



CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS  
DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Cinvestav Unidad Tamaulipas

## **Estrategias para la exploración coordinada multi-VANT**

Tesis que presenta:

**Luis Alberto Ballado Aradias**

Para obtener el grado de:

**Maestro en Ciencias  
en Ingeniería y Tecnologías  
Computacionales**

Dr. Eduardo Arturo Rodríguez-Tello, Co-Director

Dr. José Gabriel Ramírez-Torres, Co-Director

Cd. Victoria, Tamaulipas, México.

Septiembre, 2024











La tesis presentada por Luis Alberto Ballado Aradias fue aprobada por:

---

Dr. Ricardo Landa-Becerra

---

Dr. Mario Garza-Fabre

---

Dr. Eduardo Arturo Rodriguez-Tello, Co-Director

---

Dr. José Gabriel Ramirez-Torres, Co-Director

Cd. Victoria, Tamaulipas, México., 8 de Septiembre de 2024





A mi familia



# Agradecimientos

- 
- 
-



# Índice General

<b>Índice General</b>	<b>I</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>III</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>V</b>
<b>Índice de Algoritmos</b>	<b>VII</b>
<b>Resumen</b>	<b>IX</b>
<b>Abstract</b>	<b>XI</b>
<b>Nomenclatura</b>	<b>XIII</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes y motivación . . . . .	2
1.2. Planteamiento del problema . . . . .	4
1.3. Hipótesis y preguntas de investigación . . . . .	4
1.4. Objetivos . . . . .	5
1.5. Solución propuesta . . . . .	5
<b>2. Estado del Arte</b>	<b>7</b>
2.1. Introducción . . . . .	8
2.2. Trabajos relacionados . . . . .	9
2.2.1. Exploración . . . . .	9
2.2.2. Representación medio ambiente 3D . . . . .	10
2.2.3. Planificación de trayectorias . . . . .	11
2.2.4. Generación de trayectoria . . . . .	14
2.2.5. Coordinación multi-robot . . . . .	16
<b>3. Marco Teórico</b>	<b>19</b>
3.1. Conceptos fundamentales . . . . .	20
3.2. Funcionamiento de un VANT . . . . .	21
3.3. Control de un VANT . . . . .	22
3.4. Estimación de posición . . . . .	23
3.4.1. Visual Inertial Odometry . . . . .	23
3.5. Planificación de trayectoria . . . . .	24
3.5.1. Evasión de obstáculos . . . . .	25
3.6. Representación medio ambiente . . . . .	25
3.6.1. Ray casting . . . . .	26

3.6.2. Point clouds . . . . .	26
3.7. Exploración . . . . .	27
3.8. Exploración multi-robot . . . . .	27
3.8.1. Asignación de tareas . . . . .	28
3.9. Arquitectura de software ROS . . . . .	29
<b>4. Enfoque propuesto</b>	<b>31</b>
4.1. Revisión de la literatura . . . . .	32
4.2. Diseño del sistema . . . . .	32

# Índice de Figuras





# Índice de Tablas

2.1. Trabajos relacionados . . . . .	17
--------------------------------------	----



# Índice de Algoritmos



## Estrategias para la exploración coordinada multi-VANT

por

**Luis Alberto Ballado Aradias**

Cinvestav Unidad Tamaulipas

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, 2024

Dr. José Gabriel Ramirez-Torres, Co-Director

Dr. Eduardo Arturo Rodriguez-Tello, Co-Director

En la última década se ha tenido un aumento en la investigación y el desarrollo en el campo de los vehículos aéreos no tripulados (VANTS), lo que ha dado lugar a importantes avances e innovaciones en esta área. Los sistemas con múltiples vehículos aéreos no tripulados (multi-VANT) permiten la adquisición simultánea de datos desde múltiples puntos de vista privilegiados, en comparación con robots terrestres, lo que permite mejorar la generación de mapas de entornos desconocidos. El uso de algoritmos de coordinación inteligente y la toma descentralizada de decisiones proporciona una mayor confiabilidad a estos sistemas, ya que cualquier falla o mal funcionamiento de un VANT puede ser compensado por los VANTS restantes. Además, un buen protocolo de comunicación permite una colaboración fluida entre los robots, mejorando su capacidad para moverse de un lugar a otro evitando obstáculos a su paso (navegar), descubrir un entorno desconocido adquiriendo información a su paso (explorar). Asimismo, la integración de sensores de última generación los convierte en herramientas útiles en diversos dominios que van desde el entretenimiento, hasta aplicaciones de vigilancia. La mayor parte de las aplicaciones que hacen uso de VANTS suelen carecer de autonomía, requiriendo la asistencia y vigilancia constantes de un usuario humano. Para que un robot se considere autónomo deberá tomar decisiones y realizar tareas sin necesidad de que alguien le diga qué hacer o guiarlo paso a paso.

El enfoque de este trabajo es la propuesta de una estrategia descentralizada, capaz de coordinar múltiples vehículos aéreos no tripulados con habilidades para la exploración, generación de mapas y planificación de trayectorias para explorar eficientemente un área de interés.



## Strategies for coordinated multi-UAV exploration

by

**Luis Alberto Ballado Aradias**

Cinvestav Unidad Tamaulipas

Research Center for Advanced Study from the National Polytechnic Institute, 2024

Dr. José Gabriel Ramirez-Torres, Co-advisor

Dr. Eduardo Arturo Rodriguez-Tello, Co-advisor

In the last decade, there has been an increase in research and development in the field of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), leading to significant advancements and innovations in this area. Systems with multiple Unmanned Aerial Vehicles (multi-UAV) allow for the simultaneous acquisition of data from multiple vantage points, compared to ground robots, thus enhancing the generation of maps of unknown environments. The use of intelligent coordination algorithms and decentralized decision-making provides greater reliability to these systems, as any failure or malfunction of one UAV can be compensated for by the remaining UAVs. Additionally, effective communication protocols enable seamless collaboration among the robots, enhancing their ability to navigate from one place to another while avoiding obstacles (navigation) and to discover an unknown environment by acquiring information along the way (exploration). Likewise, the integration of state-of-the-art sensors turns them into useful tools in various domains like drones shows to vigilance and monitoring. Most applications that use UAVs often lack autonomy, requiring constant assistance and supervision from a human user. For a robot to be considered autonomous, it must make decisions and perform tasks without needing someone to tell it what to do or guide it step by step.

The focus of this work is on proposing a decentralized strategy capable of coordinating multiple unmanned aerial vehicles with exploration, mapping, and trajectory planning capabilities to efficiently explore an area of interest.





# Nomenclatura

<b>VANT</b>	Vehículo Aéreo No Tripulado
<b>MAVs</b>	Micro-Vehículos Aéreos no tripulados
<b>SLAM</b>	Simultaneous Localization and Mapping
<b>ESC</b>	POTENCIA MOTORES



# 1

## Introducción

Los robots de servicio son máquinas autónomas diseñadas con el objetivo de prestar servicio a los humanos fuera del ambiente industrial, convirtiéndose poco a poco en una parte esencial en nuestras vidas. Los podemos encontrar en diversos ámbitos, como en el entretenimiento, limpieza, logística, entre otras soluciones innovadoras.

Los vehículos aéreos no tripulados han evolucionado rápidamente y se han convertido en sistemas versátiles capaces de una amplia gama de aplicaciones, desde vigilancia hasta misiones de búsqueda y rescate [2]. Entre ellas, las tareas de exploración en entornos complejos y dinámicos representan un área interesante y desafiante, donde la coordinación efectiva de múltiples VANT se vuelve primordial. Este tema es de creciente importancia a medida que los vehículos aéreos no tripulados continúan transformando distintas áreas, incluida la agricultura, el monitoreo ambiental, mantenimiento de infraestructuras (puentes, edificios, líneas eléctricas) y la respuesta a desastres naturales, reduciendo los riesgos y costos asociados con las inspecciones manuales.

