracterización y puesta en marcha de una plataforma robótica móvil de bajo costo, equipada con sensores infrarrojos, de luz y acústicos. Estos componentes son evaluados para garantizar su idoneidad en tareas de navegación en interiores e interacción dentro de un entorno controlado con forma de laberinto. El estudio constituye una etapa preparatoria hacia el desarrollo de estrategias de localización de inventarios basadas en enjambres.

Sobre esta base, los trabajos futuros incorporarán comportamientos colaborativos inspirados en algoritmos de agrupamiento, como BeeClust [7], en los que agentes autónomos convergen hacia estímulos ambientales sin necesidad de coordinación centralizada, ofreciendo ventajas en escalabilidad, robustez y eficiencia [8], [9].

METODOLOGÍA

Configuración experimental

Los experimentos se llevaron a cabo en un entorno controlado a escala de almacén, con el fin de simular condiciones reales. A diferencia de estudios previos que implementaron el algoritmo BeeClust, en los que los enjambres de robots operaban típicamente en espacios abiertos, en este caso se introdujo un entorno con forma de laberinto para evaluar el comportamiento de los robots bajo restricciones espaciales. En ambientes abiertos, los robots se desplazan aleatoriamente hasta encontrar un estímulo (por ejemplo, luz), respondiendo a los obstáculos mediante giros en ángulos aleatorios y deteniéndose temporalmente al detectar otro robot, guiados por la luminosidad percibida.

El área de prueba tuvo unas dimensiones aproximadas de 80 cm × 100 cm (véase Fig. 1), proporcionando espacio suficiente para la navegación de los robots, su interacción y la formación de agrupamientos alrededor de una fuente de estímulo designada, lo que aseguró condiciones experimentales controladas y reproducibles.



Fig. 1. *Arena.*
Fuente: elaboración propia.

La plataforma robótica utilizada en la experimentación fue el robot Formula AllCode, seleccionado por sus dimensiones compactas (10 cm × 10 cm), la integración de sensores y su adecuada maniobrabilidad para desplazarse en espacios restringidos.

El algoritmo BeeClust puede representarse como una máquina de estados finitos (FSM, por sus siglas en inglés). Una FSM es un modelo matemático utilizado en teoría de sistemas y automatización para describir el comportamiento de un sistema que puede existir en un número finito de estados y transitar entre ellos en respuesta a estímulos externos o condiciones internas. Cada estado representa una acción específica, y eventos o condiciones predefinidas desencadenan las transiciones entre estados. En este caso, la FSM organiza el comportamiento del robot en tres estados principales: FWD (avance), RTT (rotación/giro) y WAIT (espera) (véase Fig. 2).

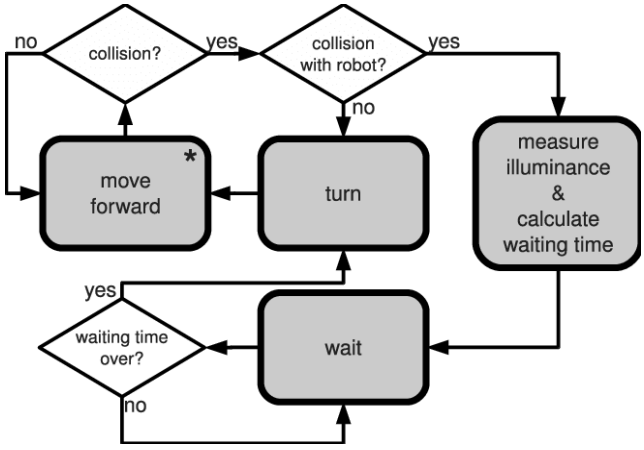

Fig. 2. *Máquina de estados finitos del algoritmo Beeclust.*
Fuente: [10]

En el estado FWD, el robot se desplaza a velocidad constante mientras escanea su entorno para evitar obstáculos. Al producirse una colisión, debe determinar si el obstáculo corresponde a una pared o a otro robot.

