

Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN  
Unidad Tamaulipas  
**Protocolo de tesis**

Título: Estrategias para la exploración coordinada multi-VANT

Candidato: Luis Alberto Ballado Aradias

Asesor: Dr. José Gabriel Ramírez Torres

Co-Asesor: Dr. Eduardo Arturo Rodríguez Tello

21 de julio de 2023

**Resumen**

En las últimas décadas se ha visto un aumento en el interés de los Vehículos Aéreos No Tripulados (conocidos como VANT o coloquialmente drones), a la par que se han introducido nuevas tecnologías de comunicación, sensores y computación. Estos avances han sido aplicados al control de VANT, logrando crear diversas soluciones en vigilancia, búsqueda y rescate [1], soluciones para el problema de la última milla, inclusive en espectáculos aéreos (solo por mencionar algunos). Dichas aplicaciones suelen carecer de autonomía. 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. Tener la capacidad de percibir su entorno y usar la información para decidir cómo moverse son considerados altos niveles de autonomía. Para llegar a ello el robot debe resolver primero problemas como su localización, mapeo y navegación. Se ha demostrado que es posible dotar de autonomía a un robot (móvil o aéreo) y las aplicaciones antes mencionadas son prueba de ello. Dichas soluciones parten de tener el problema de localización resuelto al ser aplicaciones en exteriores y poder hacer uso de sistemas de localización como el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) o Sistema Global de Navegación por Satélite (Global Navigation Satellite System, GNSS). Los Vehículos Aéreos no Tripulados (VANT) del mañana deberán de navegar en áreas urbanas de la mejor manera posible y tener la habilidad de trabajar en coordinación multi-VANT.

El enfoque de este trabajo es la creación y propuesta de una arquitectura de software capaz de coordinar múltiples Vehículos Aéreos No Tripulados con algoritmos para la exploración de áreas desconocidas y cambiantes. Convirtiéndose en un desafío en robótica móvil buscando coordinar y optimizar el movimiento de varios robots para explorar eficientemente un área desconocida. El objetivo pudiera ser maximizar la cobertura del área minimizando el tiempo requerido para completar la exploración. Este problema implica tomar decisiones complejas, como asignar tareas a los robots, evitar colisiones y planificar rutas óptimas. Factores como la comunicación entre robots, la incertidumbre del entorno y las limitaciones de recursos son considerados en este trabajo.

Resolver eficazmente este problema permitiría mejorar la eficiencia y efectividad de las misiones de exploración en diversos campos, como la búsqueda y rescate [1], la inspección de infraestructuras y entre otras.

**Palabras claves:** multi-VANT, coordinación multi-VANT, exploración 3D, planificador de rutas 3D.

## Datos Generales

### Título de proyecto

Estrategias para la exploración coordinada multi-VANT

### Datos del alumno

Nombre: Luis Alberto Ballado Aradias  
Matrícula: 220229860003  
Dirección: Juan José de La Garza #909  
Colonia: Guadalupe Mainero C.P. 87130  
Teléfono (casa): +52 (833) 2126651  
Teléfono (lugar de trabajo): +52 (834) 107 0220 + Ext  
Dirección electrónica: luis.ballado@cinvestav.mx  
URL: <https://luis.madlab.mx>

### Institución

Nombre: CINVESTAV-IPN  
Departamento: Unidad Tamaulipas  
Dirección: Km 5.5 carretera Cd. Victoria - Soto la Marina.  
Parque Científico y Tecnológico TECNOTAM,  
Ciudad Victoria, Tamaulipas, C.P. 87130  
Teléfono: (+52) (834) 107 0220

### Beca de tesis

Institución otorgante: CONAHCYT  
Tipo de beca: Maestría Nacional  
Vigencia: Septiembre 2022 - Agosto 2024

### Datos del asesor

Nombre: Dr. José Gabriel Ramírez Torres  
Dirección: Km. 5.5 carretera Cd. Victoria - Soto la Marina  
Parque Científico y Tecnológico TECNOTAM  
Ciudad Victoria, Tamaulipas, C.P. 87130  
Teléfono (oficina): (+52) (834) 107 0220 Ext. 1014  
Institución: CINVESTAV-IPN  
Departamento adscripción: Unidad Tamaulipas  
Grado académico: Doctorado

Nombre: Dr. Eduardo Arturo Rodríguez Tello  
Dirección: Km. 5.5 carretera Cd. Victoria - Soto la Marina  
Parque Científico y Tecnológico TECNOTAM  
Ciudad Victoria, Tamaulipas, C.P. 87130  
Teléfono (oficina): (+52) (834) 107 0220 Ext. 1100  
Institución: CINVESTAV-IPN  
Departamento adscripción: Unidad Tamaulipas  
Grado académico: Doctorado

## Descripción del proyecto

El proyecto de estrategias para la exploración coordinada multi-VANT se centra en las ventajas de tener múltiples-VANT(s) trabajando en conjunto para mejorar la eficiencia y cobertura de la exploración proponiendo una arquitectura de software descentralizada que permita la coordinación eficiente de multi-VANT para tareas de exploración en entornos desconocidos y cambiantes.

### Antecedentes y motivación para el proyecto

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.

Entre los trabajos más relevantes se encuentra la tesis doctoral de [2] que tiene como objetivo general el diseño e implementación de la coordinación de multi-robot con un enfoque de auto-ofertas

Por otra parte trabajos de tesis de maestría de [3] que tiene como objetivo general la Generación de mapas utilizando vehículos aéreos no tripulados de baja altitud.

Este trabajo desarrolla usando una combinación entre la técnica y técnica de ... en especial el algoritmo de ... Los resultados de este trabajo muestran un buen desempeño del sistema de control.... La robustez se alcanza para las perturbaciones.

Otra investigación relevante se encuentra en la tesis de doctorado del CINVESTAV Unidad Guadalajara [4, 5]. El objetivo principal de este trabajo es el de realizar seguimiento ..

Los robots autónomos son máquinas inteligentes capaces de ejecutar diversas tareas en un ambiente por sí mismos sin que alguien guíe sus movimientos [6]. Frecuentemente definimos a un robot como una máquina capaz de sentir, pensar y actuar. En Inteligencia Artificial dichos sistemas se les conoce como **agentes**. Los robots se distinguen de los agentes ya que su implementación se lleva a cabo en el mundo real recibiendo información del exterior a través de sensores. Estando sujetos a las leyes que rigen el mundo físico (ya que tienen masa e inercia). Parte esencial de un robot hoy en día, es el uso de computadoras que incrementan la velocidad de procesamiento con funciones cognitivas complejas.

