



LOYAL WINGMAN Y EL DESARROLLO DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL: ESTADO DE LA CUESTIÓN

Christine Dugoin-Clément

Investigadora asociada en CREOGN
y en el Observatorio de Inteligencia Artificial y
Cátedra “Riesgo” de París 1

LOYAL WINGMAN Y EL DESARROLLO DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL: ESTADO DE LA CUESTIÓN

Sumario: 1.- EL CONCEPTO DE LOYAL WINGMEN; 2.- DISEÑOS REALES DE LOS LOYAL WINGMEN; 3.- GESTIONAR LOS PRINCIPALES ATRIBUTOS DEL VUELO EN FORMACIÓN; 3.1.- Encuentro formativo; 3.2- Retención de la formación; 3.3- Reconfiguración de la formación; 3.4.- Actividades formativas; 4.- DESAFÍO CLAVE PARA UN LOYAL WINGMAN FIABLE Y EFICIENTE.

Resumen: Los drones están cada vez más presentes en la vida cotidiana. Su uso también ha aumentado en los campos de la seguridad y la defensa, donde asumen tareas 5D (Dull, Dirty, Dangerous, Dear and Difficult, es decir, aburridas, sucias, peligrosas, queridas y difíciles por sus siglas en inglés) y ayudan a proteger a los hombres en el desempeño de tareas arriesgadas, así como a mejorar la visibilidad y la vigilancia de áreas alteradas y/o amplias. La evolución de los drones significa el auge de la inteligencia artificial, especialmente para los más sofisticados, como los Loyal Wingmen. Con la invasión rusa de Ucrania, los drones son objeto de especial interés, y el pedido realizado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos (DoD) de 1000 aviones de combate colaborativos por parte de Loyal Wingmen está en el punto de mira. En este contexto, este artículo presentará los principales retos a los que debe enfrentarse la IA para permitir el desarrollo de este tipo de drones específicos y presentará un estado de la cuestión del desarrollo de los Loyal Wingmen. Por último, a la luz de los problemas identificados, este artículo propondrá una vía de desarrollo industrial.

Abstract: Drones are increasingly present in everyday life. Their use has also increased in the fields of security and defense, where they take on the 5D task (Dull, Dirty, Dangerous, Dear and Difficult) and help protect men in the performance of risky tasks, as well as enhance the visibility and surveillance of disturbed and/or extended areas. The evolution of drones means the rise of artificial intelligence, especially for the most sophisticated ones, such as Loyal Wingmen. With the Russian invasion of Ukraine, drones are the focus of particular interest, and the US Department of Defense (DoD) place an order for 1,000 collaborative fighter jets by Loyal Wingmen is in the spotlight. In this context, this article will present the main challenges that AI must meet to allow the development of this type of specific drones and will make a state of the art of the development of Loyal Wingmen. Finally, in the light of the issues identified, this paper will propose an industrial development path.

Palabras clave: Drones, Loyal Wingmen, Inteligencia Artificial (IA).

Keywords: Drones, Loyal Wingmen, Artificial Intelligence (AI).

INTRODUCCIÓN

Los drones forman cada vez más parte del sistema de defensa y seguridad en todo el mundo. De hecho, desde hace más de una década, los drones han desempeñado un papel clave en la contrainsurgencia y la lucha contra el terrorismo (Mahadevan, 2010), así como en las misiones de control y vigilancia, aunque su uso está limitado por las legislaciones nacionales locales (Tsiamis, Efthymiou y Tsagarakis, 2019).

No obstante, los drones se han utilizado tanto para misiones militares como policiales. Podemos hacer referencia al uso de la vigilancia de fronteras (Shishkov, Hristozov, Janssen, van den Hoven, 2017; Brumfield, 2017) para la lucha contra la inmigración ilegal (Roma, 2017). En la Unión Europea, los ha utilizado Frontex (Tikanmaki, 2011; Marin, Krajčiková, 2016). Al otro lado del Océano Atlántico, la policía de algunos estados estadounidenses utiliza drones para el rastreo de delitos y el seguimiento de sospechosos, así como para el control de multitudes (Stelmack, 2014) y en operaciones de búsqueda y rescate (Villasenor, 2014).

En los escenarios de guerra, los drones tienen muchos usos diferentes según el tipo de dispositivo del que se trate: pueden ser vehículos terrestres no tripulados (UGV), vehículos marítimos no tripulados (UMV) o vehículos aéreos no tripulados (UAV).

Recientemente, la invasión rusa de Ucrania, que comenzó en febrero de 2022, puso de relieve el papel que pueden desempeñar los vehículos aéreos no tripulados, especialmente con los eficientes y ágiles drones utilizados y, a veces, fabricados por el ejército ucraniano y voluntarios ucranianos. En efecto, el Bayraktar TB2 turco (Witt, 2022) se ha hecho muy conocido y también observamos el Shaed-136 iraní movilizado por la Federación de Rusia (Eslami, 2022), así como, últimamente, el KUB-BLA, Lancet y Orlan (de Henning Michaëlis, 2023, Dugoin-Clément, 2023) y, luego, de Wasternes Switchblade et Phoenix Ghosts proporcionados a Ucrania (Dugoin-Clément, 2023) invitan a muchos expertos a cuestionar el papel de los drones en las guerras futuras (Fuhrmann y Horowitz, 2017; Al-Ghani, 2022; Kunertova, 2023; Calcara, Gilli, Gilli, Marchetti, Zaccagnini, 2022) a medida que los drones se convierten en una constante de los conflictos modernos.