Si el obstáculo es una pared, el robot transita al estado RTT, donde selecciona un ángulo aleatorio y realiza un movimiento de rotación. Una vez completada la rotación, el robot regresa al estado FWD[11][12].

Si el obstáculo es otro robot, este ingresa al estado WAIT, en el cual permanece inactivo durante un tiempo proporcional a la intensidad de luz detectada en su posición, siguiendo la ecuación (1).

t_(wait)=t_(max⁡[fo]).(s^(2)(t))/(s^(2)(t)+θ)(1)

Donde$t_{\max}$ representa el tiempo máximo de espera,$s(t)$corresponde a la intensidad de luz percibida por el sensor yθes el parámetro que regula la pendiente de la curva.

Después del período de espera, el robot regresa al estado RTT. Es importante señalar que la detección de obstáculos solo se realiza en el estado FWD.

Descripción del robot

El Formula AllCode es una plataforma robótica diseñada para la experimentación en sistemas autónomos, seleccionada por su estructura compacta, los sensores integrados y su adaptabilidad a entornos controlados. Como se muestra en la Tabla 1, la plataforma está equipada con diversos sensores y actuadores que facilitan la percepción del entorno y la movilidad.

Tabla 1. Entradas y salidas del sistema de agrupamiento robótico

Tipo	Sensor/Actuador	Ubicación/Función
Entrada	8 sensores de distancia infrarrojos	Frente, izquierda, lateral izquierda, lateral derecha, derecha, trasera derecha, trasera, trasera izquierda
Entrada	Sensor de luz	Detección de luz ambiental
Entrada	Micrófono	Detección de sonido
Salida	Motor 1	Motor derecho
Salida	Motor 2	Motor izquierdo
Salida	Zumbador	Señal acústica

Fuente: Elaboración propia.

El microcontrolador dsPIC integrado gestiona todas las entradas de sensores y salidas de actuadores, procesando tanto señales analógicas como digitales. Genera comandos de modulación por ancho de pulso (PWM) para controlar los motores y se comunica con dispositivos externos. El robot fue programado en Python, aprovechando su legibilidad y el amplio soporte de

bibliotecas disponibles. La interacción entre el computador anfitrión y el robot se estableció mediante Bluetooth utilizando una Interfaz de Programación de Aplicaciones (API), lo que permitió la ejecución de comandos en tiempo real y el monitoreo del sistema durante los procedimientos experimentales.

Caracterización de sensores y control

Se realizaron una serie de pruebas experimentales bajo condiciones controladas con el fin de determinar el rango operativo y el comportamiento de respuesta de los sensores infrarrojos integrados en el robot Formula AllCode. Estos sensores están distribuidos alrededor del perímetro del chasis, conformando un disco de detección de 360 grados. Sin embargo, para este estudio únicamente se consideraron los sensores frontales, dado que la estructura en forma de laberinto del entorno experimental priorizaba la detección frontal de obstáculos.

El montaje experimental consistió en ubicar distintas superficies como papel de colores, cartón y materiales rugosos a distancias predefinidas frente a los sensores. La salida analógica fue registrada y posteriormente linealizada para estimar distancias aproximadas en milímetros. Todas las pruebas se llevaron a cabo bajo condiciones constantes de iluminación ambiental, con el fin de minimizar interferencias externas. Aunque el fabricante especifica un rango de salida en crudo de los sensores entre 0 y 4095 unidades, se prestó especial atención al comportamiento de la señal en distancias muy cortas, donde se observaron saturación y ruido.

Para complementar la caracterización de los sensores y permitir una navegación estable dentro del laberinto, se implementó un controlador Proporcional-Derivativo (PD) de uso exclusivo para el estado FWD (avance). Esta estrategia de control fue seleccionada por su simplicidad, estabilidad y rápida respuesta transitoria, características acordes con los requerimientos del montaje experimental, donde la acción integral no resultaba necesaria.

