Licenciatura: Ingeniería Mecánica.

Nombre del Proyecto de Integración (PI).

Planificación del movimiento de un vehículo aéreo de cuatro rotores.

Modalidad: Proyecto de Investigación

Versión: Segunda

Trimestre Lectivo:21P

Datos del Alumno:

Sánchez Romero Marco Antonio 2163034144
Correo electrónico: al2133036130@azc.uam.mx
Firma.

Datos del asesor

Nivel académico y Nombre completo.
Dr. Francisco Beltrán Carbajal
Departamento de adscripción.
Departamento de energía.
Teléfono.
Correo electrónico.
fbeltran.git@gmail.com
Firma.

Datos del co-asesor

Nivel académico y Nombre completo.
Dr. Hugo Yáñez Badillo
Departamento de adscripción.
Teléfono.
Correo electrónico.
yaba.hugo@gmail.com
Firma.

Fecha: 04/10/2021

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.

Nombre y firma del alumno, asesor(es), y en su caso del co-asesor o del jefe directo.

Sánchez Romero Marco Antonio

Dr. Francisco Beltrán Carbajal

Profesor Titular C

Dr. Hugo Yáñez Badillo

1. Introducción.

En los últimos años, el desarrollo de los vehículos aéreos no tripulados (Unmanned Aerial Vehicles, UAV's) se ha intensificado, manifestando un importante crecimiento tanto en el ámbito militar como civil. Una de las principales plataformas en la que se han enfocado diversas investigaciones es el helicóptero con cuatro rotores comúnmente llamado **quadrotor**. El quadrotor es un sistema subactuado que cuenta con seis grados de libertad y cuatro entradas de control (actuadores independientes) que tiene la capacidad de aterrizar y despegar verticalmente (VTOL, por sus siglas en inglés), característica que permite su operación en interiores de manera segura, tarea complicada para otro tipo de UAV's como los de ala fija. Este tipo de sistemas normalmente están sometidos a incertidumbres endógenas y exógenas durante su operación, tanto en interiores como exteriores. Se enfrentan a un medio altamente cambiante, como consecuencia de velocidades de viento variables e impredecibles, así como cambios en la humedad del entorno, mientras realizan tareas predefinidas. Es por esta razón que se requieren de esquemas robustos de control de movimiento para realizar tareas de regulación de posición, seguimiento de trayectorias, maniobras ágiles que requieren de movimientos rápidos, vuelo estable, aterrizaje y despegue vertical [1]. Estas tareas se definen de manera particular dentro de esquemas de planificación de movimiento (que establecen cómo se moverá) para una amplia variedad de aplicaciones donde se utilizan estos vehículos. El desempeño del vehículo mientras realiza las tareas asignadas depende de los esquemas de planificación y los algoritmos de control implementados en el sistema (que le permitirán moverse acorde con la planificación) [2].

En el presente estudio se proponen diversos esquemas de planificación de movimiento para un vehículo aéreo de cuatro rotores. Se realiza un análisis de los esquemas de planificación de movimiento 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 quadrotor [3]. El desarrollo de los diferentes esquemas se realizará en el lenguaje de programación de Python, donde se evaluará el desempeño dinámico del vehículo al ejecutar los movimientos planificados.

2. Antecedentes.

El sueño de volar. Los iniciadores habían estado volando globos y dirigibles desde 1783, pero un vuelo con algo más pesado que el aire "fue visto como la búsqueda de charlatanes", dijo Jim Tobin, autor de conquistar el aire: Los hermanos Wright y la Gran Carrera de Volar. "La idea del vuelo humano era el estándar imposible". Sin embargo, el sueño era demasiado convincente como para ignorarlo. Ya que, en 1804, el inglés George Cayley identificó tres áreas de estudio para futuras investigación: la necesidad de conseguir despegar de la tierra, la propulsión para moverse una vez en el aire, y el control para permanecer en el aire. Los primeros vuelos en toda la historia de la invención probablemente no hay sin igual en la manera ostentosa en la que los hermanos Wright,

de Dayton, Ohio, que dieron paso al mundo su invención en la primera época exitosa de la máquina voladora [4].

Existen reportes de principios del año 1900 sobre algunos prototipos de helicópteros de cuatro rotores desarrollados a la par de otras configuraciones de helicópteros, con el fin de lograr el vuelo vertical mediante una máquina. Los esfuerzos por parte de la humanidad para construir un dispositivo capaz de volar verticalmente han sido registrados en diversos archivos históricos, desde el siglo XV con Leonardo da Vinci y su air-screw, Pero fue hasta principios del siglo XX que surgieron alrededor del mundo los primeros prototipos funcionales basados en alas rotatorias, los primeros helicópteros.