Mientras tanto, Mykhailo Fedorov, viceprimer ministro ucraniano de Innovación, Educación, Ciencia y Tecnología y ministro de Transformación Digital, anunció en su canal de Telegram que las tres primeras compañías de ataque con vehículos aéreos no tripulados están listas para la batalla y forman parte del programa estatal del Ejército de los Drones con el apoyo de UNITED24, la plataforma oficial de recaudación de fondos de Ucrania. Ese proyecto incluye camionetas que se utilizarán para incursiones tras las líneas enemigas, la entrega de mercancías y la evacuación de las víctimas, vehículos aéreos no tripulados y helicópteros de ataque. Este anuncio se hizo eco del relativo a la primera unidad de ataque robotizada lanzada por la Federación Rusa en 2021, que supuso un paso más en el uso de la IA para aumentar las capacidades de combate rusas (McDermott, 2021). Aunque esos drones tuvieron resultados dispares en el campo de batalla sirio y no se habían utilizado en Ucrania, esta comunicación tuvo un efecto tremendo en los países occidentales en aquel entonces.

Esta evolución reciente invita a algunos investigadores a pensar en una «revolución no tripulada en los asuntos militares» (Stulberg, 2007; Bryen, 2017; Altmann

y Sauer, 2017) incluso si la Revolución en los Asuntos Militares (RMA) nacida en los años 70 para ser desarrollada en los años 80 y aplicada en los años 90 (Sloan, 2002; Davis, 1997) que quería beneficiarse de los Sistemas de Información (SI) para obtener una visión completa del teatro de guerra, no cumplió completamente las expectativas (Cansell y Desmoulin, 2017).

Hablando especialmente de los vehículos aéreos no tripulados, su uso en los próximos años tenderá a generalizarse en todos los niveles operativos, ya que ofrecen una amplia gama de servicios, desde el reconocimiento hasta la logística, pasando por los ataques de saturación y de eliminación selectiva. Como tales, muchos conceptos son estudiados por el complejo militar-industrial de todo el mundo. Si los enjambres de vehículos aéreos no tripulados son muy famosos, el Loyal Wingman está a punto de convertirse en la piedra angular del dominio aéreo y de la doctrina aérea del futuro. Los Loyal Wingmen son un tipo específico de dron que se ha convertido en algo fundamental en las estrategias aéreas, sobre todo desde que el 8 de marzo de 2023 las Fuerzas Aéreas estadounidenses anunciaron su plan de adquirir 200 cazas y no menos de 1000 drones CCA (Collaborative Combat Aircraft) en el marco de su programa NGAD (Next Generation Air Dominance). En la práctica, se asignarían dos drones a cada uno de los nuevos cazas de 6ª generación, así como a cerca de 300 F-35A, a la espera de posibles pedidos adicionales para equipar al resto de la flota de F-35. Sin embargo, las Fuerzas Aéreas estadounidenses aún no han seleccionado sus modelos de CCA, por lo que siguen desarrollando tecnologías, tácticas y doctrinas de empleo basadas en la primera generación de Loyal Wingmen, que está disponible en pequeñas cantidades (Losing, 2023).

En otras palabras, en línea con las esperanzas y expectativas de la RMA, se espera que en un futuro próximo los vehículos aéreos no tripulados ofrezcan importantes capacidades de cooperación e integración con los sistemas aliados del campo de batalla, mucho más allá de su uso actual. Sin embargo, hablar de enjambres de drones o de Loyal Wingmen implica abordar la Inteligencia Artificial (IA) que sustentará estos sistemas.

Por consiguiente, tras presentar el concepto de Loyal Wingman, este artículo se centrará en una presentación del principal tipo de IA dedicada a los drones, y terminará con una presentación del diseño real de la IA relacionada con Loyal Wingman.

1.- EL CONCEPTO DE LOYAL WINGMEN

La Revolución en los Asuntos Militares (RMA), una nueva doctrina militar, se desarrolló en la década de 1990 como resultado de la Guerra del Golfo y del desarrollo de la tecnología, especialmente en el campo de la tecnología de la información (Jablonsky, 1994; Arquilla y Ronfeldt, 1997). La Revolución Tecnológica Militar (RTM), que se desarrolló en la Unión Soviética en la década de 1970, puede considerarse el origen del concepto de RMA, que consiste en utilizar la tecnología para convertir el campo de batalla en un espacio de combate (Adamsky, 2008). El concepto básico de la MTR era que Occidente utilizaba los avances de la tecnología y la ciencia para neutralizar la amenaza que suponía el segundo escalón soviético. La Guerra del Golfo se considera un punto de inflexión porque muestra cómo está cambiando el campo de batalla. En este sentido, Blackwell, Mazarr y Snider (1991) explicaron que *«los efectos de la tecnología —en las armas guiadas de precisión, en los sistemas de lanzamiento sigilosos, en los sistemas avanzados de sensores y objetivos, en las plataformas de gestión de batallas— están*

transformando y, de hecho, ya han transformado de manera demostrable la forma en que las fuerzas armadas llevan a cabo sus operaciones» (pág. 21).

Como consecuencia, se están abriendo nuevos campos de investigación y desarrollo gracias al avance de la tecnología, sobre todo en el ámbito de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC). El sistema de mando y control (C2C) ha sufrido una profunda remodelación, y gran parte de la investigación se ha centrado en la sustitución de humanos por robots o en el desarrollo de las capacidades inherentes a los soldados. A raíz de ello surgieron las armas autónomas letales (LAW), los sistemas tripulados y las tecnologías de mejora humana (HET). En cuanto a las HET, el objetivo es crear tecnologías y métodos que ayuden a las personas a superar sus actuales limitaciones físicas y cognitivas (Parens, 1998; Agar, 2004; Naam, 2004; Wilsdon y Miller, 2006; Garreau, 2005). Se están realizando muchas investigaciones sobre las LAW y los sistemas no tripulados destinados a apoyar o sustituir al personal militar. Se espera que esa sustitución por drones sea a la vez *«moralmente preferible (por no hablar de estratégicamente ventajosa), ya que pueden utilizarse en lugar de combatientes humanos»* (Etzioni, 2018, pág. 1) y más eficaz gracias a la rapidez que permite la potencia de cálculo cuando el sistema se apoya en una Inteligencia Artificial (IA).