La autonomía de los robots se ha ampliado en diversos aspectos y no es extraño tener uno que ayude en la limpieza del hogar.

### ¿Qué es la autonomía?

Autonomía es referente a sistemas capaces de operar en el mundo como lo conocemos sin un control que lo gobierne.

Es común encontrar robots que no sean autónomos, siendo este un campo activo de investigación lo que ha causado que la autonomía de los robots se vea incrementada así como su inteligencia.

### ¿Qué es un robot?

Podemos definir un robot como una máquina que siente, piensa y actúa [6]. Es por ello que debe de contar con sensores, poder procesar la información y actuadores que lo ayuden a su movilidad. Los sensores son necesarios para la obtención de información de su entorno. Comportamientos reactivos que no requieran procesar cierta información y una inteligencia para resolver diversos retos que se puedan presentar.

## Problemas de control

Existen diversas capas de control. En niveles bajos de control queremos que los movimientos del robot sean estables sin oscilaciones. En otra capa de control podemos pensar en robots que no colisionen con obstáculos al mismo tiempo tener una estabilidad en sus movimientos.

Esperamos que el comportamiento autónomo resuelva aspectos como moverse al mismo tiempo evadir obstáculos.

Arquitecturas de software que permiten este tipo de control regularmente se ejecutan en paralelo y son conocidas como behavior-based architectures (Arkin 1998).

La organizacion de software asociada con los niveles de control tiene el nombre de Arquitectura de control de un robot.

Los controles de bajo nivel hacen uso de tecnicas de teoria de control [7]

Considerando como entrada del sistema la posicion que deseamos y su orientacion. El error sera la diferencia entre la posicion deseada y la posicion actual

Es necesario que la retroalimentacion de este tipo de controles sea de alta velocidad para evitar que los errores aumenten a lo largo del tiempo evitando la inestabilidad.

Es comun pensar que el control en ingenieria y el control biologico presentan diversas similitudes. Por un lado los sistemas en ingenieria tienen un valor de referencia pudiendo describirlos como sistemas lineales, los controles biologicos no son lineales.

A lo largo del desarrollo de la robotica movil se han demostrado que estrategias de control basadas en comportamientos (behavior-based) presentan mejores desempeños. (Brooks 1986, Maes & Brooks 1990; Arkin 1998; Beer 1990) Siendo un factor que aumenta la autonomia en dificultades comunes como evitar obstaculos. Brooks et al. (Citar articulo) propusieron estrategias reactivas. El robot sensa su entorno y reacciona con los comportamientos requeridos.

## Sensores

Percibir informacion del entorno es una tarea que deben realizar constantemente los robots y la implementacion de sensores de diversos sensores es necesaria. Diversos robots cuentan con sensores para detectar obstaculos en su camino siendo los sensores de tipo ultrasonico o lasers los mas implementados. Diversas soluciones con sistemas de vision son ampliamente utilizados buscando disminuir la cantidad de sensores que deba contar un robot autonomo.

## Inteligencia

Decimos que un robot es una maquina que sensa, piensa y actua. Las computadoras son el cerebro de los robots, convirtiendose en elementos esenciales. Los avances en la tecnologia han logrado disminuir los tamaños de los microprocesadores asi como incrementado su velocidad y memoria . Logrando tener robots cada vez mas complejos.

La RAE define Inteligencia como la capacidad de resolver problemas, para considerar un robot inteligente este debe cumplir diversos puntos:

1. **Procesar Informacion (Sensar)** Las lecturas provenientes de un sensor no son utiles para el control de un robot, sera necesaria una capa de procesamiento que reduzca la carga del control principal.

2. **Reflejos** Sistemas vivos presentan un nivel alto de reaccion (reflejos) que no involucran el procesar lo que esta sucediendo.
3. **Programas con propositos especificos** Soluciones para la navegacion, localizacion y evacion de obstaculos deben de ser considerados en el software de un robot inteligente.
4. **Funciones Cognitivas** La inteligencia aritificial ((ARTICULOS)) esta proviendo un gran numero de funciones cognitivas como aprender y planear.

La organizacion de estos componentes de control se conoce como Arquitectura de Software de un Robot. Generalmente en una estructura gerarquica con una capa de componentes reactivos en su capa de nivel mas baja y componentes que involucran planificacion y aprendizaje en su nivel mas alto.

El desarrollo de la robotica tiene dos rumbos, una se centra en manipulacion de objetos encambio la otra en su movilidad.

Por un lado encontramos la robotica industrial, su desarrollo comenzo para facilitar la remocion de materiales radioactivos despues de la Segunda Guerra Mundial. Comunmente los robots manipuladores no cuentan con sensores, teniendo preprogramadas las trayectorias que debe seguir. Robots industriales recientes hacen uso diversos sensores que les permiten contar con mayor autonomia. Por otro lado la robotica de servicios, que generalmente encontramos robots que cuenten con cierto grado de movilidad (ruedas, voladores, patas ..etc).

## Robots aereos

Claramente los problemas inherentes al control de vehiculos aereos son diferentes a los que pueda presentar un robot en tierra. Y su control recae en el ajuste de los angulos presentes en los tres ejes (roll, pitch, yaw).

Millones de Vehículos Aéreos No Tripulados, o también conocidos como drones, han presentado una adopción masiva en diferentes aplicaciones, desde usos civiles (búsqueda y rescate, monitoreo industrial, vigilancia), hasta aplicaciones militares [8]. La popularidad de los VANT(s) es atribuida a su movilidad.

La idea de utilizar múltiples robots aéreos en un sistema coordinado se basa en el comportamiento de los enjambres de animales, como las abejas o los pájaros, que trabajan juntos de manera colaborativa para lograr objetivos comunes. Esta inspiración biológica ha llevado al desarrollo de algoritmos y técnicas para coordinar y controlar múltiples VANT(s) en diferentes aplicaciones.

El interés en la investigación e innovación de soluciones con Vehículos Aéreos No Tripulados ha crecido exponencialmente en años recientes [9, 10, 11, 12, 13].

