**Licenciatura:** Ingeniería Mecánica.

**Nombre del Proyecto de Integración (PI):**
Modelado dinámico de un vehículo aéreo autónomo de cuatro rotores para aplicaciones en la agricultura.

**Modalidad:** Proyecto de Investigación

**Versión:** Primera

**Trimestre Lectivo:** 22O

**Datos del alumno:**
Sánchez Romero Marco Antonio 2163034144
Teléfono: 5561061853
Correo electrónico: al2163034144@azc.uam.mx
Firma.

**Datos del asesor:**
**Nivel académico y Nombre completo:**
Dr. Francisco Beltrán Carbajal
**Departamento de adscripción:**
Departamento de Energía.
Teléfono: 5553189069
**Correo electrónico:** fbeltran@azc.uam.mx
Firma.

**Datos del co-asesor:**
**Nivel académico y Nombre completo:**
Dr. Hugo Yáñez Badillo
**Departamento de adscripción:**
Departamento de Investigación.
Teléfono: 7755936944
**Correo electrónico:** yaba.hugo@gmail.com
Firma.

Fecha: 06/12/2022

En caso de que el Comité de Estudios de la Licenciatura en Ingeniería Mecánica apruebe la realización de la presente propuesta, otorgamos nuestra autorización para su publicación en la página de la División de Ciencias Básicas e Ingeniería.

---

Sánchez Romero Marco Antonio

---

Dr. Francisco Beltrán Carbajal
Profesor Titular C

---

Dr. Hugo Yáñez Badillo

# 1. INTRODUCCIÓN

La demanda de vehículos aéreos ha aumentado considerablemente ya que sus aplicaciones abarcan diferentes campos de investigación, tales como son la vigilancia, seguimiento de rutas, mapeo, el monitoreo e inspección, la filmación, la adquisición de imágenes, la aplicación de aerosoles agrícolas, etc [1]. Para llevar a cabo estas tareas, dependen de movimientos precisos tanto en interiores como en exteriores a determinada velocidad y altura. El constante desarrollo tecnológico y la adaptación de estos vehículos ha dado soluciones y facilitado el cumplimiento de estas actividades. Aunado a esto, los vehículos aéreos también requieren de eficientes algoritmos de control que les permitan llevar a cabo lo establecido para planificar su movimiento. Las trayectorias de referencia, rutas geométricas y algoritmos de planificación de rutas se han utilizado principalmente en los vehículos aéreos para la navegación entre dos o más puntos y para la evaluación del desempeño de algoritmos de control automático. Las aplicaciones que esto tiene va en aumento, debido a su precisión en los algoritmos de control y seguimiento de rutas, muchos sectores se han visto atraidos con estas nuevas tecnologías, uno de ellos es el sector agrícola, con la denominada ***agricultura de precisión*** [2].

Durante los últimos años la tecnología en el sector agrícola se ha desarrollado rápidamente, se ha notado con mayor frecuencia la aplicación de estos vehículos autónomos en la denominada agricultura de precisión para su mayor eficiencia y eficacia. La agricultura de precisión permite controlar los procesos antes, durante y después de la cosecha, también permite monitorear el campo de cultivo, inspecciona y genera un mapa sobre el terreno sobre el cual se pretende trabajar, asimismo la agricultura de precisión es una herramienta que le aporta confiabilidad al cultivo ya que se prevén las condiciones climáticas, las condiciones de suelo, la condición del cultivo, es decir, si está en condiciones óptimas, o no, y en su defecto, si necesita algún tratamiento de fumigación. Los vehículos aéreos pueden ayudar en tareas de siembra, de transporte de materiales, o en las actividades antes mencionadas [3].

En el presente trabajo se propone un modelo dinámico para un vehículo aéreo autónomo para tareas de monitoreo e inspección en el sector agrícola. Se realiza un análisis de los esquemas de planificación de rutas utilizados en vehículos aéreos y en otro tipo de sistemas autónomos que también forman parte de la familia de los robots móviles, como los vehículos terrestres no tripulados (Unmanned Ground Vehicles, UGV's) y los vehículos submarinos no tripulados (Unmanned Underwater Vehicles, UUV's), para determinar si es factible su implementación en el vehículo autónomo [4]. El desarrollo de las rutas geométricas para estas tareas de monitoreo e inspección se realizará en el lenguaje de programación de Python, donde se evaluará el desempeño dinámico del vehículo al ejecutar las rutas planificadas utilizadas en este sector, asimismo se propondrá un modelo de quadrotor económico para su alcance en agricultores con menor oportunidad de adquisición de un equipo costoso.