La sexta ola de RMA surgió en la década de 2000. Esta estrategia hizo hincapié en varios factores críticos. En particular, hace hincapié en cómo China y Rusia intensifican su confrontación estratégica con EE. UU. por la supremacía en diversos frentes, como el crecimiento político, económico y militar-tecnológico.

En consecuencia, otro factor importante es la aparición de dinámicas de innovación militar-tecnológica basadas en la fusión de ciencia y tecnología, en particular a través de la inteligencia artificial, el aprendizaje hombre-máquina, la manipulación cognitiva, y entre la ciberinteligencia y la inteligencia artificial (Raska, 2020). Según Raska (2020), la difusión de tecnologías de doble uso, en particular los sistemas autónomos y habilitados para la IA en el campo de batalla, está implícita en los dos primeros factores primarios.

Este contexto especial forma parte de la respuesta que explica que *«la aparición de una nueva y única ola de RMA habilitada por IA, es decir, la AI-RMA»* (pág. 8).

Con los desarrollos de la IA, ahora es posible considerar que algunas decisiones tomadas por los vehículos aéreos no tripulados pueden automatizarse con el uso de procedimientos de toma de decisiones, liberando a los comandantes humanos para que se concentren en elecciones más complejas en los escenarios bélicos actuales, dándoles una ventaja táctica clave.

En consecuencia, muchos países están interesados en crear proyectos de vehículos aéreos no tripulados (UAV) que actúen como acompañantes de los pilotos de combate, o equipos tripulados y no tripulados (MUM-T).

En términos generales, Loyal Wingman no tripulado, Loyal Wingman deshabitado y Loyal Wingman son palabras que se utilizan para describir un vehículo aéreo deshabitado que opera de forma autónoma bajo el mando táctico de un vehículo aéreo principal tripulado (Humphrey, 2016). En el Loyal Wingman desocupado no hay

ninguna aeronave pilotada a distancia. Los casos que hagan referencia a un vehículo tripulado incluirán la palabra «tripulado» en la descripción.

Se supone que los Wingmen leales son capaces de volar por sí solos sin ayuda humana. Esto es fundamental porque tener a una persona detrás de cada Wingman leal sería demasiado caro (Nentwich y Horváth, 2018) y anularía las ventajas del pilotaje por IA. Sin embargo, desarrollar un UAV con IA que pueda ser un Wingman fiable y eficaz es bastante caro, tanto desde el punto de vista financiero como medioambiental (desarrollo de UAV). De hecho, el desarrollo de drones puede resultar costoso, especialmente en cuanto a materiales (incluidas las tierras raras, como muchos productos de alta tecnología). Pero los Loyal Wingmen deben ser lo suficientemente asequibles si tenemos en cuenta que un Wingman leal debe ser teóricamente desechable.

Este artículo presentará una rápida reseña bibliográfica sobre el estado actual del desarrollo del Loyal Wingman, con el fin de exponer claramente el diseño presentado sobre la base de los datos disponibles.

2.- DISEÑOS REALES DE LOS LOYAL WINGMEN

Según un acuerdo general, los pilotos principales de los aviones de combate ya están sobrecargados de tareas (Houck, Whitaker y Kendall, 1992; Ree y Carretta, 1996; Mohanavelu, Poonguzhali, Adalarasu, Ravi, Chinnadurai, Vinutha y Jayaraman, 2020) y agradecen delegar tantas decisiones como puedan en sus Wingmen. Esto implica tanta autonomía en el sistema no tripulado como sea práctico con respecto a un fiel Wingman deshabitado. Por consiguiente, se requiere una arquitectura de mando y control compatible con las operaciones tripuladas contemporáneas, en las que un líder tripulado da instrucciones precisas. El Wingman fiel desocupado debe desempeñar las siguientes funciones: generar automáticamente un plan de misión basado en la comunicación del líder. En caso de que cambie el entorno de amenaza o los requisitos de la misión, ésta debe volver a planificarse de forma dinámica.

En consecuencia, los conectores tienen que encontrar formas tecnológicas de controlar los vehículos aéreos no tripulados, los grupos de vehículos aéreos no tripulados y el Loyal Wingman a lo largo de los cuatro atributos del vuelo en formación, a saber: encuentro formativo, retención de la formación, reconfiguración de la formación y actividades de escisión.

Otro reto clave para un Loyal Wingman fiable y eficiente desde una perspectiva global será escanear con éxito el entorno, crear escenarios (incluidos los dinámicos como indican Humphreys, Cobby, Jacques y Reeger (2016)), evaluar el mejor de esos escenarios, simular el combate y evaluar el impacto y la vulnerabilidad. En otras palabras, un Loyal Wingman debe poseer la capacidad de gestionar la idea principal, en particular la C2, el intelecto, la movilidad, la protección, la logística y el efecto (Stensrud, Mikkelsen, Betten y Valaker, 2021).

Otros marcos implican que el UAV actúe como planificador central de la segunda formación. Un sistema de este tipo tendría en cuenta un conjunto de tareas. En ese caso, un ordenador de a bordo en un único UAV calcula las trayectorias de misión de todos los vehículos aéreos no tripulados en formación y las comunica a los demás UAV de la formación para completar todas las tareas de la misión. Otro esquema sería un entorno de

control colaborativo similar a los comportamientos de enjambre, en el que todos los vehículos aéreos no tripulados en formación se comunicaran continuamente entre sí para determinar qué vehículo lleva a cabo cada tarea y encontrar la mejor manera de completar todos los objetivos de la misión.