Los VANTS capaces de realizar tareas con autonomía generalmente cuentan con mayores

capacidades de carga y procesamiento computacional, así como sensores capaces de percibir grandes volúmenes de datos en un tiempo reducido. Estos VANTS se centran en realizar tareas sencillas y estáticas en áreas abiertas con rutas predeterminadas, o bien, en contextos de operación por control remoto por un usuario. Sin embargo en donde los espacios son estrechos, se optan por el uso de VANTS reducidos, comúnmente llamados Micro-Vehículos Aéreos no tripulados (MAVs).

La exploración de áreas desconocidas, a través de la sinergia de sistemas multi-VANT promete ser una solución innovadora. Al comprender y perfeccionar una estrategia para la coordinación de múltiples vehículos aéreos no tripulados en tareas de exploración, esperamos descubrir nuevas posibilidades, replicar o romper los límites existentes, y en última instancia, avanzar en los campos de la robótica y la exploración.

## 1.1 Antecedentes y motivación

### Antecedentes

Un sistema autónomo de un Vehículo Aéreo no Tripulado, consta de cuatro algoritmos:

- Generación de una representación del entorno
- Planificación de trayectorias
- Evasión de obstáculos
- Comunicación

La computadora embebida para un sistema de navegación usado en Micro-Vehículos Aéreos son de bajo rendimiento, pero su necesidad de autonomía sigue siendo la misma que un VANT de mayor tamaño. Es por ello que es necesario equiparlos con algoritmos de baja complejidad computacional.

La necesidad de coordinación entre múltiples VANTS en tareas de exploración, surge debido a las limitaciones individuales en cuanto a la extensión de terreno que pueden cubrir y su desempeño. La exploración de áreas extensas o peligrosas a menudo exige un enfoque colaborativo, donde los

VANTS trabajen juntos para optimizar la asignación de recursos y mejorar la recopilación y el análisis de datos.

Sin embargo, el camino hacia una coordinación entre múltiples vehículos aéreos no tripulados, presenta diversos desafíos. Las complejidades de gestionar un grupo de vehículos aéreos no tripulados, navegar en entornos dinámicos y distribuir tareas de forma inteligente son sólo algunas de las cuestiones que exigen nuestra atención.

## Motivación

El potencial del uso de VANTS en tareas de búsqueda y rescate, inspección, mapeo, vigilancia, entre otras, es de gran interés a explorar, debido a las habilidades de vuelo que presentan en favor de la realización de estas tareas, y en especial situaciones que podrían poner en riesgo a personas.

Enviar personal de rescate dentro de un edificio parcialmente colapsado en busca de sobrevivientes, es poner a más personas en un gran riesgo, pues no se sabe qué es lo que les espera en el interior del edificio; esto limita la capacidad de tomar buenas decisiones acerca de si es seguro seguir cierto camino.

Operar en ambientes como éste u otros similares requieren de robots con capacidades de navegar sobre terrenos difíciles y evadir obstáculos de forma segura para obtener información del entorno que pueda ser útil al personal de rescate.

Una posible solución consiste en un robot móvil aéreo (VANT) capaz de desplazarse sobre terrenos difíciles y navegar en espacios cerrados de manera segura, que además recabe información del entorno. Esto implica realizar tareas de reconocimiento del ambiente, evasión de obstáculos y seguimiento de trayectorias.

## 1.2 Planteamiento del problema

Dado un volumen de interés desconocido en un espacio cerrado que se desea explorar denotado como  $\mathcal{W}$ , tal que  $\mathcal{W} \subset \mathbb{R}^3$ .

- El volumen se discretiza usando unidades cúbicas tridimensionales (voxel) tomando valores  $v_{libre}, v_{ocup}, v_{desc}$ .
- Un conjunto de VANTS con una cámara RGB-D embarcadas denotado como  $\mathcal{V} = \{\mathcal{V}_1, \mathcal{V}_2, \mathcal{V}_3, \dots, \mathcal{V}_n\}$ , comenzando cada uno en un estado inicial conocido  $q = \{q_1, q_2, q_3, \dots, q_n\}$ , y terminando en una configuración que maximice la construcción de un mapa.

Coordinar el conjunto de VANTs para reducir el tiempo total de exploración.

## 1.3 Hipótesis y preguntas de investigación

### Hipótesis

*“Una estrategia que coordine y asigne tareas de exploración para múltiples VANTS de manera descentralizada, en combinación con una arquitectura de software diseñada para resolver problemas de localización, gestión de mapas y planificación de rutas, mejorará la eficiencia y cobertura de la exploración en interiores de un entorno desconocido”.*

### Preguntas de investigación

1. ¿Qué características de la dinámica del VANT son cruciales para lograr trayectorias suaves y continuas?
2. ¿Podría un planificador de trayectorias que aproveche las regiones libres de obstáculos acelerar los desplazamientos de los VANTs y, consecuentemente, reducir los tiempos de exploración?

3. ¿Qué mecanismos de coordinación existen dentro de la literatura que podrían ayudar en resolver el problema de exploración multi-VANT?

## 1.4 Objetivos

### Objetivo general

*“Desarrollar una estrategia de exploración descentralizada que permita resolver los problemas de coordinación para múltiples VANTS en ambientes desconocidos.”.*

### Objetivos específicos

Para lograr nuestro objetivo principal, se consideran los siguientes objetivos específicos a cubrir:

- Desarrollar una arquitectura de software que resuelva los problemas de autonomía para un VANT (localización, manejo de mapas y planificación de trayectorias).
- Implementar un mecanismo de coordinación descentralizado que asigne tareas de exploración.
- Realizar pruebas y simulaciones de la solución propuesta en diversos entornos, analizando la relación tiempo de exploración y cobertura del área de interés.

## 1.5 Solución propuesta

Para resolver el problema de exploración multi-VANT con un enfoque descentralizado considerando restricciones en el rango de la comunicación. Se cuenta como antecedente el trabajo doctoral de JElizondo que propone un algoritmo basado en un proceso de ofertas de mercado, en el cual cada robot calcula las ofertas de manera independiente, buscando alcanzar el mayor aporte posible al equipo en su conjunto. Cuando un robot alcanza su objetivo, el robot toma una decisión para

sí mismo, involucrando a cada uno de los miembros del equipo así como el rango de comunicación, bajo un esquema descentralizado y sin la necesidad de un módulo central.

Para validar la propuesta de exploración coordinada se necesita primero resolver la autonomía de un VANT diseñando una arquitectura que incluirá la coordinación multi-robot propuesta por JElizondo.

1. Conocer los fundamentos que nos aproximen a realizar la tarea de exploración autónoma con múltiples VANTS.
2. Profundizar en la comprensión de los comandos de control y la generación de odometría para un VANT tipo cuadricóptero.
3. Obtener y procesar la información proveniente de un sensor de tipo RGB-D dentro del sistema operativo ROS.
4. Integrar un planificador de trayectoria reactivo que, combinado con la percepción recibida por la cámara RGB-D, nos permita evadir obstáculos en su paso y construir una representación tridimensional del medio ambiente.
5. Elaborar la exploración con un VANT de tipo cuadrotor.
6. Implementar la estrategia de exploración bajo los conceptos de cohesión, exploración y explotación.



# 2

## Estado del Arte

En este capítulo, se presenta un panorama de las distintas propuestas en exploración que involucran el uso de múltiples vehículos aéreos no tripulados (VANTs), evaluando tanto sus ventajas como sus limitaciones. Nuestra atención se centra especialmente en las propuestas relacionadas con la exploración multirobot, el mapeo y localización simultáneos (SLAM) con múltiples robots, y la exploración multirobot en entornos con incertidumbre en la posición.

