

Estrategia de prevención de colisiones entre drones basada en campos potenciales artificiales

Jamie Wubben¹, Stefan van der Veecken², Carlos T. Calafate¹, Juan-Carlos Cano²,
Pietro Manzoni², Johann Marquez-Barja³

Resumen— Desde hace algunos años, la investigación sobre el uso de vehículos aéreos no tripulados (VANTs) se ha vuelto muy popular, y por ello ya existe una amplia gama de aplicaciones comerciales y militares. Concretamente, la tendencia hacia el vuelo autónomo va en aumento. Dicho vuelo requiere que los VANTs tengan la capacidad de navegar en entornos urbanos o en otros entornos difíciles sin causar colisiones, ni poner en peligro a los seres humanos. Para lograr este objetivo es necesario utilizar un sistema anti-colisión (SAC) seguro y fiable. En concreto, un SAC tiene que percibir y detectar con éxito una posible colisión con un objeto para evitar eficazmente el obstáculo. Existen múltiples técnicas diferentes para implementar un SAC. En este artículo proponemos un protocolo para evitar colisiones que se basa en las fuerzas magnéticas de atracción y repulsión. Los resultados muestran que, con el uso de nuestro protocolo, las colisiones se evitan con seguridad en varios escenarios, manteniendo al mínimo el tiempo de vuelo adicional introducido por dicho proceso.

Palabras clave— VANT; campos potenciales artificiales; ArduSim.

I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, los vehículos aéreos no tripulados (VANTs) están cada vez más presentes en nuestra vida cotidiana. Esto porque se pueden utilizar los VANTs en una amplia variedad de sectores tales como: militar, comercial, agricultura, búsqueda y rescate, vigilancia y seguridad pública [1]. Las principales ventajas de los VANTs frente a los vehículos aéreos tripulados son: (i) su bajo coste, (ii) su capacidad para operar en zonas de difícil acceso, y (iii) la característica inherente de poder operar sin necesidad de un piloto humano dentro de la aeronave, y así no poner vidas en peligro [2]. Lo ideal sería que los vehículos aéreos no tripulados fueran capaces de volar de forma totalmente autónoma en entornos urbanos y otros entornos difíciles. Además de eso, los VANTs también deberían ser capaces de volar en el espacio aéreo integrado sin colisionar con otros vehículos aéreos, y tanto la regulación nacional de cada país, como los reglamentos de la UE 2019/947 y 2019/945 (EASA), deberían ser tenidos en cuenta en el control de vuelo de los VANTs, y en la planificación de su trayectoria [3].

¹Dpto. de Informática de Sistemas y Computadores (DISCA), Universitat Politècnica de València (UPV), España

²Faculty of Applied Engineering, University of Antwerp, Bélgica

³imec - University of Antwerp, Bélgica
E-mail: jwubben@disca.upv.es,
Stefan.vanderVeecken@student.uantwerpen.be,
calafate@disca.upv.es, jucano@disca.upv.es,
pmanzoni@disca.upv.es,
Johann.Marquez-Barja@uantwerpen.be

La investigación sobre el control de vuelo automatizado para los VANTs también se ha vuelto más compleja debido a los nuevos requisitos. Estos están asociados al creciente abanico de tipos de misión y de condiciones de vuelo [4]. De hecho, los entornos dinámicos, como las ciudades, suponen un reto para los VANTs, o incluso para los enjambres de VANTs, porque tienen que operar sin provocar colisiones con obstáculos estáticos (por ejemplo, edificios) y/o con objetos dinámicos (por ejemplo, otros VANTs). Para hacer frente a estos retos es necesario implementar sistemas para la detección y evitación de colisiones que garanticen un funcionamiento autónomo, seguro y fiable de un VANT. La robustez y la tolerancia a los fallos son muy importantes para estos mecanismos, ya que una colisión puede tener consecuencias catastróficas y suponer un peligro potencial para las personas. Sin embargo, existen muchas soluciones para detectar y evitar las colisiones. Normalmente, los vehículos aéreos no tripulados disponen de varios sensores a bordo para lograr el conocimiento de la situación y la toma de decisiones autónoma. La detección de obstáculos, la evitación de colisiones, y la planificación de la trayectoria, son elementos cruciales para el funcionamiento autónomo. En la figura 1 se ofrece una visión general de los posibles métodos y tecnologías para la detección y evitación de colisiones. [2].

El primer paso de un sistema anticolidión es la percepción (o detección) de un obstáculo, que se consigue mediante el uso de sensores. Se pueden utilizar diferentes tipos de sensores (es decir, sensores activos y sensores pasivos) para percibir el entorno y detectar obstáculos fijos u en movimiento. Cuando se detecta una posible colisión, se utiliza un enfoque de evitación de colisiones para determinar un nuevo curso de acción para el UAV, o para calcular una nueva ruta. Se pueden definir cuatro enfoques principales:

- **Enfoques geométricos:** en estos enfoques se utiliza la información de localización, posición y velocidad del VANT, así como del obstáculo, para calcular una nueva ruta.
- **Enfoques de campo de fuerza:** utilizando métodos de campo potencial artificial (APF), el VANT y los obstáculos se tratan como partículas cargadas en estos enfoques y, debido a las fuerzas de atracción/repulsión, se planifica una nueva trayectoria [5].
- **Enfoques optimizados:** tienen en cuenta los obstáculos estáticos previamente conocidos, y calculan la ruta más óptima para evitarlos. Sin

