

GENERACIÓN DE TRAYECTORIAS DEL UAV CUADROTOR PHANTOM 3 POR MEDIO DE SIMULACIÓN EN MATLAB

GENERATION OF TRAJECTORIES OF THE PHANTOM 3 QUADROTOR UAV BY MEANS OF SIMULATION IN MATLAB

Marlon Alexander Ramirez Torres ^{1*}

¹ Investigador independiente, Ingeniería en electrónica y automatización. Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1298-7928>. Correo: lexramirez97@hotmail.com

Kenny Ernesto Bonilla Poma²

² Investigador independiente, Ingeniería en electrónica y automatización. Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0051-3215>. Correo: kennybonilla27@gmail.com

Diego Ramiro Ñacato Estrella³

³ Ingeniero en Electrónica control y redes industriales, Magister en sistemas de Control y Automatización Industrial. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7233-9076>. Correo: diego.nacato@esepoch.edu.ec

* Autor para correspondencia: diego.nacato@esepoch.edu.ec

Resumen

El presente documento detalla los pasos para diseñar un algoritmo de control el cual va a permitir que la navegación pre programada rastree la trayectoria de un vehículo aéreo no tripulado (UAV). La estrategia de control propuesta se válida para vuelo autónomo a partir de trayectorias pre programadas utilizadas experimentalmente a partir de un modelo cinemático.

Palabras clave: Algoritmo, navegación pre-programada, generación de trayectorias, UAV.

Abstract

This document details the steps to design a control algorithm which will allow preprogrammed navigation to track the trajectory of an unmanned aerial vehicle (UAV). The proposed control strategy is validated for autonomous flight from preprogrammed trajectories used experimentally from a kinematic model.

Keywords: Algorithm, pre-programmed navigation, trajectory generation, UAV.

Fecha de recibido: 02/12/2022

Fecha de aceptado: 01/02/2023

Fecha de publicado: 02/02/2023

Introducción

Los drones están inmersos en el campo de la robótica, definida como una rama de la ciencia o la tecnología que estudia el diseño e ingeniería de máquinas para facilitar las tareas humanas mediante el uso de la ciencia y la tecnología (Hassanalian, 2017).

Un sistema en robótica se puede describir como "un sistema capaz de recibir información, comprender el entorno en el que opera, usar modelos, crear y ejecutar planes y controlar o monitorear sus acciones". (Appelbaum, 2017)

Los vehículos aéreos no tripulados (UAV) son vehículos aéreos no tripulados que pueden ser controlados de forma remota por un operador desde una estación base, o pueden volar de forma autónoma siguiendo una trayectoria pre programada. (Nex, 2014) Estos vehículos han recibido especial atención por parte de los investigadores en los últimos años debido a su facilidad de manejo y capacidad para realizar maniobras agresivas en comparación con otros vehículos (Monzón Catalán, 2013). La ventaja de los drones es que pueden realizar vuelo fijo, despegue y aterrizaje vertical en un área reducida. (Stócker, 2017). Su desventaja es que su baja producción de energía limita el tiempo de vuelo de doce a veintitrés minutos (Hernández-Morales, 2017), (Omar Mar Cornelio, 2020).

Los drones o robots aéreos que permiten el desarrollo autónomo o semiautónomo para varios tipos de misiones que van desde defensa hasta seguro para la agricultura o el medio ambiente (Mar Cornelio, Gulín González, & Santana Ching, 2021). Su desarrollo concierne tanto a nivel los centros de búsqueda, así como las áreas de usuarios potenciales, han aumentado significativamente en los últimos años.

Debido a la Segunda Guerra mundial se inició el desarrollo de entrenamiento en operativos de cañones antiaéreos que fueron sus aplicaciones desde un comienzo (Santana Cruz, 2017). En la actualidad existe un espectro amplio de posibles aeronaves con capacidad de realizar misiones con cierto grado de autonomía. La novedad de su llegada a las aplicaciones civiles dificulta la existencia de un consenso en su definición, que cuestiona, en determinadas ocasiones, si un determinado sistema responde o no al concepto de UAV. Existe por ello cierta variedad de términos que, con mayor o menor acierto, son utilizados para referirse a este tipo de aeronaves. Así en el pasado fueron denominados ROA ("Remotely Piloted Aircraft") o UA ("Unmanned Aircraft" o "Uninhabited Aircraft"). En la actualidad suele utilizarse el término UAV (Unmanned Aerial Vehicle) o más recientemente UAS ("Unmanned Aircraft System").