La exploración multi-robot se enfoca principalmente en guiar a cada robot de forma eficiente con la finalidad de obtener una representación del medio ambiente asumiendo, que la localización es perfecta y conocida en todo momento. El problema de SLAM integra la localización y el aprendizaje de mapas como el problema de construir un mapa mientras se trata de localizar al robot dentro del mismo. Finalmente, el problema de exploración multi-robot con incertidumbre en la posición representa el problema de generar un mapa mientras se estima la localización y se guía al robot hacia objetivos definidos con la finalidad de generar el mapa de forma eficiente.

## 2.1 Introducción

Las aplicaciones de la robótica industrial se han centrado en realizar tareas simples y repetitivas. La necesidad de robots con capacidad de identificar cambios en su entorno y reaccionar sin la intervención humana, da origen a los robots inteligentes. Aunado a ello, si deseamos que el robot se mueva libremente, los cambios en su entorno pueden aumentar rápidamente y complicar el problema de desarrollar un robot que muestre un comportamiento inteligente.

El despliegue rápido de robots en situaciones de riesgo, búsqueda y rescate ha sido un área ampliamente estudiada en la robótica móvil. Recientemente, concursos como el DARPA Subterranean (SubT) Challenge, buscan acelerar la investigación y desarrollo de tecnología en escenarios complejos subterráneos, donde factores como exploración, planeación y coordinación son clave para lograr los objetivos del Reto [27], la creación de una estrategia de exploración es pieza clave para el cumplimiento del reto.

La exploración de un ambiente desconocido empleando multi-VANT es un área relativamente nueva y con mucho crecimiento en los últimos años. Se han abordado una variedad de temas para lograr la exploración autónoma, desde la planificación de rutas para múltiples robots terrestres en tareas de exploración [30], estrategias para la coordinación y protocolos de comunicación [11]. Diversos estudios de aplicaciones multi-VANT se han realizado para resolver tareas como el monitoreo ambiental [1], la agricultura de precisión [24] y operaciones de búsqueda y rescate [29]. A pesar de que los VANTS comerciales modernos cuentan con avanzadas integraciones en los problemas de navegación. Siguen sin incorporar una solución completa de autonomía.

La dirección en que apunta el estado del arte actualmente se puede atribuir a los avances en tecnología en la última década que nos han permitido dotar de autonomía a VANTS de menor tamaño. Investigadores de diversas áreas, que incluyen las ciencias computacionales y la ingeniería, han contribuido al progreso de este campo.

Sin embargo, la necesidad de una arquitectura de software descentralizada que englobe los retos

de exploración, junto con un mecanismo de coordinación para múltiples VANTS, surge como una área de investigación prometedora que garantice el funcionamiento correcto de los componentes necesarios para realizar tareas de exploración coordinada multi-VANT.

En esta revisión del estado del arte se citan trabajos relacionados a la coordinación multi-VANT para tareas de exploración, que sirven de guía para la realización de este trabajo.

La exploración es una tarea fundamental en robótica, el objetivo es construir un mapa de un espacio desconocido con ayuda de un algoritmo de planificación de trayectoria que guiará al robot donde moverse. Una representación del ambiente (mapa) es necesaria para tomar la decisión de la mejor ruta hacia un mayor conocimiento del espacio que lo rodea.

Para poder construir una buena representación del ambiente, debemos comprender como realizar una exploración. En una planificación para una exploración, después de una observación, el robot debe decidir donde moverse.

Buscando acelerar la exploración, el robot debe percibir el ambiente desconocido lo más rápido posible. En la literatura existen dos principales técnicas:

## 2.2 Trabajos relacionados

### 2.2.1 Exploración

Para poder construir una buena representación del ambiente, debemos comprender como realizar una exploración. En una planificación para una exploración, después de una observación, el robot debe decidir donde moverse.

Buscando acelerar la exploración, el robot debe percibir el ambiente desconocido lo más rápido posible. En la literatura existen dos principales técnicas:

- Next Best View (NBV) planning - El planificador elige la siguiente posición en base a la percepción y una función de utilidad que maximice la ganancia de información.

- Basado en fronteras - La estrategia es simple y eficiente al asignar rutas al robot en base a la frontera más cercana.

Los trabajos de Cieslewski et al.[6], Bartolomei et al.[2] se enfocan en la exploración haciendo uso de estrategias basadas en fronteras.

Mientras que los trabajos de Papachristos et al.[26], Selin et al.[28], Zhou et al.[34], que también trabajan en el problema de exploración autónoma. Utilizan la estrategia de Next Best View Planner guiando al robot donde puedan aportar más información en la construcción del medio ambiente (mapa). Por el contrario McGuire et al.[19], al tener un comportamiento tipo bug hace uso de su propuesta con Swarm Gradient Bug Algorithm.

### 2.2.2 Representación medio ambiente 3D

Con la llegada de las primeras cámaras capaces de obtener valores de profundidad (RGB-D), y con mayores capacidades de almacenamiento en menos espacio, nos permiten tratar el medio ambiente a través de representaciones tridimensionales. Podemos citar por ejemplo la propuesta de estructura de datos basada en grafos octrees por Meagher[20] con una baja complejidad en el orden logarítmico, por consiguiente en el año 2013 se introdujo un nuevo concepto para la representación de mapas 3D basados en esos principios, haciendo que la representación de entornos 3D se realice de manera eficiente para aplicaciones en robótica donde se necesitan algoritmos rápidos. Los trabajos de Hornung et al.[14] introducen los Octomaps, que se utilizan para representar mapas tridimensionales como subdivisiones marcadas como ocupadas, desocupadas y desconocidas, para aplicaciones de navegación.

En recientes trabajos Min et al.[21] proponen dar solución a los cuellos de botella que se presentan en el Octomap buscando acelerar los tiempos de cómputo en la construcción de mapas a partir de la implementación de Aceleradores Gráficos GPU.

Los trabajos de Cieslewski et al.[6] hacen uso de la representación del entorno por medio de una

rejilla tridimensional (voxel grids), la versión tridimensional de la rejilla de ocupación empleada en robótica móvil terrestre, para planificar trayectorias de exploración. Usenko et al.[32] proponen el uso del mapa centrando al robot en un círculo tridimensional de tamaño fijo, por su parte Mohta et al.[23] hacen uso de un mapa híbrido formado con la combinación de un mapa local 3D con un mapa global en 2D. Florence et al.[9] propone un framework para el manejo de datos para mapas 3D a partir de la información de una cámara de profundidad (RGB-D). La propuesta hace uso de una estructura con cuadrículas de ocupación y datos de profundidad.

Diversos trabajos en los que se incluyen a Gao et al.[10], Lin et al.[17], [25][25], añaden una estructura adicional a su representación del medio ambiente, usando distancias que permiten la evasión de obstáculos de forma segura. Sin embargo estas soluciones pueden ser costosas requiriendo un mayor procesamiento de computo.

Collins and Michael[7] usan una representación local del mapa con ayuda de una estructura de datos KD-Tree. Usa un mapa representado en voxels, mientras que un grafo topológico representa todo el entorno explorado. Por otra parte el trabajo de McGuire et al.[19] no hace uso de un mapa. Al generar movimientos reactivos tipo bug, logra generar una navegación autónoma con odometría visual.

Los trabajos de Papachristos et al.[26], Selin et al.[28], Campos-Macías et al.[3], Zhou et al.[34], Bartolomei et al.[2], optan por el uso de OctoMaps. Haciendo de la representación de ambientes en 3D con octomaps un estandar en la robótica moderna.

### 2.2.3 Planificación de trayectorias

Uno de los desafíos clave en la colaboración de múltiples VANTS es la planificación de rutas. Se han desarrollado diversos algoritmos para optimizar la planificación de rutas dentro de la robótica móvil, minimizando los riesgos de colisión y mejorando la eficiencia en sus misiones. Estos algoritmos tienen en cuenta varios factores como las restricciones del robot y la ubicación del objetivo, para generar trayectorias seguras.

El objetivo principal de los algoritmos de planificación de trayectorias, es el de guiar al robot desde el punto de inicio al punto destino. Los trabajos por Lumelsky and Stepanov[18], dieron respuesta a problemáticas de navegación eficiente, que no requieren de una representación del medio ambiente y emplean, por lo tanto, pocos recursos computacionales y de memoria (algoritmos tipo bug).

