



Robótica de enjambre

Espectáculo de Drones



Jose Carlos Aldeguer Coll & Jorge Guillén Pastor &
Elisa Sáez García

ÍNDICE

1. DESCRIPCIÓN DE LA TIPOLOGÍA	3
1.1. INTRODUCCIÓN	3
1.2. TIPOS DE COMPORTAMIENTO	3
1.3. APLICACIONES	4
1.4. EJEMPLOS	5
El proyecto Seaswarm	5
Figura 1. Enjambre robótico de limpieza marina	6
El proyecto COCORO	6
Enjambre de insectos robot	7
2. CASO DE ESTUDIO	7
2.1. INTRODUCCIÓN	7
2.2. DESCRIPCIÓN TÉCNICA	8
2.3. DESCRIPCIÓN DE LA APLICACIÓN	11
3. CONCLUSIÓN	13
4. REFERENCIAS	14

Enlace al vídeo de presentación:

https://drive.google.com/file/d/1LVSIJW_MkjB-7uZYD5QqNBogSU2Va2On/view?usp=sharing

1. DESCRIPCIÓN DE LA TIPOLOGÍA

1.1. INTRODUCCIÓN

Inspirándose en la organización de los insectos sociales, tales como las hormigas, abejas y termitas, y en la formación de los cardúmenes de peces y bandadas de aves en vuelo, la robótica de enjambres es un campo de estudio que estudia los mejores caminos computacionales para que los robots puedan intercambiar información entre sí y actuar en conjunto, de acuerdo con un objetivo común para el cual fueron programados. En la naturaleza los enjambres suelen estar formados por muchos agentes individuales, simples y homogéneos o heterogéneos. Estos individuos cooperan sin ningún control central y actúan según un comportamiento simple y local. Sólo a través de sus interacciones surge un comportamiento colectivo capaz de resolver tareas complejas. Estas características conducen a las principales ventajas de los enjambres: adaptabilidad, robustez y escalabilidad. Los enjambres pueden considerarse una especie de organismo que puede adaptarse a los cambios del entorno siguiendo comportamientos específicos.

En la robótica de enjambre, múltiples robots -homogéneos o heterogéneos- están interconectados, formando un enjambre de robots. Dado que los robots individuales tienen capacidades de procesamiento, comunicación y detección a bordo, son capaces de interactuar entre sí y reaccionar al entorno de forma autónoma. Cada individuo muestra un comportamiento basado en un conjunto de reglas locales que puede ir desde un simple mapeo reactivo entre las entradas de los sensores y las salidas de los actuadores hasta elaborados algoritmos locales. Normalmente, estos comportamientos locales incorporan interacciones con el mundo físico, incluido el entorno y otros robots. Cada interacción consiste en la lectura e interpretación de los datos sensoriales, el procesamiento de estos datos y el accionamiento de los actuadores en consecuencia. Esta secuencia de interacciones se define como un comportamiento básico que se ejecuta repetidamente, ya sea de forma indefinida o hasta que se alcanza un estado deseado.

1.2. TIPOS DE COMPORTAMIENTO

Un mismo enjambre de robots puede ser programado para el cumplimiento de diferentes objetivos o la realización de distintas tareas. Dependiendo de este objetivo su comportamiento y funcionamiento puede variar. A continuación se muestran los principales comportamientos de la robótica de enjambres:

- **Organización espacial**

Estos comportamientos permiten el movimiento de los robots de un enjambre en el entorno con el fin de organizarse espacialmente o con objetos. Dentro de este comportamiento se encuentra el de agregación, el cual concentra a la mayoría de individuos en una región, la formación de patrones y el autoensamblaje, donde los robots se conectan para formar estructuras.