En recientes años, dotar a los VANT de inteligencia para explotar la información recolectada de sensores a bordo, ha sido y es un área estudiada en robótica móvil área (construcción de mapas)[14]. Buscando probar diferentes teorías de control, convirtiéndolos los problemas típicos de control 2D (péndulo inverso fijo) a un ambiente 3D, teniendo más variables a controlar para mantener el equilibrio del péndulo y al mismo tiempo lograr el movimiento y las maniobras deseadas del dron en el espacio tridimensional [15].

El despliegue rápido de robots en situaciones de riesgo, búsqueda y rescate ha sido un área ampliamente estudiada en la robótica móvil. Donde se han aplicado teorías de grafos para la obtención de la mejor ruta. Los comportamientos reactivos son primordiales si pensamos en un agente

autónomo.

La coordinación de múltiples-VANT(s) ofrece numerosos beneficios y oportunidades en diversos campos y aplicaciones.

- Eficiencia y cobertura
- Redundancia y tolerancia a fallos
- Adaptabilidad a entornos dinámicos
- Distribución de carga de trabajo
- Aprendizaje colaborativo

## Planteamiento del problema

La coordinación de múltiples-VANT (Vehículos Aéreos No Tripulados) es un desafío complejo en el campo de la robótica y la exploración de áreas desconocidas. A medida que la tecnología de los Vehículos Aéreos No Tripulados continúa avanzando y se vuelven más accesibles, se presenta la oportunidad de utilizar equipos de múltiples VANT(s) para realizar tareas de manera colaborativa y eficiente. Sin embargo, esta coordinación planea diversas problemáticas que deben abordarse.

La coordinación de múltiples VANT(s) implica la necesidad de establecer una comunicación efectiva entre ellos. Los VANT(s) deben intercambiar información relevante sobre su posición, estado, objetivos y otros datos importantes. La comunicación debe ser confiable, de baja latencia y capaz de manejar múltiples enlaces de manera simultánea. Además, los protocolos de comunicación deben ser seguros para proteger la integridad y confidencialidad de los datos transmitidos.

Otro desafío es la planificación de rutas y la toma de decisiones distribuida. Los VANT(s) deben coordinar sus movimientos para evitar colisiones y lograr una cobertura eficiente del área objetivo. Esto implica la necesidad de desarrollar algoritmos y estrategias que permitan la planificación de rutas dinámicas, considerando los obstáculos y las restricciones del entorno. Además, los VANT(s) deben tomar decisiones colaborativas para adaptarse a situaciones imprevistas o cambios en el entorno.

La asignación de tareas también es un aspecto crítico en la coordinación de múltiples VANT(s). Cada VANT puede tener diferentes capacidades y sensores especializados, por lo que es importante asignar tareas de acuerdo con las fortalezas individuales de cada robot. Además, los VANT(s) deben colaborar en la recolección y procesamiento de datos, evitando la duplicación de esfuerzos optimizando el uso de los recursos disponibles.

Dada un área de interés  $A$  desconocida que se desea explorar,

- Un conjunto de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) denotados como  $V = V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$ , donde  $n$  es el número total de VANT's disponibles
- Un conjunto de tareas de exploración denotados como  $T = T_1, T_2, T_3, T_m$ , donde  $m$  es el número total de tareas a realizar.

restricciones y requisitos específicos del problema, como límites de tiempo, obstáculos a evitar, etc.

Para cada tarea de exploración  $T_m$ , se definen las siguientes variables:

- Posición inicial:  $p_i(x, y, z)$ , representa la posición inicial del VANT o los múltiples-VANTs asignados a la tarea  $T_m$
- Trayectoria:  $\alpha_i$ , describe la trayectoria seguida por el/los VANT(s) asignado(s) a la tarea  $T_m$  en función del tiempo  $t$
- Información recolectada:  $C_i$ , representa la información recolectada por el/los VANT(s) asignado(s) durante la exploración

La función objetivo variará según los objetivos específicos del problema.

- Maximizar la cobertura del área de interés  $A$
- Minimizar el tiempo total requerido para cubrir el área de interés  $A$
- Maximizar la cantidad de información recolectada

# Objetivos generales y específicos del proyecto

## General

Diseñar una arquitectura de software descentralizada capaz de resolver los problemas de localización, mapeo, navegación y coordinación multi-VANT en ambientes desconocidos y dinámicos para tareas de exploración en interiores.

De manera más específica, se listan los siguientes objetivos:

1. **Construcción propuesta** Evaluar las soluciones en la literatura asociados con la coordinación multi-VANT. Enfocándose en aspectos como la comunicación, evasión de obstáculos, asignación de tareas y sincronización de información. En base a esta valoración, construir una arquitectura de software para la coordinación multi-VANT.
2. **Valoración (prueba) propuesta** Emplear una herramienta de simulación de libre uso para robótica, para el desarrollo y puesta en marcha de una propuesta de arquitectura de software capaz de realizar el control multi-VANT y evaluar el desempeño de dicha arquitectura.
3. **Comparación y análisis** Comparar y analizar los resultados obtenidos con enfoques existentes en la coordinación multi-VANT, mostrando las ventajas y desventajas de la estrategia propuesta. Con base a estos análisis proponer recomendaciones y pautas prácticas para la implementación y aplicación de la estrategias de coordinación multi-VANT en escenarios reales, considerando factores como la escalabilidad, la robustez y los recursos computacionales requeridos.



# Metodología

La metodología propuesta se divide en tres etapas, iniciando en septiembre del 2023. A continuación se detallan cada una de las actividades que se plantean realizar en cada una.

## Etapa 1. Análisis y diseño de la solución propuesta

En esta etapa se comprende en la revisión de la literatura de manera más completa, que permita contar con la información necesaria para la elección de los mejores algoritmos para abordar cada una de las problemáticas asociadas con la coordinación de trayectorias. Una vez realizada la elección de los algoritmos que se usarán para la propuesta de arquitectura de software, se procederá a revisar y estudiar las arquitecturas para los robots colaborativos. Finalmente, se realizará el diseño de la arquitectura.

Las actividades específicas a realizarse en la etapa 1, son:

**E1.A1. Revisión estado del arte** Ampliar la revisión de la literatura sobre coordinación y exploración multi-VANT.

**E1.A2. Evaluación de aptitudes** Revisar y documentar los aspectos relevantes (asi como sus limitantes) que permiten la colaboración, coordinación y balanceo de la carga de trabajo multi-VANT.

**E1.A3. Selección de algoritmos** Seleccionar los algoritmos para planificación de trayectorias y exploración en ambientes desconocidos representativos para un entorno de computación restringida.