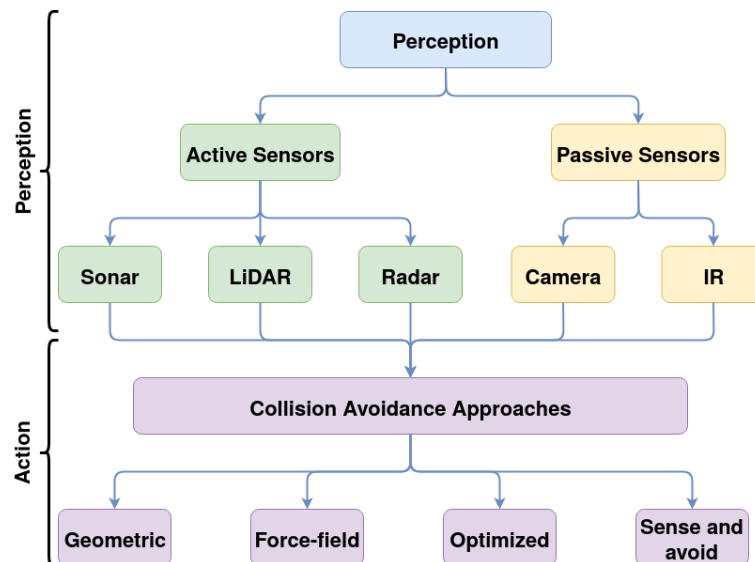


Fig. 1: Métodos y tecnologías para la prevención de colisiones.

embargo, estos métodos no son aplicables a los obstáculos móviles.

- **Sentir y evitar (Sense & Avoid):** toman decisiones en tiempo de ejecución para la evasión de obstáculos basándose en la detección de los mismos.

Un VANT aplica uno o varios de estos enfoques para resolver un conflicto. La capacidad de resolver estos conflictos es crucial para el vuelo autónomo de los VANTs, evitando estrellarse y causar cualquier daño o perjuicio a los seres vivos.

En este artículo, proponemos un método de campo de fuerza que utiliza APF para evitar colisiones entre VANTs. Presentamos una descripción formal de nuestra solución y, a continuación, validamos el protocolo utilizando dos escenarios diferentes. Además, también determinamos el impacto de aumentar o disminuir los niveles de seguridad mediante el ajuste de parámetros. Los resultados obtenidos muestran la eficacia de nuestra solución a la hora de evitar colisiones, introduciendo sólo pequeños retrasos en las diferentes misiones de los VANTs.

El resto de este documento se organiza de la siguiente manera: en la Sección II se presentan algunos trabajos relacionados. En la Sección II-E se profundizará en la solución que proponemos. A continuación, la sección III describirá los métodos utilizados y los experimentos realizados para validar la solución. Después, los resultados de estos experimentos se analizarán en la sección IV. Este documento concluirá en la sección V, incluyendo referencia a posibles trabajos futuros.

II. TRABAJOS RELACIONADOS

La detección y evitación de colisiones es crucial para el vuelo autónomo de los VANTs. Se pueden utilizar diferentes estrategias y enfoques, y cada uno de ellos tiene sus características únicas, como se ha presentado anteriormente. Por lo tanto, también podría utilizarse una combinación de estrategias. Sin embargo, siempre

hay que tener en cuenta las limitaciones (es decir, la potencia de cálculo). Según [2] la mayoría de las estrategias para evitar colisiones pertenecen a una de las siguientes categorías:

A. Enfoque geométrico

Los enfoques geométricos calculan una nueva trayectoria dada la información geométrica (por ejemplo, velocidad, ubicación, rumbo) del propio VANT y del obstáculo implicado. Una vez que se detecta una posible colisión, se calcula una nueva trayectoria con la información geométrica de ambas partes para evitar la colisión con la menor desviación posible.

En [6] se utiliza un sistema de Vigilancia Dependiente Automática (ADS-B) para detectar otros vehículos aéreos, y se propone un enfoque geométrico para evitar colisiones.

B. Métodos de campos de fuerza

Los métodos de campo de fuerza o de campo potencial artificial utilizan el concepto de partículas cargadas para evitar las colisiones. Las fuerzas de repulsión y atracción se utilizan para repeler un VANT de un obstáculo o atraerlo hacia otro objeto, respectivamente. Esta técnica funciona bien en entornos estáticos, pero su aplicación a entornos dinámicos es compleja, ya que necesita la información geométrica y el conocimiento del movimiento tanto de los robots como de los obstáculos [2].

En [7] los autores proponen un algoritmo de optimización basado en campos potenciales artificiales, e implementaron con éxito este método para resolver el problema del objetivo inalcanzable, teniendo además en cuenta a otros VANT como obstáculos.

En [8] los autores sugieren el uso de un método APF mejorado para controlar un clúster de múltiples VANTs. Concretamente, utilizan el concepto de núcleo virtual para el control del clúster, y proponen un componente de perturbación atractivo junto con el método de backtracking-filling para resolver

el problema del mínimo local en el APF. Además, utilizan el conocido método k-means para integrar y encontrar la fuerza atractiva óptima entre los UAV.

Liu y Zhao [9] proponen el uso de puntos de ruta virtuales para resolver el problema del mínimo local. Si un VANT queda atrapado por habitar alrededor de un mínimo local, se calcula un waypoint virtual. El punto de ruta ejerce fuerzas adicionales, por lo que el VANT puede escapar del mínimo local. El punto de ruta virtual se cancela después de que el VANT haya escapado, de modo que la planificación de la ruta original puede continuar.