Por último, además del reto de los sistemas de información, el Loyal Wingman es también un problema puramente aeronáutico. En efecto, este UAV tendrá que actuar en equipo con aviones de combate, especialmente de última generación, lo que supone que podrá ofrecer la misma capacidad de vuelo, velocidad y agilidad. De hecho, el desarrollo de los sistemas de información debe ir acompañado del desarrollo de la tecnología aeronáutica, lo que pone en competencia a las industrias de defensa.

3.- GESTIONAR LOS PRINCIPALES ATRIBUTOS DEL VUELO EN FORMACIÓN

Para convertirse en socios pilotos eficaces, los Loyal Wingmen deben ser capaces de gestionar los principales atributos del vuelo en formación y, luego, cumplir misiones técnicas que requieren cálculo y planificación. Esta planificación de la ruta implica dominar el control del circuito exterior, que incluye el control de planificación de la ruta mediante la teoría de grafos, el algoritmo de Dijkstra, la navegación proporcional, la línea de visión, la guía de terminales del modo de deslizamiento y las funciones de potencial artificial.

3.1.- Encuentro formativo

Este modismo recupera la unión de dos o más vehículos que parten de ubicaciones físicamente separadas en una formación destinada a durar un período de tiempo determinado.

Esta idea debe completarse con otra, el objetivo de encuentro, que aborda la cuestión de la llegada de varios vehículos desde distintos lugares físicamente enfrentados (Giulietti, 2000). Suponiendo que cada aeronave es un nodo y que las rutas de comunicación entre ellas son los bordes que conectan los nodos, se utiliza la teoría de grafos. El problema se resuelve reduciéndolo a un problema de ruta más corta y proporcionando una serie de supuestos. Se eligió el algoritmo de Dijkstra porque es determinista, solo tiene complejidad polinómica y garantiza la optimización (Smith, 2008; Park, 2003; Tahk, Park y Ryoo, 2005). La Guía de Terminales del Modo de Deslizamiento (SMTG) para el encuentro de aeronaves se usa porque la comunicación no es necesaria cuando se usa el modo de deslizamiento (Harl y Balakrishnan, 2008). La Navegación Proporcional (PN) produce aceleraciones de control proporcionales a la velocidad de rotación de la línea de visión detectada entre el interceptor y el objetivo y dirige estas fuerzas para reducir la velocidad o mantener esa velocidad constante. Al designar la función de restricción como una fuerza repulsiva y la función objetivo como una fuerza de atracción, se pueden utilizar funciones potenciales artificiales. Esto permite dirigir el vehículo de modo que se vea atraído por los objetivos y rechazado por las restricciones (Stickney, 2014; Garcia, Barnes y Fields, 2012).

3.2.- Retención de la formación

Tras el encuentro formativo, el objetivo es mantener la formación. Esto implica construir un campo potencial 3D que formará parte de la categoría de control del circuito exterior definida para la planificación secuencial de trayectorias. Para ello se recurrirá de nuevo a la teoría de grafos (Tanner, Jadbabaie y Pappas, 2003; Garcia, Barnes y Fields, 2012). Se supone que los UAV enjambre, como Loyal Wingmen, se comportan como grupos de animales y enjambres. En consecuencia, los ingenieros trabajaron en modelar comportamientos de enjambres reales, especialmente en su «*capacidad de lograr objetivos complejos mediante interacciones sinérgicas de componentes reaccionarios simples*» (Kovacina et al., 2002), y también desarrollaron métodos como el control predictivo de modelos multiplexados -MPC- (Weihua y Go, 2011; Ling et al. 2012). Este enfoque se sigue desarrollando (Yan, Yu y Wang, 2022) con el fin de aumentar el problema de detección de anomalías, así como para coordinar UAV y UAG (Chen, Li, Wang y Wang, 2022).

3.3.- Reconfiguración de la formación

Debido a los cambios que implica liderar una acción o por la incorporación de nuevos vehículos, el vuelo en formación puede requerir una reconfiguración de la formación. Esta reconfiguración depende en gran medida de los sistemas de comunicación, los sensores, las restricciones de la trayectoria de vuelo, así como del sistema que gestiona el vuelo colaborativo, como la optimización por enjambre de partículas -PSO- (Hu y Eberhart, 2002) definida y desarrollada por Duan, Ma y Luo (2008) y Duan y Liu (2006), o la colocación ortogonal directa (Ma, Huang y Zhuang, 2010), y sigue progresando y siendo objeto de investigación en la actualidad (Zhang et al., 2019; Li, B., Zhang, Dai Teo y Wang, 2020; Liu, Li y Ji, 2022).

3.4.- Actividades formativas

La formación puede tener que gestionar diferentes tipos de actividad, incluidas las escisiones. Los comportamientos emergentes y de enjambre son pertinentes para el desempeño de las actividades de escisión. Pero Kovacina et al. (2002) mencionan que los métodos de control tradicionales «*no proporcionan la flexibilidad y eficacia necesarias para satisfacer las demandas comerciales y militares de los enjambres de UAV*». En consecuencia, crea un algoritmo de control y utiliza una simulación de un enjambre de vehículos en una perspectiva de algoritmo de control de comportamiento emergente que se puede dividir en diferentes técnicas (Russell y Lamont, 2005; Teodorovic y Dell'Orco, 2005; Wang, Yadav y Balakrishnan, 2007; Sammut y Webb, 2011; Xie, Han, Dong, Li y Ren, 2021). Divide las actividades, ya que todas las reconfiguraciones tienen que minimizar el tiempo necesario para crear una nueva formación, lo cual es otro reto (Fukurawa et al, 2002).