- **Navegación**

Estos comportamientos permiten el movimiento coordinado de un enjambre de robots en el entorno. Dentro de este comportamiento se encuentra la exploración colectiva, que hace

que el enjambre de robots navegue de forma cooperativa por un entorno para explorarlo. Esta puede utilizarse para obtener una visión general de la situación, buscar objetos... También destaca el movimiento coordinado, donde todo el enjambre se mueve en una formación determinada o el transporte colectivo, donde todo el enjambre se dedica a mover colectivamente objetos demasiado pesados o grandes para los robots individuales.

- **Toma de decisiones**

Estos comportamientos permiten a los robots de un enjambre tomar una decisión común sobre una cuestión determinada. El consenso permite que los robots individuales del enjambre se pongan de acuerdo o converjan hacia una única elección común entre varias alternativas. Además, la percepción colectiva combina los datos detectados localmente por los robots del enjambre en una imagen global. Permite al enjambre tomar decisiones colectivas con conocimiento de causa, por ejemplo, para determinar la solución óptima a un problema global.

- **Otros**

Existen otros comportamientos de los robots enjambre que no encajan en ninguna de las categorías anteriores.

- La autocuración permite al enjambre recuperarse de los fallos causados por las deficiencias de algún componente defectuoso. El objetivo es, por tanto, minimizar el impacto de los fallos de los robots en el resto del enjambre para aumentar su fiabilidad, robustez y rendimiento..

- La autorreproducción permite a un enjambre de robots crear nuevos robots o replicar el patrón creado a partir de muchos individuos. El objetivo es aumentar la autonomía del enjambre eliminando la necesidad de un ingeniero humano para crear nuevos robots.

- La interacción hombre-enjambre permite a los humanos controlar los robots del enjambre o recibir información de ellos. La interacción puede producirse de forma remota o de forma próxima en un entorno compartido.

1.3. APLICACIONES

El campo de la robótica de enjambre ofrece inmensas posibilidades. Esta tecnología ha sido aplicada en una inmensidad de tareas diferentes, sin embargo, hay situaciones en las que el hecho de utilizar la robótica de enjambre, mejora con creces la resolución de la tarea en comparación con otros sistemas robóticos, ya sea por la eficacia, reducción de pérdidas... A continuación se muestran algunas de las principales tareas dónde es muy conveniente el uso de estos sistemas.

- **Tareas que cubren una gran superficie**

El sistema de robótica de enjambre está distribuido y especializado para las tareas que requieren una gran área de espacio. Los robots del enjambre están distribuidos en el entorno y pueden detectar el cambio dinámico de toda la zona, como fugas químicas o contaminación. La robótica de enjambre puede realizar este tipo de tareas mejor que la red de sensores, ya que cada robot puede patrullar en una zona en lugar de quedarse quieto. Esto significa que el enjambre puede vigilar la zona con menos agentes. Además de la vigilancia, los robots del enjambre pueden localizar la fuente, desplazarse hacia la zona y tomar medidas rápidas.

- **Tareas peligrosas**

Gracias a la escalabilidad y la estabilidad, el enjambre puede sufrir la pérdida de robots en gran medida antes de tener que terminar el trabajo. Los robots son muy baratos y se prefieren para las áreas que probablemente dañen a los trabajadores. En algunas tareas, los robots pueden ser irrecuperables después de la tarea, por lo que el uso de robots complejos y caros es económicamente inaceptable, mientras que la robótica de enjambre con individuos baratos puede proporcionar las soluciones razonables.

- **Las tareas requieren una población escalable**

La carga de trabajo de algunas tareas puede cambiar con el tiempo, por lo que el tamaño del enjambre debe escalarse en función de la carga de trabajo actual para conseguir una alta eficiencia tanto en tiempo como en economía. Por ejemplo, en la tarea de limpieza de fugas de petróleo después de accidentes en tanques, el enjambre debe mantener una población alta cuando las fugas de petróleo son rápidas al principio de la tarea y reducir gradualmente los robots cuando la fuente de fuga está tapada y el área de fuga está casi despejada. El enjambre también escala entre diferentes regiones si el progreso de éstas se desequilibra.

