

ENJAMBRES ROBÓTICOS: INSPIRADOS EN LA **NATURALEZA**

Gerardo Loreto Gómez

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Uruapan
Contacto: gerardo.lg@uruapan.tecnm.mx

ENJAMBRES ROBÓTICOS: INSPIRADOS EN LA NATURALEZA

La naturaleza siempre ha sido fuente de inspiración para el desarrollo científico y tecnológico, la interacción social de los enjambres de insectos, colonias de hormigas, bandadas de aves y cardúmenes de peces por mencionar algunos, han asombrado al ser humano por su capacidad para trabajar colaborativamente. Desde las hormigas que construyen complejas estructuras hasta las abejas que se comunican a través de danzas, estos seres han sido la inspiración detrás de lo que actualmente se conoce como la robótica de enjambre. Este enfoque innovador busca mejorar la eficiencia y la adaptabilidad de los robots mediante la aplicación de principios que han evolucionado a lo largo de millones de años en la naturaleza. La clave para el éxito de estos sistemas radica en los métodos de control que permiten la coordinación eficiente y la toma de decisiones colectiva. En este artículo, nos sumergiremos en este emocionante universo tecnológico explorando cómo estas creaciones están redefiniendo la forma en que entendemos la inteligencia colectiva y para comprender cómo estos enjambres robóticos pueden transformar diversas áreas de nuestras vidas.

Palabras clave: robótica, enjambres.



PRINCIPIOS FUNDAMENTALES

Los enjambres en la naturaleza exhiben un asombroso grado de coordinación y cooperación entre individuos aparentemente simples. Por ejemplo, las hormigas trabajan juntas para construir complejos sistemas de túneles, las aves vuelan en formaciones sincronizadas y los peces ajustan su dirección de manera colectiva [1]. Estas formas de comportamiento han inspirado a los ingenieros a

