

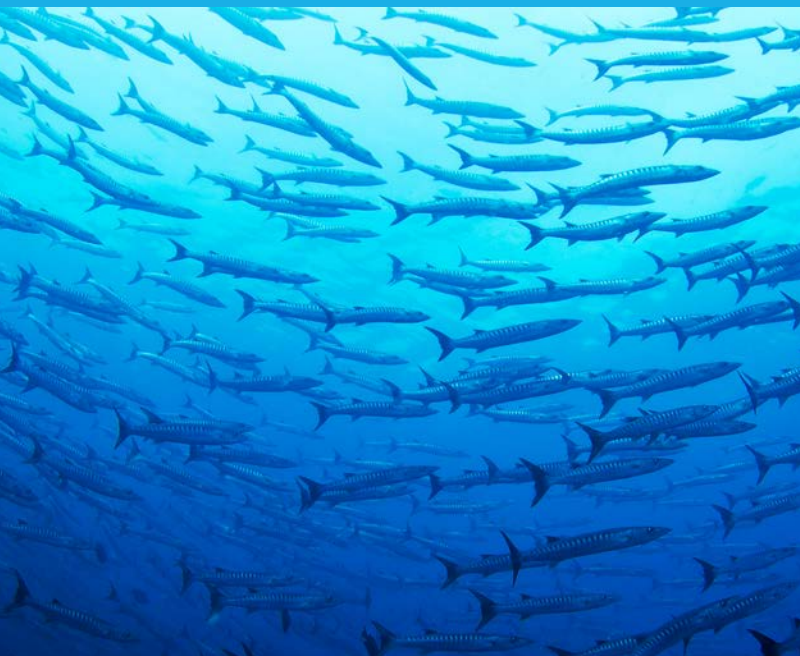
Robótica de enjambre

Informe de investigación

INTRODUCCIÓN

El enjambre como concepto no es algo nuevo. Encontramos enjambres en la naturaleza, como los bancos de peces (para buscar alimento y defenderse contra los depredadores), las colonias de abejas (reproducción) y las bandadas de pájaros (búsqueda de alimento y migración). La enjambrazón es también una táctica militar tradicional, en la que varias unidades convergen de forma deliberadamente estructurada y coordinada para atacar a un objetivo desde diversos ejes. Pero se aproxima un nuevo tipo de enjambrazón: la robótica de enjambre.

Siguiendo los pasos del sector civil y comercial, las organizaciones militares invierten cada vez más en enjambres de sistemas robóticos. A medida que esta tecnología se introduzca progresivamente en el campo de batalla, tendrá el potencial de traer un cambio disruptivo al desarrollo de las operaciones militares.



¿QUÉ ES UN ENJAMBRE?

Las demostraciones de la robótica de enjambre suelen llegar a los titulares de los principales medios, en particular cuando se trata de un número elevado de unidades robóticas.

El comportamiento en enjambre se basa en el uso de la normativa local y de robots relativamente sencillos que, al organizarse en grupo, pueden desempeñar tareas complejas que un único robot no sería capaz de realizar, ofreciendo así solidez y flexibilidad al grupo. La descripción más sencilla de un enjambre robótico es que está compuesto por **numerosas unidades robóticas (idénticas o diferentes) controladas** únicamente por unas pocas personas. No obstante, no hay un número mágico: en teoría, los enjambres pueden abarcar desde tan solo dos unidades hasta miles de ellas. Cada unidad robótica del enjambre puede considerarse un miembro **autónomo** que reacciona según unas normas internas y el estado del entorno. El algoritmo usado para programar un enjambre es **de distribución**, es decir, que el algoritmo del enjambre se ejecuta por separado en cada robot del mismo. Para que un enjambre sea más que un grupo de robots individuales y autónomos, las unidades del grupo deben mostrar un **comportamiento colectivo a través de la colaboración entre las unidades individuales y con el entorno** a fin de desempeñar una tarea determinada. Para alcanzar ese comportamiento colaborativo, es necesario algún tipo de **comunicación** que permita el intercambio de información entre los robots, como la coobservación o la señalización inalámbrica a través de *bluetooth* o *wifi*.