A principios de 1907 los hermanos Louis y Jacques Breguet en asociación con el profesor Richet, construyeron una máquina que consistía en un chasis central de tubos de acero que soportaba al piloto y al motor. Esta máquina conocida como el giro-plano BreguetRichet, fue la primera en elevarse por sí sola verticalmente con un sistema de elevación de ala rotatoria. Más tarde ese mismo año, una máquina fabricada por el francés Paul Cornu realizó el que probablemente fue el primer vuelo libre de cualquier anclaje, con una duración de 24 s. La falta de presupuesto y la inadecuada controlabilidad del helicóptero (debido a que el vehículo no pudo elevarse lo suficiente para superar lo que ahora se conoce como ground-effect), influyeron para que Cornu abandonara el desarrollo posterior de su prototipo. En 1909 Ivanovich Sikorsky otro de los principales pioneros en el diseño y construcción de los primeros prototipos de ala rotatoria construyó su primera máquina, un helicóptero del tipo coaxial con dos hélices de dos palas. Sikorsky decidió posponer más investigaciones referentes a los sistemas de ala giratoria, debido a que se enfocó en la construcción de prototipos de ala fija. Una década más tarde, el francés Etienne Oemichen realizó algunos experimentos con mecanismos de ala rotatoria. El segundo prototipo de Oemichen tenía la capacidad de sostener el vuelo por varios minutos. Pasaron algunos años antes de que se construyera otro helicóptero con cuatro rotores. Para el año 1945 se habían construidos al menos 72 helicópteros, de los cuales solamente tres eran de cuatro rotores: las máquinas de Breguet-Richet, Oemichen y de Bothezat [5].

Modernas aplicaciones demandan a estos vehículos la realización con precisión de tareas de regulación de posición, seguimiento de trayectorias y navegación autónoma, lo que ha propiciado 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 [8] 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 [9] 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 [5] 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 [2] 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 [6] 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 [7] 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 [Méndez Martínez] 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, la aplicación de aerosoles agrícolas, entre otras, que dependen de movimientos precisos tanto en interiores como en exteriores a determinada velocidad y altura. De manera paralela, los vehículos aéreos también requieren de eficientes algoritmos de control que les permitan llevar a cabo lo establecido en la planificación. Por lo antes expuesto, se requiere de la propuesta de nuevos y más eficientes esquemas de planificación para el movimiento adecuado del quadrotor en el espacio tridimensional.

Diversas trayectorias de referencia, rutas geométricas y algoritmos de planificación de rutas se han utilizado principalmente en los vehículos aéreos de cuatro rotores con dos objetivos: el primero de ellos es para la navegación entre dos o más puntos y el segundo referente a la evaluación del desempeño de algoritmos de control automático. Los esquemas propuestos durante el desarrollo 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.

Objetivo general:

Planificar el movimiento de un vehículo aéreo de cuatro rotores.

Objetivos particulares:

Describir al menos tres perfiles de movimiento utilizados en sistemas móviles autónomos.

Construir un modelo de simulación mediante las ecuaciones dinámicas del sistema y el lenguaje de programación Python, para la evaluación de los esquemas de planificación de movimiento.

Evaluar el desempeño del vehículo aéreo utilizando los esquemas de planificación del movimiento propuestos y una técnica de control automático del tipo proporcional, integral y derivativa (PID).

5. Metodología.

Fase 1. Investigación sobre la planificación del movimiento para un vehículo aéreo no tripulado.

Con base en la bibliografía, en esta etapa se identificarán y documentarán los diversos esquemas de planificación de movimiento utilizados en diversos sistemas móviles autónomos.

Fase 2. 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 3. Evaluación de los esquemas de planificación del movimiento.

En esta etapa utilizará un controlador Proporcional, Integral y Derivativo (PID) para llevar a cabo tareas de regulación y seguimiento de trayectorias acorde con los esquemas de planificación de movimiento propuestos para el vehículo aéreo de cuatro rotores.

Fase 4. 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 5. 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 [10].

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 [11].

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 [12].

7. Cronograma de actividades.

UEA para la que se solicita autorización:

Proyecto de Integración en Ingeniería Mecánica I.

Actividad	Semana										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1.1 Analizar diferentes esquemas de planificación de movimiento utilizados en sistemas móviles autónomos.											
1.2 Proponer al menos tres esquemas de planificación de movimiento para un vehículo aéreo de cuatro rotores.											
2.1 Programar un método numérico en Python para la solución de las ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento dinámico del sistema.											
2.2 Programar en Python los esquemas de planificación del movimiento.											
2.3 Programar un esquema de control Proporcional, Integral y Derivativo (PID) para que el vehículo aéreo pueda moverse de acuerdo con los esquemas de planificación propuestos.											
2.4 Integrar un modelo de simulación mediante el lenguaje de programación de Python para la evaluación de los esquemas de planificación del movimiento.											