Matemáticamente, el problema de planificación de trayectorias es resuelto a través del modelado del medio ambiente utilizando grafos, siendo un grafo una representación matemática de vértices y aristas. Hart et al.[12], al mejorar el algoritmo de Dijkstra para el robot Shakey, logró navegar en una habitación que contenía obstáculos fijos. El objetivo principal del algoritmo A\* es la eficiencia en la planificación de rutas al incorporar una heurística. A su vez, el algoritmo D\*, propuesto por Stentz[31], ha demostrado operar de manera eficiente ante obstáculos dinámicos; en comparación con el algoritmo A\* que vuelve a ejecutarse al encontrarse con un obstáculo no previsto inicialmente, el algoritmo D\* usa la información previa para buscar una nueva ruta hacia el objetivo.

Por otra parte, el algoritmo RRT (Rapidly Exploring Random Trees), propuesto por LaValle[16], es ampliamente usado para la planificación de rutas en robots modernos. El algoritmo construye de forma incremental una estructura de árbol mediante un muestreo aleatorio en el espacio de configuraciones, uniendo aleatoriamente nuevas posiciones al árbol existente hasta alcanzar la posición final. Las modificaciones realizadas al algoritmo RRT por Karaman and Frazzoli[15], incorporando una heurística de costo por recorrer, permite encontrar rutas casi óptimas de manera eficiente.

En recientes trabajos de Yang et al.[33], muestran la capacidad de implementación de algoritmos clásicos de planificación de trayectorias, como los grafos de visibilidad, para tareas en entornos conocidos y no conocidos, utilizando una representación del ambiente a base de polígonos, logrando un rápido planificador que también resuelve obstáculos nuevos en el ambiente, logrando resultados comparables a las estrategias más recientes como D\* e inclusive RRT\*.

Un enfoque muy recurrente para abordar el problema de planificación de trayectorias, es el uso de las metaheurísticas bio-inspiradas (Algoritmos Genéticos (GA), Particle Swarm Optimization (PSO),

Ant Colony Optimization (ACO), Firefly Algorithm (FA)). Estas estrategias se inspiran en sistemas y procesos biológicos para resolver problemas complejos de optimización.

Las metaheurísticas han demostrado ser efectivas para resolver una amplia gama de problemas de optimización; sin embargo, su adopción en el campo de la robótica móvil se ve limitada por las restricciones de ejecución en tiempo real. La robótica a menudo implica la toma de decisiones en tiempo real, donde los robots deben responder rápidamente a entornos cambiantes. Las metaheurísticas suelen requerir extensos recursos computacionales y temporales para converger en una solución óptima, lo que puede no ser factible en aplicaciones de robótica en tiempo real, particularmente en vehículos aéreos con limitado poder de cómputo. El control y la planificación en tiempo real en robótica a menudo requieren algoritmos de baja complejidad computacional, como la planificación clásica o los enfoques de control reactivo.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que ciertamente hay áreas dentro de la robótica donde las metaheurísticas se han aplicado con éxito, como la planificación de rutas de robots en entornos complejos, la robótica de enjambres o la asignación de tareas en sistemas de múltiples robots. Los enfoques híbridos que combinan metaheurísticas con optimización basada en modelos o algoritmos específicos de tareas pueden aprovechar las fortalezas de ambos y proporcionar soluciones efectivas para aplicaciones en la robótica.

En lugar de planificar trayectorias, los autores en Cieslewski et al.[6], emplean un enfoque reactivo que genera comandos de velocidad instantáneos hacia las fronteras descubiertas. Papachristos et al.[26], Campos-Macías et al.[3] construye un árbol de exploración rápido y aleatorio (RRT) con un costo relacionado al número de nuevos voxels para identificar el próximo objetivo, y un segundo RRT para trazar una ruta hacia el punto de vista seleccionado minimizando la incertidumbre en la posición y puntos de referencia del robot. Por su parte, Selin et al.[28] introduce nodos con un alto potencial de ganancia de información en un RRT para utilizarlos como objetivos de planificación después de que el agente ha explorado su entorno cercano.

Oleynikova et al.[25] que también se ocupa del problema de exploración, incorpora un objetivo

adicional de alcanzar una meta para abordar de manera explícita el problema de quedarse atrapado en mínimos locales. Eligen la próxima meta al seleccionarla con cierta probabilidad desde el objetivo global.

Mohta et al.[23], Gao et al.[10] y Lin et al.[17] emplean la información generada en la etapa de planificación para establecer un problema de optimización que produzca trayectorias seguras y dinámicamente viables. Todos buscan generar un corredor seguro para restringir la optimización. Mohta et al.[23], Lin et al.[17], y Florence et al.[9] emplean un algoritmo A\* para planificar una trayectoria para buscar una distancia mínima hacia la siguiente frontera.

[19][19] presenta una solución de navegación para enjambres de pequeños multi-VANTS que exploran entornos desconocidos sin señal de GPS de forma centralizada. Éste trabajo propone el algoritmo Swarm Gradient Bug (SGBA), que maximiza la cobertura al hacer que los robots se muevan en diferentes direcciones lejos del punto de partida. Los robots navegan por el entorno y enfrentan obstáculos estáticos sobre la marcha mediante la odometría visual y algoritmos tipo BUG para el seguimiento de paredes. Además, se comunican entre sí para evitar colisiones y maximizar la eficiencia de la búsqueda. Para regresar al punto de partida, los robots realizan una búsqueda de gradiente hacia una señal Bluetooth de baja potencia.

Independientemente del enfoque utilizado para generar la ruta, un aspecto crítico para la navegación libre de colisiones en entornos desconocidos es imponer restricciones en el plan de movimiento para navegar dentro del campo de visión actual hacia el siguiente punto de referencia, utilizada por los métodos en Zhou et al.[34] y Bartolomei et al.[2]

#### 2.2.4 Generación de trayectoria

La propuesta de Gao et al.[10] busca confinar toda la trayectoria dentro del espacio libre. Plantean un programa cuadrático (QP, por sus siglas en inglés) con restricciones, representando la trayectoria en forma de curvas de Bezier por tramos. Mohta et al.[23] formulan un QP para la generación de trayectorias donde, además de las restricciones habituales de velocidad, aceleración y jerk, agregan



un término en la función de costo proporcional al cuadrado de la distancia entre la trayectoria y los segmentos de línea de la trayectoria modificada. Para asignar tiempo a cada segmento de spline, lo cual es crucial para la viabilidad del QP y la calidad de la trayectoria resultante, utilizan los tiempos obtenidos ajustando un perfil de velocidad trapezoidal a través de los segmentos.

Usenko et al.[32] plantean un problema de replanificación local como la optimización de una función de costo compuesta por un término que penaliza las desviaciones de posición y velocidad al final de la trayectoria, así como un costo por colisión. La trayectoria local se representa a través de un B-spline cúbico uniforme, lo cual simplifica el cálculo de los términos de costo. Por otro lado, Lin et al.[17] formulan un problema de optimización no lineal utilizando polinomios de octavo orden para representar la trayectoria.

Cieslewski et al.[6] emplea un modo reactivo para generar comandos de velocidad instantáneos basados en las fronteras que se observan en el momento. Para aquellas fronteras dentro del alcance del sensor de profundidad, la velocidad deseada será la máxima y estará orientada hacia el volumen desconocido. En contraste, para las fronteras más cercanas al robot, la velocidad deseada será menor. Por otro lado, el algoritmo presentado por Florence et al.[9], busca un movimiento primitivo 3D que maximice el progreso euclidiano hacia el objetivo global, teniendo en cuenta las probabilidades de colisión para trayectorias completas en entornos con obstáculos.