4.- DESAFÍO CLAVE PARA UN LOYAL WINGMAN FIABLE Y EFICIENTE

Pero hablar de Loyal Wingman implica integrar cuestiones específicas que no siempre son competencia de otros vehículos aéreos no tripulados. Según Humphreys, Cobby, Jacques y Reeger (2016), se debe desarrollar una técnica que permita producir soluciones rápidas y autónomas para un control óptimo de los Loyal Wingmen. Esto debe ser para una trayectoria de misión única, pero los Loyal Wingmen deben ser capaces de generar

una nueva trayectoria de misión en un entorno cambiante. Como conclusión de su estudio, Humphreys, Cobby, Jacques y Reeger (2016) sugieren crear un algoritmo heurístico de optimización por enjambre de partículas (PSO) adaptado a un entorno de amenazas dinámico. Con la sugerencia de este artículo, parece que los combatientes que se convierten en Loyal Wingmen pueden utilizar el mismo concepto.

Un árbol de comportamiento (BT) fue la principal técnica utilizada en la reciente investigación de Giacomossi, Schwanz Dias, Brancalion y Maximo (2021) para tomar decisiones de forma descentralizada. Emplearon la técnica de optimización PSO para lograr este objetivo. Sus estudios lograron demostrar una eficacia del 93 % en la eliminación de amenazas. Además, Li, Han, Zhong, Ji y Mu propusieron en 2022 una estrategia de cazas tripulados y vehículos aéreos no tripulados que cooperan en el combate aéreo con una toma de decisiones inteligente basada en el algoritmo de gradiente de política determinista profundo (DDPG).

Además de estas cuestiones técnicas, los MUM-T implican que el ser humano acepta no interactuar con los vehículos aéreos no tripulados. Muchos estudios de investigación han demostrado que la aceptación de la tecnología está vinculada a la confianza que deposita en el sistema el ser humano que lo utiliza. Al no basarse en una relación interpersonal, la confianza en la IA y otros sistemas robóticos tendrá que construirse entre una persona y la máquina. Así, el vínculo de confianza entre el proveedor de tecnología (especialmente si es innovador) y el actor podría ser interdependiente (Wang y Siau, 2020) y depende, en particular, de la transparencia y la «explicabilidad» de los nuevos sistemas. Para estos autores, la confianza en la tecnología se basa en tres tipos de características: humanas, medioambientales y tecnológicas.

En consecuencia, parece que, además de las cuestiones técnicas relacionadas con el diseño de la IA dedicada a los Loyal Wingmen, estos drones tienen que inspirar confianza en su compañero piloto para ser completamente aceptados y, por lo tanto, plenamente utilizados.

DISCUSIÓN: justo lo necesario en los equipos tripulados y no tripulados (MUM-T) y propuesta de desarrollo

Como se ha mencionado anteriormente, los Loyal Wingmen representan un reto tecnológico, una pieza fundamental del futuro de las fuerzas aéreas y un desafío en términos de aceptabilidad, tanto porque tienen que cumplir con las características tecnológicas, humanas y medioambientales (entre las que se incluyen la explicabilidad, la competencia estimada del objeto y la naturaleza de la tarea asignada al dron) como porque no deben considerarse una amenaza para la profesión de los pilotos. Si bien la explicabilidad puede aumentarse mediante la formación y la educación de los pilotos en materia de SI, centrándose en algunos de los métodos expuestos en este artículo, no resolverá la competencia estimada del objeto, que está correlacionada con la disposición del piloto a confiar.

Teniendo en cuenta estos retos, postulamos que futuras investigaciones podrían abordar la propuesta de reutilizar aviones de combate bien conocidos por los pilotos para desarrollar una IA dedicada al Loyal Wingman.

De hecho, esta propuesta puede ser una forma de ahorrar tiempo al desarrollar simultáneamente la aeronave y el sistema de inserción que puede probarse en condiciones reales de vuelo, así como utilizando un amplio conjunto de datos.

Así pues, la reutilización de aviones de combate cuyo coste financiero ya se ha amortizado y para los que se dispone de bases de datos de vuelos de crucero y de combate podría ser una oportunidad. En efecto, equiparlos con IA que permita transformarlos en Loyal Wingmen podría tener una triple ventaja.

En primer lugar, permitiría el desarrollo de una IA dedicada y eficiente a bajo coste.

En segundo lugar, teniendo en cuenta que sus habilidades de vuelo y combate son conocidas por los pilotos, ayudaría a aumentar uno de los pilares de confianza mencionados anteriormente, permitiendo un cambio natural y progresivo hacia nuevos diseños de Loyal Wingmen.

Luego, al estar amortizados económicamente, su posible pérdida sería más sostenible, ya que los drones pueden tener una vida en combate muy limitada (a veces apenas más de un día en el caso de los drones utilizados en Ucrania, que desde luego no son Loyal Wingmen).

Por último, este despliegue de IA permitiría ahorrar tiempo de desarrollo al no tener que esperar a que el desarrollo final del dron esté equipado con esta IA, lo que permitiría a los industriales no retrasarse. En ese caso, cualquier retraso podría ser difícil de superar.

CONCLUSIÓN

En conclusión, los drones han desempeñado recientemente un papel predominante en los conflictos modernos, ya sea en la guerra entre Azerbaiyán y Armenia (Hecht, 2022; Kinik y Çelik, 2021) o desde la invasión de Ucrania por parte de Rusia en febrero de 2022 (Chávez, 2023; Dugoin-Clément, 2023). Con este reciente conflicto, los países occidentales se plantean con más voluntad reconstruir sus ejércitos. Equiparse con drones que puedan superar las habilidades humanas y, al mismo tiempo, proteger vidas, resulta cada vez más atractivo. Este atractivo se ve reforzado por el desarrollo de capacidades y potencia de cálculo que permiten desarrollar una IA cada vez más exitosa dedicada al pilotaje de drones, incluidos los vehículos aéreos no tripulados.