- **Las tareas requieren redundancia**

La robustez en los sistemas de robótica de enjambre se beneficia principalmente de la redundancia del enjambre, es decir, la eliminación de algunos robots no tiene un impacto significativo en el rendimiento. Algunas tareas se centran en el resultado más que en el proceso, es decir, el sistema debe asegurarse de que la tarea se completará con éxito, principalmente mediante el aumento de la redundancia.

1.4. EJEMPLOS

El proyecto Seaswarm

El proyecto Seaswarm, del MIT, prevé vehículos robóticos autónomos de 4,8 metros de largo por 2,1 metros de ancho trabajando en conjunto para extraer petróleo de la superficie del mar, principalmente en estuarios y bahías. Son similares a barcos y se desplazan a expensas de la energía solar, generada por paneles fotovoltaicos dispuestos en la parte superior del robot. Así, pueden quedarse varios días en el mar sin necesidad de tocar tierra. Una cinta transportadora en la parte trasera del robot recoge el petróleo en la superficie. Cuando la cinta se desplaza hacia la parte delantera del robot, el petróleo se suelta y queda almacenado allí hasta que el vehículo vuelve a tierra o le entrega su carga a un barco de acopio en tránsito.

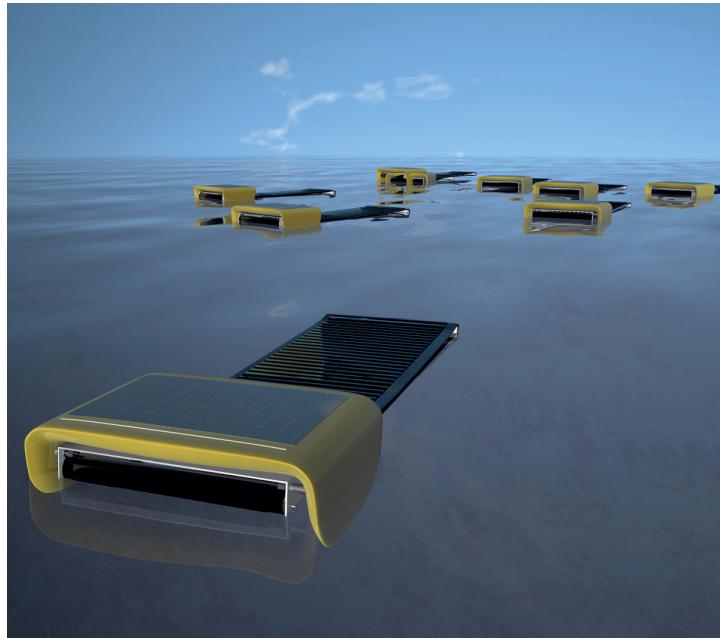


Figura 1. Enjambre robótico de limpieza marina

El proyecto COCERO

Un equipo de científicos ha creado enjambres de robots que funcionan igual que los bancos de peces y que intercambian información para analizar el entorno y buscar, mantener, explorar y extraer recursos situados en hábitats subacuáticos. Los enjambres de robots del proyecto COCERO no solo se asemejan a bancos de peces; también se comportan como ellos. Los robots autónomos creados por el proyecto interactúan entre sí e intercambian información, conformando así un sistema cognitivo que posee conciencia de su entorno.

