

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 Rodríguez Tello

6 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 también un amplio abanico de aplicaciones en diversos sectores. Desde vehículos autónomos, robots móviles en logística hasta la exploración espacial, la robótica de servicios junto a los avances en robótica móvil inteligente, han demostrado ser útiles 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, 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 y en robótica móvil aérea, existen desafíos y problemáticas asociadas a la planificación de trayectorias en ambientes desconocidos y cambiantes.

La **exploración** en robótica móvil 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-VANTs representa un desafío emocionante. La **colaboración** de varios VANT(s) puede ser utilizada 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 drones 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 fallos, 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

## 1. Datos Generales

### 1.1. Título de proyecto

Estrategias para la exploración coordinada multi-VANT

### 1.2. Datos del alumno

Nombre: Luis Alberto Ballado Aradias  
Dirección: Juan José de La Garza #909  
Colonia: Guadalupe Mainero C.P. 87130  
Teléfono (casa): 81 20706661  
Teléfono (lugar de trabajo): (834) 107 0220 + Ext  
Dirección electrónica: luis.ballado@cinvestav.mx  
URL: <https://luis.madlab.mx>

### 1.3. 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

### 1.4. Beca de tesis

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

### 1.5. 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

## 2. Descripción del proyecto

El proyecto de estrategias para la exploración coordinada multi-VANT se centra en las ventajas de tener multiples-VANT(s) trabajando en conjunto para mejorar la eficiencia y la cobertura de la exploración proponiendo una arquitectura de software que con ayuda de algoritmos, permitan la coordinación eficiente de múltiples drones para llevar a cabo tareas de exploración en entornos desconocidos y cambiantes.

### 2.1. Antecedentes y motivación para el proyecto

Millones de Vehículos Aéreos No Tripulados, también conocidos como VANT(s) o 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 VANTs en diferentes aplicaciones.

El interes en la investigación e inovación 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 así más variables a controlar buscando 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 optención 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 y capaz de coordinar múltiples vehículos aéreos no trupulados a medida que incrementa o disminuye la oferta de drones disponible.

La coordinación de múltiples VANTs ofrece numerosos beneficios y oportunidades en diversos campos y aplicaciones.

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

### 3. 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 VANTs continúa avanzando y se vuelven más accesibles, se presenta la oportunidad de utilizar equipos de múltiples VANTs para realizar tareas de manera colaborativa y eficiente. Sin embargo, esta coordinación plantea diversas problemáticas que deben abordarse.

En primer lugar, la coordinación de múltiples VANTs implica la necesidad de establecer una comunicación efectiva entre ellos. Los VANTs 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 VANTs 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 VANTs 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 VANTs. 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 VANTs deben colaborar en la recolección y procesamiento de datos, evitando la duplicación de esfuerzos y optimizando el uso de los recursos disponibles.

Dada un área de interés  $A$  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

## 4. Objetivos generales y específicos del proyecto

### General

Desarrollo e implementación de una arquitectura de software tolerante a fallas para la coordinación de múltiples VANT's aplicados a una simulación de búsqueda y rescate.

### Particulares

- Generación de la dinámica del Vehículo Aéreo No Tripulado.
- Garantizar que los drones eviten colisiones entre sí y con otros objetos en su entorno. La coordinación adecuada asegura que los múltiples-VANTs mantengan una distancia segura y sigan rutas que minimicen el riesgo de colisión.
- Eficiencia y rendimiento del sistema en su conjunto. Esto implica asignar tareas de manera óptima entre los múltiples-VANTs, minimizar los tiempos de espera y los tiempos de respuesta, y maximizar la capacidad de realizar tareas en paralelo.
- Garantizar que cada VANT contribuya de manera efectiva al logro de los objetivos generales, sin redundancia ni superposición de tareas.
- Comunicación efectiva entre los múltiples-VANTs para intercambiar información y sincronizar sus acciones. El objetivo es establecer una comunicación confiable y eficiente que permita la transmisión de datos relevantes y las instrucciones necesarias para la coordinación.
- Adaptabilidad y flexibilidad: Los objetivos de la coordinación pueden cambiar en función de las circunstancias y las necesidades. La coordinación de múltiples-VANTs debe ser adaptable y flexible para ajustarse a cambios en el entorno, nuevos objetivos o la incorporación o salida de drones del sistema.
- Pruebas con diferentes algoritmos de exploración y soluciones a la fecha.