Sin embargo, desarrollar la IA en línea con las características de vuelo de los aviones de combate presenta una serie de complejidades. Este UAV debe comportarse como un compañero de equipo, ser capaz de realizar misiones de planificación, vigilancia y seguimiento. Pero también tiene que interactuar en tiempo real en un combate aéreo dentro de un equipo que combine aviones pilotados y Loyal Wingmen.

Además, si la aceptabilidad y la confianza en las tecnologías humanas nos obligan a pensar en la IA como algo explicable, las necesidades de seguridad son cruciales. Por consiguiente, hay que «reforzar» la IA, en particular para contrarrestar los ciberataques (especialmente la suplantación de identidad) y reducir la superficie de vulnerabilidad.

Por último, estos drones tienen que estar diseñados para poder ser acompañados por aviones de combate de 5ª y 6ª generación, lo que implica tener más o menos las mismas capacidades en acciones de vuelo y de combate. Pero también tienen que poder ser prescindibles, ya que pueden verse obligados a sacrificarse para proteger al avión de combate pilotado por humanos, lo que implica unos costes de producción sostenibles.

Por último, la bibliografía ha descrito en varias ocasiones que para ser explotados los sistemas deben ser aceptados por sus usuarios. Esta aceptabilidad se basa en varias características, entre ellas la voluntad de confiar en los propios sistemas y la confianza en las competencias de los mismos

Nos parece pertinente plantearnos la posibilidad de reutilizar cazas antiguos para entrenar a la IA. Podría ser una opción interesante, ya que facilitaría la confianza de los pilotos al conocer perfectamente el caza, que es el portador del nuevo socio de IA. Además, podría tratarse de una transición que mejorara la confianza de los pilotos en el sistema antes de pasar a un dron con un diseño completamente nuevo y, por lo tanto, con habilidades de vuelo poco conocidas y, en cualquier caso, no experimentadas empíricamente por los pilotos.

Además, el tiempo de entrenamiento de la IA podría acortarse si se utilizaran bases de datos existentes, recopiladas durante misiones pasadas realizadas por los aviones de combate ya explotados. Eso permitiría desarrollar IA explicables (Gunning, Stefik, Choi, Miller, Stumpf y Yang, 2019; Arrieta et al., 2020; Tjoa y Guan, 2020; Meske, Bunde, Schneider y Gersch, 2022; Dwivedi et al., 2023), tal y como las concibe la DARPA estadounidense (Gunning y Aha, 2019), y reforzadas, sin esperar a la finalización de los UAV en los que deberán instalarse. Este ahorro de tiempo representará una ventaja significativa para el complejo militar-industrial, en el que la competencia en estos proyectos de desarrollo es particularmente dura.

Por último, si Loyal Wingmen se refiere directamente a los desarrollos destinados a ser desarrollados para uso militar, conviene pensar en desarrollos similares que podrían implementarse con fines de seguridad, pero también para uso civil. De hecho, en esos otros campos, la aceptabilidad de la tecnología y el control de los costes de producción también serán un problema.

BIBLIOGRAFÍA

- Altmann, J. y Sauer, F. 2017. Autonomous Weapon Systems and Strategic Stability *Survival*, vol. 59, núm. 5, págs. 117–142, <https://doi.org/10.1080/00396338.2017.1375263>.
- al-Garni, A. D. 2022. Drones in the Ukrainian war: will they be an effective weapon in future war? Estudio de Rasanah
- Arrieta, A. B., Díaz-Rodríguez, N., Del Ser, J., Bennetot, A., Tabik, S., Barbado, A., etc. y Herrera, F. (2020). Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts, taxonomies, opportunities and challenges toward responsible AI. *Information fusion*, 58, 82-115.
- Brumfield, E. 2014. Armed Drones for Law Enforcement: Why It Might Be Time to Re-Examine the Current Use of Force Standard. *McGeorge Law Rev*, 46, 543