# 2. ANTECEDENTES

Las personas que iniciaron con un proyecto de vuelo habían estado volando globos y otros objetos dirigibles desde 1783, pero un vuelo en donde se veía implicado algo más pesado que el aire "fue visto como la búsqueda de charlatanes", mencionó J. Tobin, autor de La conquista de los cielos. Algunas personas pensaban que "la idea del vuelo humano era el estándar imposible". A pesar de eso, el sueño era demasiado contundente como para ser ignorado. Puesto que, en 1804 el inglés George Cayley encontró tres áreas de estudio para investigaciones futuras, las cuales son: La necesidad de poder despegar de la tierra, la propulsión para que haya movimiento una vez estando en el aire, y el control para permanecer en el aire. Probablemente no hay registro de la invención de los primeros vuelos en toda la historia, sin embargo, la máquina voladora elaborada por los hermanos Wright, de Dayton, Ohio, significó un gran paso para el mundo debido a que fue un proyecto exitoso [5].

Hay registros que a principios del año 1900 algunos prototipos de helicópteros de cuatro rotores fueron desarrollados a la par de otras configuraciones de helicópteros, con la finalidad de lograr el vuelo vertical con ayuda de una máquina. Los esfuerzos por parte de la humanidad para diseñar y elaborar un dispositivo que fuera capaz de volar verticalmente han quedado registrados en distintos archivos a lo largo de la historia. Un ejemplo data del siglo XV con Leonardo da Vinci y su air-screw, Pero no fue hasta comienzos del siglo XX que surgieron en todo el mundo los primeros prototipos funcionales basados en alas rotatorias, se convertirían así, en lo que hoy son primeros helicópteros.

Al comienzo del siglo XX los hermanos Louis y Jacques Breguet en conjunto con el profesor Richet, elaboraron una máquina que consistía en un chasis central de tubos de hecho de acero el cual tenía la fuerza para soportar al piloto y al motor. Esta máquina fue conocida como el giroplano BreguetRichet. Aquella máquina fue la primera en poder elevarse por sí sola verticalmente con un sistema de elevación de ala rotatoria. Posteriormente en 1907, una máquina fabricada por el francés Paul Cornu realizó el que se considera que probablemente fue el primer vuelo libre de cualquier anclaje registrado hasta ese momento, tuvo una duración de vuelo de más de 20 segundos. El deficiente presupuesto y la falta de control al momento del vuelo del helicóptero (debido a que el vehículo no pudo elevarse lo suficiente para poder elaborar con éxito lo que ahora se conoce como ground-effect), fue motivo para que Cornu desistiera el desarrollo futuro de su prototipo. En 1909 Ivanovich Sikorsky considerado como uno de los principales pioneros en el diseño y construcción de los primeros prototipos de ala rotatoria elaboró su primera máquina, que consistía en un helicóptero del tipo coaxial con dos hélices de dos palas. Sikorsky tomó la decisión de posponer más investigaciones en torno a los sistemas de ala giratoria, esto debido a que se enfocó en la construcción de prototipos de ala fija. En 1919, el francés Etienne Oemichen construyó algunos prototipos con mecanismos de ala rotatoria. El segundo proyecto de Oemichen era capaz de mantener el vuelo por varios minutos. Tuvieron que pasar varios años para que se construyera otro prototipo de helicóptero con cuatro rotores. Unos años después, en 1945, ya se habían construidos más de 70 helicópteros, de ellos, solo se tienen registrados tres pertenecientes a la categoría de cuatro rotores, estos son: Los prototipos de Breguet-Richet, Oemichen y de Bothezat [6].