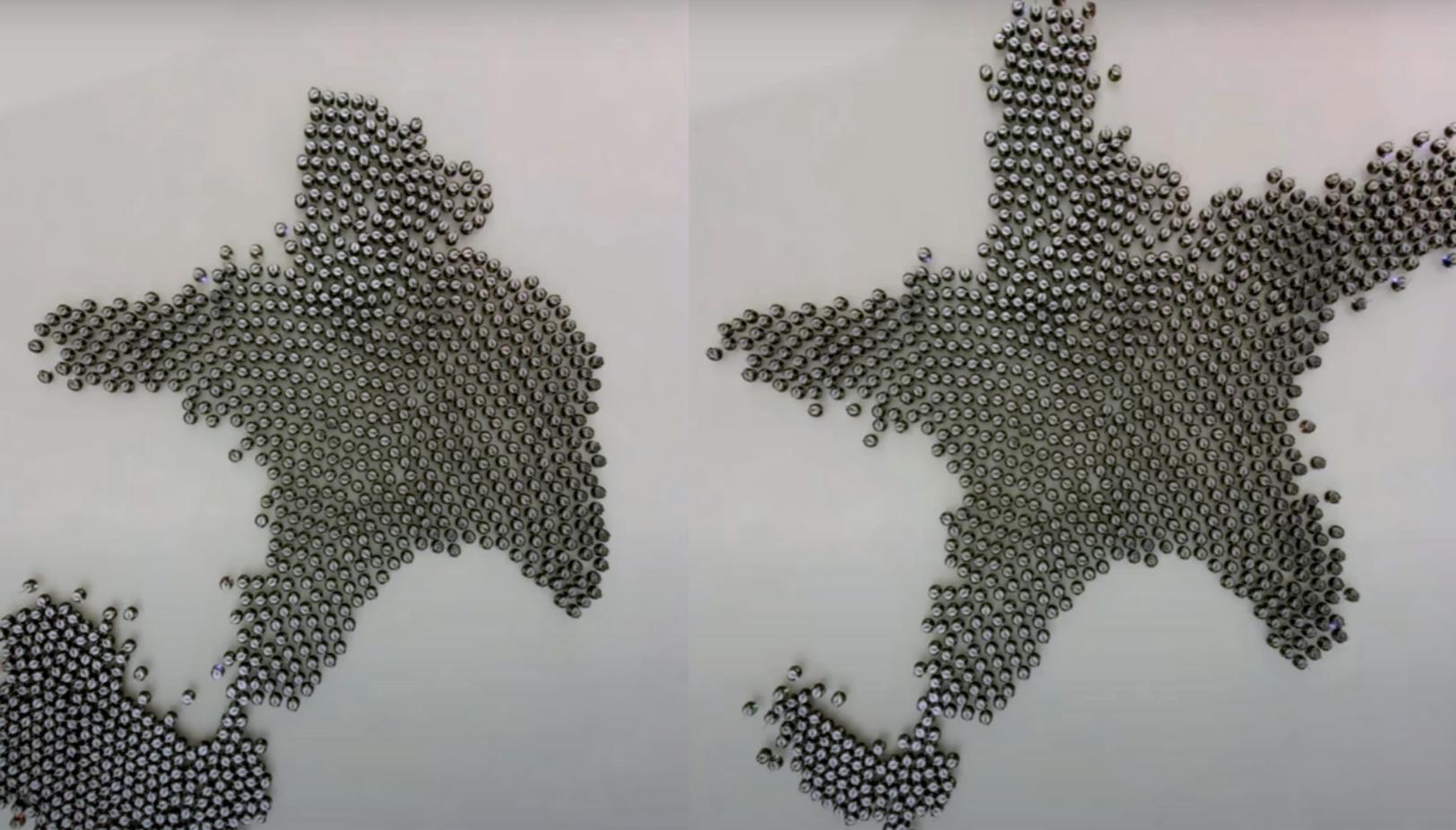


Figura 1. Enjambre robótico desarrollando formas geométricas. Obtenida de: Rubenstein, et al. 2014 [11]

diseñar sistemas robóticos aéreos, terrestres y acuáticos que puedan trabajar de manera similar, logrando tareas complejas de manera eficiente y adaptable [2]. La robótica de enjambre es una nueva aproximación a la coordinación de un gran número de robots relativamente simples (Figura 1). De manera que estos robots pueden llevar a cabo tareas colectivas que están fuera de las capacidades de un único robot. Para comprender cómo la ingeniería utiliza este conocimiento sobre el comportamiento de los enjambres presentes en la naturaleza veamos algunos conceptos claves [3].