**E1.A4. Elaboración de solución** Definir la arquitectura de software para escenarios en aplicaciones multi-VANT apegadas a las especificaciones de computadora de placa reducida (Raspberry Pi, Esp32 ... etc.).

**E1.A5. Documentación Etapa 1** Elaborar la documentación de la revisión del estado del arte y del trabajo realizado que formará parte de la tesis.

**E1.A6. Revisión de tesis** Revisión y corrección de avances con los asesores.

## Etapa 2. Implementación y validación

Esta etapa se centra en el desarrollo e implementación del diseño de la arquitectura de software para la coordinación multi-VANT.

Las actividades específicas a realizarse en la etapa 2, son:

**E2.A1. Selección Simulador** Al tener definida la arquitectura de software y conocer las estructuras de datos que se utilizaran, evaluar los diversos simuladores para robótica de libre uso. (Revisar temas de modelos 3D, dinámica del robot, representación del ambiente 3D, simulación de sensores).

**E2.A2. Creación modelo 3D** Crear un modelo 3D en base al simulador seleccionado apegandose a las dimensiones de un VANT que se pueda replicar.

**E2.A3. Control de desplazamientos** Crear movimientos y control de un VANT y múltiples VANT, algoritmos que forman parte de la capa reactiva del VANT.

**E2.A4. Desarrollo de visualización de datos** A partir de la selección del sensor, se desarrollará la forma de representar el entorno 3D dentro del simulador elegido.

**E2.A5. Desarrollo de algoritmos de exploración** En base a la revisión del estado del arte se implementará el algoritmo propuesto para la exploración con un VANT

**E2.A6. Implementación un solo VANT** Realizar pruebas y corregir errores en base a los desarrollos realizados.

**E2.A7. Simulación un solo VANT** Realizar pruebas de simulación con un solo VANT de la solución propuesta.

**E2.A8. Desarrollo de coordinación** Al contar con la exploración y navegación exitosa de un solo VANT, se procede al desarrollo de coordinación multi-VANT.

**E2.A9. Implementación multi-VANT** Realizar pruebas y corregir errores en base a los desarrollos realizados para la coordinación multi-VANT.

**E2.A10. Simulación multi-VANT** Realizar pruebas de simulación multi-VANT de la solución propuesta.

**E2.A11. Documentación Etapa 2** Elaborar la documentación del desarrollo e implementación de la propuesta de arquitectura de software para la coordinación multi-VANT que formará parte de la tesis.

**E2.A12. Revisión de tesis** Revisión y corrección de capítulos con los asesores.

### **Etapas 3. Evaluación experimental, resultados y conclusiones**

Partiendo del prototipo y las simulaciones desarrolladas en la etapa anterior, en esta etapa se realizan todas las actividades relacionadas con la evaluación, recabación de resultados y la escritura de los capítulos restantes de la tesis. Además se realizará el proceso de graduación y actividades relacionadas.

Las actividades específicas a realizarse en la etapa 3, son:

**E3.A1. Experimentación de solución** Experimentos para evaluar el desempeño de la solución propuesta creada en la etapa anterior.

**E3.A2. Recopilación de resultados** Recabar la información de los resultados, realizar su análisis y generar la documentación correspondiente.

**E3.A3. Documentación Etapa 3** Elaborar la documentación de los resultados obtenidos y conclusiones que formará parte de la tesis.

**E3.A4. Revisión de tesis** Revisión y corrección de tesis con los asesores.

**E3.A5. Divulgación** Escribir un artículo científico, con los hallazgos de esta tesis y participar en actividades de difusión.

**E3.A6. Proceso de titulación** Comenzar el proceso de titulación

## Cronograma de actividades (plan de trabajo)

	Cuatrimestre 1				Cuatrimestre 2				Cuatrimestre 3			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
<b>Etap 1</b>												
<b>E1.A1.</b> Revisión estado del arte												
<b>E1.A2.</b> Evaluación de aptitudes												
<b>E1.A3.</b> Selección de algoritmos												
<b>E1.A4.</b> Elaboración de solución												
<b>E1.A5.</b> Documentación Etapa 1												
<b>E1.A6.</b> Revisión de tesis Etapa 1												
<b>Etap 2</b>												
<b>E2.A1.</b> Selección Simulador												
<b>E2.A2.</b> Creación modelo 3D												
<b>E2.A3.</b> Control de desplazamientos												
<b>E2.A4.</b> Desarrollo de visualización de datos												
<b>E2.A5.</b> Desarrollo de algoritmos de exploración												
<b>E2.A6.</b> Implementación un solo VANT												
<b>E2.A7.</b> Simulación un solo VANT												
<b>E2.A8.</b> Desarrollo de coordinación												
<b>E2.A9.</b> Implementación multi-VANT												
<b>E2.A10.</b> Simulación multi-VANT												
<b>E2.A11.</b> Documentación Etapa 2												
<b>E2.A12.</b> Revisión de tesis												
<b>Etap 3</b>												
<b>E3.A1.</b> Experimentación de solución												
<b>E3.A2.</b> Recopilación resultados												
<b>E3.A3.</b> Documentación Etapa 3												
<b>E3.A4.</b> Revisión de tesis												
<b>E3.A5.</b> Divulgación												
<b>E3.A6.</b> Proceso de titulación												

## Infraestructura

Para el desarrollo de este proyecto de investigación, se hará uso de un equipo de cómputo con las siguientes características:

- iMac (21.5-inch, Late 2015)
- Procesador 2.8 GHz Quad-Core Intel Core i5
- Memoria Ram 8 GB 1867 MHz DDR3
- Graphics Intel Iris Pro Graphics 6200 1536 MB
- Almacenamiento 1 TB

## Estado del arte

A minimal navigation solution is presented for swarms of tiny flying robots to explore unknown, GPS-denied environments. Swarms of tiny flying robots hold great potential for exploring unknown, indoor environments. Their small size allows them to move in narrow spaces, and their light weight makes them safe for operating around humans. Until now, this task has been out of reach due to the lack of adequate navigation strategies. The absence of external infrastructure implies that any positioning attempts must be performed by the robots themselves. State-of-the-art solutions, such as simultaneous localization and mapping, are still too resource demanding. This article presents the swarm gradient bug algorithm (SGBA), a minimal navigation solution that allows a swarm of tiny flying robots to autonomously explore an unknown environment and subsequently come back to the departure point. SGBA maximizes coverage by having robots travel in different directions away from the departure point. The robots navigate the environment and deal with static obstacles on the fly by means of visual odometry and wall-following behaviors. Moreover, they communicate with each other to avoid collisions and maximize search efficiency. To come back to the departure point, the robots perform a gradient search toward a home beacon. We studied the collective aspects of SGBA, demonstrating that it allows a group of 33-g commercial off-the-shelf quadrotors to successfully explore a real-world environment. The application potential is illustrated by a proof-of-concept search-and-rescue mission in which the robots captured images to find victims in an office environment. The developed algorithms generalize to other robot types and lay the basis for tackling other similarly complex missions with robot swarms in the future [16].