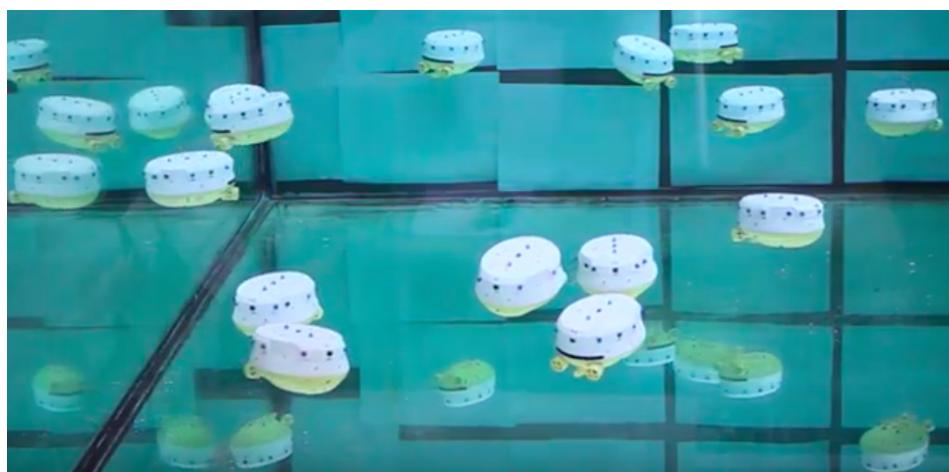


Figura 2. Enjambre robótico de exploración marina

Enjambre de insectos robot

Yasemin Ozkan- Aydin ha desarrollado pequeños robots con múltiples patas capaces de moverse en entornos complejos y realizar tareas de forma colectiva, como si fueran un enjambre de insectos. Estos innovadores robots han sido creados para ser utilizados en tareas de búsqueda y rescate, transporte de objetos, exploraciones espaciales y monitoreo ambiental. Estos robots, creados con impresión 3D, miden de 15 a 20 cm. Gracias a sus cuatro patas flexibles, se redujo la necesidad de sensores y piezas adicionales, dotando a los insectos robots del nivel de inteligencia mecánica necesaria para interactuar con terrenos accidentados o irregulares. Pueden pasar por los distintos huecos, construir un puente con sus cuerpos, mover objetos de forma individual o incluso compenetrarse para mover objetos

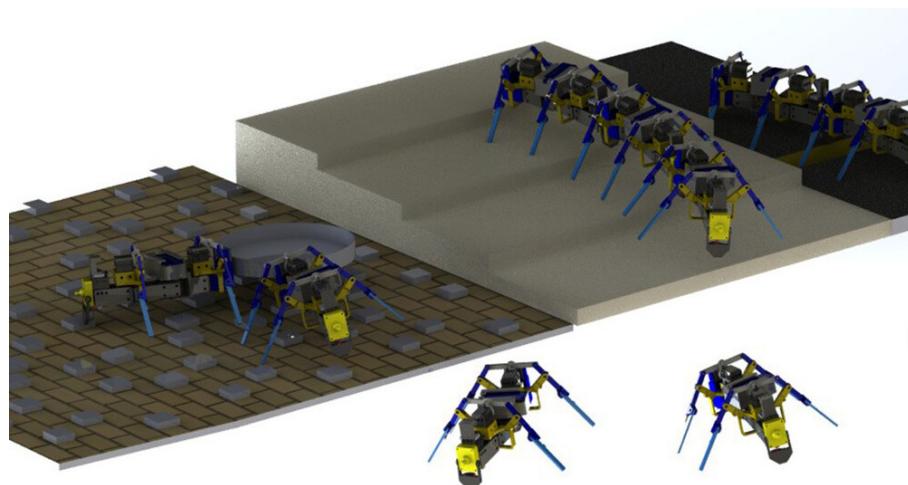


Figura 3. Enjambre robótico de búsqueda y rescate

2. CASO DE ESTUDIO

2.1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el uso de drones en las operaciones comerciales se ha ampliado en diferentes industrias debido a su capacidad de impulsar la eficiencia y el análisis de datos. Estando en plena explosión tecnológica, estos dispositivos muestran una tendencia a las aplicaciones de uso de técnicas de enjambre.

Hoy en día, se encuentra utilidad a los enjambres de drones en diversos ámbitos, ya no sólo militares, sino en seguridad, control de tráfico y ocio, entre otros. Algunos ejemplos de distintas aplicaciones de estos dispositivos usados en conjunto son:

- Operaciones de búsqueda y rescate
- Control de incendios
- Seguimiento y soporte en control de tráfico
- Inspección de pistas en aeropuertos

- Vigilancia en eventos
- Espectáculos de luces

En esta memoria, se va a estudiar el uso de drones como artificio en espectáculos, mencionando su funcionamiento y sus limitaciones. La marca de los drones seleccionados es Intel quien ha sido responsable de algunos de estos tipos de shows más importantes e impresionantes.