Estas denominaciones hacen referencia a la ausencia de tripulación en el vehículo, lo que no es necesariamente sinónimo de autonomía (Cándido, 2014). Se entiende por una aeronave no tripulada (UAV: Unmanned Aerial Vehicle o también UAS: Unmanned Aircraft System o UAVS: Unmanned Aircraft Vehicle System) a aquella que es capaz de realizar una misión sin necesidad de tener una tripulación embarcada. Debe entenderse que

ésta condición no excluye la existencia de piloto, controlador de la misión u otros operadores, que pueden realizar su trabajo desde tierra (Domínguez Moreno, 2015).

Aplicaciones de los UAV's

Como se mencionó anteriormente, los UAV's fueron iniciados en el sector militar y por tal motivo se ha impulsado su desarrollo en ese ámbito, sin embargo, en los últimos 15 años ha surgido diferentes aplicaciones civiles que han generado un mayor espectro de sistemas de los cuales podemos mencionar algunas aplicaciones como:

- Agricultura: Es usada en aplicaciones de fumigantes, análisis de estrés hídrico y agricultura con precisión.
- Climatología: Es usada para la toma de muestras y monitorización de partículas en Aerosol, así como también para monitorización de contaminantes atmosféricos.
- Inspección de infraestructuras: Para la vigilancia de líneas eléctricas, oleoductos y gaseoductos.
- Vigilancia de fronteras: Se usa como un vigilante policial para la inmigración ilegal y el contrabando.
- Filmografía: Este es uno de los campos más conocidos ya que es usado para el cine y le reportaje fotográfico, últimamente hemos visto tomas de video que sólo pudieron ser grabadas gracias a un dron.
- Reconocimiento y toma de datos en desastres naturales: Su aplicación es para la vigilancia de huracanes, riadas y volcanes.
- Búsqueda y rescate: Esta aplicación es una de las mejor aprovechadas en el área civil ya que ayuda en naufragios y accidentes en montañas o zonas de difícil acceso.

Seguimiento de trayectorias

El reconocimiento de las trayectorias realizadas por los objetos se efectúa en función de las posiciones ocupadas por éstos a lo largo de la secuencia de frames buscando minimizar una función que determina la desviación de una trayectoria. Las trayectorias de cada objeto se actualizan con cada nuevo frame que ingresa al sistema. (Cortabitarte, 2008)

Partiendo del conocimiento acumulado, el objetivo de la presente investigación es diseñar un algoritmo de control que permita la navegación autónoma de trayectoria pre programada de un vehículo aéreo no tripulado (UAV)

Materiales y métodos

Para el desarrollo de esta investigación se combinó la utilización de los siguientes métodos y técnicas:

Métodos teóricos:

- Sistematización, para aplicar la información bibliográfica y experimental al diseño del sistema de Supervisión y control autónomo del UAV.
- Análisis y síntesis, para evaluar los resultados, llegar a conclusiones y recomendaciones.

Métodos empíricos:

- Observación, para la validación del sistema diseñado de control aplicado al UAV.
- Experimentación, para realizar la simulación y comprobación de los módulos que se describen en la investigación.

Métodos estadísticos:

- Permiten procesar e interpretar los resultados obtenidos con el prototipo desarrollado y contrastarlos con los parámetros de diseño originales.

Hardware del sistema

Para la realización de la investigación, es importante caracterizar el hardware requerido en estudios de este tipo:

Vehículo aéreo no tripulado (UAV)

El UAV utilizado en esta investigación es un Cuad-Rotor comercial del fabricante DJI Phantom 3e aprecia en la figura 3-2, diseñado para uso civil que incorpora un microprocesador, sensores como acelerómetros, GPS, y un dispone de un mando físico por radiocontrol y se vincula a través de WiFi a un dispositivo móvil.