Unmanned aerial vehicles (UAVs) have the potential to make a significant impact in a range of scenarios where it is too risky or too costly to rely on human labour. Fleets of autonomous UAVs, which complete tasks collaboratively while managing their basic flight and related tasks independently, present further opportunities along with research and regulatory challenges. Improvements in UAV construction and components, along with developments in embedded computing hardware, communication mechanisms and sensors which may be mounted on-board a UAV, are nearing the point where commercial deployment of fleets of autonomous UAVs will be technically possible. To fulfil this potential, UAVs will need to operate safely and reliably in complex and potentially dynamically changing environments with path-planning, obstacle sensing and collision avoidance paramount. This survey presents an original environment complexity classification and critically analyses the current state of the art in relation to UAV path-planning approaches. Moreover, it highlights the existing challenges in environment complexity modelling and representation, as well as path-planning approaches, and outlines open research questions together with future directions. [17]

The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) to carry out remote aerial surveys has become prominent in recent years. The UAV-based survey faces several operational issues, such as complicated terrain, limited UAV resources, obstacles, sensor limitations, and other environmental factors. In addition, the coverage plan includes numerous objectives, such as lowering path length, maximizing coverage, and limiting survey time, necessitating multi-objective optimization. UAVs require effective coverage path planning (CPP) to generate the ideal route. It involves determining the path which encompasses every point inside the required region under different constraints. The process automates the process of route determination for autonomous operation by considering various environmental constraints. In this paper, we explore and analyze the existing research on the various techniques used in coverage route planning for UAVs. It provides an overview of the current state-of-the-art CPP methods for UAVs. The study discusses the key challenges and requirements of CPP for UAVs and presents various approaches proposed in the literature to tackle these challenges. We explore a variety of geometric flight patterns for the area of interest having UAV deployment. It also features multi-UAV and multi-region coverage strategies, providing a new dimension to UAV-based operations. The energy consumption of UAVs during CPP is an essential factor, as it influences their flight length and mission duration. The design of the CPP algorithm is determined by the unique requirements of the UAV application, such as the size and form of the

region to be mapped, the existence of obstacles, and the desired coverage resolution. Path planning strategies in a three-dimensional environment and dynamic coverage are also included in the study. Moreover, we compare the existing strategies using different performance metrics to evaluate the success of covering missions. Finally, the problems and unresolved concerns related to UAV coverage path planning are examined to provide valuable insights to the readers [18].

This paper investigates the path planning problem of an unmanned aerial vehicle (UAV) for completing a raid mission through ultra-low altitude flight in complex environments. The UAV needs to avoid radar detection areas, low-altitude static obstacles, and low-altitude dynamic obstacles during the flight process. Due to the uncertainty of low-altitude dynamic obstacle movement, this can slow down the convergence of existing algorithm models and also reduce the mission success rate of UAVs. In order to solve this problem, this paper designs a state detection method to encode the environmental state of the UAVs direction of travel and compress the environmental state space. In considering the continuity of the state space and action space, the SD-TD3 algorithm is proposed in combination with the double-delayed deep deterministic policy gradient algorithm (TD3), which can accelerate the training convergence speed and improve the obstacle avoidance capability of the algorithm model. Further, to address the sparse reward problem of traditional reinforcement learning, a heuristic dynamic reward function is designed to give real-time rewards and guide the UAV to complete the task. The simulation results show that the training results of the SD-TD3 algorithm converge faster than the TD3 algorithm, and the actual results of the converged model are better [19].

Recently, unmanned aerial vehicles (UAVs) or drones have emerged as a ubiquitous and integral part of our society. They appear in great diversity in a multiplicity of applications for economic, commercial, leisure, military and academic purposes. The drone industry has seen a sharp uptake in the last decade as a model to manufacture and deliver convergence, offering synergy by incorporating multiple technologies. It is due to technological trends and rapid advancements in control, miniaturization, and computerization, which culminate in secure, lightweight, robust, more-accessible and cost-efficient UAVs. UAVs support implicit particularities including access to disaster-stricken zones, swift mobility, airborne missions and payload features. Despite these appealing benefits, UAVs face limitations in operability due to several critical concerns in terms of flight autonomy, path planning, battery endurance, flight time and limited payload carrying capability, as intuitively it is not recommended to load heavy objects such as batteries. As a result, the primary goal of this research is to provide insights into the potentials of UAVs, as well as their characteristics and functionality issues. This study provides a comprehensive review of UAVs, types, swarms, classifications, charging methods and regulations. Moreover, application scenarios, potential challenges and security issues are also examined. Finally, future research directions are identified to further hone the research work. We believe these insights will serve as guidelines and motivations for relevant researchers [10].

TEXTOS DEL HANDBOOK [20].