- Bryen, S. 2017. Armed Drones Revolutionizing the Future of War, *Asia Times*, 9 de diciembre de 2020, <https://asiatimes.com/2020/12/armed-drones-revolutionizing-the-future-of-war/>.
- Calcara, A., Gilli, A., Gilli, M., Marchetti, R., Zaccagnini, I., 2022. Why Drones Have Not Revolutionized War: The Enduring Hider-Finder Competition in Air Warfare. *International Security* 2022; 46 (4): 130–171. doi: https://doi.org/10.1162/isec_a_00431
- Cansell, P. y Desmoulin, L. 2017. De la RMA à la guerre infocentrée : retours d'expérience sur les promesses inaccomplies de la numérisation et du big data. COSSI - Méthodes et stratégies de gestion de l'information par les organisations : des "big data" aux "thick data", mayo de 2017, Montréal, Francia. págs. 50-61. .hal-02984391.
- Chávez, K. (2023). Learning on the Fly: Drones in the Russian-Ukrainian War. *Arms Control Today*, 53(1), 6-11.
- Chen, M., Li, B., Wang, J., y Wang, G. (noviembre de 2022). A Formation Control Algorithm for Air-Ground Cooperative UAV. En *2022 14th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)* (págs. 741-747). IEEE.
- Davis, N. C. (1997). An information-based revolution in military affairs. RAND-PUBLICATIONS-MR-ALL SERIES-, 79-98.
- de Henning Michaëlis, S. (2023). Turkey's And Iran's Drone Supply In The War In Ukraine. *Policy*, (21).
- Duan, HB., Ma, GJ. y Luo, DL. 2008. Optimal formation reconfiguration control of multiple UAVs using improved particle swarm optimization. *Journal of Bionic Engineering*, 5(4):340-347 doi:10.1016/S1672-6529(08)60179-1.
- Duan, HB. y Liu, SQ. 2010. Non-linear dual-mode receding horizon control for multiple unmanned air vehicles formation flight based on chaotic particle swarm optimisation. *Control Theory & Applications*, IET, 4(11):2565 {2578, 2010. doi:10.1049/iet-cta.2009.0256.
- Dugoin-Clément. C. 2023. Ukraine-Russie : un an de guerre des UAVs. *DSI*
- Dugoin-Clément, C. 2023. Ukraine, Russie et high-tech, un an après le déclenchement de l'invasion. *Revue Défense Nationale*, (2), 37-42.
- Dwivedi, R., Dave, D., Naik, H., Singhal, S., Omer, R., Patel, P., etc. y Ranjan, R. (2023). Explainable AI (XAI): Core ideas, techniques, and solutions. *ACM Computing Surveys*, 55(9), 1-33.
- Eslami, M. 2022. Iran's drone supply to Russia and changing dynamics of the Ukraine war. *Journal for Peace and Nuclear Disarmament*, 5(2), 507-518.
- Fuhrmann, M. y Horowitz, M.C. 2017. "Droning On: Explaining the Proliferation of Unmanned Aerial Vehicles," *International Organization*, Vol. 71, Núm. 2, 397–418, <https://doi.org/10.1017/S0020818317000121>.
- Furukawa, T., Durrant-Whyte, HF., Bourgault, F. y Dissanayake, G., 2003. Time-optimal coordinated control of the relative formation of multiple vehicles. *En Computational Intelligence in Robotics and Automation, Proceedings 2003 IEEE International Symposium on, volumen 1, 259-264. IEEE, 2003. DOI: 10.1109/CIRA.2003.1222099*.
- Garcia, RD., Barnes, L y Fields, MA. 2012. Unmanned aircraft systems as wingmen. *The Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology*, 9(1):5 {15, 2012. doi:10.1177/1548512910391217.
- Giacomossi, L., Schwanz Dias, S., Brancalion J. F. y Maximo, M. R. O. A. 2021 "Cooperative and Decentralized Decision-Making for Loyal Wingman UAVs," 2021

- Latin American Robotics Symposium (LARS), 2021 Brazilian Symposium on Robotics (SBR), and 2021 Workshop on Robotics in Education (WRE)*, Natal, Brasil, 2021, págs. 78-83, doi: 10.1109/LARS/SBR/WRE54079.2021.9605468.
- Giulietti, F., Pollini, L e Innocenti, M., 2000. Autonomous formation flight. *Control Systems, IEEE*, 20(6):34-44, 2000.
 - Gunning, D., Stefik, M., Choi, J., Miller, T., Stumpf, S., y Yang, G. Z. (2019). XAI— Explainable artificial intelligence. *Science robotics*, 4(37), eaay7120.
 - Gunning, D., y Aha, D. (2019). DARPA’s explainable artificial intelligence (XAI) program. *AI magazine*, 40(2), 44-58.
 - Harl, N. y Balakrishnan, S. N., 2008. Coordinated rendezvous of unmanned air vehicles to a formation: A sliding mode approach. *En AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, 2008*.
 - Hecht, E. (2022). Drones in the Nagorno-Karabakh War: Analyzing the Data. *Mil. Strateg. Mag*, 7, 31-37.
 - Houck, M. R., Whitaker L. A. y Kendall, R. R. 1992 "A cognitive classification of pilot performance in air combat," *Proceedings of the IEEE 1992 National Aerospace and Electronics Conference@NAECON 1992, Dayton, OH, USA, 1992*, págs. 503-509 vol. 2, doi: 10.1109/NAECON.1992.220524.
 - Hu, X. y Eberhart, R. 2002. Solving constrained nonlinear optimization problems with particle swarm optimization. *En Proceedings of the Sixth World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics*, volumen 5, páginas 203-206. Citeseer, 2002.
 - Humphreys, C. J. (2016). Optimal control of an uninhabited loyal wingman.
 - Kinik, H., y Çelik, S. (2021). The Role of Turkish Drones in Azerbaijan’s Increasing Military Effectiveness. *Insight Turkey*, 23(4), 169-192.
 - Kunertova, D. 2023. The war in Ukraine shows the game-changing effect of drones depends on the game. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 79(2), 95-102
 - Kovacina MA., Palmer, D., Yang, G. y Vaidyanathan, R., 2002. Multi-agent control algorithms for chemical cloud detection and mapping using unmanned air vehicles. *En International Conference on Intelligent Robots and Systems, volumen 3, 2782-2788. IEEE, 2002*. doi:10.1109/IRDS.2002.1041691.
 - Li, B., Zhang, J., Dai, L., Teo, K. L., y Wang, S. (2020). A hybrid offline optimization method for reconfiguration of multi-UAV formations. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 57(1), 506-520.
 - Ling, KV., Maciejowski, J., Richards, A. y Wu, BF., 2012. Multiplexed model predictive control. *Automatica*, 48(2):396-401.
 - Liu, G., Li, B., y Ji, Y. (2022). A modified HP-adaptive pseudospectral method for multi-UAV formation reconfiguration. *ISA transactions*, 129, 217-229.
 - Losing, S. 2023. US Air Force eyes fleet of 1,000 drone wingmen as planning accelerates
Defense News, March 8th
 - Ma, G., Huang, H. y Zhuang, Y. 2010. Time optimal trajectory planning for reconfiguration of satellite formation with collision avoidance. *En Control and Automation (ICCA), 2010 8th IEEE International Conference on*, 476-479. IEEE, 2010.
 - Mahadevan, pág. 2010. The military utility of drones. *CSS Analyses in Security Policy*, 78.