Figura 1: Cuadrotor Phantom 3.

Fuente: DJI.com/es/product/phantom-3-pro

Como características técnicas principales de este UAV se presentan en la tabla 1, 2, 3.

Tabla 1: Características técnicas de UAV Phantom

UAV Phantom	
Peso (Batería y Hélices Incluidas)	1280 g
Tamaño Diagonal (Hélices Excluidas)	350 mm
Velocidad Máx. en Ascenso	5 m/s
Velocidad Máx. en Descenso	3 m/s
Velocidad Máx.	16 m/s sin viento
Límite de altura por defecto	120 m
Temperatura de Funcionamiento:	0°C a 40°C

Posicionamiento Mac:	GPS/GLONASS
Duración de Vuelo Aproximadamente	23 minutos

Fuente: <https://store.dji.com/>

Tabla 2: Características técnicas de UAV batería de vuelo

BATERÍA DE VUELO	
Capacidad	4480 mAh
Voltaje	15.2 V
Tipo de Batería LiPo	4S
Energía	68 Wh
Peso Neto	365 g
Temperatura de Funcionamiento de	-10°C a 40°C
Potencia de Carga Máx	100 W

Fuente: <https://store.dji.com/>

Tabla 3: Características técnicas de UAV mando de control remoto

MANDO DE CONTROL REMOTO	
Frecuencia	2.400 GHz-2.483 GHz
Distancia Máxima	Hasta 5 km , sin obstáculos ni interferencias según normas FCC y Hasta 3.5 km sin obstáculos ni interferencias con la norma CE
Temperatura de Funcionamiento de	0°C a 40°C
Batería	6000 mAh LiPo 2S
Transmisor de Potencia (PIRE)	FCC: 20 dBm FCC: 20 dBm Voltaje de Funcionamiento 1.2 A @7.4

Fuente: <https://store.dji.com/>

El vehículo puede moverse en tres dimensiones, para ello es necesario controlar la posición y orientación, para ello es necesario definir un sistema de coordenadas que pase por el centro de gravedad, donde cada eje debe ser perpendicular a dos ejes opuestos, definir la orientación del dron a través de la parte de vuelo La cantidad de rotación a lo largo del eje requiere tres ángulos, llamados ángulos de Euler, que son:

- Pitch: rotación con respecto al eje “y”
- Roll: rotación con respecto al eje “x”
- Yaw: rotación con respecto al eje “z”

Son tres rotaciones, relativas al sistema móvil de gran utilidad cuando el piloto de una aeronave quiere describir una maniobra, estos se pueden apreciar en la figura 2.

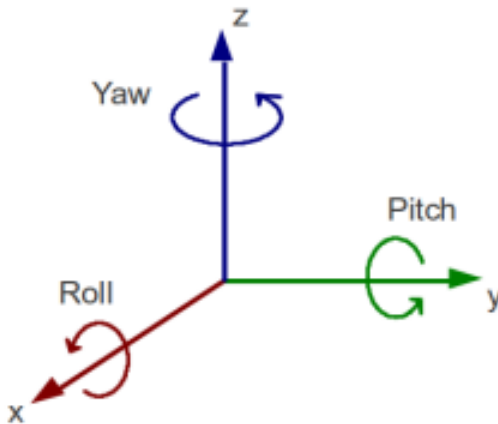


Figura 2: Ángulos de Euler
Fuente: (Barrientos, 2007)

Velocidad del UAV

En la figura 3 se aprecian las velocidades de giro de las hélices, que son capaces de cambiar la trayectoria y posición del UAV cuya combinación permite el desplazamiento en sus tres ejes. Las hélices en color rojo determinan la velocidad alta con que giraran las hélices para subir y verde siendo velocidad baja para cuando quiera descender.