No existe una definición única del término "enjambre" en el sentido tecnológico. El significado de dicho término dista mucho de acordarse, tanto en la comunidad internacional como en el sector privado, el mundo académico y las comunidades técnicas. Conscientes de estos contextos técnicos y políticos, y a efectos de este informe, proponemos la siguiente definición práctica de "enjambres": **sistemas multirrobot en los que los robots coordinan sus acciones para trabajar de manera colectiva en pro de la ejecución de un objetivo.**



© shutterstock.com/Joanna Weston

© shutterstock.com/Andy Dean Photography

¿POR QUÉ LOS ENJAMBRES SON RELEVANTES EN LOS DEBATES SOBRE EL CONTROL HUMANO?

La posibilidad de crear enjambres militares es real, si bien es cierto que aún no están operativos y la tecnología es bastante débil. No obstante, la creación de métodos eficaces y responsables de control humano en relación con estos sigue siendo un ámbito de investigación emergente. Los principales retos en este respecto están asociados al diseño y la implementación de una interacción adecuada humano-máquina y máquina-máquina. Investigadores y desarrolladores han adoptado numerosas técnicas para establecer la participación humana en los enjambres. Esta participación o control humano suele hacer referencia al dominio (a través de órdenes), el control o la coordinación.

En general, el control directo de las unidades individuales de un enjambre no solo sería contraproducente, sino con toda probabilidad imposible. A medida que el número de unidades robóticas de un enjambre aumenta, se hace cada vez más difícil el diseño de una **interacción** adecuada entre **humano y máquina**. Por ello, y para que la participación humana resulte eficaz, debe centrarse de manera creciente en el enjambre como conjunto en lugar de en sus unidades individuales.

Los enjambres de unidades robóticas dependen de algoritmos para, entre otros, su formación, supervisión, separación, trayectoria de vuelo, distribución de tareas e identificación de objetivos. Esto significa que los enjambres se basan inevitablemente en la **interacción máquina-máquina**. Los

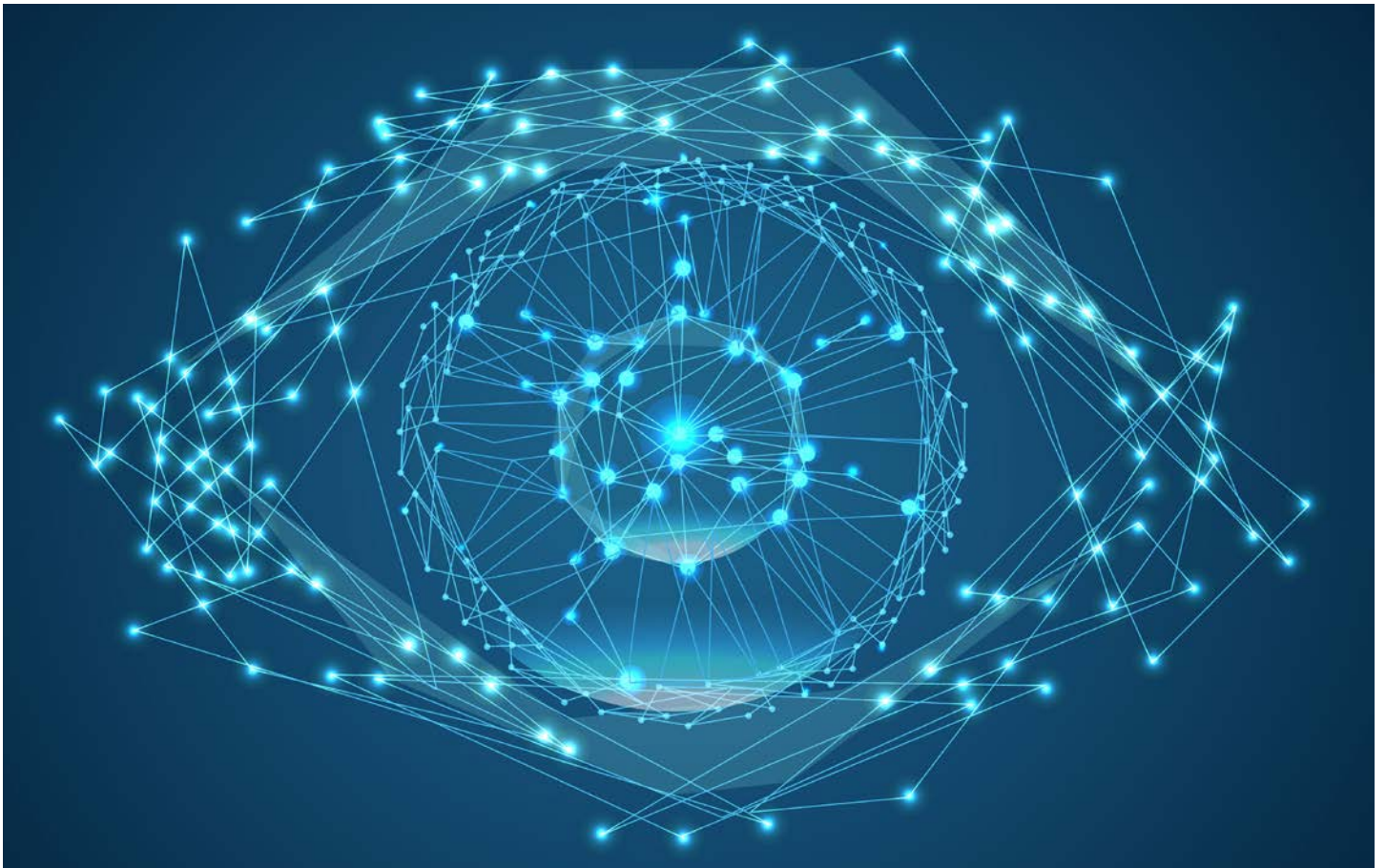
robots individuales interactúan con otros robots del enjambre para desempeñar una tarea y, a través de esta interacción se produce un comportamiento colectivo. Este afectará a su vez a la forma en que los humanos pueden comandar, controlar y coordinar el comportamiento del enjambre.