C. Trayectorias de escape optimizadas

En los métodos basados en la optimización, la evitación de colisiones se considerará un problema o una ecuación que requiere optimización. En los cálculos de optimización se utiliza información geográfica, así como la posición y el tamaño de los obstáculos [5]. Teniendo en cuenta la limitada potencia de cálculo de los VANTs, la elevada complejidad de estos cálculos supone un problema. Para solucionarlo se han desarrollado varios métodos de optimización, como los algoritmos inspirados en hormigas, los algoritmos genéticos, la optimización bayesiana, los métodos basados en el descenso de gradiente, la optimización por enjambre de partículas, los métodos *greedy*, y las aproximaciones locales [2].

Pérez-Carabaza et al. [10] proponen un algoritmo de búsqueda en tiempo mínimo (MTS) basado en colonias de hormigas para encontrar una trayectoria optimizada libre de colisiones para un VANT, mientras se asegura la comunicación continua con la estación de control en tierra.

D. Métodos de detección y evitación

En los métodos de detección y evitación, los VANTs están equipados con diferentes sensores para detectar obstáculos y evitarlos rápidamente. El objetivo principal de estos métodos es reducir la potencia de cálculo necesaria en los VANTs para acortar los tiempos de respuesta. Por lo tanto, los métodos de detección y evitación son adecuados para entornos dinámicos [2].

En [11], los autores proponen el uso de un LIDAR 2D para detectar obstáculos. Su método es capaz de distinguir entre obstáculos estáticos y dinámicos, así como de seguir objetos dinámicos. El algoritmo ha demostrado ser más eficiente en cuanto a la memoria requerida y la potencia de cálculo necesaria.

Debido a su elevada precisión, el LIDAR se utiliza a menudo para detectar obstáculos. Por ello, se han diseñado muchas metodologías de vanguardia para trabajar con datos LIDAR. Sin embargo, los sensores LIDAR son caros, y pueden utilizarse otros sensores más baratos, como los de sonido ultrasónico, si sus datos (de detección) se adaptan adecuadamente. Para permitir una fácil integración en los sistemas existentes, Balemans et al. [12] crearon un autoencoder convolucional apilado que puede predecir (con gran precisión) los datos LIDAR en base a mediciones de ultrasonido.

E. Solución propuesta

La solución que proponemos se basa en el método de los campos de fuerza, que se apoya en los principios del magnetismo para definir un campo potencial artificial (APF). En concreto, se basa en la interacción entre las fuerzas de atracción y repulsión. Las fuerzas de atracción se utilizarán para atraer al VANT hacia un objetivo específico, mientras que las fuerzas de repulsión empujarán al VANT en la dirección opuesta a la fuerza, y se utilizarán para evitar obstáculos y otros VANT que vuelen en las proximidades. El vector resultante, el cual determina la velocidad y la dirección del VANT, se genera sumando las fuerzas de atracción y repulsión. En este trabajo, las fuerzas sólo se aplicarán en el eje X y en el eje Y, lo que significa que los VANT mantienen fijos los valores del eje Z para evitar los obstáculos del suelo, y también para evitar sobrepasar los límites legales de altitud de vuelo. Por lo tanto, un VANT no evadirá un obstáculo ajustando su altitud de vuelo.

Durante una misión, un VANT vuela de un punto de referencia al otro (utilizando el GPS). Cada uno de ellos actuará consecutivamente como una fuerza de atracción para el VANT, y, por lo tanto, tirará del VANT hacia cada uno de ellos a medida que avance la misión. Los propios VANTs actuarán como fuerzas de repulsión para otros VANTs, y, por lo tanto, se repelerán entre sí para evitar colisiones.

El VANT se controla utilizando un vector de dirección de movilidad que consiste en múltiples vectores sumados. En primer lugar, se calculará el vector que apunta hacia el próximo destino. Lo llamamos vector de atracción. El tamaño de la fuerza de atracción depende de la distancia entre el VANT y el punto de referencia.

El vector de atracción supone la velocidad máxima del VANT en el momento de la puesta en marcha. Para el propósito de este trabajo, asumimos que la velocidad máxima de un VANT es de 10 m/s (típica para la mayoría de las misiones que utilizan multicopteros). Una vez que la distancia entre un VANT y su destino alcanza un determinado valor umbral, la fuerza de atracción empezará a disminuir y, por tanto, la velocidad del VANT será menor, tal y como se muestra en la figura 2. Un VANT no frenará repentinamente al alcanzar su objetivo; en su lugar, romperá la inercia reduciendo gradualmente su velocidad. Esto se hace para evitar que el VANT sobrepase su objetivo. Si un VANT vuela más allá de su objetivo, reducirá la velocidad y cambiará la dirección hacia el destino de nuevo. Si el VANT siguiese sobrepasando su objetivo, esto se convertiría en un bucle sin fin, y nunca se alcanzaría el destino.