- El ángulo Pitch.- Es muy similar al movimiento de Roll y es proporcionado por el aumento o disminución en las velocidades de las hélices trasera en diagonal como se puede ver en el figura 3 b “Pitch control”.
- El giro Roll.- Es proporcionado por el incremento o disminución de la velocidad de las hélices izquierda y derecha. Generando un momento con respecto al eje que hace girar al cuadricóptero como se muestra en la figura 3 c “Roll Control”.
- El ángulo Yaw .- Es creado por la velocidad de las hélices delantera y trasera en aumento o disminución en diagonal como se puede ver en la figura 3 d “Yaw control”.

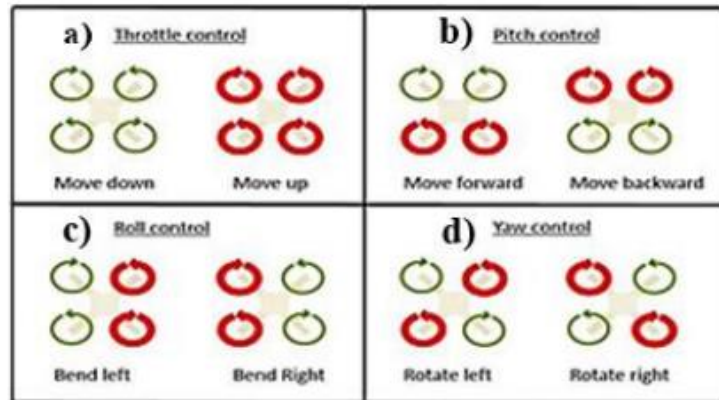


Figura 3: Velocidad de las hélices, ángulos de Euler.

Modelo cinemático

La cinemática detalla la geometría del movimiento y no considera las fuerzas que lo ocasiona, para analizar el comportamiento del UAV es necesario definir el siguiente sistema de referencia que describe el movimiento, este trabajo está representado por tres velocidades en el espacio $\langle Q \rangle$, el desplazamiento del UAV está guiada, por dos velocidades lineales q_{pu} , q_{zu} y una angular w_q que constituye el marco inercial del UAV como se muestra en la figura 4, En donde q_z , q_x , q_y , y ψ_q , son medidas con respecto al marco inercial $\langle R \rangle$. El punto de interés que será la posición a ser controlada, es el centro de gravedad del UAV. (Andaluz, 2015)

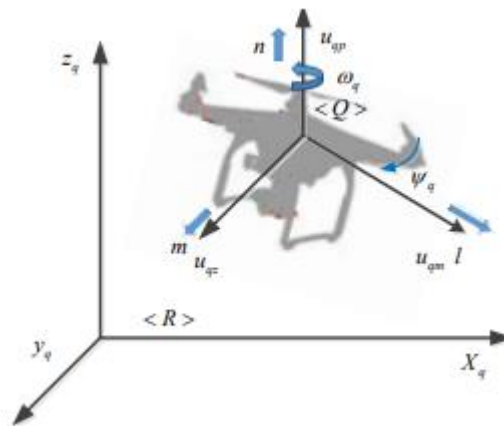


Figura 4. Marco Inercial del UAV.

Los grados de libertad que considero en el UAV de esta investigación para el seguimiento de trayectoria lo definimos en el siguiente vector:

$$\dot{u} = u_q m, W_q, u_{qp} \tag{1}$$

Donde u_{qm} Es el vector de desplazamiento frontal y u_{qp} vector de velocidad ascenso ω_q representa un vector velocidad angular de guiñada y significa la orientación del UAV. Y es necesario entonces definir la relación de velocidades que existe entre el marco inercial $\langle R \rangle$ y $\langle Q \rangle$ y tenemos la siguiente ecuación:

$$\dot{h}_q = J(\psi_q) * \dot{u} \tag{2}$$

Siendo:

$\dot{h} = \dot{x}_q, \dot{y}_q, \dot{\psi}_q, \dot{z}_q \in R^n$ Con $n=4$ representa el vector de velocidad con respecto a los ejes de referencia $\langle R \rangle$, $J(\psi_q) \in R^{n \times n}$ representa una matriz de rotación, y las maniobras de control de la aeronave se resume en $u_q \in R^n$.obteniendo el término J de la ecuación tenemos la matriz:

$$J(\psi_q) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -a * \sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & -a * \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