En la fase de movimiento hacia adelante, el controlador PD regulaba de manera continua la trayectoria del robot ajustando las salidas de los motores derecho e izquierdo de acuerdo con su desviación lateral respecto al centro del pasillo. La ley de control siguió la formulación discreta estándar del PD en el tiempo(2).

u(k)=K_(p)e(k)+K_(d)(e(k)−e(k−1))/(Δt)(2)

Donde$e(k)$es la señal de error, definida como la diferencia entre las lecturas de los sensores infrarrojos izquierdo y derecho, yΔtcorresponde al período de muestreo. El término derivativo fue aproximado mediante diferencias finitas. La ganancia proporcional$K_p$determina la magnitud de la respuesta frente al error, mientras que la ganancia derivativa$K_d$compensa las variaciones rápidas en$e(k)$, mejorando la estabilidad. Las ganancias del controlador fueron ajustadas experimentalmente mediante el método de Ziegler–Nichols, aplicando una secuencia de entradas escalón y observando la respuesta dinámica hasta alcanzar condiciones oscilatorias. La salida resultante del controlador se aplicó al sistema de tracción diferencial de acuerdo con(3).

$$V_L = V_{base} - u[k]$$

V_(R) = V_(base) − u[k](3)

Además del control PD, la función WAIT empleada para regular el comportamiento estacionario del robot en respuesta a un estímulo detectado fue modificada para considerar la luz ambiental. La implementación original asumía un entorno completamente oscuro($s(t)=0$); sin embargo, el espacio experimental presentaba una iluminación de fondo medible. Para evitar respuestas de agrupamiento falsas, se incorporó en la ecuación un valor de compensación de luz ambiental, obtenido mediante calibración, como umbral inferior de detección, véase(4).

t_(wait)=t_(max⁡ f0).((s(t)−offset)^(2))/((s(t)−offset)^(2)+θ)(4)

Este ajuste aseguró que los robots reaccionaran únicamente a la fuente de luz prevista, incluso bajo condiciones variables de iluminación ambiental.

Para complementar la detección basada en luz, la identificación entre robots se realizó mediante un sistema acústico que aprovechó el altavoz y el micrófono integrados en la plataforma. El altavoz emitió un tono de 392 Hz (nota G4) con una duración de dos segundos, mientras que el robot receptor midió los niveles de sonido correspondientes utilizando su micrófono. Se llevaron a cabo pruebas experimentales bajo diferentes configuraciones emisor-receptor incluyendo posiciones frontales, traseras y laterales con el fin de evaluar el impacto de la orientación relativa en la recepción de la señal. Estas mediciones se utilizaron posteriormente para establecer un umbral de detección que permitiera la identificación confiable de robots cercanos, minimizando al mismo tiempo los falsos positivos ocasionados por el ruido ambiental o las interferencias del entorno.

RESULTADOS

La caracterización de los sensores de distancia infrarrojos evidenció una clara influencia de las propiedades de la superficie en el desempeño de la detección. Como se muestra en la Fig. 3, las distancias máximas de detección variaron aproximadamente desde 35 mm para superficies rugosas y cartón, hasta cerca de 90 mm para superficies coloreadas como rojo, amarillo y verde. A distancias menores de 25 mm, las lecturas de los sensores se mantuvieron estables en torno a 3000 unidades, mientras que a distancias mayores la señal decayó progresivamente y presentó un incremento en el nivel de ruido.

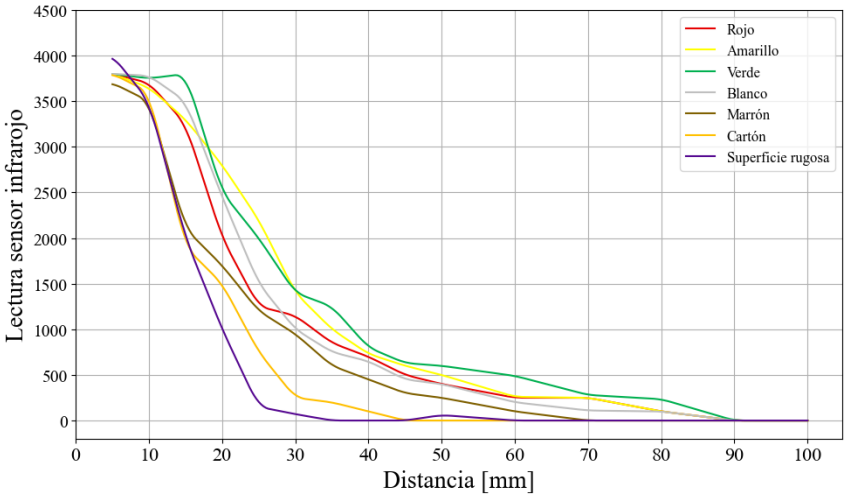

Fig. 3. *Rango sensor infrarrojo.*
Fuente: elaboración propia.