En la actualidad existe una escasez de estudios que investiguen cómo pueden los humanos diseñar y establecer con eficacia unas relaciones humano-máquina y máquina-máquina adecuadas, y quedan numerosas preguntas y cuestiones por resolver. Estas preguntas requieren una consideración más profunda para poder sacar partido al potencial de la robótica de enjambre y que la tecnología se pueda usar de forma eficaz y responsable en operaciones militares.

El estudio del UNIDIR sobre la robótica de enjambre pretende llenar este vacío bibliográfico tendiendo puentes entre el elemento técnico de esta tecnología emergente y su uso operativo, y las implicaciones relevantes para la seguridad internacional y el control de armas.

¿LE INTERESA SABER MÁS ACERCA DE LOS ENJAMBRES?

Puede acceder al informe completo, "*Swarm Robotics: Technical and Operational Overview of the Next Generation of Autonomous Systems*", en www.unidir.org/publications



COMANDOS

¿Qué tipo de instrucciones puede dar un humano a un enjambre?



Aunque la mayor parte de los enjambres están diseñados para operar de manera autónoma, no funcionan en un vacío ni sin instrucciones. **Los enjambres siempre actúan bajo la dirección de humanos.** Hay varias formas de mando humano.



Ya se han demostrado varias formas de **dirección de bajo nivel** en la robótica de enjambre, al menos en investigación y desarrollo, pruebas y simulaciones. Diversos proyectos han analizado métodos para dirigir un enjambre con **comandos de alto nivel**, delegando las decisiones de más bajo nivel en las unidades robóticas.



Los robots individuales pueden estar equipados con una biblioteca interna de comportamientos preprogramados. En esos casos, los humanos ordenan al enjambre a que ejecute un **comportamiento preprogramado concreto**.



Otro método, quizá más colaborativo, para enviar instrucciones a un grupo de unidades robóticas es **comunicar planes concretos**.



En cualquier caso, una operación estará limitada por un **conjunto de parámetros**, como por ejemplo limitaciones espaciales o temporales. Aunque estos parámetros no afecten directamente al comportamiento del enjambre, podrían limitar el tiempo y el espacio en el que este puede operar y, por tanto, influir de manera indirecta el comportamiento del enjambre por medio de la interacción con su entorno.



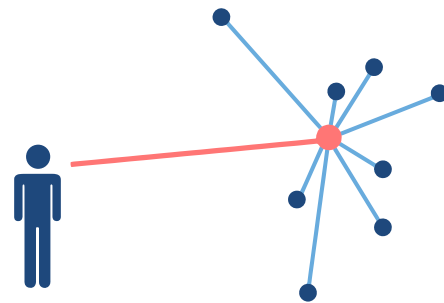
CONTROL

¿Cómo se distribuyen las tareas entre los distintos robots del enjambre?