El VANT se controla mediante vectores en los planos X, Y, Z. Estos vectores tienen valores en metros por segundo. El entorno del VANT consiste en fuerzas de atracción y repulsión, que se mapean en estos vectores de velocidad. Los vectores se representan en forma polar, siendo r la magnitud del vector, y θ el ángulo, y diferentes vectores que actúen sobre un mismo VANT se pueden sumar para crear un nuevo

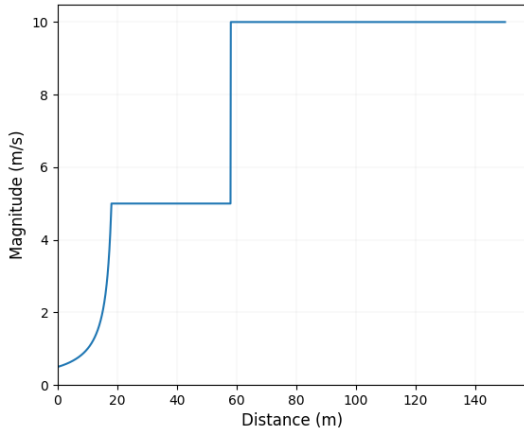


Fig. 2: Magnitud de la atracción frente a la distancia.

vector. Dicho vector se convierte de nuevo a su forma cartesiana para utilizar en los comandos del controlador de vuelo. Para mapear las fuerzas en un vector, primero se calcula la magnitud, y, en segundo lugar, se calcula el ángulo θ usando la posición del VANT y el punto usado como referencia. La magnitud de la fuerza de atracción de los puntos de referencia sobre los VANTs se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$r_{attr} = \begin{cases} v_{max} & \text{if } d > d_0 \\ \frac{v_{max}}{2} & \text{if } d_s < d < d_0 \\ \frac{v_{max}}{d_s - d} & \text{if } d < d_s \end{cases} \quad (1)$$

Con el uso de esta fórmula (véase la figura 2 para una representación gráfica), el VANT volará a toda velocidad (10 m/s) mientras esté lejos del punto de referencia ($d_0 = 58m$). Cuando el VANT se acerca al punto de referencia, la velocidad se reduce a la mitad. Finalmente, cuando el VANT se acerque al punto de referencia ($d_s = 15m$) la velocidad se reducirá de forma inversamente proporcional a la distancia. Esto hará que el VANT reduzca gradualmente su velocidad y se acerque lentamente al punto de referencia, sin sobrepasarlo.

Otros VANTs que vuelen cerca se consideran obstáculos en movimiento y, por lo tanto, generan una fuerza de repulsión para evitar colisiones. Para que los vehículos aéreos no tripulados se conozcan entre sí, cada uno de ellos emite balizas a un ritmo constante. Estas balizas incluyen una identificación, una marca de tiempo, la ubicación más reciente y la velocidad del emisor. Cualquier VANT, al recibir dicha baliza, calcula la distancia entre ambos VANTs con esta información. Dependiendo de la distancia y la velocidad del VANT, el mensaje puede ser ignorado (grandes distancias), o se calcula un vector de repulsión (distancias cortas). El parámetro *timeToReact* se introduce para asegurar que la cantidad de segundos que tiene un VANT para reaccionar ante otros VANTs será la misma, a pesar de que un VANT tenga mayor o menor velocidad que el otro. El *timeToReact* se calcula de la siguiente manera:

$$timeToReact = \frac{d}{v} \quad (2)$$

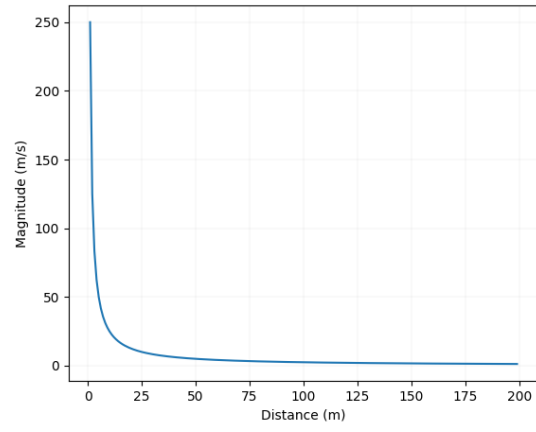


Fig. 3: Magnitud de repulsión teórica frente a la distancia.

Siendo d la distancia entre los VANTs, y v la magnitud del vector del VANT entrante. El vector de repulsión está inversamente relacionado con la distancia entre los VANTs, y se calcula con la siguiente fórmula:

$$r_{rep} = v_{max}/(\alpha \cdot d) \quad (3)$$

En esta ecuación, v_{max} es la velocidad máxima del VANT, α es un pequeño factor de escala, y d es la distancia entre los VANTs. La repulsión será pequeña a grandes distancias, pero será significativa en rangos más pequeños, como se muestra en la figura 3. En esta figura $\alpha = 0,04$.

Según la ecuación 3, una distancia de 25 metros generará un vector de repulsión con una magnitud de 10 m/s con $\alpha = 0,04$. Como la velocidad máxima se establece en 10 m/s, la repulsión máxima se alcanzará ya a los 25 metros.

Para cada VANT cercano se calcula un vector de repulsión. La suma de cada uno de estos vectores dará como resultado el vector de repulsión final. Si la magnitud dicho vector es mayor que v_{max} , se limitará esta magnitud a este valor para asegurarse de que el VANT no supera la velocidad máxima definida.

El vector de dirección de movilidad final, el cual decide el rumbo y la velocidad del VANT, se determina sumando los vectores de atracción y repulsión. Este es el vector que controla el VANT, lo aleja de los obstáculos, y lo dirige hacia el objetivo deseado. En la siguiente sección se explicará el montaje experimental utilizado para validar nuestra solución.