Los espectáculos de luz con drones aprovechan las maravillas de la tecnología de los drones, mezclando el arte y la ciencia para crear una forma totalmente nueva de espectáculo nocturno y entretenimiento. Con animaciones dinámicas en 3D y combinaciones de colores brillantes, cada dron sirve como un píxel para iluminar y pintar el cielo nocturno para una experiencia increíble. Coreografiados al ritmo de la música y con la capacidad de integrarse con otros elementos de entretenimiento en vivo, los espectáculos de luces de drones con cientos, incluso miles de drones preprogramados seguramente deslumbrarán al público.

2.2. DESCRIPCIÓN TÉCNICA

Como se ha comentado en la introducción, se va a hablar sobre los espectáculos que son capaces de crear los enjambres de drones. En este apartado, se comentarán los aspectos técnicos del dron que se usa para la robótica de enjambre y cuál es el software que, en la actualidad, se está utilizando.

En primer lugar, cabe detallar de manera simplificada la electrónica genérica utilizada en los drones de espectáculo, mencionando sus principales componentes.:

- El autopiloto: es el procesador central del dron. Contiene los algoritmos necesarios que permiten el vínculo con el resto de dispositivos bajo su control. Es el componente encargado de guardar el firmware de la misión a realizar junto con la base en tierra, y de la coordinación del resto de drones del enjambre para evitar colisiones. Provee instrucciones de guía, navegación y conecta los distintos sensores, extensiones de telemetría y otros accesorios periféricos. Cabe destacar que cada fabricante hace uso de un software autopiloto que se ajuste a sus requerimientos para extender sus capacidades.
- Receptor y transmisor (RX/TX): Componente de control inalámbrico por medio de ondas de radio. Recibe las señales de comandos enviadas desde la base central, y da información sobre los datos del dron (su posición, estado de salud de la batería, entre otros). Toda la flota de drones emite su información en la misma frecuencia, identificándose mediante el ID/IP propio de cada dron. En la base de control, se decodifica esta información remota (telemetría), conociendo de esta manera el estado general de cada uno de los dispositivos.
- Dispositivos encargados del sistema de alumbrado: el controlador de luces y el módulo LED RGB. El controlador de luces consiste en un adaptador WiFi que guarda la información de la estructura de la coreografía, así como las relaciones entre sus diferentes partes, y permite la coordinación de las luces entre los drones gracias a una comunicación full duplex (transmisión y recepción de datos en ambas direcciones de manera simultánea). Los módulos LED RGB es el circuito de leds de alta luminiscencia que permite multitud de combinaciones de colores. Generalmente se usan diversos módulos para abarcar todos los

ángulos del dron. Se debe tener en cuenta el diseño de la carcasa exterior del dron, ya que afectará a la manera que este proyecta la luz y tendrá la capacidad de resaltar los efectos lumínicos de los LEDS.

- Otros componentes básicos para el funcionamiento del dron: motor, baterías y chasis. No procede entrar en detalle con estos dispositivos, pero cabe destacar que estos limitarán las posibilidades del espectáculo en cuanto a autonomía, distancias y seguridad. [1]

Entrando en una explicación más específica, los drones que se han utilizado tanto en el espectáculo de Intel, como en el del hotel Bellagio y como los de los Juegos de Tokio 2020, son los denominados como Intel Drone Light Show o también conocidos como Intel Shooting Star Drone, de la marca de Intel como se puede ver en el propio nombre. En el último de los shows mencionado se utilizó la gama Premium de este drone, a continuación se explicarán ambos modelos, el classic y el premium, y sus diferencias.