El constante desarrollo y la modernización de distintas aplicaciones demandan a estos vehículos la realización con precisión de tareas de regulación de posición, seguimiento de trayectorias y navegación autónoma, lo que a su vez ha traído como consecuencia un constante desarrollo tecnológico de estos sistemas dinámicos complejos. En México diversos grupos de investigación han publicado importantes contribuciones para la mejora del control de movimiento del vehículo quadrotor. En [7] propone una estrategia de control no lineal para resolver el problema de seguimiento de trayectoria en un quadrotor con una carga suspendida. Por otro lado, en [8] se presenta un estudio sobre de seguimiento de trayectorias para el prototipo comercial llamado AR.Drone 2.0. Con la estrategia de control diseñada se logra que el vehículo converja asintóticamente a una trayectoria de vuelo preestablecida. En [6] se utiliza un algoritmo proporcional derivativo (PD) con ganancias adaptativas para el control de movimiento de un vehículo quadrotor. Los resultados obtenidos se comparan con una estrategia de control robusto basado en la teoría de modos deslizantes de segundo orden. Se implementan algunas trayectorias circulares para evaluar la eficiencia de ambos esquemas de control, donde se observa una reducción en las acciones de control de alta frecuencia obtenidas en la propuesta basada en modos deslizantes.

El autor en [9] propone el control de un quadrotor utilizado en tareas de pintura, donde se requiere el seguimiento de algunas trayectorias circulares, elípticas y armónicas. Por su parte, en [10] el autor desarrolla esquemas de control para helicópteros a escala. La propuesta permite el control de un quadrotor en presencia de incertidumbres paramétricas y perturbaciones externas. Se utiliza la teoría de Super Twisting para el diseño de los esquemas de control. La evaluación del desempeño del controlador propuesto se realiza mediante experimentos de regulación de la posición del vehículo en presencia de perturbaciones externas. En [11] se presenta el control de movimiento de un quadrotor por medio de visión estereoscópica y un controlador mediante funciones anidadas. Por otro lado, el autor en [4] propone el control de vuelo en configuración líder-seguidor para vehículos aéreos del tipo quadrotor, donde el objetivo es lograr la interacción entre un agente guía que planifica el movimiento de un vehículo seguidor para lograr formaciones geométricas determinadas.

Para complementar la información que aquí se presenta, sobre los diversos trabajos desarrollados en los diversos centros educativos de investigación en nuestro país, se le hace una invitación al lector a revisar las referencias que se introducen en este manuscrito y los trabajos mencionados en ellas.

# 3. JUSTIFICACIÓN

Dentro de las diversas aplicaciones donde se utilizan los vehículos aéreos de cuatro rotores destacan la vigilancia, la búsqueda y rescate, mapeo, el monitoreo e inspección, la filmación, la adquisición de imágenes, etc, estas aplicaciones que en principio se hicieron para fines militares, se han visto atractivas para otras áreas, en el caso en el que se centrará este proyecto es en el sector agrícola, que se ha visto resagado por el surgimiento de nuevas tecnologías y que, con la finalidad de aprovechar el desarrollo y la investigación de estas a este sector, se pretende elaborar un modelo dinámico para que un quadrotor realice tareas de inspección, monitoreo reconocimiento del terreno, mapeo, etc, en campos agrícolas. Los beneficios que tendría la implementacion de quadrotors en la agricultura son muchos, puesto que implementándolos se optimizarían tiempos de traslado, ya que para hacer recorridos a pie si se pretende inspeccionar el terreno o conocer los límites del mismo, se tomaría un tiempo considerable, lo que le lleva minutos al quadrotor, también se pueden utilizar las imágenes recabadas para ver qué parte del terreno necesita más agua, fumigación, controlar la temperatura, proteger por la lluvia o por vientos fuertes, etc.

La adquisición de estos equipos suele ser muy caro, y pocos agricultores tienen acceso a ellos, es por eso que se requiere de equipos menos costosos para su implementación a nivel global. Se pretende presentar un modelo de quadrotor económico para que más agricultores tengan acceso al equipo y así puedan optimizar tiempo y trabajo, esto con la finalidad de que sea eficiente y eficaz.

El desarrollo del modelo dinámico de este proyecto de integración permitirán la evaluación posterior de diferentes algoritmos de control automático diseñados para el control de movimiento de vehículos aéreos de cuatro rotores y la navegación eficiente del vehículo en diversos escenarios. Los esquemas de planificación de movimiento se basan en el uso de ecuaciones paramétricas y polinomios de interpolación.