Path planning with collision avoidance for unmanned aerial vehicles (UAVs) in environments with moving obstacles is a complex process of navigation, often considered a hard optimization problem. Ordinary resolution algorithms may fail to provide flyable and collision-free paths under the time-consumption constraints required by the dynamic 3D environment. In this paper, a new parallel multiobjective multiverse optimizer (PMOMVO) is proposed and successfully applied to deal with the increased computation time of the UAV path planning problem in dynamic 3D environments. Collision constraints with moving obstacles and narrow pass zones were established based on a mathematical characterization of any intersection with lines connecting two consecutive drones positions. For the implementation, a multicore central processing unit (CPU) architecture was proposed according to the concept of master-slave processing parallelization. Each subswarm of the entire PMOMVO population was granted to a corresponding slave, and representative solutions were selected and shared with the master core. Slaves sent their local Pareto fronts to the CPU core representing the master that merged the received set of nondominated solutions and built a global

Pareto front. Demonstrative results and nonparametric ANOVA statistical analyses were carried out to show the effectiveness and superiority of the proposed PMOMVO algorithm compared to other homologous, multiobjective metaheuristics [21]

Path planning is one of the most important problems to be explored in unmanned aerial vehicles (UAVs) for finding an optimal path between source and destination. Although, in literature, a lot of research proposals exist on the path planning problems of UAVs but still issues of target location and identification persist keeping in view of the high mobility of UAVs. To solve these issues in UAVs path planning, optimal decisions need to be taken for various mission-critical operations performed by UAVs. These decisions require a map or graph of the mission environment so that UAVs are aware of their locations with respect to the map or graph. Keeping focus on the aforementioned points, this paper analyzes various UAVs path planning techniques used over the past many years. The aim of path planning techniques is not only to find an optimal and shortest path but also to provide the collision-free environment to the UAVs. It is important to have path planning techniques to compute a safe path in the shortest possible time to the final destination. In this paper, various path planning techniques for UAVs are classified into three broad categories, i.e., representative techniques, cooperative techniques, and non-cooperative techniques. With these techniques, coverage and connectivity of the UAVs network communication are discussed and analyzed. Based on each category of UAVs path planning, a critical analysis of the existing proposals has also been done. For better understanding, various comparison tables using parameters such as-path length, optimality, completeness, cost-efficiency, time efficiency, energy-efficiency, robustness and collision avoidance are also included in the text. In addition, a number of open research problems based on UAVs path planning and UAVs network communication are explored to provide deep insights to the readers [22]

In order to solve the path planning problem about multiple unmanned aerial vehicles (UAVs) attacking multiple targets under static environment, the method based on consistency theory is proposed in this paper. The Voronoi diagram method is used to create threat field and the total path cost is established firstly. Then, path planning model is constructed and the payment function of multiple UAVs path planning is designed. The idea that multiple UAVs cooperatively seek the optimal path based on consistency theory is further defined by establishing the path solving framework, the purpose of which is that multiple UAVs take off and arrive at prescribed target points at the same time. Finally, the simulation experiment is conducted, the results of which demonstrate that using the consistency theory combined with Voronoi diagram can guarantee the optimal path of UAVs and complete multiple UAVs cooperatively attacking multiple targets [23]

so developed. For RRT planning method, most time has been spent on collision. Numerous works are focused on 3D scenario. In [7], an improved RRT algorithm is implemented for UAV navigation in field environments. The initial path was created by RRT method and then the path was pruned to fit the motion constrain of UAV. Simple RRT only gives optimal result when the sample iteration reaches infinity though we can stop at required resolution. Recently various optimal RRT path planning algorithms have been developed towards reducing planning time, cost of the path or requirement of the motion constrain[8]. However, few of these try to solve the planning problem in multiple UAVs traversing environment, especially for the problems that contain rich static and pop-up obstacles [9][11].

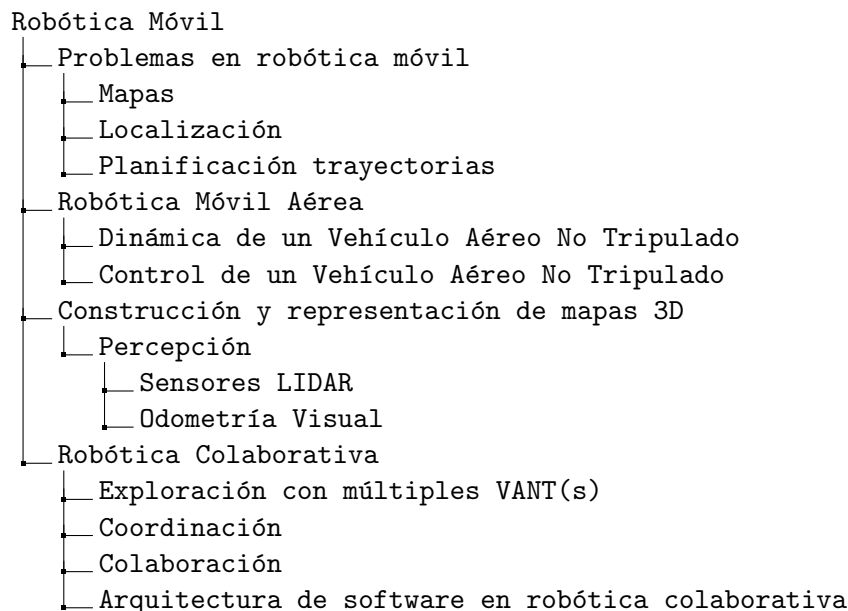
In this paper, we develop a path planning algorithm for multiple UAVs traversing from their starting locations to corresponding goal locations in the presence of both static and dynamic obstacles. When a UAV detects a new obstacle, a new path is first found quickly and then depending on the cooperative path planning strategy is run to produce a better path. [24]

Autonomous BVLOS Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) are gradually gaining their share in the drone market. Together with the demand for extended levels of autonomy comes the necessity for high-performance obstacle avoidance and navigation algorithms that will allow autonomous drones to operate with minimum or no human intervention. Traditional AI algorithms have been extensi-

vely used in the literature for finding the shortest path in 2-D or 3-D environments and navigating the drones successfully through a known and stable environment. However, the situation can become much more complicated when the environment is changing or not known in advance. In this work, we explore the use of advanced artificial intelligence techniques, such as reinforcement learning, to successfully navigate a drone within unspecified environments. We compare our approach against traditional AI algorithms in a set of validation experiments on a simulation environment, and the results show that using only a couple of low-cost distance sensors it is possible to successfully navigate the drone beyond the obstacles [25].

Drones are poised to become an integral part of smart cities and improve overall life experience in the sense of monitoring pollution, accident investigation, fire-fighting, package delivery, supporting first responder activities, delivering medicine, monitoring traffic, and supervising construction sites. Drone technology can further lead to enormous secondary benefits such as reducing power consumption, conserving resources, reducing pollution, accessing hazardous and disaster areas, and increasing preparedness for emergencies [26].