III. DEFINICIÓN DE LOS EXPERIMENTOS

Para el desarrollo del protocolo y la realización de los experimentos detallados en este trabajo se utiliza ArduSim [13]. Se trata de un simulador/emulador multi-VANT en tiempo real desarrollado por el Grupo de Redes de Computadores (GRC) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), España. Es un software de código abierto publicado bajo la Licencia Apache 2.0, y está disponible libremente en línea [14]. ArduSim tiene algunas características clave que lo

hacen adecuado como entorno de desarrollo y pruebas. En esta sección, se dará una visión general limitada. Para más detalles, por favor consultar [13]. Las características clave de ArduSim incluyen:

- API: ArduSim proporciona una API fácil de usar para acceder a los comandos más utilizados por los VANTs (por ejemplo, el establecimiento de la velocidad, o mover el vehículo aéreo no tripulado a coordenadas GPS específicas). La API proporciona información al desarrollador sobre si la ejecución del comando ha tenido éxito o no.
- Comunicación de VANT a VANT: ArduSim se basa en el estándar IEEE 802.11a para proporcionar comunicación entre múltiples VANTs, y entre un VANT y la estación de tierra. Si el protocolo se utiliza en VANTs reales, se utiliza el Protocolo de Datagramas de Usuario (UDP) para enviar y recibir mensajes. Para las simulaciones, se implementan modelos de transmisión de difusión. Existen tres modelos diferentes que ofrecen diferentes niveles de precisión.
- Escalabilidad: ArduSim está diseñado como un simulador multi-VANT, y, por lo tanto, fue desarrollado teniendo en cuenta la escalabilidad. ArduSim puede soportar hasta 100 VANTs en tiempo casi real, y alrededor de 256 VANTs en tiempo real suave en un PC de gama alta (Intel Core i7-7700, 32 GB DDR4 RAM). El número de vehículos aéreos no tripulados admitidos puede variar considerablemente en función del hardware utilizado.
- Despliegue de protocolos: ArduSim fue diseñado para facilitar el despliegue de protocolos en VANTs reales. Por eso, simula la comunicación entre ellos de manera realista, y utiliza los mismos protocolos en ambas situaciones. De hecho, el cambio entre la simulación y el despliegue del protocolo en un VANT real se consigue, simplemente, cambiando un parámetro de ejecución.

Para validar nuestra propuesta se ejecutaron dos escenarios diferentes. El primer escenario (A) consiste en dos VANTs que vuelan el uno hacia el otro en una línea recta y vertical a una distancia de 500 metros. El segundo escenario (B) consiste en que uno de los VANTs adelanta al otro a mayor velocidad en la misma trayectoria recta y vertical. Para lograr el adelantamiento en este segundo escenario, la velocidad máxima de uno de los VANT se fijó en 5 m/s, mientras que la velocidad máxima del otro VANT se mantuvo en 10 m/s.

Se realizó un análisis de sensibilidad para el parámetro $timeToReact$ en estos dos escenarios para determinar el compromiso más óptimo entre el tiempo de adelantamiento y la seguridad; para nuestro estudio, suponemos que las distancias entre VANTs inferiores a 15 metros no cumplen los requisitos mínimos de seguridad previstos. Los diferentes casos de prueba definidos, y los valores de los parámetros correspondientes, pueden encontrarse en la tabla I.

Tabla I: Valores de los parámetros del algoritmo para cada prueba.

# prueba	timeToReact	Grado de seguridad
#1	15 (s)	Estándar
#2	5 (s)	Bajo
#3	25 (s)	Alto

IV. RESULTADOS

En esta sección procedemos a validar nuestra contribución ideando un conjunto de experimentos que permitan evaluar su correcto comportamiento, y determinar los sobrecostos de tiempo y distancia asociados a nuestra solución.

Los experimentos de simulación se realizan con VANTs que vuelan a un valor fijo para su velocidad (10 m/s). Los datos se recogen desde el momento en que los VANTs están en el aire hasta el momento en que han aterrizado con seguridad en el suelo. Para investigar la eficacia del protocolo, se realiza una comparación entre los VANTs que siguen la trayectoria planificada sin ningún protocolo de evitación de colisiones, y con el protocolo propuesto activado. El tiempo para alcanzar el destino, desde el momento en que los VANTs están en el aire hasta que aterrizan, se muestra en la tabla II.

Tabla II: Tiempo para llegar al destino y aterrizar sin evitar la colisión para los dos escenarios de referencia.

Escenario	VANT ID	Tiempo total
A (Enfrentados)	0	64.25 s
	1	64.35 s
B (Adelantamiento)	0	92.74 s
	1	86.75 s

A. Escenario A: misma trayectoria, direcciones opuestas

En el primer escenario, los VANTs vuelan directamente el uno hacia el otro en la misma trayectoria. La configuración inicial del experimento y la trayectoria que han seguido los VANTs se muestra visualmente en la figura 4. Como se ve en la figura 4a, los VANTs están en una trayectoria vertical y enfrentados, en ruta de colisión. En la figura 4b podemos ver que los VANTs se desvían limpiamente de la trayectoria planificada para evitar una colisión, y continúan hacia su objetivo. Los parámetros de esta primera prueba se encuentran en la tabla I. En la figura 5a se muestra la progresión de la velocidad del VANT a lo largo del tiempo para ambos VANTs. Destaca que las estrechas interacciones entre ambos VANTs conducen a cambios similares en su patrón de velocidad. En la figura 5b se muestra la distancia entre los VANTs a lo largo del tiempo. Dado que $timeToReact$ se estableció en 15 segundos, los VANTs comenzarán a interactuar dentro de un rango de 150 metros, de acuerdo con la fórmula 2. A partir de estas figuras,