Adicionalmente, es crucial abordar de manera explícita las restricciones dinámicas del movimiento lineal del robot para garantizar su permanencia en áreas seguras. En específico, los trabajos de Cieslewski et al.[6], Usenko et al.[32], Selin et al.[28], Lin et al.[17], Collins and Michael[7] y McGuire et al.[19] no gestionan las restricciones dinámicas de forma explícita. En contraste, los algoritmos propuestos en Florence et al.[9], Gao et al.[10], Oleynikova et al.[25], Papachristos et al.[26], Mohta et al.[23], Campos-Macías et al.[3], Zhou et al.[34] y Bartolomei et al.[2] que abordan de manera explícita las restricciones dinámicas del robot.

### 2.2.5 Coordinación multi-robot

Además de la planificación de rutas, la coordinación de múltiples robots para la exploración requiere de una estrategia de comunicación efectiva, que garantice la coherencia del mapa que se va generando. Se han investigado diferentes protocolos de comunicación y estrategias de intercambio de información para permitir la colaboración. Algunos enfoques utilizan comunicación directa entre los robots, mientras que otros emplean una arquitectura de red donde los múltiples robots se comunican a través de una infraestructura descentralizada Chen and Hung[4], Bartolomei et al.[2], Zhou et al.[34], Bartolomei et al.[2], mostrando la tolerancia a fallas en equipos para tareas de búsqueda y rescate.

En recientes trabajos [5][5] ha demostrado descentralizar la tarea de SLAM para la creación de mapas en tareas de exploración multi-VANT eliminando el bloque de optimización, haciendo uso de técnicas de machine learning (teach and repeat).

La dirección que apunta el estado del arte, es en la repartición inteligente de tareas para un problema multi-agente en tareas de exploración.

En el Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional Unidad Tamaulipas se han realizado investigaciones en el área de exploración multi-robot y diseño de prototipos de VANTS, lo cual sirve como antecedente para este trabajo. Este relevante desarrollo, propuesto por Elizondo-Leal[8], tiene como objetivo principal el despliegue de una estrategia de coordinación para múltiples robots móviles basado en un enfoque de auto-ofertas (método húngaro).

Tabla 2.1: Trabajos relacionados

REFERENCIA	APLICACIÓN	GENERACIÓN MAPA	PLANIFICACIÓN DE TRAYECTORIA	GENERACIÓN TRAYECTORIA	SENSOR RGB-D	DINÁMICA VANT	multi-VANT
Cieslewski et al.[6]	Exploración	3D Grid	Basado en fronteras	Control directo de velocidad	✓	✗	✗
Usenko et al.[32]	Punto Objetivo	Cuadrícula egocéntrica Voxel 3D	Offline RRT*	Curvas de Bezier	✓	✗	✗
Mohta et al.[23]	Punto Objetivo	3D-Local y 2D-Global	A*	Programación cuadrática	✗	✓	✗
Lin et al.[17]	Punto Objetivo	3D voxel array TSDF	A*	Optimización cuadrática	✗	✗	✗
Papachristos et al.[26]	Exploración	Octomap	Next Best View Planner (NBVP)	Control directo de velocidad	✗	✓	✗
Oleynikova et al.[25]	Punto Objetivo	Voxel Hashing TSDF	Next Best View Planner (NBVP)	Optimización cuadrática	✓	✓	✗
Gao et al.[10]	Punto Objetivo	Mapa de cuadrícula	Método de marcha rápida	Optimización cuadrática	✗	✓	✗
Florence et al.[9]	Punto Objetivo	Busqueda basada en visibilidad	2D A*	Control predictivo por modelo (MPC)	✓	✓	✗
Selin et al.[28]	Exploración	Octomap	Next Best View Planner (NBVP)	Control directo de velocidad	✗	✗	✗
McGuire et al.[19]	Exploración	NA	Swarm Gradient Bug Algorithm (SGBA)	Control directo de velocidad	✗	✗	✓
Collins and Michael[7]	Punto Objetivo	KD Tree + Mapa en Voxel	Búsqueda en Grafo	Movimientos suaves	✓	✗	✗
Campos-Macías et al.[3]	Punto Objetivo	Octree	Rapidly Exploring Random Trees (RRT)	Basado en contornos	✓	✓	✗
Cieslewski[5]	Exploración	Octomap	Basado en fronteras	Control directo de velocidad	✓	✓	✓
Zhou et al.[34]	Exploración	Octomap HGrid	Next Best View Planner (NBVP)	Control directo de velocidad	✓	✓	✓
Bartolomei et al.[2]	Exploración	Octomap	Basado en fronteras	Control directo de velocidad	✓	✓	✓



# 3

## Marco Teórico

La exploración coordinada con múltiples Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) es un área de investigación actual en la robótica móvil, con aplicaciones en campos como la vigilancia, la exploración de áreas de difícil acceso y la respuesta a emergencias. Para comprender plenamente este tema, es crucial tener una sólida comprensión de los fundamentos teóricos que sustentan tanto la representación del movimiento de los VANT como los algoritmos para planificación de trayectorias y coordinación que facilitan su trabajo conjunto para alcanzar objetivos comunes mientras evitan colisiones y construyen una representación del medio ambiente.

Al comprender estos aspectos teóricos fundamentales, estaremos preparados para abordar los desafíos de la exploración coordinada con múltiples VANTS.

## 3.1 Conceptos fundamentales

### Sistema de ejes coordenados

El sistema de ejes coordenados en tres dimensiones (3D) es una herramienta fundamental en la representación y comprensión del espacio tridimensional. Consiste en tres ejes ortogonales:  $x$ ,  $y$  y  $z$ , que se intersectan en un punto de origen común. El eje  $x$  se extiende horizontalmente, el eje  $y$  verticalmente y el eje  $z$  en la dirección de profundidad. Estos ejes proporcionan un marco de referencia para describir la posición y orientación de objetos en el espacio 3D de manera precisa y consistente. El sistema de ejes coordenados 3D se utiliza ampliamente en diversas disciplinas, como la geometría, la ingeniería, la robótica, la realidad virtual y la visualización de datos, facilitando la comunicación y el análisis de información espacial compleja. Un entendimiento profundo de este sistema es crucial para la planificación de trayectorias, la navegación, la modelización de objetos tridimensionales y el diseño de sistemas autónomos, incluyendo Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) en aplicaciones de exploración coordinada.

### Coordenadas homogéneas

Las coordenadas homogéneas son una herramienta matemática esencial en la representación y manipulación de la posición y orientación de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) en un entorno tridimensional. Este enfoque permite expresar las transformaciones geométricas de manera compacta y consistente, lo que facilita la planificación de trayectorias, la navegación y la coordinación de múltiples VANT. Al utilizar coordenadas homogéneas, se pueden representar tanto las traslaciones como las rotaciones en un único marco de referencia, lo que simplifica los cálculos y reduce la complejidad de los algoritmos de control. Este enfoque es fundamental para el desarrollo de sistemas autónomos capaces de exploración coordinada, ya que proporciona una base matemática sólida para la comprensión y manipulación del movimiento de los VANT en entornos dinámicos y complejos. En

esta tesis, se explorará en detalle el uso de coordenadas homogéneas en el contexto de la coordinación de múltiples VANT, investigando su aplicación en la planificación de rutas, la evasión de obstáculos y la optimización del rendimiento del sistema en una variedad de escenarios operativos.

## Transformaciones geométricas

En el contexto de los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT), las transformaciones geométricas son herramientas fundamentales para comprender y manipular la posición y orientación de los vehículos en un espacio tridimensional. Estas transformaciones se utilizan para describir cambios en la posición, la rotación y el tamaño de los objetos en un sistema de coordenadas. Comprenden operaciones como la traslación, la rotación, el escalado y la proyección, que permiten a los investigadores y diseñadores modelar y simular el movimiento de los VANT de manera precisa y eficiente. Además, las transformaciones geométricas son esenciales para la planificación de trayectorias, la navegación y la coordinación de múltiples VANT en entornos complejos. Este resumen aborda la importancia de las transformaciones geométricas en la investigación y el desarrollo de VANT, destacando su papel crucial en la creación de sistemas autónomos capaces de explorar y operar en diversos entornos de manera efectiva.