This paper presents a method for online trajectory planning in known environments. The proposed algorithm is a fusion of sampling-based techniques and model-based optimization via quadratic programming. The former is used to efficiently generate an obstacle-free path while the latter takes into account the robot dynamical constraints to generate a time-dependent trajectory. The main contribution of this work lies on the formulation of a convex optimization problem over the generated obstacle-free path that is guaranteed to be feasible. Thus, in contrast with previously proposed methods, iterative formulations are not required. The proposed method has been compared with state-of-the-art approaches showing a significant improvement in success rate and computation time. To illustrate the effectiveness of this approach for online planning, the proposed method was applied to the fluid autonomous navigation of a quadcopter in multiple environments consisting of up to 200 obstacles. The scenarios hereinafter presented are some of the most densely cluttered experiments for online planning and navigation reported to date [27].



Las aplicaciones de la robótica 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 un comportamiento inteligente. Dentro de la robótica móvil inteligente se han propuesto estrategias

de comportamiento reactivas, algoritmos que imitan el comportamiento de insectos y el cómo se desplazan en un entorno.

El objetivo principal de los algoritmos de navegación es el de guiar al robot desde el punto de inicio al punto destino. Los trabajos por V. Lumelsky y A. Stephanov, et al. [11], dieron respuesta a problemáticas de navegación eficiente y de poca memoria (Algoritmos tipo bug).

Se considera a P. Hart, N. Nilsson et al. como los creadores del algoritmo A\* en 1968 [12], al mejorar el algoritmo de Dijkstra para el robot Shakey, que debía navegar en una habitación que contenía obstáculos fijos. El objetivo principal del algoritmo A\* es la eficiencia en la planificación de rutas. Otros algoritmos propuestos por A. Stentzz[13] han demostrado operar de manera eficiente ante obstáculos dinámicos, a comparación del algoritmo A\* que vuelve a ejecutarse al encontrarse con un obstáculo, el algoritmo D\* usa la información previa para buscar una ruta hacia el objetivo.

La colaboración de múltiples VANTs (vehículos aéreos no tripulados), también conocidos como VANTs, ha surgido como una área de investigación prometedora en los últimos años [1,2,3,5]. La capacidad de coordinar y colaborar entre sí permite a los VANTs realizar tareas complejas de manera eficiente, abriendo nuevas posibilidades en una amplia gama de aplicaciones, desde la vigilancia y la logística hasta la exploración y la respuesta a desastres [1,2].

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 la colisión y mejorando la eficiencia de sus misiones[5,6]. Estos algoritmos tienen en cuenta varios factores, como las restricciones de vuelo, la energía restante de los VANTs y las ubicaciones objetivo, para generar trayectorias seguras y eficientes.

Además de la planificación de rutas, la coordinación de los VANTs requiere una comunicación efectiva. Se han investigado diferentes protocolos de comunicación y estrategias de intercambio de información para permitir la colaboración entre los VANTs. Algunos enfoques utilizan comunicación directa entre los VANTs, mientras que otros emplean una arquitectura de red donde los VANTs se comunican a través de una infraestructura centralizada[6]. La elección del enfoque depende de las características de la aplicación y las restricciones del sistema.

La colaboración de múltiples VANTs también puede implicar la formación de formaciones o la realización de tareas coordinadas. Para ello, se han desarrollado algoritmos de control distribuido que permiten a los VANTs mantener posiciones relativas estables y realizar movimientos coordinados. Estos algoritmos[14] pueden basarse en técnicas de seguimiento y control de formaciones, y se han aplicado en diferentes contextos, desde la inspección de infraestructuras hasta la búsqueda y rescate.

En términos de validación y evaluación, se utilizan simulaciones y pruebas reales para verificar el rendimiento y la eficacia de los sistemas de colaboración de múltiples VANTs. Las simulaciones permiten evaluar diferentes escenarios y ajustar los parámetros del sistema antes de las pruebas reales. Los casos de prueba reales proporcionan información sobre la implementación y la eficiencia en situaciones del mundo real, y pueden ayudar a identificar desafíos adicionales que deben abordarse.

La adquisición de datos es el primer paso en la representación de mapas 3D con VANTs. Los VANTs pueden llevar a cabo vuelos sobre un área de interés, capturando imágenes desde diferentes ángulos y alturas[15]. Estas técnicas aprovechan la información de correspondencia entre las imágenes para calcular la posición y orientación relativa de las cámaras y reconstruir la estructura tridimensional del entorno.

Los VANTs pueden utilizar sensores LiDAR (Light Detection and Ranging) para capturar datos 3D. Los sensores LiDAR emiten pulsos de luz láser y miden el tiempo que tarda en reflejarse en



los objetos circundantes. Esto permite obtener información precisa sobre la distancia y la posición tridimensional de los objetos en el entorno. Los datos LiDAR pueden combinarse con las imágenes capturadas para generar mapas 3D completos y detallados.

Trabajos relacionados						
Ref.	3D	Mapa	Navegación	Simulador	Percepción	Arquitectura
[28]	✓	Voronoi	A*	gazebo	LiDAR	Centralizada
[29]	✗	Celdas	D* Lite	gazebo	Camara	Descentralizada
[4]	✓	Grafo	RRT*	matlab	Camara	Centralizada
[30]	✗	Oct-tree	A*	webots	LiDAR	Descentralizada
[31]	✗	Grafo	RRT	airsim	siete	Descentralizada
[31]	✗	Grafo	RRT	airsim	siete	Descentralizada
[31]	✗	Grafo	RRT	airsim	siete	Descentralizada

## Contribuciones o resultados esperados

1. Documentación, y códigos liberados
  - Algoritmo para la planificación de rutas
  - Protocolos de comunicación y coordinación
  - Coordinación en entornos dinámicos
2. Simulación de solución
  - Simulaciones detalladas y pruebas en entornos controlados
  - Métricas como tiempo de respuesta, consumo de energía y la capacidad de adaptación a diferentes escenarios.
3. Tesis impresa.
4. Divulgar este trabajo en algun espacio afin en ingenieria y tecnologia.