Utilizando los resultados de la ecuación 3 aplico en la ecuación 2, y se obtiene el espacio de estados:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_q \\ \dot{y}_q \\ \dot{\psi}_q \\ \dot{z}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -a * \sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & -a * \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} u_q m \\ u_q \\ u_{qp} \\ 1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

Obteniendo las variables de salida de la ecuación (4) se tiene:

$$\begin{aligned} \dot{x}_q &= u_{qz} * \cos(y_q) - a * w_q * \sin(y_q) \\ \dot{y}_q &= u_{qm} * \sin(y_q) - a * w_q * \sin(y_q) \\ \dot{\psi}_q &= w_q \\ \dot{z}_q &= u_{qn} \end{aligned}$$

Diseño del controlador

El movimiento del UAV expresado en la ecuación (2) en función de las tres velocidades u_q y el punto de control se encuentran desfasada a una distancia A con el centro de masa del cuerpo. o . Se conoce que la posición deseada para el UAV es tangente a la trayectoria, como se muestra en la figura 5, se define que las velocidades en cada instante de tiempo son las derivadas de la trayectoria.

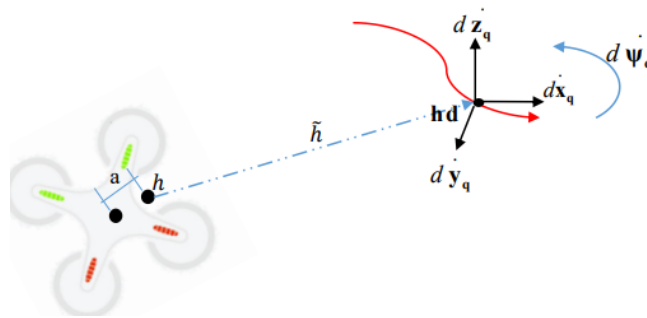


Figura 5. Posición y velocidad deseadas de trayectoria.

Definiendo $hd = (x_q, y_q, \psi_q, z_q)^T$ Como el vector de la posición deseada, su primera derivada respecto al tiempo es $\dot{hd} = \dot{dx}_q, \dot{dy}_q, \dot{d\psi}_q, \dot{dz}_q$ y para calcular el error de trayectoria se aplica la siguiente ecuación:

$$E = hd - h \tag{5}$$

El control se diseña a partir de la cinemática inversa aplicada a la ecuación (2) y se propone:

$$\dot{u}_q = J^\# * \dot{h}_q \text{ ref} \tag{6}$$

Donde:

- \dot{u}_q Es la pseudoinversa de la matriz Jacobiano, debido a que no es una matriz cuadrada.

- $J^\#$ Son las velocidades lineales y angulares necesarias para que el UAV siga la trayectoria deseada.
- $h_q \text{ ref}$ Son las velocidades de referencia para el seguimiento de trayectoria.

Las velocidades de $h_q \text{ ref}$ deberán cumplir dos objetivos:

- Corregirá el error de posición cuando el UAV este fuera de la trayectoria, para lo cual se aplica un compensador multiplicado al error de posición E, y una constante K de compensación, tal como :

$$k * \tanh(E) \tag{7}$$

- Mantener las velocidades deseadas cuando la aeronave esté dentro de la trayectoria, se consigue con la derivada de las posiciones deseadas para la trayectoria $\dot{d}h$.