## 3.2 Funcionamiento de un VANT

El Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) es un dispositivo robótico que ha revolucionado numerosos campos gracias a su capacidad para operar en entornos diversos y complejos sin la necesidad de un piloto humano a bordo. Su funcionamiento se basa en una serie de componentes clave, que incluyen una plataforma de vuelo equipada con sistemas de propulsión, sensores, actuadores y una unidad de procesamiento central. Estos dispositivos pueden variar en tamaño, forma y capacidad, desde pequeños drones recreativos hasta sofisticados sistemas utilizados en aplicaciones militares, de investigación y comerciales.

El VANT utiliza sus sensores para recopilar información del entorno, como datos de posición, imágenes, video y mediciones de distancia. Esta información se procesa a bordo o en tierra mediante algoritmos de percepción y planificación de rutas, permitiendo al VANT tomar decisiones autónomas sobre su navegación, evasión de obstáculos y cumplimiento de objetivos de misión.

El vuelo de un VANT se controla mediante comandos enviados desde una estación terrestre o mediante algoritmos de control autónomo a bordo. Estos comandos ajustan la velocidad, dirección y altitud del VANT, permitiéndole moverse de manera precisa y eficiente en el espacio aéreo.

El funcionamiento de un VANT se ve influenciado por una serie de factores, incluyendo las condiciones meteorológicas, las regulaciones gubernamentales, la autonomía de la batería y la calidad de los datos de los sensores. La seguridad y la fiabilidad son consideraciones críticas en el diseño y operación de estos sistemas, lo que requiere un enfoque cuidadoso en la planificación, desarrollo y prueba de cada componente.

En resumen, el funcionamiento de un VANT implica una integración compleja de hardware, software y sistemas de control para permitir operaciones autónomas en entornos aéreos variados. El entendimiento detallado de estos principios es fundamental para el diseño efectivo, la operación segura y el aprovechamiento máximo del potencial de los VANT en una amplia gama de aplicaciones.

### 3.3 Control de un VANT

El control de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs) es un aspecto crucial en la investigación y desarrollo de sistemas autónomos aéreos. Este proceso implica el diseño y la implementación de algoritmos y estrategias que permiten a los VANTs realizar tareas específicas de manera eficiente y segura. Se abordan diversos aspectos del control, como la estabilización, la navegación, la planificación de trayectorias y la interacción con el entorno. La investigación en este campo se centra en mejorar la precisión, la robustez y la capacidad de adaptación de los algoritmos de control, así como en la integración de tecnologías emergentes como la inteligencia artificial y el aprendizaje



automático. El control efectivo de los VANTs es fundamental para una amplia gama de aplicaciones, desde la vigilancia y la cartografía hasta la entrega de paquetes y la asistencia en emergencias, y su comprensión y optimización continúan siendo áreas de estudio activas y prometedoras en la investigación de sistemas autónomos aéreos.

## 3.4 Estimación de posición

El proceso de estimación de posición en Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs) es fundamental para su operación autónoma y efectiva en una amplia gama de aplicaciones. Este proceso implica la utilización de sensores y algoritmos para determinar la posición y orientación del VANT en relación con un sistema de coordenadas global. Los VANTs suelen utilizar una combinación de sensores, como GPS, IMU, cámaras y LIDAR, para recopilar información sobre su entorno y su movimiento. A partir de estos datos, se aplican algoritmos de estimación, como el filtro de Kalman extendido (EKF) o el filtro de partículas, para integrar la información de los sensores y calcular la posición estimada del VANT con respecto al tiempo. Una estimación precisa de la posición es esencial para tareas como la navegación, el seguimiento de objetivos, la cartografía y la planificación de trayectorias. Sin embargo, este proceso enfrenta desafíos como la incertidumbre sensorial, la fusión de datos multi-sensor y la mitigación de errores acumulativos. Por lo tanto, el desarrollo de técnicas robustas y eficientes de estimación de posición sigue siendo un área de investigación activa en el campo de los VANTs, con el objetivo de mejorar la precisión, la confiabilidad y la autonomía de estos sistemas en diversas aplicaciones.

### 3.4.1 Visual Inertial Odometry

El Visual Inertial Odometry (VIO) es una tecnología avanzada utilizada en Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs) que combina datos visuales y de sensores inerciales para estimar la posición y orientación del vehículo en tiempo real. Este enfoque aprovecha la información visual de cámaras

a bordo y la información de acelerómetros y giroscopios para calcular con precisión la trayectoria del VANT en entornos dinámicos y cambiantes. Al fusionar la información de múltiples fuentes sensoriales, el VIO supera las limitaciones individuales de cada sensor y proporciona una estimación más robusta y confiable del movimiento del VANT. Esta tecnología tiene una amplia gama de aplicaciones, incluyendo la navegación autónoma, la cartografía de entornos desconocidos y la localización precisa en interiores y exteriores. En esta tesis, se explorará en detalle el funcionamiento del VIO, su implementación en sistemas de VANT y su papel en la mejora de la autonomía y la eficiencia de estos vehículos en diversas aplicaciones prácticas.

## 3.5 Planificación de trayectoria

El tema de la planificación de trayectorias para Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs) es de vital importancia en la investigación actual, abarcando un conjunto diverso de técnicas y enfoques para garantizar la navegación segura y eficiente de estos dispositivos en entornos complejos y dinámicos. Este proceso implica la generación de rutas óptimas que permitan a los VANTs alcanzar sus destinos mientras evitan obstáculos, cumplen con restricciones operativas y optimizan objetivos específicos, como minimizar el consumo de energía o maximizar la cobertura de área. Desde métodos clásicos basados en grafos y búsqueda heurística hasta enfoques más avanzados que integran técnicas de aprendizaje automático y optimización, la planificación de trayectorias para VANTs ha evolucionado significativamente para adaptarse a diversas aplicaciones y escenarios de operación. Este resumen proporciona una visión general de las principales estrategias y desafíos en este campo, destacando la importancia de desarrollar soluciones innovadoras y escalables que impulsen el avance en la autonomía y eficacia de los VANTs en una variedad de contextos operativos.

### 3.5.1 Evasión de obstáculos

El desarrollo de estrategias efectivas para la evasión de obstáculos es un componente crítico en el diseño de sistemas autónomos, especialmente en el contexto de los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs). Este resumen se centra en explorar y analizar diversas técnicas y algoritmos empleados para permitir que los VANTs detecten, eviten y naveguen alrededor de obstáculos de manera segura y eficiente. Se examinan enfoques basados en sensores, como cámaras, LIDAR y ultrasonido, así como técnicas de procesamiento de imágenes y aprendizaje automático para identificar y clasificar obstáculos en tiempo real. Además, se investigan estrategias de planificación de trayectorias y control de vuelo que permiten a los VANTs calcular rutas alternativas y tomar decisiones evasivas en función de la información del entorno. Este estudio proporciona una visión integral del estado del arte en la evasión de obstáculos para VANTs, identificando desafíos actuales y áreas de investigación futuras para mejorar la seguridad y la eficiencia de las operaciones autónomas en entornos complejos y dinámicos.

## 3.6 Representación medio ambiente

El mapeo del entorno es una tarea crítica en la operación de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs), ya que proporciona una representación precisa y detallada del medio ambiente circundante. Estos mapas son esenciales para la planificación de rutas, la navegación autónoma y la toma de decisiones inteligentes durante las misiones de exploración y vigilancia. En la tesis se examinan diferentes enfoques y técnicas para la generación y actualización de mapas, que van desde métodos basados en sensores como cámaras y LIDAR hasta técnicas de fusión de datos y aprendizaje automático. Se analizan tanto las ventajas como las limitaciones de cada método en términos de precisión, eficiencia computacional y robustez en diferentes entornos y condiciones. Además, se exploran estrategias para la representación eficiente y la gestión de la incertidumbre en los mapas,

con el objetivo de mejorar la fiabilidad y la utilidad de los datos para la planificación de misiones y la toma de decisiones. El estudio contribuye al avance en el campo de la robótica móvil y la exploración autónoma, ofreciendo nuevas perspectivas y soluciones innovadoras para el mapeo del entorno con VANTs.