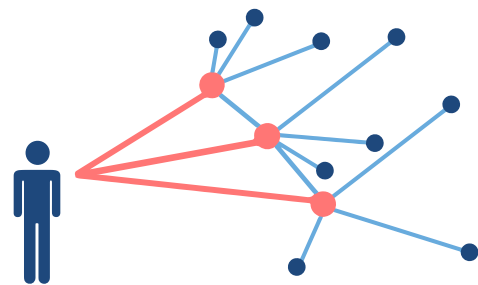
Además de las instrucciones emitidas por humanos, el enjambre también depende de algoritmos para, entre otros, su formación, supervisión, separación, trayectoria de vuelo, distribución de tareas e identificación de objetivos. Estos algoritmos o "arquitecturas de control" definen la distribución de tareas entre las unidades robóticas del enjambre.

Las órdenes pueden dirigirse a un robot que actúa como controlador central. Esta arquitectura de **control centralizado** implica que cada robot lleva asignada una tarea individual y que no existe una colaboración directa entre las unidades, excepto la que se produce a través del controlador central.



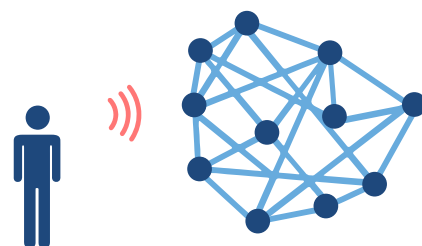
Control centralizado

Un humano puede dirigir varios "líderes" de un enjambre. En esta arquitectura de **control jerárquico**, los robots individuales pueden controlarse por medio de varios agentes de bajo nivel (nivel de "escuadrón"), que a su vez están dirigidos por controladores de un nivel superior, y así sucesivamente.



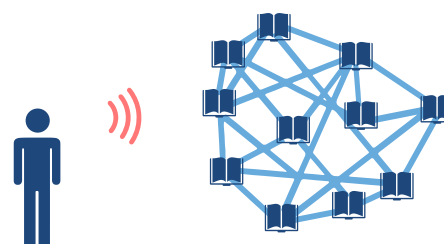
Control jerárquico

El **control a nivel de conjunto** es un método descentralizado que permite a los humanos transmitir instrucciones a todo el enjambre (no a robots individuales), y los robots individuales deciden entre ellos cómo ejecutar el comando.



Control a nivel de conjunto

En las arquitecturas de **control de comportamiento**, cada robot tiene una biblioteca de comportamientos y los operadores indican al sistema qué comportamiento debe ejecutar.



Control de comportamiento

COORDINACIÓN

¿Cómo ejecuta el enjambre esas tareas?



Una vez que los humanos han suministrado comandos al enjambre (o a unidades individuales del enjambre) y las arquitecturas de control han determinado cómo se distribuirán estos comandos, el enjambre debe coordinar su comportamiento colectivo y ejecutar las tareas asignadas. La manera en que el enjambre ejecuta las tareas asignadas depende, en parte, del método de coordinación.



Los modelos **líder-seguidor** designan a una unidad robótica como líder y al resto de los robots como seguidores. En este modelo, los robots se coordinan siguiendo la trayectoria del líder o el líder puede asignar tareas concretas a robots individuales del enjambre.