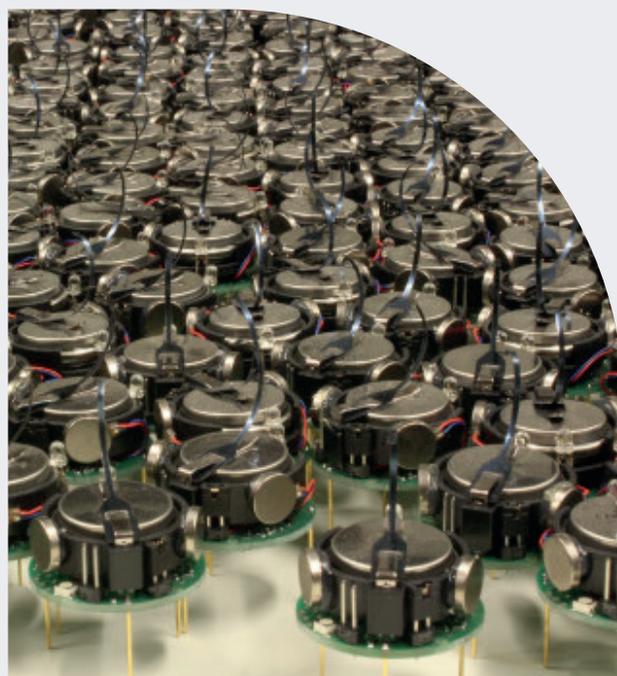
DESCENTRALIZACIÓN: EL PODER DE LA INDEPENDENCIA

En la naturaleza, pareciera que existiera un agente dentro del enjambre que recopila, monitorea y supervisa el comportamiento colectivo de los miembros. Sin embargo, en la realidad los enjambres no dependen de una entidad central para la toma de decisiones. Ahora sabemos que un solo individuo no es capaz de evaluar una situación global, centralizar la información sobre el estado del enjambre y controlar las tareas que realizarán los integrantes. No existe supervisores, cada individuo contribuye al comportamiento colectivo actuando de manera autónoma basándose en simples comportamientos resultado de la información procedente de su entorno [1]. Por ejemplo, las hormigas son criaturas fascinantes que viven en colonias con un alto nivel de organización, cada hormiga desempeña una función concreta, están organizadas en dos grupos principales: las hormigas reinas y las obreras. La hormiga reina, pese a recibir este nombre, no dirige la colonia, es únicamente responsable de la reproducción de la colonia. Por otro lado, las hormigas obreras, sin un líder central, trabajan juntas para lograr hazañas increíbles, como construir hormigueros gigantescos y recolectar comida. ¿Cómo lo hacen?, la clave está en la descentralización, en un hormiguero nadie tiene información de lo que está pasando a nivel global, los individuos solo manejan información de lo que está pasando a nivel local, los individuos solo manejan información local contribuyendo así al comportamiento colectivo [4].

Este principio de descentralización se ha convertido en una piedra angular en la robótica de enjambre. Los robots, equipados con sensores sofisticados, toman decisiones locales basadas en reglas simples de comportamiento en función de la información que obtienen de su entorno inmediato, lo que permite una adaptabilidad y resiliencia extraordinarias frente a cambios no planificados [5].



Figura 1. Imagen obtenida de https://media.licdn.com/dms/image/v2/C5612AQHq8Yvgwo8-AA/article-cover_image-shrink_720_1280/article-cover_image-shrink_720_1280/0/1623136034331?e=1729123200&v=beta&t=yTQbLS9IOYldR8NVcu0ioe2dPuEbo5JnHpzklPOnuXY



COMUNICACIÓN LOCAL: EL SECRETO DE LA COLABORACIÓN EFECTIVA

Detrás de esta “organización sin un organizador”, existen varios mecanismos que permiten a los enjambres naturales afrontar situaciones inciertas y encontrar soluciones a problemas complejos únicamente con la información de su entorno. Retomando el ejemplo de las hormigas, estas se comunican entre sí mediante el uso de feromonas que son sustancias químicas que atraen a otras hormigas. Si una hormiga encuentra una fuente de alimento, regresará al hormiguero dejando un rastro de feromonas, este sendero guiará a otras obreras hacia la fuente de alimento, cuando otras hormigas sigan el sendero y regresen depositarán su propia feromona reforzando el camino. Por lo tanto, mientras más hormigas usen un sendero, más atractivo se vuelve para otras hormigas, por supuesto, el rastro desaparecerá después

