

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

17 de julio de 2023

**Resumen**

La importancia de la robótica de servicios en la actualidad es innegable. Estos avances están revolucionando la forma en que interactuamos con el mundo, ofreciendo un amplio abanico de aplicaciones en diversos sectores. Desde vehículos autónomos, robots móviles en logística, hasta la exploración espacial, la robótica de servicios ha demostrado ser útil en entornos donde los seres humanos pueden enfrentar riesgos o dificultades.

Dentro de la robótica móvil podemos encontrar robots aéreos, mejor conocidos como Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT), estos robots móviles tienen la capacidad de volar y acceder a lugares de manera rápida y eficiente, convirtiéndolos en herramientas extremadamente versátiles. Vehículos así están siendo utilizados por empresas de comercio electrónico para entregar productos a los clientes de manera ágil ((hablar del mTSP)), en la agricultura para monitorear cultivos e identificar problemas con plagas para aplicar pesticidas o fertilizantes de manera precisa. En el ámbito de la seguridad, pueden utilizarse para la vigilancia de Áreas de difícil acceso o en situaciones de emergencia, proporcionando información valiosa en tiempo real a los equipos de rescate.

A pesar de los numerosos avances de la robótica de servicios, existen desafíos y problemáticas asociadas a la planificación de trayectorias en ambientes desconocidos y cambiantes. La **exploración** implica una serie de tareas y desafíos. Estos pueden incluir la **planificación de rutas** para cubrir eficientemente el área a explorar, la **detección y evasión de obstáculos**, la **localización y mapeo simultáneo** (SLAM) y la toma de decisiones para maximizar la información.

La **coordinación** y el **trabajo en equipo** de múltiples-VANT(s) representa un desafío emocionante. La **colaboración** de varios VANT(s) puede ser útil en misiones de búsqueda y rescate, en donde pueden cubrir áreas más extensas y realizar tareas más complejas de manera simultánea. La coordinación entre los VANT(s) puede optimizar la eficiencia de las operaciones y aumentar las posibilidades de éxito.

El objetivo de este trabajo es la propuesta de una arquitectura de software tolerante a fallas, capaz de explorar ambientes desconocidos y cambiantes para la coordinación de Vehículos Aéreos No Tripulados.

El proyecto de investigación demostrará que es posible diseñar algoritmos inteligentes de poca memoria capaces de resolver tareas en colaboración multi-VANT.

**Palabras claves:** multi-VANT, coordinación multi-agente, Exploración 3D, 3D Path finding

## 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 que con ayuda de algoritmos, permitan la coordinación eficiente de múltiples-VANT(s) para llevar a cabo tareas de exploración en entornos desconocidos y cambiantes.

## Antecedentes y motivación para el proyecto

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 [1]. 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 [2,7,8,9,10].

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)[3]. Buscando probar diferentes teorías de control, convirtiendo 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[4].

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. Esa percepción que podemos tener los seres humanos para reaccionar a ciertos retos. Buscar la manera de crear una arquitectura tolerante a fallas, capaz de coordinar múltiples vehículos aéreos no tripulados a medida que incrementa o disminuye la oferta de VANT(s) disponibles.

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 de baja memoria 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 encontrarán los siguientes objetivos:

1. Evaluar las limitantes de 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.
2. Determinar una herramienta de simulación de libre uso para robótica compatible con el middleware ROS (Robot Operating System).
3. Generación y manipulación del modelo dinámico de un VANT en el simulador elegido.
4. Desarrollo e implementación de tres técnicas para la representación del ambiente en 3D, así como el desarrollo de tres planificadores de trayectorias para un único VANT.
5. Desarrollo de una estrategia para la coordinación multi-VANT en base a los puntos anteriores en base al mejor candidato.
6. Realizar simulaciones y pruebas de las estrategias propuestas, evaluando su desempeño en términos de tiempo de respuesta, eficiencia en la asignación de recursos, seguridad y capacidad de adaptación a situaciones cambiantes.
7. Comparar y analizar los resultados obtenidos con enfoques existentes en la coordinación multi-VANT, demostrando las ventajas y contribuciones de la estrategia propuesta.
8. 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.
9. Escribir un artículo científico con los hallazgos en esta tesis en relación con la exploración y coordinación multi-VANT.

# 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 planificación de trayectorias. Una vez realizada la elección del algoritmo que se usará para la propuesta de arquitectura, 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:

1. **E1.A1.** Realizar una revisión de la literatura sobre coordinación multi-VANT.
2. **E1.A2.** Revisar y documentar
3. **E1.A3.** Estudiar los problemas
4. **E1.A4.** Seleccionar
5. **E1.A5.** Definir la arquitectura
6. **E1.A6.** Proponer el diseño
7. **E1.A7.** Elaborar la documentación de la revisión bibliográfica realizada, que formará parte de la tesis
8. **E1.A8.** Realizar la documentación del trabajo realizado en la etapa

## Etapa 2. Implementación y validación

Esta etapa se centra en la implementación del diseño del sistema ...