3.1 Evaluar el desempeño del quadrotor en tareas de regulación y seguimiento de trayectorias, determinadas por los esquemas de planificación del movimiento, utilizando el controlador Proporcional, Integral y Derivativo (PID).											
3.2 Realizar ajustes para mejorar los esquemas de planificación propuestos en base a un análisis de los resultados obtenidos.											
3.3 Organizar y reportar en un manuscrito formal toda la información obtenida durante cada una de las actividades, como resultados, principales aportes y las conclusiones derivadas de este proyecto.											
3.4 Entrega del reporte final del proyecto.											

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.

Nota: El tiempo que se llevará el proyecto de investigación es de un trimestre, dadas las condiciones sanitarias presentes por la pandemia debido al COVID-19, toda la investigación será vía remota.

9. Referencias bibliográficas.

[1] Chimal, E. J. C., y Concha, G. P. D., 2016, *Advances in Computer Science and Artificial Intelligence,* Series*,* México.

[2] Gutiérrez, J. A. R., 2014, “Modelo y Simulación de un Cuadricóptero (en cruz) con Aplicaciones en la Industria de las Pinturas”, Universidad Autónoma de México, Posgrado en Ciencias Físicas.

[3] Martínez, M. M., 2018, “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.

[4] Antonio, J. R. M. R., y Manuel, R. H., Francisco, B. R., 2016, “Ingeniería y Tecnologías”, Difu100ci@, Vol. 10, no. 1, pp 8.

[5] Yáñez, B. H., 2020, “Control Robusto para el Movimiento de un Vehículo Aéreo de Cuatro Rotores”, Universidad Politécnica De Tulancingo, Departamento De Posgrado.

[6] Peña, S. S. O., 2013, “Diseño de Controladores no Lineales para un Helicóptero a Escala”, Universidad Autónoma de Nuevo León”, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

[7] Beltrán, S. Z., 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.

[8] Mosco, A. P., y Luciano, H. R. C., 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.

[9] Santiaguillo, S. J., y Bricaire, A. E., 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.

[10] 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.

[11] Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2010, “NOM-003-SCT3-2010”, http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4661/SCT/SCT.htm**.**

[12] 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.

No aplica.

Limpiar formulario

Clave de la Propuesta	PPI- 040 - 21 - PT		
Puntos a considerar	**Si**	**No**	**Observaciones/Comentarios**
¿Se incluyen los datos de la **Portada** (licenciatura, título, modalidad, versión, declaratoria, firmas, etc.)?	✔		
¿La extensión del T**ítulo** es adecuada y sin abreviaturas?	✔		
¿El **Título** refleja de forma clara lo que se trabajará en el proyecto?		✔	Ver comentarios
¿La **Introducción** describe en forma concisa el área de aplicación del proyecto?		✔	Se centra en vehículos aéreos y no tanto en la
¿Los **Antecedentes** sitúan el proyecto propuesto respecto a otros trabajos?		✔	No se realizó una investigación de trabajos
¿La **Justificación** describe la razón, relevancia o necesidad que origina el proyecto?	✔		
¿El **Objetivo General** es claro y tiene relación directa con el proyecto a realizar?	✔		Sí, corregir redacción
¿Los **Objetivos Particulares** se engloban en el objetivo general?	✔		
¿La secuencia de actividades que se presenta en la **Metodología** es congruente con los objetivos y permite que se alcancen éstos?	✔		
¿La **Descripción Técnica** presenta las especificaciones generales y particulares (materiales, dimensiones, normas, etc.), así como la explicación funcional de cada uno de los bloques del sistema a desarrollar?			No aplica
¿La **Normatividad** mencionada da un marco a la propuesta?	✔		
¿El **Cronograma de Actividades** señala con claridad las tareas a realizar para alcanzar los objetivos del proyecto?	✔		
¿El proyecto es realizable en el tiempo propuesto?	✔		
¿Se encuentran indicados los **Entregables** dentro de la propuesta? ¿Se incluye explícitamente la entrega del **Reporte Final**?	✔		
¿Se incluyeron las **Referencias Bibliográficas** y estas cumplen con el formato solicitado?	✔		
¿La **Terminología** especifica del proyecto, que no es del conocimiento general en Ingeniería Mecánica, está claramente explicada?			No aplica
¿Se indican instalaciones, equipos y materiales que se requieren para realizar el proyecto?	✔		
¿La propuesta tiene una redacción clara y sin faltas ortográficas?		✔	Hay algunos detalles a corergir
¿El enfoque del trabajo corresponde a un proyecto de Ingeniería Mecánica?	✔		

Observaciones

Atender las observaciones en el documento y enviar la versión segunda.