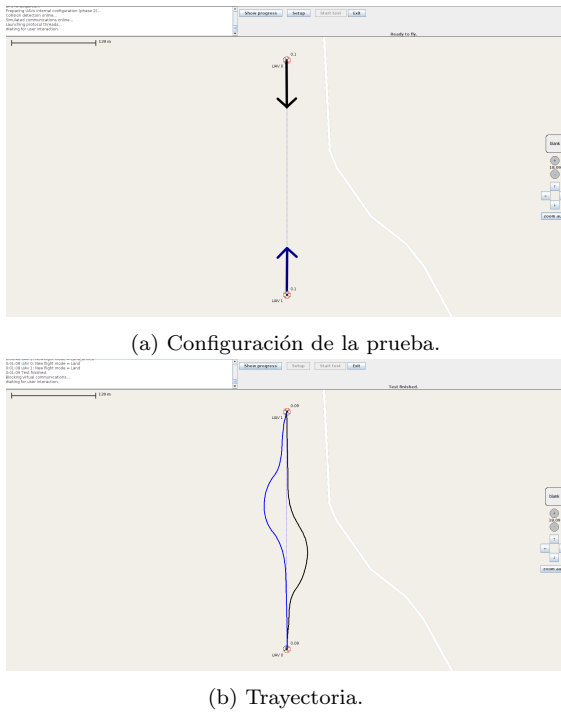


Fig. 4: Escenario A: dirección inicial de la misión y trayectorias reales.

podemos ver que los VANTs alcanzan su máxima velocidad (10 m/s) después de 10 segundos, y que la velocidad comienza a bajar cuando se acercan; en ese momento comienzan su maniobra para evitar una colisión.

En la tabla III se puede encontrar un resumen de las estadísticas más importantes de este experimento. Esta tabla incluye el tiempo total que tardó el VANT en volar hacia su objetivo y aterrizar, la distancia mínima que se mantuvo entre los VANTs, y el tiempo de vuelo adicional necesario debido a la maniobra de evitación de colisiones.

Para el primer caso de prueba (niveles de seguridad estándar), la distancia mínima que se mantuvo entre los VANTs durante este experimento fue de 36,21 metros, y los VANT sólo tardaron entre 4,4 y 4,5 segundos más en completar su misión y evitar una colisión

En el segundo caso de prueba (niveles de seguridad bajos) el valor de *timeToReact* se fija en 5 s. Este experimento sólo tardó alrededor de un segundo más que el escenario de referencia (alta eficiencia), pero la distancia mínima entre los VANTs fue de sólo 8,02 metros, un valor considerado demasiado bajo. Hay que tener en cuenta que el módulo GPS de los VANTs tiene un radio de error de unos 5 metros. Teniendo esto en cuenta, la distancia mínima de 8,02 metros en este escenario no es suficiente para garantizar una trayectoria sin colisiones y los niveles de seguridad deseados.

En el tercer y último caso de prueba (niveles de seguridad elevados), el parámetro *timeToReact* se establece en 25 s. Según la tabla III, el exceso de tiempo para esta prueba es de 20 segundos en media, y la distancia mínima entre los VANT es de 121,27

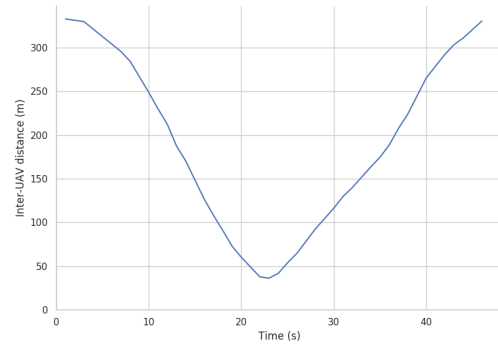
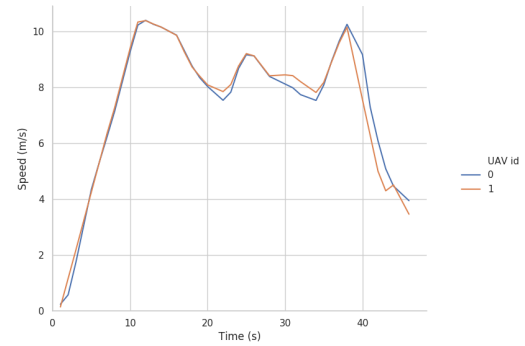


Fig. 5: Comparación del rendimiento del escenario A para el caso de prueba #1.

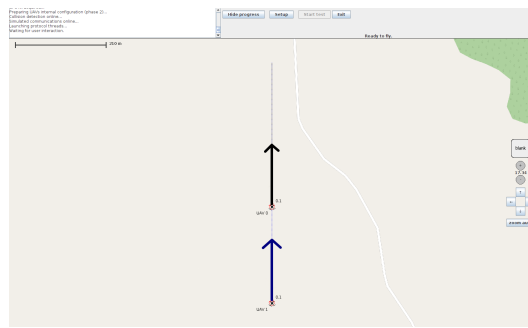
Tabla III: Resultados experimentales: escenario A.