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

1. **E2.A1.** Definir
2. **E2.A2.** Definir
3. **E2.A3.** Realizar
4. **E2.A4.** Implementar
5. **E2.A5.** Documentar
6. **E2.A6.** Elaborar

## Etapa 3. Evaluación experimental, resultados y conclusión

Lorem itsum....

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

1. **E3.A1.** Experimentos para evaluar el prototipo creado en la etapa anterior en las métricas de interés
2. **E3.A2.** Recabar
3. **E3.A3.** Escribir un artículo científico, con los hallazgos de esta tesis

4. **E3.A4.** Iniciar el proceso de revisión de tesis con los directores.
5. **E3.A5.** Escribir los capítulos correspondientes a la implementación, resultados y conclusiones
6. **E3.A6.** Iniciar el proceso de graduación
7. **E3.A7.** Participar en actividades de difusión y divulgación

1. Revisión de literatura

- Realizar una revisión de la literatura científica y técnica relacionada con la coordinación de múltiples VANT(s).
- Identificar los enfoques existentes, algoritmos y tecnologías utilizadas en la coordinación de múltiples VANT(s).

2. Análisis y diseño de la solución propuesta

- Identificar los requisitos clave para una coordinación eficiente de VANT(s), considerando factores como la seguridad, la eficiencia energética y la capacidad de adaptación a diferentes entornos.
- Establecer métricas y criterios de evaluación para medir el desempeño de la coordinación de múltiples VANTS.
- Diseñar algoritmos y protocolos de comunicación que permitan la coordinación de manera eficiente.
- Proponer estrategias para la asignación de tareas y la gestión de recursos en función de los requisitos identificados.

3. Implementación y validación

- Implementar la metodología propuesta utilizando lenguajes de programación adecuados y herramientas de simulación.
- Realizar simulaciones para evaluar el desempeño de la coordinación de múltiples VANT(s) bajo diferentes escenarios.

4. Evaluación, resultados y conclusiones

- Analizar y comparar los resultados obtenidos con otros enfoques existentes.
- Extraer conclusiones sobre la efectividad propuesta en términos de coordinación eficiente de Vehículos Aéreos No Tripulados.
- Identificar posibles mejoras y áreas de investigación futuras en el campo de la coordinación de múltiples VANT(s).

## Cronograma de actividades (plan de trabajo)

Cuatrimestre	Q1				Q2				Q3			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Actividad 1												
Actividad 2												
Actividad 3												
Actividad 4												
Actividad 5												
Actividad 6												
Actividad 7												

## 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
- Tarjeta Raspberry Pi para Nodos ROS



## Estado del arte

### Robótica Móvil

- Problemas en robótica móvil
  - Mapas
  - Localización
  - Planificación trayectorias
- Robótica Móvil Aérea
  - Dinámica de un Vehículo Aéreo No Tripulado
  - Control de un Vehículo Aéreo No Tripulado
- Construcción y representación de mapas 3D
  - Percepción
    - Sensores LIDAR
    - Odometría Visual
- Robótica Colaborativa
  - Exploración con múltiples VANT(s)
  - Coordinación
  - Colaboración
  - Arquitectura de software en robótica colaborativa

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 desplanzan 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	Localización	Mapa	Navegación	Simulador	Percepción	Arquitectura
[2]	✓	BLE	Voronoi	A*	gazebo	LiDAR	Centralizada
[2]	✗	GPS	Celdas	D* Lite	gazebo	Camara	Descentralizada
[2]	✓	Feat.	Grafo	RRT*	matlab	Camara	Centralizada
[2]	✗	GPS	Oct-tree	A*	webots	LiDAR	Descentralizada
[2]	✗	BLE	Grafo	RRT	airsim	siete	Descentralizada

## Contribuciones o resultados esperados

1. Códigos a disposición de la comunidad
  - 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. [1] [2]

## Referencias

- [1] A. Einstein, “Zur elektrodynamik bewegter korper,” *Annalen der Physik*, vol. 322, no. 10, pp. 891–921, 1905.
- [2] J. Smith and S. Johnson, “The importance of references,” *Journal of Research*, vol. 15, no. 2, pp. 45–60, 2020.

Fecha de inicio

Fecha de terminación

Septiembre de 2023

Agosto de 2024

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

Comité de aprobación del tema de tesis

Dr. JosÃ© Gabriel RamÃ³rez Torres \_\_\_\_\_

Dr. Eduardo Arturo RodrÃ­guez Tello \_\_\_\_\_

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

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