### 3.6.1 Ray casting

El raycasting es una técnica fundamental en la percepción y la navegación de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs) que permite detectar obstáculos y mapear el entorno tridimensional de manera eficiente. Consiste en emitir rayos desde el VANT en direcciones específicas y detectar las intersecciones con objetos o superficies en el entorno. Estas intersecciones proporcionan información crucial sobre la geometría del entorno, que se utiliza para generar mapas tridimensionales y planificar trayectorias seguras y eficientes para la navegación autónoma. El raycasting se emplea en una variedad de aplicaciones de VANTs, como la exploración de áreas desconocidas, la vigilancia, la cartografía y la inspección de infraestructuras. Su implementación eficaz y precisa es fundamental para garantizar el rendimiento y la seguridad de los sistemas autónomos en entornos dinámicos y complejos.

### 3.6.2 Point clouds

El uso de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs) para la captura y procesamiento de nubes de puntos (point clouds) ha emergido como una herramienta poderosa en una amplia gama de aplicaciones, desde la cartografía y la topografía hasta la inspección de infraestructuras y la monitorización medioambiental. Las nubes de puntos, que consisten en conjuntos masivos de puntos tridimensionales que representan la superficie de objetos y entornos, proporcionan información detallada y precisa sobre la estructura y la geometría de los mismos. En esta tesis, exploramos los avances en la adquisición y procesamiento de nubes de puntos utilizando VANTs, centrándonos en el desarrollo de algoritmos y técnicas para la planificación de trayectorias, la navegación y la captura

eficiente de datos. Además, investigamos estrategias para la fusión y la interpretación de múltiples nubes de puntos obtenidas de diferentes perspectivas y momentos temporales, con el objetivo de generar modelos tridimensionales precisos y completos del entorno. Nuestro trabajo contribuye al avance en la capacidad de los VANTs para la recopilación de datos geoespaciales y la generación de información útil para una variedad de aplicaciones, impulsando así el potencial de esta tecnología en el ámbito de la percepción y la inteligencia espacial.

### 3.7 Exploración

El uso de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs) para la exploración ha ganado prominencia en una variedad de campos, desde la vigilancia ambiental hasta la respuesta a desastres. Esta tesis se centra en el desarrollo y la implementación de técnicas avanzadas para la exploración coordinada con múltiples VANTs. Se investigan y se proponen algoritmos de coordinación eficientes que permiten a los VANTs colaborar de manera inteligente, compartiendo información del entorno y optimizando rutas para una exploración efectiva. Además, se aborda la planificación de trayectorias y la navegación autónoma para garantizar la eficacia y seguridad de las misiones de exploración. A través de experimentos simulados y pruebas de campo, se evalúan y validan las soluciones propuestas, con el objetivo de avanzar en el estado del arte en la exploración con VANTs y contribuir al desarrollo de sistemas autónomos más robustos y eficientes.

### 3.8 Exploración multi-robot

El concepto de exploración multirobot con Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs) es una área de investigación prometedora que busca aprovechar las capacidades colectivas de múltiples robots para explorar y mapear entornos desconocidos de manera eficiente y precisa. Esta estrategia ofrece ventajas significativas sobre la exploración con un solo robot, incluyendo una mayor cobertura del

área, tiempos de exploración reducidos y una mayor robustez ante fallos individuales. En esta tesis, se investiga y se propone un conjunto de algoritmos y técnicas para la coordinación efectiva de múltiples VANTs en entornos complejos y dinámicos. Se explora el diseño de sistemas de planificación de trayectorias, la asignación de tareas, la comunicación entre robots y la toma de decisiones distribuida para lograr una exploración colaborativa y eficiente. Además, se llevan a cabo experimentos simulados y en entornos reales para validar y evaluar el desempeño de los algoritmos propuestos. Los resultados obtenidos demuestran el potencial de la exploración multirobot con VANTs para aplicaciones prácticas en campos como la vigilancia, la cartografía de áreas de difícil acceso y la respuesta a emergencias. Este trabajo contribuye al avance del conocimiento en el campo de la robótica móvil y sienta las bases para futuras investigaciones en el desarrollo de sistemas autónomos colaborativos para la exploración de entornos desconocidos.

### 3.8.1 Asignación de tareas

El desarrollo de sistemas de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) ha generado un interés creciente en la coordinación y asignación de tareas, especialmente en aplicaciones que requieren la colaboración de múltiples VANT para lograr objetivos comunes de manera eficiente. En esta tesis, se examina en detalle el diseño y la implementación de algoritmos de coordinación y asignación de tareas para equipos de VANT. Se abordan aspectos teóricos y prácticos relacionados con la planificación de rutas, la optimización de recursos, la comunicación entre VANT y la adaptación a cambios en el entorno. Se exploran diferentes enfoques, desde métodos basados en reglas simples hasta algoritmos más sofisticados que incorporan técnicas de aprendizaje automático y optimización. Además, se presentan estudios de caso y experimentos para validar la efectividad y la escalabilidad de los enfoques propuestos en una variedad de escenarios y aplicaciones prácticas. Esta investigación contribuye al avance del campo de la coordinación y asignación de tareas en sistemas de VANT, proporcionando herramientas y metodologías para mejorar la eficiencia y el rendimiento de los equipos de VANT en una amplia gama de aplicaciones, desde la vigilancia y la exploración hasta la logística y el transporte.

### 3.9 Arquitectura de software ROS

El uso de ROS (Robot Operating System) emerge como un componente esencial en el diseño y desarrollo de sistemas autónomos, incluidos los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs). ROS proporciona una plataforma flexible y modular que facilita la integración de hardware, la implementación de algoritmos de control y la comunicación entre componentes en un entorno distribuido. Este sistema operativo robótico ofrece una amplia gama de herramientas, bibliotecas y recursos que agilizan el desarrollo de aplicaciones robóticas, permitiendo a los investigadores y desarrolladores concentrarse en la implementación de soluciones innovadoras en lugar de abordar problemas de infraestructura. Además, la naturaleza de código abierto de ROS fomenta la colaboración y el intercambio de conocimientos dentro de la comunidad robótica, acelerando el avance en el campo de los VANTs y promoviendo la adopción de estándares y prácticas de desarrollo comunes. En esta tesis, se destaca la importancia y los beneficios del uso de ROS en el diseño, implementación y evaluación de sistemas VANT, subrayando su papel fundamental en la mejora de la eficiencia, la robustez y la interoperabilidad de estos sistemas autónomos.





# 4

## Enfoque propuesto

El enfoque propuesto para la tesis de exploración coordinada multi-VANT se centra en el desarrollo de un sistema autónomo que emplea varios Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) para explorar y mapear entornos desconocidos de manera eficiente y coordinada. Este enfoque implica una revisión exhaustiva de la literatura para identificar técnicas y algoritmos relevantes, seguido del diseño detallado del sistema y su implementación en un entorno simulado. Las pruebas en el mundo real permitirán validar el rendimiento del sistema en condiciones más realistas, mientras que el análisis de resultados proporcionará información sobre la eficiencia, precisión y robustez del sistema. En resumen, el enfoque propuesto aborda el desafío de la exploración coordinada multi-VANT mediante la integración de tecnologías avanzadas y la evaluación práctica de su desempeño en diferentes contextos.

## 4.1 Revisión de la literatura

Realizar una revisión exhaustiva de la literatura sobre técnicas y algoritmos existentes para la exploración coordinada con múltiples VANT. Esto incluiría investigar enfoques de planificación de trayectorias, técnicas de mapeo y localización simultáneos (SLAM), y métodos de coordinación y comunicación entre VANT.