Ambos modelos son drones cuadricópteros, es decir, están controlados por cuatro motores. Los drones multirrotores tienen características de vuelo parecidas a la de los helicópteros.

En cuanto al modelo clásico (classic) está diseñado específicamente para este tipo de espectáculo de luces y pesa menos de 330 gramos. Por temas de seguridad, la estructura está construida con un marco blanco hecho de espuma y plásticos flexibles; y las hélices de los motores se encuentran encapsuladas. Las luces LEDs que tiene incorporadas pueden crear más de cuatro millones de combinaciones de colores. Por otro lado, el software incorporado de estos drones se ha personalizado para automatizar el proceso de animación, lo que permite realizar formas y animaciones dinámicas en cuestión de semanas. Además, el software del controlador de espectáculos ejecuta la comprobación completa de la flota antes de cada vuelo y puede seleccionar aquellos drones más optimizados para el vuelo, es decir, los que mejor se encuentren. Un único computador controla toda la tropa de drones.

Las magnitudes de este drone son las siguientes: cuenta con unas medidas de 384x384x93 mm y aproximadamente unos 15 cm de diámetro del rotor.

Las condiciones de operabilidad que posee son una velocidad de viento máximo tolerable de 7 m/s y una velocidad de actuación de luces de unos 3 m/s. Además, el tiempo de actuación es de entre 5 y 8 minutos de batería según los requerimientos del espectáculo. [2]

El modelo del que se ha hablado se muestra en las siguientes figuras:

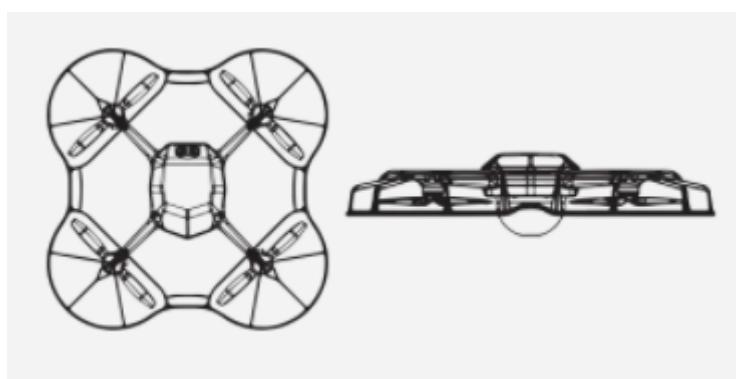


Figura 4. Intel Drone Light Show



Figura 5. Intel Drone Light Show

El modelo premium también es conocido como Intel Shooting Star™ 3. Estos drones de última generación tienen capacidades excepcionales de animación en 3D, un brillo inigualable, velocidades más rápidas, mayor resolución y mayor tiempo de actuación.

Este modelo es un poco más pesado que el classic, pesa 340 gramos, y este como el anterior, está diseñado principalmente para los espectáculos de luces. A pesar de esto, este modelo se puede usar para diversas aplicaciones. El material de construcción de la estructura es el mismo que el modelo classic, para garantizar la seguridad en caso de caída en plena animación. La diferencia en cuanto a las luces es que en este modelo los LEDs están corregidos por gamma para emitir una luz brillante y fiel al color y en vez de tener una luz LED tiene 4. Este modelo está equipado con un GPS cinemático en tiempo real (RTK) que permite aumentar la precisión de la posición para obtener animaciones de mayor resolución, imágenes más nítidas y animaciones 3D más dinámicas en espacios limitados. Posee una plataforma de lanzamiento más pequeña que el modelo clásico, lo que reduce la huella en el lugar de despegue en más de un 30%.