Test #	VANT id	Tiempo total [s]	Distancia min. [m]	Tiempo adicional [s]
#1	0	68.76	36.21	4.51
	1	68.76	36.3	4.40
#2	0	65.25	8.02	1.00
	1	65.36	8.02	1.00
#3	0	85.56	121.27	21.31
	1	83.66	121.27	19.30

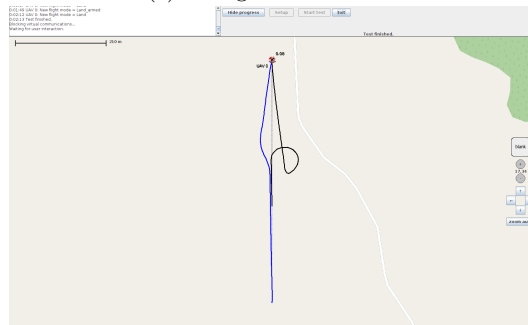
metros. Esta distancia mínima es más que suficiente para garantizar una trayectoria de colisión. Sin embargo, teniendo en cuenta que la maniobra de evitación de colisiones prolongó la duración del vuelo de cada VANT en unos 20 segundos, podemos concluir que establecer el *timeToReact* = 25 s no es la solución óptima, si la optimización del tiempo es una prioridad.

B. Escenario B: adelantamiento

El segundo escenario consiste en un adelantamiento por parte de un VANT más rápido a otro más lento que va por delante. El escenario se puede ver en la figura 6. En la configuración inicial (véase la figura 6a), podemos observar que el VANT con ID 0 está delante, y que será adelantado por el VANT 1. La trayectoria real que han tomado los VANTs se muestra en la figura 6b. El VANT más rápido realiza



(a) Configuración inicial.

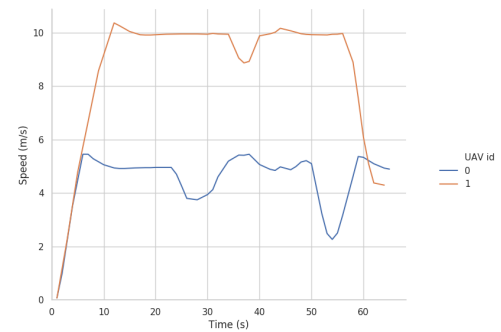


(b) Trayectoria.

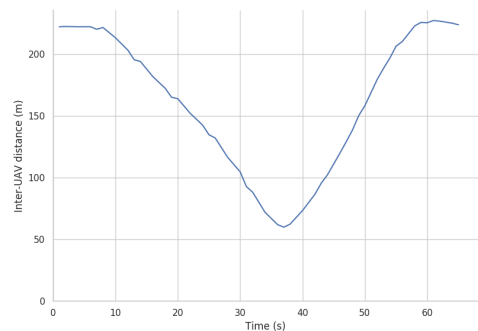
Fig. 6: Escenario B: dirección inicial de la misión y trayectorias reales.

la acción de adelantamiento rodeando al otro VANT por la izquierda. El VANT más lento se mueve hacia el lado opuesto y realiza un pequeño bucle para dejar espacio al VANT más rápido para realizar el adelantamiento, reanudando el movimiento hacia su objetivo inmediatamente después. Los parámetros utilizados en este segundo conjunto de experimentos son los mismos que en el primer escenario (véase la tabla I). En la figura 7a son claramente visibles las diferencias en términos de velocidad entre los dos VANTs. En particular, para $t=24$ segundos, la velocidad del VANT 1 se ve afectada, e inicia la maniobra de evitación de colisión, mientras que el VANT 0 sigue avanzando a la máxima velocidad. Esto se debe al valor del parámetro *timeToReact*. Dado que el VANT 0 tiene una velocidad que es el doble de la del VANT 1, de la ecuación 2 puede deducirse que $d = timeToReact \cdot v$, y, por lo tanto, que el VANT 0 actuará para evitar la colisión antes que el VANT 1. La figura 7b muestra la distancia entre ambos VANTs a lo largo del tiempo. Se observa el mismo patrón que en el primer escenario. La distancia entre los VANTs se reduce, y luego vuelve a crecer una vez realizado el adelantamiento. En la tabla IV se pueden ver los resultados experimentales completos, incluyendo los tres casos de prueba.

En el primer caso de prueba (niveles de seguridad estándar), la distancia mínima es de 59,79 metros, lo cual es más que suficiente para garantizar una trayectoria sin colisiones. Por otro lado, el tiempo total que tardó el VANT 0 en llegar a su destino ha aumentado en 39,7 segundos. Por el contrario, el tiempo del VANT 1 ha aumentado en menos de un segundo, lo cual es un resultado excelente.



(a) Velocidad vs. tiempo.



(b) Distancia vs. tiempo.

Fig. 7: Comparación del rendimiento del escenario B para el caso de prueba 1.

Tabla IV: Resultados experimentales: escenario B.

Test #	VANT id	Tiempo total [s]	Distancia min. [m]	Tiempo adicional [s]
#1	0	132.46	59.79	39.71
	1	87.63	59.79	0.88
#2	0	105.06	17.58	12.31
	1	87.14	15.77	0.40
#3	0	159.36	113.00	66.62
	1	87.44	112.58	0.69

En el segundo caso de prueba (niveles de seguridad bajos), la distancia mínima asumió un valor de 15,77 m, que es lo justo para garantizar una trayectoria sin colisiones teniendo en cuenta el error del GPS. El exceso de tiempo para el VANT 0 es ahora de 12,3 segundos, un resultado mejor que el del primer caso de prueba. En el caso del VANT 1, el exceso de tiempo se redujo aún más, hasta apenas 395 ms.

En el tercer y último caso de prueba (niveles de seguridad altos), la distancia mínima entre los VANTs fue de 112,58 metros. Evidentemente, esto es más que suficiente para garantizar que no haya colisiones. El VANT 0 realizó la misión en 159 segundos, es decir, 66,6 segundos más que el valor de referencia, lo cual puede considerarse una sobrecarga temporal muy elevada. El VANT 1 sólo tardó 690 ms más en completar su misión.

V. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En los escenarios futuros en los que los VANTs se vuelvan más omnipresentes, compartiendo el mismo espacio aéreo para cumplir diferentes misiones, el poder contar con mecanismos eficientes para evitar colisiones se convierte en una necesidad para permitir su navegación autónoma. Esto es especialmente aplicable a los entornos urbanos, donde se espera que coexistan muchos de estos dispositivos voladores.

En este artículo proponemos una estrategia para evitar colisiones basada en el método del campo potencial artificial. Nuestra solución utiliza fuerzas de atracción para atraer al VANT hacia un objetivo deseado (por ejemplo, puntos de ruta), y fuerzas de repulsión para alejar al VANT de obstáculos dinámicos, en nuestro caso otros VANTs. El protocolo fue validado para dos escenarios típicos en los que diferentes VANTs comparten rutas similares de ida y vuelta (corredores aéreos). Los resultados obtenidos son bastante prometedores, y muestran que el protocolo funciona correctamente en estos escenarios, evitando totalmente las colisiones. Además, mostramos cómo el parámetro *timeToReact* puede ajustarse para lograr diferentes compensaciones entre la seguridad y la sobrecarga de tiempo de la misión. En particular, mostramos que un valor pequeño del parámetro *timeToReact* (niveles de seguridad bajos) puede dar lugar a una colisión en algunos casos, ya que los VANTs podrían ser demasiado lentos para reaccionar. Por el contrario, los valores grandes del parámetro *timeToReact* dan lugar a maniobras de evasión que son extremadamente seguras, pero tienen un tiempo de ejecución largo, lo que no es deseable cuando la optimización del tiempo es una prioridad.

Como trabajo futuro pretendemos optimizar el protocolo y probarlo en diferentes escenarios. También se deben realizar validaciones extendidas para investigar la influencia de otros parámetros del protocolo, como los umbrales de distancia, o el impacto de factores externos, como las condiciones del viento. De esta manera, el protocolo puede volverse más versátil y puede adaptarse a diferentes escenarios.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto RTI2018-096384-B-I00, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y “ERDF Una manera de hacer Europa”, y por el Programa Eras-

mus+.

REFERENCIAS

- [1] S. Hayat, E. Yanmaz, and R. Muzaffar, “Survey on Unmanned Aerial Vehicle Networks for Civil Applications: A Communications Viewpoint,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 18, pp. 2624–2661, Fourthquarter 2016.
- [2] J. N. Yasin, S. A. S. Mohamed, M.-H. Haghbayan, J. Heikonen, H. Tenhunen, and J. Plosila, “Unmanned aerial vehicles (uavs): Collision avoidance systems and approaches,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 105139–105155, 2020.
- [3] Y. I. Jenie, E. J. V. Kampen, J. Ellerbroek, and J. M. Hoekstra, “Taxonomy of conflict detection and resolution approaches for unmanned aerial vehicle in an integrated airspace,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 18, pp. 558–567, 2017.
- [4] H. Shraim, A. Awada, and R. Youness, “A survey on quadrotors: Configurations, modeling and identification, control, collision avoidance, fault diagnosis and tolerant control,” *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 33, 2018.
- [5] B. M. Albaker and N. A. Rahim, “A survey of collision avoidance approaches for unmanned aerial vehicles,” in *2009 International Conference for Technical Postgraduates (TECHPOS)*, (Manhattan, New York, U.S), pp. 1–7, IEEE, 2009.
- [6] J.-W. Park, H. Oh, and M.-J. Tahk, “Uav collision avoidance based on geometric approach,” in *2008 SICE Annual Conference*, (Loughborough, England), pp. 2122 – 2126, Loughborough University, 09 2008.
- [7] J. Sun, J. Tang, and S. Lao, “Collision avoidance for cooperative uavs with optimized artificial potential field algorithm,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 18382–18390, 8 2017.
- [8] E. Wu, Y. Sun, J. Huang, C. Zhang, and Z. Li, “Multi uav cluster control method based on virtual core in improved artificial potential field,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 131647–131661, 2020.
- [9] Y. Liu and Y. Zhao, “A virtual-waypoint based artificial potential field method for uav path planning,” in *CGNCC 2016 - 2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference*, (Manhattan, New York, U.S), pp. 949–953, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 1 2017.
- [10] S. Pérez-Carabaza, J. Scherer, B. Rinner, J. A. López-Orozco, and E. Besada-Portas, “Uav trajectory optimization for minimum time search with communication constraints and collision avoidance,” *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 85, pp. 357–371, 10 2019.
- [11] W. Min, V. Holger, and S. Daobilige, “Robust online obstacle detection and tracking for collision-free navigation of multirotor uavs in complex environments,” *2018 15th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV)*, pp. 1228–1234, 2018.
- [12] N. Balemans, P. Hellinckx, and J. Steckel, “Predicting lidar data from sonar images,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 57897–57906, 2021.
- [13] F. Fabra, C. T. Calafate, J. C. Cano, and P. Manzoni, “ArduSim: Accurate and real-time multicopter simulation,” *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 87, pp. 170–190, 2018.
- [14] GRCDev, “ArduSim: Accurate and real-time multi-UAV simulation.” <https://github.com/GRCDEV/ArduSim>, 2020. Accessed: 27 de junio de 2022.