Sumando estos dos objetivos se tienen la siguiente ecuación:

$$h_q \dot{\text{ref}} = k * \tanh(E) + \dot{d}h \tag{8}$$

Obteniendo de esta manera la ecuación de control autónomo de trayectoria:

$$\dot{u}_q = J^\# * k * \tanh(E) + \dot{d}h \tag{9}$$

Desarrollando la ecuación (9) se obtiene:

$$\begin{bmatrix} u_{qm} \\ u_q \\ u_{qp} \\ 1 \end{bmatrix} = j^\# * \begin{bmatrix} k1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k4 \end{bmatrix} * \tanh \begin{bmatrix} dx_q \\ dy_q \\ d\psi_q \\ dz_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{dx}_q \\ \dot{dy}_q \\ \dot{d\psi}_q \\ \dot{dz}_q \end{bmatrix} \tag{10}$$

Se considera importante indicar el planteamiento de condiciones ideales de velocidad, es decir que las velocidades ingresadas, son las velocidades que la aeronave tiene en ese instante de tiempo (11).

$$\dot{h} = h_q \text{ ref} \quad (11)$$

Condiciones de estabilidad partiendo del error "E" y obteniendo la primera derivada, se obtiene:

$$\dot{E} = \dot{h}d - h_q \text{ ref} \quad (12)$$

El objetivo del controlador es que E=0, para verificar la estabilidad del este sistema no lineal se usa el método de Lyapunov, para lo cual. Se define la función definida positiva como candidata.

$$v = \frac{1}{2} * E^T * E > 0 \quad (13)$$

Tomando su primera derivada y reemplazando (12) en (13), se obtiene:

$$\dot{v} = \frac{1}{2} * E^T * \dot{h}d - J^\# * \dot{q} \quad (14)$$

El control propuesto tiene como señal de entrada:

$$\dot{u}_q = J^\# * k * \tanh(E) + \dot{h} \quad (15)$$

Obteniendo:

$$\dot{v} = E^\# * -k * \tanh(E) + \dot{h} \quad (16)$$

Y según Lyapunov el sistema es estable si $\dot{v} < 0$, la condición para ello es posible debido a:

$$E^\# * k * \tanh(E) + \dot{h} > 0 \quad (17)$$

El seguimiento de la trayectoria tiene en cuenta los errores, al igual que la compensación dinámica del proceso de excitación, que debe ser capaz de seguir de forma independiente cuatro comandos: adelante, lateral,

arriba/abajo y ángulo de inicio, para generar el valor de velocidad deseado determinado por el movimiento. Este se puede explicar mediante un modelo matemático, que proporciona las señales de velocidad necesarias para el correcto funcionamiento del proceso.

Diseño del Software

Herramienta de software MATLAB

Es una herramienta de software matemático que ofrece un IDE con un lenguaje de programación propio del lenguaje m; que es de tipo interpretado y puede ejecutarse tanto en el entorno interactivo o a través de un archivo de script, que tienen una extensión *.m presenta entre sus instrucciones la visualización de datos en 2D y 3D ideal para aplicaciones de investigación, resuelve problemas de ingeniería y matemáticas, con un gran énfasis en aplicaciones de diseño de sistemas de control. Dispone de herramientas como Simulink, que es una plataforma de simulación y GUIDE que es un editor de interfaces de usuario, muy usado en universidades y centros de investigación. (i Nogueras, s.f.)

Resultados y discusión

Para obtener una trayectoria en forma de espiral se utilizaron las siguientes líneas de código que se observan en la figura 6 Las cuales permitieron simular la forma que se observa en la figura 7. La línea de color verde es la trayectoria generada de referencia mientras que la línea de color morado es el seguimiento de la trayectoria que realiza el UAV. Es necesario definir los parámetros de ganancia que se utiliza para el controlador con la finalidad de obtener una mayor estabilidad.

```
%espiral
xrd = 2.5*cos(0.2*t);
yrd = 2.5*sin(0.2*t);
zrd = 0.1*t;

phid = 90*ones(1,length(t))*(pi/180);
xrd_p = -2.5*0.2*sin(0.2*t);
yrd_p = 2.5*0.2*cos(0.2*t);
zrd_p = 0.1*ones(1,length(t));

phid_p = zeros(1,length(t));
```

Figura 6. Código de trayectoria en espiral

Fuente: Elaboración propia.