## Referencias

- [1] R. Matheson, “Fleets of drones could aid searches for lost hikers,” Nov 2018.
- [2] J. C. Elizondo Leal, *Estrategia Descentralizada para la Exploración Multi-Robot, incluyendo Restricciones en Rango de Comunicación*. PhD thesis, CINVESTAV Unidad Tamaulipas, Junio 2013.
- [3] H. Sandoval García, “Generación de mapas utilizando vehículos aéreos no tripulados de baja altitud,” Master’s thesis, CINVESTAV Unidad Tamaulipas, Febrero 2013.
- [4] L. E. Campos Macias, *Multi-Agent Autonomus Navigation in Unknown Cluttered Environments*. PhD thesis, CINVESTAV Unidad Guadalajara, December 2021.
- [5] O. A. Villanueva Grijalva, “Control de un vehículo aéreo no tripulado (auv) para reconocimiento en interiores,” Master’s thesis, CINVESTAV Unidad Guadalajara, Septiembre 2015.
- [6] G. A. Bekey, *Autonomus Robots From Biological Inspiration to Implementation and Control*. MIT Press, 1st ed., 2005.
- [7] G. Ramirez and S. Zeghloul, “Collision-free path planning for nonholonomic mobile robots using a new obstacle representation in the velocity space,” *Robotica*, vol. 19, no. 5, pp. 543–555, 2001.
- [8] H. Shakhatreh, A. H. Sawalmeh, A. Al-Fuqaha, Z. Dou, E. Almaita, I. Khalil, N. S. Othman, A. Khreishah, and M. Guizani, “Unmanned aerial vehicles (uavs): A survey on civil applications and key research challenges,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 48572–48634, 2019.
- [9] P. Daponte, L. D. Vito, G. Mazzilli, F. Picariello, S. Rapuano, and M. Riccio, “Metrology for drone and drone for metrology: Measurement systems on small civilian drones,” *2015 IEEE Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace)*, pp. 306–311, 2015.
- [10] S. A. H. Mohsan, N. Q. H. Othman, A. Li, Yanlong, M. H., and M. A. Khan, “Unmanned aerial vehicles (uavs): practical aspects, applications, open challenges, security issues, and future trends,” *Intelligent Service Robotics*, vol. 16, no. 1, 2023.
- [11] L. Gupta, R. Jain, and G. Vaszkun, “Survey of important issues in uav communication networks,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 1123–1152, 2016.
- [12] A. D. J. Senthilnath, Manasa Kandukuri, “Application of uav imaging platform for vegetation analysis based on spectral-spatial methods,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. Volume 140, no. 0168-1699, pp. 8–24, 2017.
- [13] H. Zhou, H. Kong, L. Wei, D. Creighton, and S. Nahavandi, “On detecting road regions in a single uav image,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 18, no. 7, pp. 1713–1722, 2017.
- [14] A. Shukla and H. Karki, “Application of robotics in onshore oil and gas industry - a review part i,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 75, pp. 490–507, 2016.
- [15] M. Hehn and R. D’Andrea, “A flying inverted pendulum,” in *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 763–770, 2011.
- [16] K. N. McGuire, C. D. Wagter, K. Tuyls, H. J. Kappen, and G. C. H. E. de Croon, “Minimal navigation solution for a swarm of tiny flying robots to explore an unknown environment,” *Science Robotics*, vol. 4, no. 35, p. eaaw9710, 2019.
- [17] M. Jones, S. Djahel, and K. Welsh, “Path-planning for unmanned aerial vehicles with environment complexity considerations: A survey,” *ACM Comput. Surv.*, vol. 55, feb 2023.

- [18] K. Kumar and N. Kumar, “Region coverage-aware path planning for unmanned aerial vehicles: A systematic review,” *Physical Communication*, vol. 59, p. 102073, 2023.
- [19] D. Zhang, Z. Xuan, Y. Zhang, J. Yao, X. Li, and X. Li, “Path planning of unmanned aerial vehicle in complex environments based on state-detection twin delayed deep deterministic policy gradient,” *Machines*, vol. 11, no. 1, 2023.
- [20] B. Siciliano and K. Oussama, *Springer Handbook of Robotics*. Springer Cham, 2nd ed., 2016.
- [21] R. Jarray, S. Bouall  gue, H. Rezk, and M. Al-Dhaifallah, “Parallel multiobjective multiverse optimizer for path planning of unmanned aerial vehicles in a dynamic environment with moving obstacles,” *Drones*, vol. 6, no. 12, 2022.
- [22] S. Aggarwal and N. Kumar, “Path planning techniques for unmanned aerial vehicles: A review, solutions, and challenges,” *Computer Communications*, vol. 149, pp. 270–299, 2020.
- [23] X. Chen, G.-y. Li, and X.-m. Chen, “Path planning and cooperative control for multiple uavs based on consistency theory and voronoi diagram,” in *2017 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, pp. 881–886, 2017.
- [24] W. Zu, G. Fan, Y. Gao, Y. Ma, H. Zhang, and H. Zeng, “Multi-uavs cooperative path planning method based on improved rrt algorithm,” in *2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, pp. 1563–1567, 2018.
- [25] C. Chronis, G. Anagnostopoulos, E. Politi, A. Garyfallou, I. Varlamis, and G. Dimitrakopoulos, “Path planning of autonomous uavs using reinforcement learning,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2526, p. 012088, jun 2023.
- [26] S. H. Alsamhi, O. Ma, M. S. Ansari, and F. A. Almalki, “Survey on collaborative smart drones and internet of things for improving smartness of smart cities,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 128125–128152, 2019.
- [27] L. Campos-Mac  as, D. G  mez-Gutiérrez, R. Aldana-López, R. de la Guardia, and J. I. Parra-Vilchis, “A hybrid method for online trajectory planning of mobile robots in cluttered environments,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 2, no. 2, pp. 935–942, 2017.
- [28] M. Collins, “Efficient planning for high-speed mav flight in unknown environments using sparse topological graphs,” Master’s thesis, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, August 2019.
- [29] e. a. Lin Y, Gao F, “Autonomous aerial navigation using monocular visual-inertial fusion,” *Journal of Field Robotics*, pp. 1–29, 2017.
- [30] M. Selin, M. Tiger, D. Duberg, F. Heintz, and P. Jensfelt, “Efficient autonomous exploration planning of large-scale 3-d environments,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 4, no. 2, pp. 1699–1706, 2019.
- [31] B. Zhou, H. Xu, and S. Shen, “Racer: Rapid collaborative exploration with a decentralized multi-uav system,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 39, no. 3, pp. 1816–1835, 2023.

Fecha de inicio

Fecha de terminación

Septiembre de 2023

Agosto de 2024

Firma del alumno: \_\_\_\_\_

Comité de aprobación del tema de tesis

Dr. José Gabriel Ramírez Torres \_\_\_\_\_

Dr. Eduardo Arturo Rodríguez Tello \_\_\_\_\_

Dr. 3 \_\_\_\_\_

Dr. 4 \_\_\_\_\_