## 5. Metodología

La metodología propuesta para esta tesis 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.

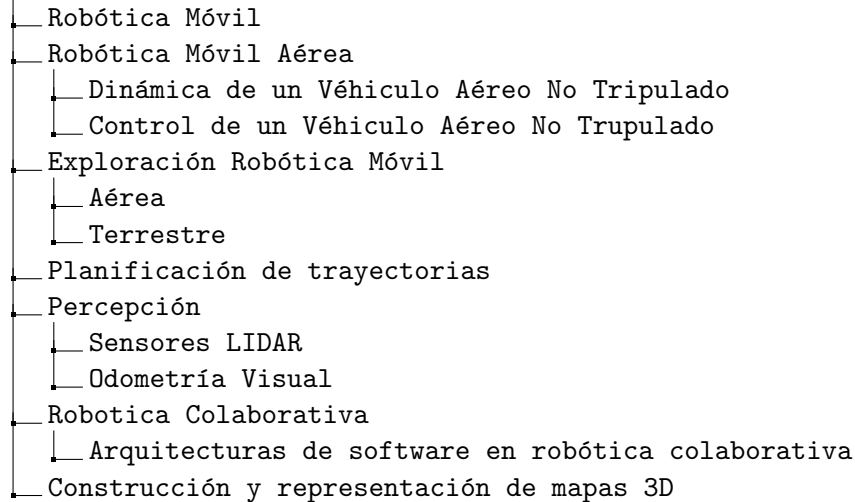
1. Análisis y diseño de la solución propuesta
2. Implementación y validación
3. Evaluación experimental, resultados y conclusiones

## 6. Cronograma de actividades (plan de trabajo)

A desarrollar ...

## 7. Estado del arte

Robótica Móvil Inteligente



## 8. Contribuciones o resultados esperados

1. Códigos a disposición de la comunidad
2. Simulación de solución propuesta
3. Tesis impresa

## 9. Referencias

1. H. Shakhathreh et al., 'Unmanned Aerial Vehicles: A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges', arXiv:1805.00881, 2018
2. P. Daponte et al., 'Metrology for drone and drone for metrology: Measurement systems on small civilian drones', in Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace), 2015 IEEE, 2015, pp. 306-311: IEEE.
3. 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
4. M. Hehn and R. D'Andrea, 'A flying inverted pendulum', 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Shanghai, China, 2011, pp. 763-770, doi: 10.1109/ICRA.2011.5980244.
5. Z. Fu, Y. Mao, D. He, J. Yu and G. Xie, 'Secure Multi-UAV Collaborative Task Allocation,' in IEEE Access, vol. 7, pp. 35579-35587, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2902221.
6. B. Zhou, H. Xu and S. Shen, 'RACER: Rapid Collaborative Exploration With a Decentralized Multi-UAV System,' in IEEE Transactions on Robotics, vol. 39, no. 3, pp. 1816-1835, June 2023, doi: 10.1109/TRO.2023.3236945.
7. 'Hovering over the drone patent landscape, ifi claims patent services, Nov 2014 online
8. L. Gupta, R. Jain, and G. Vaszkun, 'Survey of important issues in UAV communication networks', IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 18, no. 2, pp. 1123-1152, 2016.

9. J. Senthilnath, M. Kandukuri, A. Dokania, and K. Ramesh, 'Application of UAV imaging platform for vegetation analysis based on spectral-spatial methods', *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 140, pp. 8-24, 2017.
10. H. Zhou, H. Kong, L. Wei, D. Creighton, and S. Nahavandi, 'On detecting road regions in a single UAV image,' *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 18, no. 7, pp. 1713-1722, 2017.
11. Borboni, A.; Reddy, K.V.V.; Elamvazuthi, I.; AL-Quraishi, M.S.; Natarajan, E.; Azhar Ali, S.S. The Expanding Role of Artificial Intelligence in Collaborative Robots for Industrial Applications: A Systematic Review of Recent Works. *Machines* 2023, 11, 111. <https://doi.org/10.3390/machines11010111>

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

\_\_\_\_\_