Con base en estas observaciones, se seleccionó una distancia de detección operativa confiable de 20 mm. Este valor asegura una detección de obstáculos consistente, reduce la variabilidad en las mediciones y favorece una navegación estable dentro del entorno tipo laberinto.

Una vez establecido el rango de detección, la atención se centró en la estrategia de control de movimiento del robot. La sintonización experimental mediante el procedimiento de Ziegler–Nichols resultó en ganancias de controlador deK_p=0.288yK_d=0.18. Con estos valores, el controlador PD mantuvo una navegación hacia adelante fluida y estable dentro del laberinto, minimizando de manera efectiva las colisiones con las paredes y reduciendo las oscilaciones en la trayectoria del robot. El sistema regresó de forma consistente al centro del pasillo después de las desviaciones, demostrando robustez en múltiples ensayos. La calibración del sistema de detección de luz arrojó un valor de compensación de 500 unidades. Este valor fue incorporado en la función WAIT de acuerdo con(5).

t_(wait)=t_(max[fo]).((s(t)−500)^(2))/((s(t)−500)^(2)+θ)(5)

La incorporación de este umbral permitió prevenir exitosamente activaciones falsas causadas por la iluminación de fondo, lo que garantizó que los robots respondieran únicamente al estímulo objetivo. Esta modificación resultó particularmente efectiva para mantener el desempeño de agrupamiento en condiciones donde la intensidad de la luz ambiental fluctuaba durante los experimentos.

Posterior a la calibración del sistema de detección de luz, se evaluó el sistema de detección acústica con el fin de determinar su efectividad en la identificación de robots cercanos. Las pruebas experimentales de detección sonora revelaron una variabilidad significativa en las lecturas de los micrófonos dependiendo de la posición relativa entre el robot emisor y el receptor. Como se muestra en la Tabla 2, los valores más altos se registraron cuando los robots estaban alineados frente a frente, mientras que las configuraciones que involucraban posiciones laterales o traseras resultaron en intensidades de señal más bajas. Entre todos los casos, las lecturas más bajas se observaron cuando el emisor se ubicó a la derecha del receptor, probablemente debido al desplazamiento angular y a la oclusión parcial. Con base en estos resultados, se estableció un umbral de detección de 918 unidades, proporcionando un equilibrio entre la sensibilidad a robots cercanos y la robustez frente al ruido ambiental.

Tabla 2. Lecturas del micrófono para diferentes posiciones relativas entre el robot emisor y el receptor.

Posición	Lecturas del sensor
Frente a frente	997, 1069, 1012, 1047, 998
Emisor detrás del detector	954, 1079, 1112, 978, 1114
Emisor en el lado izquierdo	977, 1188, 994, 910, 991
Emisor en el lado derecho	938, 1000, 1255, 812, 906

Fuente: Elaboración propia.

DISCUSIÓN

Los resultados demuestran que la caracterización de los sensores y la adaptación del algoritmo BeeClust permitieron un comportamiento de agrupamiento eficiente en entornos controlados con restricciones espaciales. Establecer el rango de detección infrarrojo en 20 mm y calibrar el sistema de detección de luz con un umbral de 500 unidades redujo significativamente las activaciones falsas. Estas mejoras en el desempeño, logradas mediante ajustes específicos de parámetros, son consistentes con estudios previos que muestran cómo variaciones controladas como cambios en la velocidad o en el tiempo de espera pueden mejorar la eficiencia del algoritmo BeeClust[9].