- Marin, L.; Krajčíková, K. 2016. Deploying Drones in policing southern European borders: Constraints and challenges for data protection and human rights. En *Drones and Unmanned Aerial Systems*; Springer: Berlín/Heidelberg, Alemania, págs. 101-127
- McDermott, R. 2021. Moscow Forming First Robotic Military Units, *Eurasia Daily Monitor* Volume: 18 Issue: 64
- Meske, C., Bunde, E., Schneider, J., y Gersch, M. (2022). Explainable artificial intelligence: objectives, stakeholders, and future research opportunities. *Information Systems Management*, 39(1), 53-63.
- Mohanavelu, K., Poonguzhali, S., Adalarasu, K., Ravi, D., Chinnadurai, V., Vinutha, S., etc. y Jayaraman, S. (2020). Dynamic cognitive workload assessment for fighter pilots in simulated fighter aircraft environment using EEG. *Biomedical Signal Processing and Control*, 61, 102018.
- Park, S. 2003. *Avionics and Control System Development for Mid-Air Rendezvous of Two Unmanned Aerial Vehicles*. Tesis doctoral, Instituto de Tecnología de Massachusetts, 2003.
- Ree, M. J., y Carretta, T. R. (1996). Central role of g in military pilot selection. *The International Journal of Aviation Psychology*, 6(2), 111-123.
- Roma, A. 2017. Drones and popularisation of space, *Space Policy*, 41, 65–67
- Russell, MA. y Lamont, GB. 2005. A genetic algorithm for unmanned aerial vehicle routing. In *Proceedings of the 7th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation*, 1523-1530. ACM.
- Sammut, C. y Webb, GI. 2011. *Encyclopedia of Machine Learning*. Springer Science & Business Media.
- Shishkov, B.; Hristozov, S.; Janssen, M.; van den Hoven, J. 2017. Drones in Land Border Missions: Benefits and Accountability Concerns. En *Proceedings of the 6th International Conference on Telecommunications and Remote Sensing*, Delft, Países Bajos 6–7 de noviembre 2017; págs. 77–86.
- Siau, K y Wang W. 2020. Building Trust in Artificial Intelligence, Machine Learning, and Robotics, *Cutter Business Technology Journal*, Vol. 31, Núm. 2
- Sloan, E. C. 2002. *Revolution in Military Affairs* (Vol. 5). McGill-Queen's Press-MQUP
- Smith. AL. 2008. Proportional navigation with adaptive terminal guidance for aircraft rendezvous. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 31(6):1832{1836, 2008. doi: 10.2514/1.33535.
- Stelmack, K. 2014. Weaponized Police Drones and Their Effect on Police Use and Force. *J. Technol. Law Policy*, 15, 276
- Stickney, HM 2014. Performance characterization, development, and application of artificial potential function guidance methods. *Technical report, DTIC Document*, 2014.
- Stulberg, AN. 2017. Managing the Unmanned Revolution in the U.S. Air Force,” *Orbis*, Vol. 51, Núm. 2 (2007), págs. 251–265, <https://doi.org/10.1016/j.orbis.2007.01.005>
- Tahk, M. J., Park, C. S., y Ryoo. C. K., 2005. Line-of-sight guidance laws for formation flight. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 28(4):708{716, 2005. doi: 10.2514/1.9605.
- Tanner, HG., Jadbabaie, A. y Pappas, GJ. 2003 Stable flocking of mobile agents, part i: Fixed topology. En *Decision and Control, Proceedings of the 42nd IEEE Conference on*, volumen 2, páginas 2010-2015. IEEE, 2003.

- Teodorovic, D y Dell’Orco, M., 2005. Bee colony optimization - a cooperative learning approach to complex transportation problems. *En Advanced OR and AI Methods in Transportation, Proceedings of 16th Mini EURO Conference, 51-60. Poznan Publishing House of the Polish Operational and System Research.*
- Tikanmäki, I., 2011. *Possibilities to Operational Use of Remotely Piloted Aircrafts in Finland.* Master’s Thesis, Laurea-ammattikorkeakoulu, Vantaa, Finlandia, 2011.
- Tjoa, E., y Guan, C. (2020). A survey on explainable artificial intelligence (xai): Toward medical xai. *IEEE transactions on neural networks and learning systems*, 32(11), 4793-4813.
- Tsiamis, N., Efthymiou, L., y Tsagarakis, K. P. 2019. A comparative analysis of the legislation evolution for drone use in OECD countries. *Drones*, 3(4), 75.
- Villasenor, J. 2014. “Drones” and the future of domestic aviation. *Proc. IEEE*, 102, 235–238
- Wang, X., Yadav, V., y Balakrishnan, S. N. (2007). Cooperative UAV formation flying with obstacle/collision avoidance. *IEEE Transactions on control systems technology*, 15(4), 672-679.
- Weihua, Z. y Go, TH. 2011. Robust decentralized formation flight control. *International Journal of Aerospace Engineering.*
- Witt, S. 2023. The Turkish Drone That Changed the Nature of Warfare, *the NewYorker*, 16 de mayo, 2022.
- Xie, Y., Han, L., Dong, X., Li, Q., y Ren, Z. (2021). Bio-inspired adaptive formation tracking control for swarm systems with application to UAV swarm systems. *Neurocomputing*, 453, 272-285.
- Zhang, B., Sun, X., Liu, S., y Deng, X. (2019). Adaptive differential evolution-based receding horizon control design for multi-UAV formation reconfiguration. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 17(12), 3009-3020.