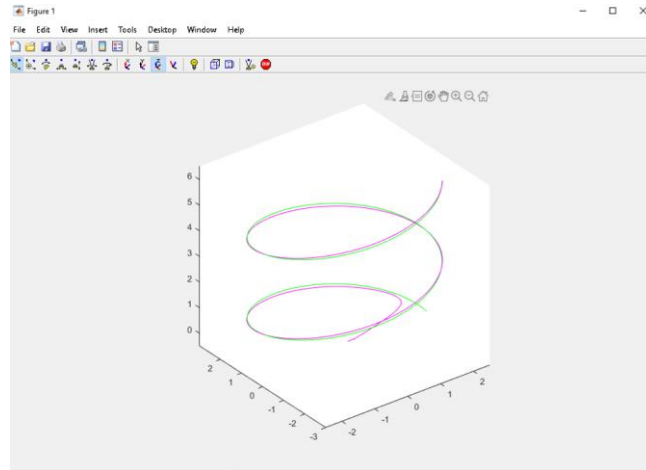


Figura 7. Pantalla del software de simulación trayectoria en espiral.

Fuente: Elaboración propia.

Para obtener una trayectoria en forma de ocho se utilizaron las siguientes líneas de código que se observan en la figura 8 Las cuales permitieron simular la forma que se observa en la figura 9.

```
%el ocho
xrd = 2.5*cos(0.2*t);
yrd = 2.5*sin(0.4*t);
zrd = 7*ones(1,length(t));

phid = 90*ones(1,length(t))*(pi/180);

xrd_p = -2.5*0.2*sin(0.2*t);
yrd_p = 2.5*0.4*cos(0.4*t);
zrd_p = 0*ones(1,length(t));

phid_p = zeros(1,length(t));
```

Figura 8. Código de trayectoria en ocho

Fuente: Elaboración propia.

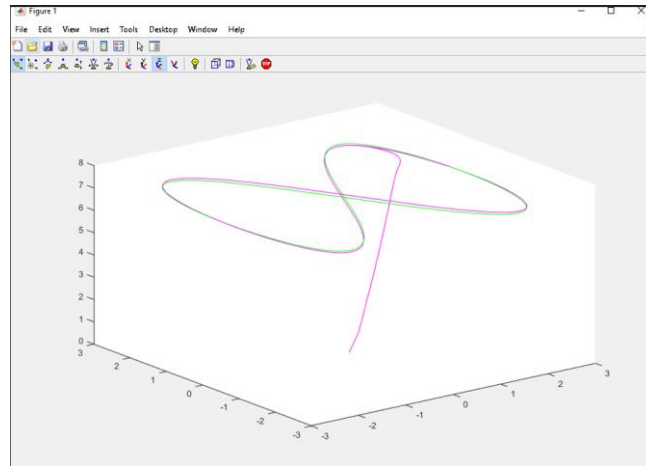


Figura 9. Pantalla del software de simulación trayectoria en ocho.

Fuente: Elaboración propia.

Para obtener una trayectoria en forma circular se utilizaron las siguientes líneas de código que se observan en la figura 10 Las cuales permitieron simular la forma que se observa en la figura 11.

```
%circulooo
xrd = 2.5*cos(0.2*t);
yrd = 2.5*sin(0.2*t);
zrd = 7*ones(1,length(t));

phid = 45*ones(1,length(t))*(pi/180);

xrd_p = -2.5*0.2*sin(0.2*t);
yrd_p = 2.5*0.2*cos(0.2*t);
zrd_p = 0*ones(1,length(t));

phid_p = zeros(1,length(t));
```

Figura 10. Código de trayectoria en círculo.

Fuente: Elaboración propia.

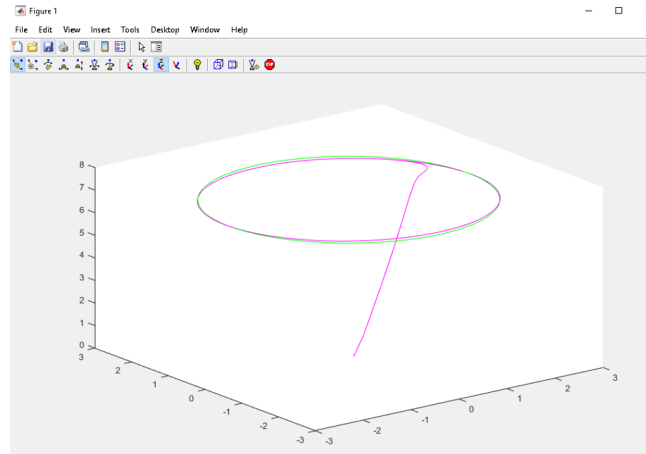


Figura 11. Pantalla del software de simulación trayectoria en círculo.