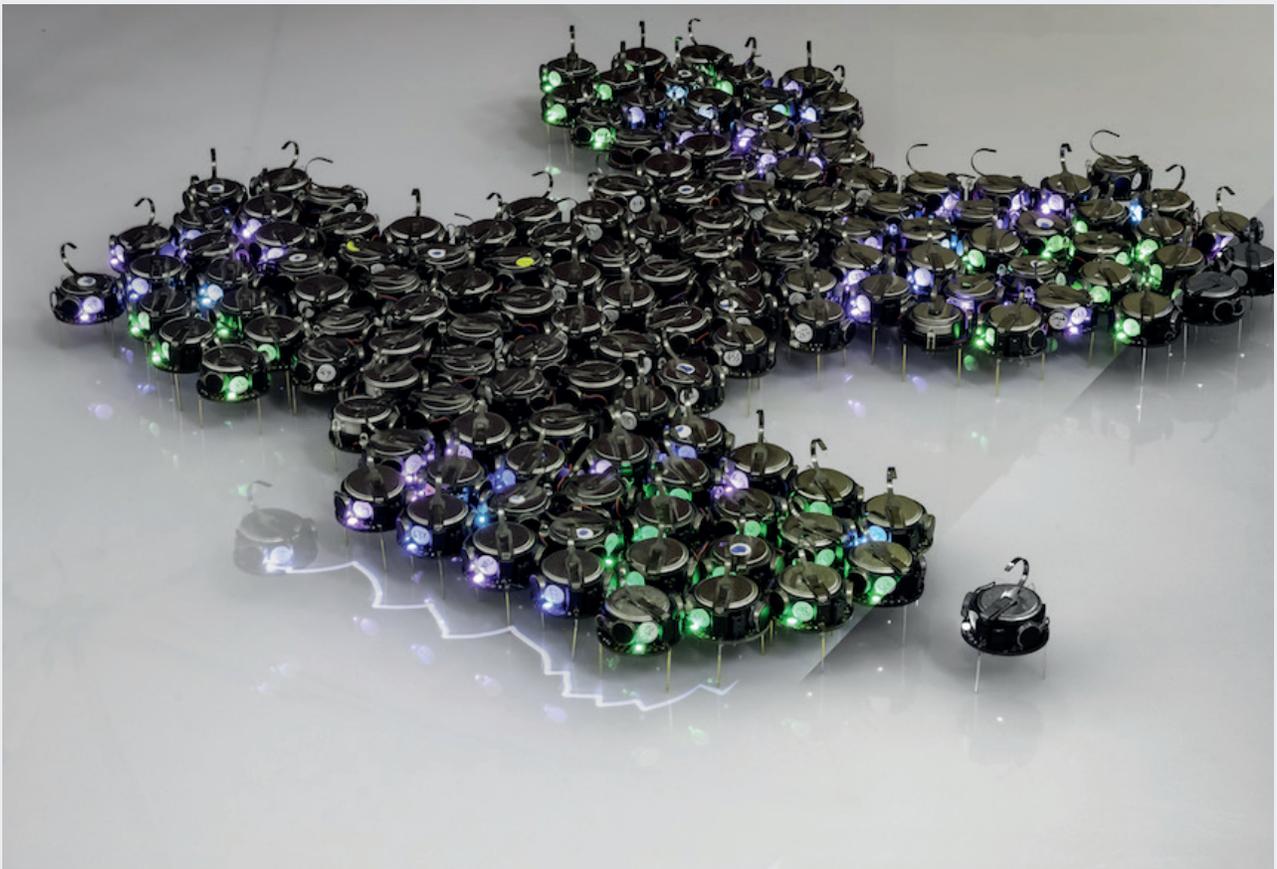


Figura 3. Obtenida de <https://www.dereumlabs.com/global/wp-content/uploads/2022/06/Swarm-Robots.jpg>

de un tiempo si el refuerzo mediante feromonas es demasiado lento, este tipo de comportamiento no solamente permite reunir un gran número de recolectores para una fuente de alimento, sino además, es utilizado para tomar decisiones eficientes, como la selección del camino más corto que conduzca a la fuente de alimento. Por lo tanto, cualquier restricción que modifique la concentración de rastros en un sendero puede hacer que ese camino pierda o gane la competencia por otro. Las decisiones se realizan sin ninguna regulación del comportamiento individual y ningún procesamiento cognitivo sofisticado a nivel individual, sino únicamente a través de la información local que perciben los integrantes de la colonia [4]. En la robótica de enjambre, esta lección se traduce en la necesidad de establecer canales de comunicación eficientes entre los robots. A través de la transmisión de información en tiempo real, los robots pueden coordinarse para lograr objetivos comunes. Este intercambio de datos no solo implica la posición y velocidad de cada robot, sino también información sobre el entorno y posibles obstáculos basados en esta información se establecen reglas simples de comportamiento individual [6].