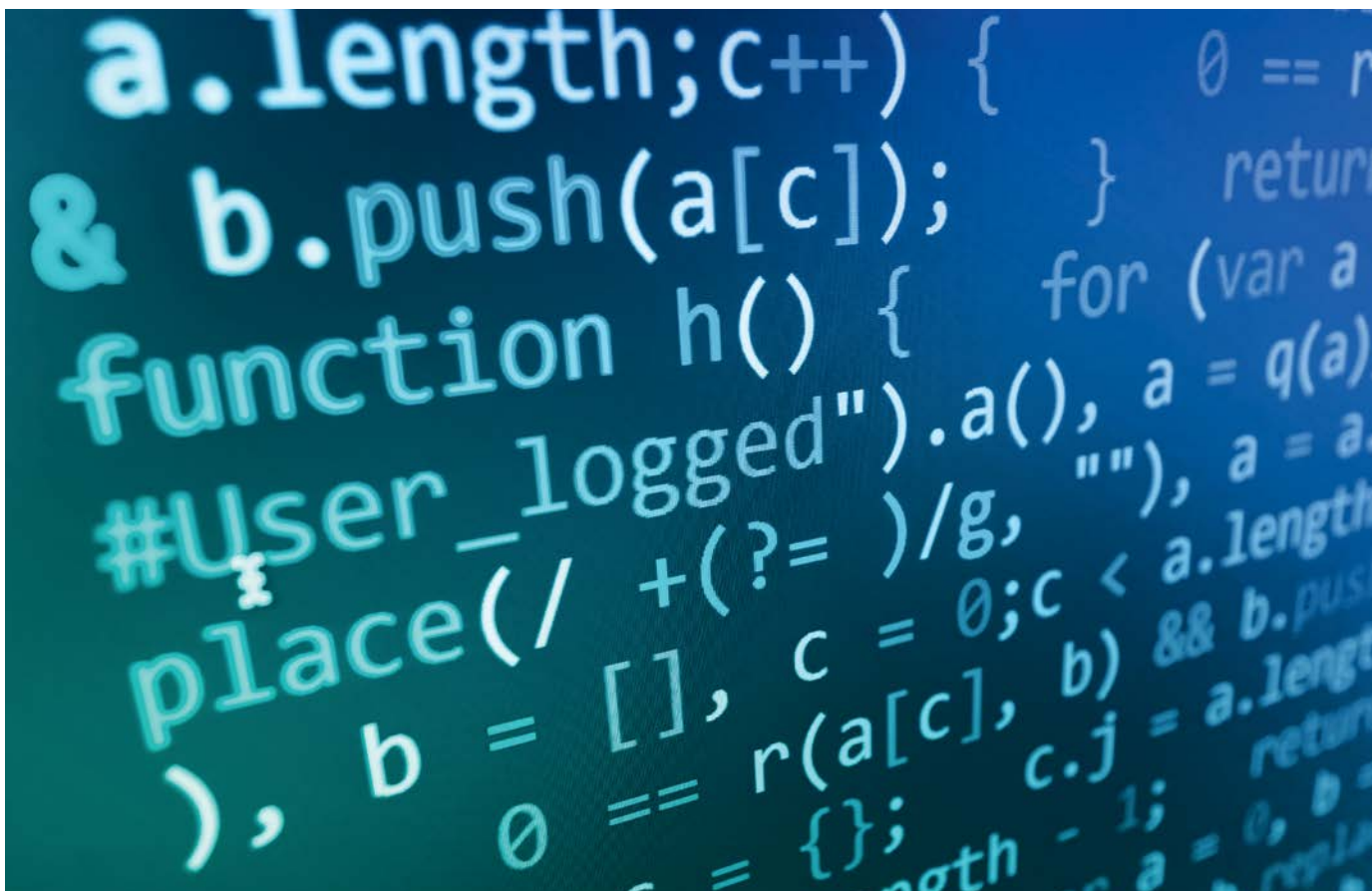
Las **funciones de utilidad** pueden emplearse para optimizar el comportamiento del enjambre: al recibir un comando de alto nivel (un objetivo) el enjambre sopesa los costes y las recompensas de posibles acciones concretas para lograrlo y ejecuta la acción que considera más útil (con la recompensa más elevada).



Otro método para coordinar el comportamiento de un enjambre es el uso de **algoritmos de consenso**: los robots individuales se comunican entre ellos y llegan a una solución mediante un voto o bien aplicando métodos basados en subastas.



La **coordinación emergente** surge de la interacción entre las unidades individuales del enjambre y puede compararse con un conjunto de jazz, en el que los distintos músicos se coordinan reaccionando al resto de los músicos del grupo.











ESTADO DE LA CUESTIÓN

El despliegue de enjambres militares tiene el potencial de cambiar considerablemente la función del humano y la forma en que ejerce el control sobre los sistemas autónomos.

Los enjambres actuales, del ámbito civil y militar, están aún en desarrollo o en fase de pruebas y demostraciones. En el contexto militar, la investigación y desarrollo de las tecnologías para enjambres se centra principalmente en las aplicaciones descritas en la tabla que figura a continuación.

Ninguno de los proyectos de la tabla ha alcanzado la fase operativa. El diseño, desarrollo y ensayo de enjambres en entornos estructurados (p. ej., un laboratorio) o en entornos relativamente despejados (p. ej., espacio aéreo controlado) es solo el principio. El despliegue de esta misma tecnología en un entorno incontrolado, desestructurado y potencialmente hostil presenta retos mucho más formidables.