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

Los vehículos aéreos no tripulados sirven para múltiples actividades como en el campo, vigilancia, inspección, reconocimiento, búsqueda, entre otros, en el campo de la vigilancia, al desarrollar una trayectoria definida se puede emplear para supervisar cierto campo mediante la cámara. Al finalizar la búsqueda de información se ha determinado los requerimientos que se verán involucrados en el desarrollo del sistema automatizado. Para desarrollar las trayectorias, se realizaron en función de las posiciones ocupadas por los objetos a lo largo de la secuencia de frames con el objetivo de minimizar una función que determina la desviación de una trayectoria.

Es importante conocer la cinemática del robot omnidireccional ya que gracias a ella, se detalla la geometría del movimiento y no considera las fuerzas que lo ocasiona, también se debe tener en cuenta que para analizar el comportamiento del UAV es importante definir el sistema de referencia que describe el movimiento.

Se debe tener en claro la codificación realizada en el software de Matlab para poder generar la trayectoria en espiral y en forma del número ocho, ya que gracias a esta herramienta se puede simular la trayectoria que va a desarrollar el dron y poder verificar los errores gracias a esta interfaz.

En el software Matlab se programa la trayectoria que se quiere que ejecute el dron pero hay que tener en cuenta que esto es simulado y en la implementación como tal ya afectan otros factores tales como el viento, el clima, la altura, la presión y esto provoca que la trayectoria generada en Matlab no sea de todo efectiva.

Referencias

- Andaluz, V. H. (2015). Construction of a quadcopter for autonomous and teleoperated navigation. IEEE, 1--6.
- Appelbaum, D. a. (2017). The coming disruption of drones, robots, and bots: how will it affect CPAs and accounting practice?},. CPA Journal, 6.

- Barrientos, A. a. (2007). Fundamentos de robótica. Biblioteca Hernán Malo González.
- Cándido, L. F. (2014). Projeto de um UAV Solar de grande autonomia.
- Cortabitarte, J. a. (2008). Seguimiento y estimación de trayectorias.
- Cornelio, O J. G. G., Ivan Santana Ching, Barbara Bron Fonseca. (2020). Remote Laboratory System for Automatic Engineering. International Journal of Wireless and Ad Hoc Communication, 1(2), 55-63.
- Domínguez Moreno, A. (2015). Estudio de un sistema de propulsión para UAV de autonomía infinita. {B.S.} thesis.
- Hassanalian, M. a. (2017). Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. Elsevier, 99--131.
- Hernández-Morales, L. a.-M.-J.-S. (2017). Estudio sobre la estrategia de guiado L1 para el seguimiento de caminos rectos y curvos en UAV. Facultad de Eléctrica, Instituto Superior Politécnico José Antonio, 14--25.
- Nogueras i, G. B. (s.f.). Matemáticas en Ingeniería con Matlab y Octave. Obtenido de línea: <http://iimyoforja.rediris.es/tutorial/algebra.html>
- Monzón Catalán, I. a. (2013). Desarrollo de un cuadricóptero operado por ROS. Tesis. Zaragoza, España.
- Mar, O., Gulín González, J., & Santana Ching, I. (2021). Sistema de Laboratorios Remoto para las prácticas de control de la carrera de Ingeniería en Automática. Revista Cubana de Ciencias Informáticas, 15(2), 77-95.
- Nex, F. a. (2014). UAV for 3D mapping applications: a review. Springer, 1--15.
- Santana Cruz, E. E. (2017). Propuesta de sistema multi-UAV para aplicaciones de cobertura de área.
- Stócker, C. a. (2017). Review of the current state of UAV regulations. MDPI, 459.