Figura 4. Obtenida de https://www.freepik.es/foto-gratis/helicoptero-drone-volando-camara-digital_11179239.htm#fromView=search&page=2&position=21&uuid=29f74173-bd7a-49c9-be3b-8f40a835211d

ALGORITMOS DE ENJAMBRE: IMITANDO LA INTELIGENCIA COLECTIVA

La inteligencia colectiva exhibida por enjambres naturales ha sido traducida en un conjunto de pasos y reglas simples conocidos como algoritmos, que buscan replicar su comportamiento. Por ejemplo, uno de los primeros algoritmos propuestos se conoce como “optimización por enjambre de partículas” descrito por Kennedy y Eberhart [7] alrededor de 1995, el método fue inspirado por el comportamiento de una parvada de aves o insectos en la búsqueda de fuentes de alimentos. Consideremos para explicar el principio de funcionamiento, el ejemplo de un enjambre de abejas que busquen

la región de espacio en la que existe mayor densidad de flores para recolectar polen. El enjambre inicialmente se encuentra sobre un área de flores seleccionada previamente, las abejas exploradoras vuelan en diferentes direcciones buscando otro espacio con mayor cantidad de flores al conocido hasta el momento, si alguna abeja exploradora durante ese sobrevuelo encuentra una región con mayor densidad de las conocidas anteriormente, todo el enjambre se orientará hacia esa nueva dirección, si se descubre otra región con mayor densidad floral a las anteriores, el enjambre se reorientará nuevamente hacia esta nueva ubicación, y así sucesivamente. Este tipo de algoritmo es el resultado de combinar las decisiones individuales de cada uno con el comportamiento de los demás integrantes del enjambre. Actualmente, existen diferentes aplicaciones de cómo los ingenieros están aplicando estos principios biológicos para mejorar la planificación y la toma de decisiones de los enjambres robóticos [8].



APRENDIZAJE ADAPTATIVO: LA CLAVE PARA LA FLEXIBILIDAD, ROBUSTEZ Y ESCALABILIDAD



Figura 5. Obtenida de <https://www.hola.com/actualidad/20240609361035/abeja-robotica-bionicbee-enjambre-imagenes/>

En la naturaleza, los enjambres exhiben una sorprendente capacidad para adaptarse a cambios en su entorno. Los bancos de peces son un ejemplo impresionante de coordinación en entornos acuáticos, logrando que miles de peces se muevan en perfecta armonía, esquivando obstáculos y depredadores. En la robótica de enjambre, se busca replicar esta flexibilidad a través de técnicas de aprendizaje adaptativo. Los robots pueden ajustar sus comportamientos y estrategias en función de la experiencia y de las variaciones en el entorno, lo que les permite abordar desafíos con eficacia [9].

Los enjambres robóticos son robustos y escalables porque no dependen de un robot en particular para funcionar. Si un robot falla, los demás pueden compensarlo, además es posible agregar más robots al sistema sin problemas. A medida que aumenta el número de robots, también aumenta la capacidad del enjambre para realizar tareas más complejas, similar a como las colonias de hormigas pueden continuar funcionando incluso si muchas hormigas mueren o por el contrario si en la colonia aumenta el número de hormigas [1].

APLICACIONES Y FUTURAS DIRECCIONES DE LA ROBÓTICA DE ENJAMBRE

La robótica de enjambre actualmente presenta aplicaciones en una amplia gama de campos. En la agricultura, por ejemplo, los enjambres de robots se utilizan para sembrar, cultivar y cosechar. En entornos peligrosos, como desastres naturales o zonas de conflicto, robots cooperativos son desplegados para tareas de búsqueda y rescate sin poner en riesgo la vida humana. Además, en la logística y la fabricación, los sistemas robóticos de enjambre se utilizan para optimizar el transporte y la manipulación de mercancías, mejorando la eficiencia operativa. La adaptabilidad y la capacidad de respuesta a cambios en el entorno hacen que estos sistemas sean altamente versátiles en una variedad de situaciones [10].