El tiempo de espectáculo está entre 7-8 minutos, se aumentan 2 minutos en comparación al modelo clásico. Un cambio importante respecto al otro modelo es la velocidad de viento máxima tolerable, en este caso aguanta unos 11 m/s y también tiene una velocidad de actuación mayor, de 6 m/s. Aunque no parezca gran cosa, este aumento de velocidad de actuación mejora los espectáculos pudiendo realizar más animaciones en el mismo tiempo. Las medidas de este modelo son de 286 x 283 x 146 mm y 12.7 mm de diámetro de rotor. [3]

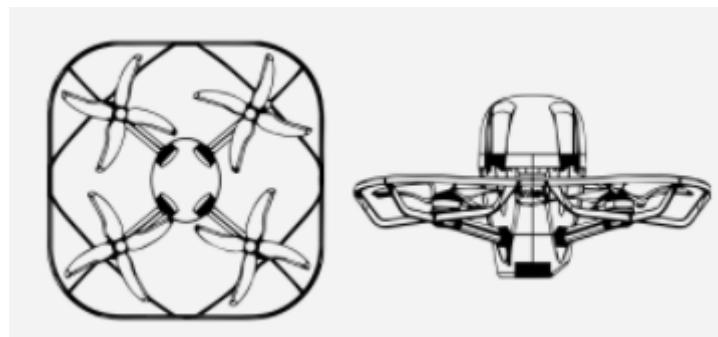


Figura 6. Intel Shooting Star™ 3



Figura 7. Intel Shooting Star™ 3

El software que poseen estos drones de Intel es una plataforma llamada Drone Light Shows. La plataforma de Intel tiene en cuenta la seguridad y mantiene barreras virtuales (geofencing) que los drones no pueden traspasar, en caso contrario aterrizarán inmediatamente, pero además hay observadores humanos que vigilan que no haya potenciales accidentes que puedan suponer daños personales.

2.3. DESCRIPCIÓN DE LA APLICACIÓN

Gracias a los avances en desarrollo de software de planificación de trayectorias y prevención de colisiones para entornos tridimensionales, el uso de enjambres de drones se ha hecho más común, llegándose a extender al campo del entretenimiento. Pareciendo imposible el control simultáneo de flotas de drones, el desarrollo de potentes aplicaciones de software para gestión de enjambres, de IA y modelado 3D ha hecho posible la llevada a cabo de espectáculos utilizando desde decenas hasta miles de estos dispositivos. Estos espectáculos consisten en coreografías sincronizadas a la perfección, en las cuales los drones se mueven y posicionan formando figuras y patrones tridimensionales sorprendentes, únicamente restringidos por las limitaciones de su hardware y del software utilizado para diseñarlas.



Figura 8 y 9. Ejemplos de patrones representados en un espectáculo de drones

El diseño de estas coreografías se lleva a cabo con simuladores 3D, que permiten montar espectáculos de alta dificultad en tan sólo diversas semanas. En el caso de Intel, se hace uso de Sirius Pro, un software vanguardista de control de animaciones y actuaciones que permite diseñar y probar simulaciones 3D. Este sistema, facilita la planificación avanzada de vuelo, haciendo uso de modelos detallados para el mapeo de ciudades y adaptación de elevación 3D con control en vivo. El previo diseño de las coreografías, ayuda a garantizar la seguridad de las actuaciones de drones al trazar automáticamente trayectorias sin colisiones desde un sólo ordenador. Cabe destacar que la seguridad es lo más importante en este tipo de espectáculos, por eso cada parámetro está altamente revisado. Las condiciones atmosféricas deben ser adecuadas y sobre todo es importante que no haya apenas viento para que los drones puedan desplazarse de forma correcta. Además, hay otro tipo de factor clave en este tipo de espectáculos: el espacio aéreo debe estar validado y reservado para este tipo de eventos. La distancia entre los drones suele ser de entre 1,5 y 3 metros para evitar también colisiones. Asimismo, para realizar el control de estos espectáculos es necesaria una preparación profesional previa, experiencia acreditada y los permisos pertinentes ante AESA (la Agencia Estatal de Seguridad Aérea) [5].