## 4.2 Diseño del sistema

Desarrollar un diseño detallado del sistema que incluya la arquitectura general, los componentes individuales y los algoritmos específicos que se utilizarán para la planificación de trayectorias, el mapeo del entorno y la coordinación entre los VANT.

# Bibliografía

- [1] Alsamhi, S. H., Ma, O., Ansari, M. S., and Almalki, F. A. (2019). Survey on collaborative smart drones and internet of things for improving smartness of smart cities. *IEEE Access*, 7:128125–128152.
- [2] Bartolomei, L., Teixeira, L., and Chli, M. (2023). Fast multi-uav decentralized exploration of forests. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 8(9):5576–5583.
- [3] Campos-Macías, L., Aldana-López, R., Guardia, R., Parra-Vilchis, J. I., and Gómez-Gutiérrez, D. (2020). Autonomous navigation of MAVs in unknown cluttered environments. *Journal of Field Robotics*, 38(2):307–326.
- [4] Chen, B.-S. and Hung, T.-W. (2023). Integrating local motion planning and robust decentralized fault-tolerant tracking control for search and rescue task of hybrid uavs and biped robots team system. *IEEE Access*, 11:45888–45909.
- [5] Cieslewski, T. (2021). *Decentralized Multi-Agent Visual SLAM*. PhD thesis, University of Zurich.
- [6] Cieslewski, T., Kaufmann, E., and Scaramuzza, D. (2017). Rapid exploration with multi-rotors: A frontier selection method for high speed flight. In *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 2135–2142.
- [7] Collins, M. and Michael, N. (2020). Efficient planning for high-speed mav flight in unknown environments using online sparse topological graphs. In *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 11450–11456.
- [8] Elizondo-Leal, J. C. (2013). *Estrategia Descentralizada para la Exploración Multi-Robot, incluyendo Restricciones en Rango de Comunicación*. PhD thesis, CINVESTAV Unidad Tamaulipas.

- 
- [9] Florence, P. R., Carter, J., Ware, J., and Tedrake, R. (2018). Nanomap: Fast, uncertainty-aware proximity queries with lazy search over local 3d data.
- [10] Gao, F., Wu, W., Lin, Y., and Shen, S. (2018). Online safe trajectory generation for quadrotors using fast marching method and bernstein basis polynomial. In *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 344–351.
- [11] Gielis, J., Shankar, A., and Prorok, A. (2022). A critical review of communications in multi-robot systems. *Current Robotics Reports*, 3(4):213–225.
- [12] Hart, P. E., Nilsson, N. J., and Raphael, B. (1968). A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 4(2):100–107.
- [13] Hirsch, L. and Merced, M. J. D. L. (2023). Fireworks have a new competitor: Drones.
- [14] Hornung, A., Wurm, K. M., Bennewitz, M., Stachniss, C., and Burgard, W. (2013). OctoMap: An efficient probabilistic 3D mapping framework based on octrees. *Autonomous Robots*. Software available at <https://octomap.github.io>.
- [15] Karaman, S. and Frazzoli, E. (2011). Sampling-based algorithms for optimal motion planning. *The International Journal of Robotics Research*, 30(7):846–894.
- [16] LaValle, S. M. (1998). Rapidly-exploring random trees : a new tool for path planning. *The annual research report*.
- [17] Lin, Y., Gao, F., Qin, T., Gao, W., Liu, T., Wu, W., Yang, Z., and Shen, S. (2017). Autonomous aerial navigation using monocular visual-inertial fusion. *Journal of Field Robotics*, 35(1):23–51.
- [18] Lumelsky, V. J. and Stepanov, A. A. (1987). Path-planning strategies for a point mobile automaton moving amidst unknown obstacles of arbitrary shape. *Algorithmica*, 2(1-4):403–430.

- [19] McGuire, K. N., Wagter, C. D., Tuyls, K., Kappen, H. J., and de Croon, G. C. H. E. (2019). Minimal navigation solution for a swarm of tiny flying robots to explore an unknown environment. *Science Robotics*, 4(35):eaaw9710.
- [20] Meagher, D. (1982). Geometric modeling using octree encoding. *Computer Graphics and Image Processing*, 19(2):129–147.
- [21] Min, H., Han, K. M., and Kim, Y. J. (2020). Accelerating probabilistic volumetric mapping using ray-tracing graphics hardware.
- [22] Mohsan, S. A. H., Othman, N. Q. H., Li, Yanlong, A., H., M., and Khan, M. A. (2023). Unmanned aerial vehicles (uavs): practical aspects, applications, open challenges, security issues, and future trends. *Intelligent Service Robotics*, 16(1).
- [23] Mohta, K., Watterson, M., Mulgaonkar, Y., Liu, S., Qu, C., Makineni, A., Saulnier, K., Sun, K., Zhu, A., Delmerico, J., Karydis, K., Atanasov, N., Loianno, G., Scaramuzza, D., Daniilidis, K., Taylor, C. J., and Kumar, V. (2017). Fast, autonomous flight in GPS-denied and cluttered environments. *Journal of Field Robotics*, 35(1):101–120.
- [24] Mukhamediev, R. I., Yakunin, K., Aubakirov, M., Assanov, I., Kuchin, Y., Symagulov, A., Levashenko, V., Zaitseva, E., Sokolov, D., and Amirgaliyev, Y. (2023). Coverage path planning optimization of heterogeneous uavs group for precision agriculture. *IEEE Access*, 11:5789–5803.
- [25] Oleynikova, H., Taylor, Z., Siegwart, R., and Nieto, J. (2018). Safe local exploration for replanning in cluttered unknown environments for microaerial vehicles. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3(3):1474–1481.
- [26] Papachristos, C., Khattak, S., and Alexis, K. (2017). Uncertainty-aware receding horizon exploration and mapping using aerial robots. In *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 4568–4575.

- [27] Rouček, T., Pecka, M., Čížek, P., Petříček, T., Bayer, J., Šalanský, V., Azayev, T., Heřt, D., Petrлік, M., Báča, T., Spurný, V., Krátký, V., Petráček, P., Baril, D., Vaidis, M., Kubelka, V., Pomerleau, F., Faigl, J., Zimmermann, K., Saska, M., Svoboda, T., and Krajník, T. (2022). System for multi-robotic exploration of underground environments CTU-CRAS-NORLAB in the DARPA subterranean challenge. *Field Robotics*, 2(1):1779–1818.
- [28] Selin, M., Tiger, M., Duberg, D., Heintz, F., and Jensfelt, P. (2019). Efficient autonomous exploration planning of large-scale 3-d environments. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4(2):1699–1706.
- [29] Shakhathreh, H., Sawalmeh, A. H., Al-Fuqaha, A., Dou, Z., Almaita, E., Khalil, I., Othman, N. S., Khreishah, A., and Guizani, M. (2019). Unmanned aerial vehicles (UAVs): A survey on civil applications and key research challenges. *IEEE Access*, 7:48572–48634.
- [30] Sharma, S. and Tiwari, R. (2016). A survey on multi robots area exploration techniques and algorithms. In *2016 International Conference on Computational Techniques in Information and Communication Technologies (ICCTICT)*. IEEE.
- [31] Stentz, A. (1994). Optimal and efficient path planning for partially-known environments. In *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 3310–3317 vol.4.
- [32] Usenko, V., von Stumberg, L., Pangercic, A., and Cremers, D. (2017). Real-time trajectory replanning for MAVs using uniform b-splines and a 3d circular buffer. In *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE.
- [33] Yang, F., Cao, C., Zhu, H., Oh, J., and Zhang, J. (2022). Far planner: Fast, attemptable route planner using dynamic visibility update.

- 
- [34] Zhou, B., Xu, H., and Shen, S. (2023). Racer: Rapid collaborative exploration with a decentralized multi-uav system. *IEEE Transactions on Robotics*, 39(3):1816–1835.