En cuanto al control de movimiento, la implementación de un controlador PD optimizado permitió una navegación estable y centrada a lo largo de los pasillos, reduciendo de manera efectiva las colisiones y las oscilaciones. Este enfoque coincide con trabajos previos en los que se aplicaron estrategias de control específicas y calibración de sensores para asegurar un seguimiento preciso de trayectorias y minimizar desviaciones en sistemas basados en BeeClust[12].

La integración de un sistema de detección acústica en nuestra plataforma basada en BeeClust constituye una innovación distintiva frente a las versiones clásicas del algoritmo, que tradicionalmente dependen de colisiones táctiles o estímulos luminosos para el agrupamiento. El sistema demostró alta fiabilidad en posiciones frontales; sin embargo, su menor sensibilidad en los laterales y la parte trasera resalta la necesidad de mejoras, como el uso de arreglos de micrófonos o algoritmos de filtrado espacial, que incrementen la robustez bajo condiciones de orientación variable.

Estudios previos han explorado el uso de fuentes sonoras como estímulos ambientales para comparar BeeClust con estrategias de agregación basadas en señales alternativas[9]; no obstante, estas implementaciones empleaban el sonido únicamente como un estímulo global, sin incorporar técnicas avanzadas de detección acústica direccional. En contraste, nuestro enfoque aprovecha un módulo de detección sonora frontal un principio bien establecido en la localización de fuentes acústicas mediante arreglos de micrófonos en robots móviles[13]para activar comportamientos BeeClust y permitir la interacción basada en proximidad sin contacto físico. Si bien el sistema alcanzó una detección frontal confiable, la menor sensibilidad en los laterales y la parte trasera sugiere que la incorporación de un arreglo completo de micrófonos, como se ha explorado en la navegación cooperativa de enjambres acústicos[14], podría mejorar la conciencia direccional y la robustez bajo condiciones de orientación variable. Este avance resalta el potencial de integrar la percepción multimodal en los algoritmos de enjambre, abriendo el camino hacia comportamientos colectivos más versátiles y resilientes en entornos complejos y dinámicos.

CONCLUSIONES

La evaluación experimental de los sensores a bordo confirmó que las propiedades de la superficie influyen en el desempeño de la detección por infrarrojo, lo que permitió definir un rango operativo óptimo para garantizar una detección de obstáculos estable y consistente.

La implementación y ajuste del controlador PD resultó en una navegación más fluida y estable, reduciendo significativamente las colisiones y oscilaciones dentro del entorno tipo laberinto. La calibración del sistema de detección de luz demostró ser eficaz para filtrar la iluminación ambiental, evitando activaciones falsas y mejorando la fiabilidad de las respuestas basadas en estímulos.

La integración de un sistema de detección acústica potenció aún más las capacidades sensoriales de la plataforma al permitir la detección entre robots sin contacto físico. Si bien la detección frontal mostró una alta fiabilidad, el menor desempeño de las configuraciones laterales y traseras resalta oportunidades de mejora en futuros diseños.

En conjunto, la caracterización y puesta en marcha de la plataforma de robot móvil mejoran de manera significativa el rendimiento y la robustez del sistema en entornos restringidos, estableciendo una base técnica sólida para futuras implementaciones de comportamientos de coordinación y agrupamiento en enjambres orientados a aplicaciones de localización de inventarios.

REFERENCIAS

[1] P. N. Hutapea and M. Siallagan, “Predictive Analysis for Inventory Management of Coconut Warehouse (Case Study: Banio Lahewa),” *International Journal of Current Science Research and Review*, vol. 06, no. 11, Nov. 2023, doi: 10.47191/ijcsrr/V6-i11-44.

[2] N. S. Sandoval Carrero, N. M. Acevedo Quintana, and L. M. Santos Jaimes, “LINEAMIENTOS DESDE LA INDUSTRIA 4.0 A LA EDUCACIÓN 4.0: CASO TECNOLOGÍA IoT,” *REVISTA COLOMBIANA DE TECNOLOGIAS DE AVANZADA (RCTA)*, vol. 1, no. 39, pp. 81–92, Jul. 2023, doi: 10.24054/rcta.v1i39.1379.