Es necesario analizar el impacto del uso de esta tecnología en la realización de estos espectáculos comparándolos con los tradicionales espectáculos de fuegos artificiales. Hasta ahora, estos vehículos aéreos no tripulados han reemplazado a otras tecnologías en otros ámbitos, así que se debe planear la posibilidad de que lleguen a sustituir a los dispositivos pirotécnicos en un futuro no muy lejano.

Algunas de las ventajas que presentan los enjambres de drones en este contexto son las siguientes [4]:

- Contaminación sonora: los espectáculos con enjambres de drones son mucho más silenciosos que los pirotécnicos, que usan sonidos estremecedores para sorprender a su público sin tener en cuenta su impacto en los animales de los alrededores, o incluso, el posible impacto negativo en personas con necesidades especiales, como puede ser el trastorno del espectro autista o estrés post traumático.
- Impacto medioambiental: además de la contaminación por ruido, se debe considerar los residuos generados tras cada actuación. Los fuegos artificiales, aparte de los gases de combustión, producen desechos que pueden llegar a ser tóxicos para el medioambiente. Los drones son dispositivos reutilizables de larga vida de duración, lo que les hace una alternativa *eco friendly*.

- Flexibilidad y gran abanico de posibilidades: las actuaciones con flotas de drones permiten realizar diseños personalizables que están fuera de alcance en los espectáculos pirotécnicos.
- Seguridad: aunque los drones pueden ser potencialmente peligrosos en determinadas situaciones, presentan menor riesgo que la probabilidad de incendio y quemaduras que presentan los fuegos artificiales.

La mayor desventaja que presenta este tipo de tecnología es su alto coste. Un espectáculo de 200 drones tiene un precio de partida de 150.000 dólares, mientras que subir a 300 drones sale por 225.000 dólares y llegar a 500 drones hará que tengamos que pagar un mínimo de 315.000 dólares.

3. CONCLUSIÓN

Para concluir, comentar que a la velocidad que avanza la tecnología estos espectáculos serán más impresionantes en poco tiempo. Cada vez los drones podrán estar más cerca entre ellos con la seguridad de que no se van a tocar en ningún movimiento que hagan, la velocidad de actuación y toleradas aumentarán, la localización será más precisa aún y se podrán conectar muchos más drones en un mismo computador. Además, estas aplicaciones de enjambres robóticos con drones podrán estar destinadas a muchas más aplicaciones, éticas o no.

4. REFERENCIAS

1

1.1

<https://learn.g2.com/swarm-robotics>
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frobt.2020.00036/full>
<https://revistapesquisa.fapesp.br/es/enjambres-de-robots/>

1.2

<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frobt.2020.00036/full>

1.3

<https://www.iotforall.com/swarm-robotics-applications>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221491471300024X>

1.4

<https://revistapesquisa.fapesp.br/es/enjambres-de-robots/>
<https://cordis.europa.eu/article/id/165208-cocoro-robot-swarms-use-collective-cognition-to-perform-tasks/es>
<https://www.nobbot.com/futuro/insectos-roboticos-robotica/>

2

2.2

<https://www.droneguru.es/espectaculos-de-drones-nocturnos-drone-light-shows/#t-1634000382403> [1]

<https://newsroom.intel.com/wp-content/uploads/sites/11/2019/06/intel-drone-light-show-fact-sheet.pdf> [2]

<https://inteldronelightshows.com/wp-content/uploads/sites/3/2021/01/Intel-Drone-Light-Show-Premium-Fact-Sheet-23112020.pdf> [3]

2.3

<https://www.droneblog.com/drone-light-show/> [4]
<https://www.xataka.com/drones/esta-magia-detras-espectacular-coreografia-que-enjambre-2-000-drones-ilumino-noche-shanghai>
<https://www.intel.es/content/www/es/es/technology-innovation/intel-drone-light-shows.html>
<https://www.diariodeleon.es/articulo/innova/drones-como-artificios/202110260333182157907.html>
<https://cursodedrones.es/drones-para-spectaculos/> [5]