# 4. OBJETIVOS

## 4.1. Objetivo General

Obtener un modelo matemático de la dinámica de un vehículo aéreo autónomo de cuatro rotores, para evaluar a través de simulación computacional tareas de seguimiento de perfiles de movimiento planificados para diversas aplicaciones en la agricultura.

## 4.2. Objetivos Particulares

Obtener las ecuaciones diferenciales que describen el movimiento del vehículo aéreo mediante la formulación de Newton-Euler.

Desarrollar los programas computacionales para propósitos de simulación del vuelo del helicóptero con cuatro rotores usando el lenguaje de programación Python.

Establecer la planificación de trayectorias de movimiento para el vehículo aéreo para al menos una aplicación en la agricultura.

Seleccionar e implementar una estrategia de regulación del vuelo del vehículo aéreo reportada en la literatura.

# 5. METODOLOGÍA

**Fase 1. Desarrollo de un modelo matemático que describe el movimiento de un vehículo aéreo mediante la formulación de Newton-Euler.**
En esta etapa se consultará en la literatura los diferentes modelos matemáticos que rigen el movimiento de diversos vehículos aéreos no tripulados en distintas aplicaciones para su respectivo análisis y posteriormente obtener de manera concisa y clara las ecuaciones diferenciales mediante la formulación de Newton-Euler.

**Fase 2. Investigación sobre la planificación del movimiento para un vehículo aéreo no tripulado utilizados en agricultura.**
Con base en la bibliografía, en esta etapa se identificarán y documentarán los diversos esquemas de planificación de movimiento utilizados en el sector agrícola para los diferentes sistemas móviles autónomos.

**Fase 3. Desarrollo de un modelo de simulación.**
En esta etapa se construirá un modelo de simulación mediante el lenguaje de programación de Python. En el modelo de simulación se programarán las ecuaciones que describen el comportamiento dinámico de un quadrotor, las cuales se resolverán mediante métodos numéricos; leyes de control, para que el vehículo se mueva adecuadamente; y los esquemas de planificación de movimiento, que determinarán de qué manera el vehículo ejecuta los movimientos.

**Fase 4. Implementación de una estrategia de regulación de vuelo.**
Para el desarrollo de esta etapa se empleará y evaluará el desempeño de un tipo de control que regulará el movimiento del vehículo aéreo autónomo, esto, con la finalidad ejecutar de manera eficiente y precisa tareas de seguimiento de trayectorias y rutas geométricas que se le asignen.

**Fase 5. Análisis de resultados.**
Se compararán los resultados obtenidos mediante el modelo de simulación. Se realizarán propuestas de mejoras para los esquemas de planificación implementados.

**Fase 6. Cierre de proyecto.**
En esta etapa del proyecto se reportarán los principales resultados obtenidos. Además, se tendrá disponible el modelo de simulación para futuras investigaciones. Finalmente, se enlistarán las principales contribuciones del trabajo de investigación, así como las conclusiones generales.

# 6. NORMATIVIDAD

**NOM-107-SCT3-2019.**
Establece los requerimientos para operar un sistema de aeronave pilotada a distancia (rpas) en el espacio aéreo mexicano [12].

**NOM-003-SCT3-2010.**
Que establece el uso dentro del espacio aéreo mexicano, del transpondedor para aeronaves, así como los criterios para su instalación, especificaciones y procedimientos de operación [13].

**NOM-022-SCT3-2011.**
Que establece el uso de registradores de vuelo instalados en aeronaves que operen en el espacio aéreo mexicano, así como sus características [14].

# 7. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

UEA para la que se solicita autorización:
Proyecto de Integración en Ingeniería Mecánica I.