A pesar de los avances significativos, la robótica de enjambre todavía enfrenta desafíos. La coordinación precisa entre robots, la optimización de algoritmos de toma de decisiones y la seguridad en entornos cambiantes son áreas de investigación en constante desarrollo.

En el futuro, se espera que la robótica de enjambre continúe avanzando, inspirada en la rica diversidad de estrategias observadas en enjambres naturales. La capacidad de los robots para aprender de su entorno y adaptarse de manera autónoma abrirá nuevas posibilidades en la exploración espacial, la medicina y muchos otros campos [5].

En conclusión, la robótica de enjambre inspirada en el comportamiento de enjambres de la naturaleza no solo representa un emocionante avance tecnológico, sino también un testimonio del asombroso diseño que la naturaleza ha perfeccionado a lo largo de millones de años. Al combinar

la ingeniería con la sabiduría colectiva de la naturaleza, estamos dando forma a un futuro donde los robots trabajan juntos de manera armoniosa, imitando la eficiencia y la adaptabilidad de los enjambres que tanto admiramos en la naturaleza.

AGRADECIMIENTOS

“Proyecto Apoyado por El Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación del Estado de Michoacán de Ocampo”.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Garnier, S., Gautrais, J., & Theraulaz, G. (2007). The biological principles of swarm intelligence. *Swarm intelligence*, 1, 3-31. <https://doi.org/10.1007/s11721-007-0004-y>
2. Duan, H., Huo, M., & Fan, Y. (2023). From animal collective behaviors to swarm robotic cooperation. *National Science Review*, 10(5), nwad040. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwad040>.
3. Nedjah, N., & Junior, L. S. (2019). Review of methodologies and tasks in swarm robotics towards standardization. *Swarm and Evolutionary Computation*, 50, 100565. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2019.100565>
4. López-Riquelme, G. O., & Ramón, F. (2010). El mundo feliz de las hormigas. *Tip Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 13(1), 35-48. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43215427004>
5. Dias, P. G. F., Silva, M. C., Rocha Filho, G. P., Vargas, P. A., Cota, L. P., & Pessin, G. (2021). Swarm robotics: A perspective on the latest reviewed concepts and applications. *Sensors*, 21(6), 2062. <https://doi.org/10.3390/s21062062>.
6. Khaldi, B., & Cherif, F. (2015). An overview of

swarm robotics: Swarm intelligence applied to multi-robotics. *International Journal of Computer Applications*, 126(2). <https://doi.org/10.5120/ijca2015906000>

7. Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995, November). Particle swarm optimization. In *Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks*, Vol. 4, pp. 1942-1948. <https://doi.org/10.1007/s00500-016-2474-6>
8. Chung, S. J., Paranjape, A. A., Dames, P., Shen, S., & Kumar, V. (2018). A survey on aerial swarm robotics. *IEEE Transactions on Robotics*, 34(4), 837-855. <https://doi.org/10.1109/TRO.2018.2857475>
9. Bayindir, L. (2016). A review of swarm robotics tasks. *Neurocomputing*, 172, 292-321. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.05.116>
10. Schranz, M., Umlauf, M., Sende, M., & Elmreich, W. (2020). Swarm robotic behaviors and current applications. *Frontiers in Robotics and AI*, 36. <https://doi.org/10.3389/frobt.2020.00036>.
11. Rubenstein, M., Cornejo, A., & Nagpal, R. (2014). Programmable self-assembly in a thousand-robot swarm. *Science*, 345(6198), 795-799, <https://doi.org/10.1126/science.1254295>