[3] A. A. Ali, R. A. Rashid, N. M. Abdikadir, A. A. Mohamed, and M. M. Ahmed, “IoT Based Warehouse Management System Leveraging On RFID and Cloud Platform Technologies,” in 2024 IEEE International Conference on Advanced Telecommunication and Networking Technologies (ATNT), IEEE, Sep. 2024, pp. 1–4. doi: 10.1109/ATNT61688.2024.10719252.

[4] V. Casamayor-Pujol, M. Morenza-Cinos, B. Gastón, and R. Pous, “Autonomous stock counting based on a stigmergic algorithm for multi-robot systems,” *Comput Ind*, vol. 122, p. 103259, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.compind.2020.103259.

[5] M. Vogrin, M. Stefanec, and T. Schmickl, "Social Distancing in Robot Swarms: Modulating Exploitation and Exploration Without Signal Exchange," in 2020 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI), IEEE, Dec. 2020, pp. 2233–2240. doi: 10.1109/SSCI47803.2020.9308502.

[6] T. Schmickl et al., "Get in touch: cooperative decision making based on robot-to-robot collisions," *Auton Agent Multi Agent Syst*, vol. 18, no. 1, pp. 133–155, Feb. 2009, doi: 10.1007/s10458-008-9058-5.

[7] S. Kernbach, R. Thenius, O. Kernbach, and T. Schmickl, "Re-embodiment of Honeybee Aggregation Behavior in an Artificial Micro-Robotic System," *Adaptive Behavior*, vol. 17, no. 3, pp. 237–259, Jun. 2009, doi: 10.1177/1059712309104966.

[8] L. Bayındır, "A review of swarm robotics tasks," *Neurocomputing*, vol. 172, pp. 292–321, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.neucom.2015.05.116.

[9] F. Arvin, A. E. Turgut, F. Bazyari, K. B. Arikan, N. Bellotto, and S. Yue, "Cue-based aggregation with a mobile robot swarm: a novel fuzzy-based method," *Adaptive Behavior*, vol. 22, no. 3, pp. 189–206, Jun. 2014, doi: 10.1177/1059712314528009.

[10] M. Bodi, R. Thenius, T. Schmickl, and K. Crailsheim, "How Two Cooperating Robot Swarms Are Affected by Two Conflictive Aggregation Spots," 2011, pp. 367–374. doi: 10.1007/978-3-642-21314-4_46.

[11] O. Acevedo, Y. Y. Rios, J. Duque, E. Gomez, and L. García, "A Software for Simulating Robot Swarm Aggregation," 2022, pp. 386–399. doi: 10.1007/978-3-031-20611-5_32.

[12] O. Acevedo, Y. Y. Rios, L. Garcia, and D. Narvaez, "A study of the Beeclust algorithm for robot swarm aggregation," in 2022 IEEE International Conference on Machine Learning and Applied Network Technologies (ICMLANT), IEEE, Dec. 2022, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICMLANT56191.2022.9996514.

[13] J.-M. Valin, F. Michaud, J. Rouat, and D. Letourneau, "Robust sound source localization using a microphone array on a mobile robot," in Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003) (Cat. No.03CH37453), IEEE, pp. 1228–1233. doi: 10.1109/IROS.2003.1248813.

[14] M. Itani, T. Chen, T. Yoshioka, and S. Gollakota, "Creating speech zones with self-distributing acoustic swarms," *Nat Commun*, vol. 14, no. 1, p. 5684, Sep. 2023, doi: 10.1038/s41467-023-40869-8.

FINANCIACIÓN

Ninguna

CONFLICTOS DE INTERÉS

No existen

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Redacción - borrador original: Ana Valentina Montañez Cuellar, Hernán David Sánchez restrepo, Yennifer Yuliana Ríos Diaz.

Redacción - revisión y edición: Ana Valentina Montañez Cuellar, Hernán David Sánchez restrepo, Yennifer Yuliana Ríos Diaz.