| **Actividades** | **Semana** | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 1.1 Buscar y analizar los diferentes modelos matemáticos que rigen el comportamiento de los vehículos aéreos de cuatro rotores. | | | | | | | | | | | |
| 1.2 Determinar las ecuaciones diferenciales mediante la formulación Newton-Euler. | | | | | | | | | | | |
| 2.1 Analizar diferentes esquemas de planificación de movimiento utilizados en sistemas móviles autónomos para aplicaciones en agricultura. | | | | | | | | | | | |
| 2.2 Proponer al menos un esquema de planificación de movimiento para un vehículo aéreo de cuatro rotores en la agricultura. | | | | | | | | | | | |
| 3.1 Programar un método numérico en Python para la solución de las ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento dinámico del sistema. | | | | | | | | | | | |
| 3.2 Integrar un modelo de simulación mediante el lenguaje de programación de Python para la evaluación de los esquemas de planificación del movimiento. | | | | | | | | | | | |
| 4.1 Programar un esquema de control Proporcional, Integral y Derivativo (PID) para la regulación de vuelo del vehículo aéreo de acuerdo con el esquema de planificación propuesto. | | | | | | | | | | | |
| 4.2 Evaluar el desempeño del quadrotor en tareas de regulación y seguimiento de trayectorias, determinadas por el esquema de planificación del movimiento, utilizando el controlador Proporcional, Integral y Derivativo (PID). | | | | | | | | | | | |
| 5.1 Realizar ajustes para mejorar el esquema de planificación propuesto con base en un análisis de los resultados obtenidos. | | | | | | | | | | | |
| 6.1 Redactar y entregar el reporte final | | | | | | | | | | | |

# 8. ENTREGABLES

**Reporte final del proyecto de integración**
Al finalizar este proyecto se entregará un reporte escrito donde se documentarán los resultados obtenidos durante la investigación y sus principales contribuciones.

**Modelo de simulación**
Se tendrá disponible el modelo de simulación para futuras investigaciones.

# 9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS


[1] Barrientos, A y del Cerro, J y Gutiérrez, P y San Martín, R y Martínez, A y Rossi, C., 2010, "Vehículos aéreos no tripulados para uso civil. Tecnología y aplicaciones", Grupo de Robótica y Cibernética, Universidad Politécnica de Madrid, Departamento de Robótica.
[2] Santillán, O y Rentería, RME., 2018, "Agricultura de Precisión", INCyTU, Vol. 15, no. 1, 1-6 págs.
[3] Ojeda, BW y Flores VJ y Ontiveros CRE., 2016,*Uso y manejo de drones con aplicaciones al sector hídrico*, 1ra ed., Jiutepec, Morelos, México, cap 6.
[4] Méndez, MM., 2014, "Control de vuelo en Configuración Líder-seguidor para Aeronaves tipo Cudrirotor", Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Departamento de ingeniería Eléctrica.
[5] García SF., Ed., 2016, "Ingeniería y Tecnologías", Difu100ci@, Vol. 10, no. 1, pp 8.
[6] Yáñez, BH., 2020, "Control Robusto para el Movimiento de un Vehículo Aéreo de Cuatro Rotores", Universidad Politécnica De Tulancingo, Departamento De Posgrado.
[7] Mosco, LAP, y Rodrigo, CH, y Castro LR., 2019, "Seguimiento de Trayectorias de un Cuatrirotor con carga Suspendida", Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Departamento de ingeniería Eléctrica.
[8] Santiaguillo, SJ, y Aranda, BE., 2014, "Seguimiento de Trayectorias para un Helicóptero de 4 rotores AR.Drone 2.0 Utilizando ROS", Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Departamento de ingeniería Eléctrica.
[9] Rosas, GJA., 2018, "Modelo y Simulación de un Cuadricóptero (en cruz) con Aplicaciones en la Industria de las Pinturas", Universidad Autónoma de México, Posgrado en Ciencias Físicas.
[10] Salas, POS, 2013, "Diseño de Controladores no Lineales para un Helicóptero a Escala", Universidad Autónoma de Nuevo León", Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.
[11] Beltrán, ZZ., 2013, "Control de un Cuadrirotor (X4) por medio de Visión Estereoscópica", Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Departamento de Control Automático.
[12] Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2019, "NOM-107-SCT3-2019", https://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGAC-archivo/modulo2/nom-107-sct3-2019- 201119.pdf.
[13] Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2010, "NOM-003-SCT3-2010", http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4661/SCT/SCT.htm.
[14] Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2011, "NOM-022-SCT3-2011", http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4642/sct/sct.htm.

# 10. TERMINOLOGÍA

No es necesaria.

# 11. INFRAESTRUCTURA

No aplica.

# 12. ASESORÍA COMPLEMENTARIA

No aplica.

# 13. PUBLICACIÓN O DIFUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Se realizará la publicación de un artículo de difusión con los principales resultados del proyecto.