Aplicación	Descripción	Ejemplos
Operaciones de inteligencia, vigilancia y reconocimiento 	Los enjambres pueden recibir la tarea de buscar en un área definida para, por ejemplo, encontrar objetivos potenciales – o pueden usarse para cartografiar áreas extensas.	El proyecto Perdix de la Strategic Capabilities Office de los Estados Unidos en colaboración con el Naval Air Systems Command, y la Distributed and Collaborative Intelligent Systems and Technology Collaborative Research Alliance (DCIST CRA).
Vigilancia y protección perimetrales 	Los enjambres podrían utilizarse como sistemas autónomos de vigilancia fronteriza y perimetral.	La iniciativa Roborder de la Unión Europea; la flota de enjambres CARACaS de la US Office of Naval Research; el enjambre de 56 barcos drones de China.
Ataques distribuidos 	Los enjambres podrían utilizarse como sistemas de armas que distribuyen objetivos de manera autónoma entre las unidades robóticas del grupo.	El proyecto Collaborative Operations in Denied Environment (CODE) de la US Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA); el sistema de enjambre Kargu de la empresa turca STM.
Defensa aérea 	Los enjambres pueden emplearse para confundir, abrumar y neutralizar a la defensa aérea enemiga gracias a su elevado número.	El proyecto Suppression of Enemy Air Defenses de la Unión Europea.
Protección de la fuerza 	Los enjambres también podrían emplearse para proteger plataformas militares de alto valor y tropas durante misiones desplegándolos, por ejemplo, en torno a un convoy, a barcos, o a otros activos.	El proyecto Gremlins de la US DARPA y el Air Force Research Laboratory; el XQ-58A Valkyrie o “Loyal Wingman” de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos.
Engaño 	Los enjambres pueden actuar como señuelos, efectuar maniobras falsas o engañar al adversario para que piense que el enjambre es un vehículo mucho más grande moviéndose en un área.	Las fuerzas israelíes han desplegado tácticas de engaño similares en la República Árabe Siria, haciendo creer a los operadores de radares sirios que los drones eran aeronaves de ataque. No obstante, los drones no funcionaron como enjambres.
Tareas aburridas, sucias y peligrosas 	Los enjambres podrían utilizarse también en tareas aburridas, sucias y peligrosas, como la detección de minas y la limpieza.	Enjambres de robots autónomos de detección de minas terrestres; los robots en miniatura de Rolls Royce que pueden efectuar inspecciones visuales de motores.
Defensa contra otros enjambres 	Dada la disponibilidad mundial de pequeñas plataformas robóticas (especialmente vehículos aéreos, como maquetas de aviones), los enjambres podrían utilizarse para defender contra otros enjambres.	Los experimentos con enjambres de contraataque de la Naval Postgraduate School de los Estados Unidos en el contexto del Advanced Robotic Systems Engineering Laboratory (ARSENL).

Acerca del UNIDIR


El Instituto de las Naciones Unidas de Investigación sobre el Desarme (UNIDIR) es un instituto autónomo de las Naciones Unidas financiado con contribuciones voluntarias. El UNIDIR, uno de los pocos institutos de políticas de todo el mundo que se ocupa del desarme, genera conocimiento y promueve el diálogo y la adopción de medidas en materia de desarme y seguridad. Con sede en Ginebra, el UNIDIR ayuda a la comunidad internacional a desarrollar las ideas prácticas e innovadoras necesarias para encontrar soluciones a los problemas fundamentales de seguridad.

Esta área de investigación del Programa de Seguridad y Tecnología cuenta con el apoyo de los Gobiernos de Alemania, Noruega, los Países Bajos y Suiza.

www.unidir.org

 @unidirgeneva

 @UNIDIR

 un_disarmresearch

Autores: Merel Ekelhof y Giacomo Persi Paoli

Las aportaciones para esta publicación se han extraído de:
Ekelhof, Merel, & Giacomo Persi Paoli. 2020. *Swarm Robotics: Technical and Operational Overview of the Next Generation of Autonomous Systems*. Ginebra: Instituto de las Naciones Unidas de Investigación sobre el Desarme.

Ekelhof, Merel. 2019. *The Distributed Conduct of War: Reframing Debates on Autonomous Weapons, Human Control and Legal Compliance in Targeting*. Tesis doctoral. VU University Amsterdam.

Diseño: Kathleen Morf, www.kathleenmorf.ch

Fotografía: portada y contraportada: © istockphoto.com/4X-image

Iconos: © iconfinder.com

