

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Desarrollo e implementación de algoritmos de control para un  
enjambre de drones Crazyflie 2.0 mediante un sistema de  
visión de cámaras Optitrack.**

Protocolo de trabajo de graduación presentado por Kenneth Andree  
Aldana Corado, estudiante de Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2022

## Resumen

En el siguiente proyecto se va a desarrollar un conjunto de algoritmos para coordinación de enjambre de drones *Crazyflie 2.0* para la ejecución de formaciones en un ambiente analizado por un sistema de captura de movimiento, Optitrack. Estos algoritmos se basan en la formación y control de los drones.

Los algoritmos serán desarrollados a través de aplicación de métodos de toma de decisiones en conjunto, la obtención de datos a través del sistema Optitrack y la verificación de estos algoritmos por medio de simulaciones y pruebas físicas.

La ejecución de formaciones con enjambre de drones presenta diversos retos y por eso este trabajo busca solucionar los problemas como colisiones y evasión de obstáculos. Esto proporcionará autonomía a cada dron, esto porque serán capaz de ejecutar la trayectoria prevista pero con la capacidad de re-calcularla si se presenta algún obstáculo.

Se han desarrollado distintos trabajos que buscan la ejecución de formaciones con *Crazyflies*, pero se han encontrado con diversos problemas como el aumento del error de la posición conforme aumentan la cantidad de drones. En otros casos se han trabajado proyectos que permiten el calculo de las trayectorias de los drones para ejecutar las formaciones pero sin utilizar control, pues pueden calcular trayectorias pero no evadir obstáculos.

Finalmente, es relevante mencionar que este proyecto mezcla diversos temas para que sea exitoso, tal como sistemas de control, algoritmos de consenso que permitan al enjambre comunicarse para poder trasladarse o rotar, conocer las características del *Crazyflie 2.0* y del sistema Optitrack para la implementación de la información que caracteriza a ambos sistemas y aplicar conceptos de robótica de enjambre para tomar en cuenta factores que reducen el óptimo funcionamiento del enjambre.

## Antecedentes

El *Crazyflie 2.0* es un cuadricóptero de código abierto de tamaño reducido [1]. Este dron ha sido utilizado por distintas instituciones educativas y de investigación. Gracias a la versatilidad del dispositivo, se han realizado distintas variaciones en sus aplicaciones de trabajo.



Figura 1: Cuadricóptero *Crazyfly 2.0* [1].

Varias instituciones e individuos que trabajan con estos drones, han implementado sistemas de control para su funcionamiento. Por ello se trabajan distintas simulaciones y pruebas para poder minimizar las pérdidas al momento de realizar las pruebas físicas. El uso de drones tiene un potencial para ejecución de tareas específicas en el mundo, por ello el poder darle instrucciones y que estos las ejecuten sin mayor percance es de suma importancia.

Se han trabajado distintos software que permite su control, tanto como dron individual como enjambre. Estos software han probado ser efectivos pero contienen deficiencias como la coordinación de distintos drones en ambientes con obstáculos.

### **Crazyswarm: software de código abierto para control de múltiples drones:**

En 2017, Preiss, Wolfgang [2] y colaboradores trabajaron este software que permitía el control de múltiples drones. Este software utilizaba la información del entorno a partir de 14 cámaras VICON. La obtención de estos datos se realizaba a través de VICON Tracker. El desarrollo de esta plataforma se basa en la utilización de herramientas y librerías ROS, con lenguaje C++ en Ubuntu.

Durante la experimentación monitorearon el comportamiento del enjambre según la cantidad de drones. Como resultado se obtuvo que, entré más drones realizaban la tarea, el error de posición aumentaba. Esto se debe a que la aerodinámica del entorno cambiaba debido a los demás drones. En la Figura 2 se observa una formación de cuarenta drones y el sistema de cámaras VICON.



Figura 2: Formacion de cuarenta Crazyflies en forma de piramide [2].

### Uso de distintos Crazyflies como UAV's:

Raúl Zahínos presentó resultados experimentales para el control de 9 Crazyflies 2.0 [3], comunicadas a partir de una computadora por medio de crazyradio PA con un alcance de hasta 1 km. Para poder obtener información del entorno se trabajó en un banco de pruebas de CATEC que les proporciona datos a partir de la convención ENU (East - North - Up). A pesar que el sistema controlado no es lineal, se utilizaron técnicas de control clásico, controlador PID, para poder trabajar con el sistema.

Inicialmente, la implementación del control de estos drones utilizaba el feedback del sistema VICON por medio de la libreria Crazyflie-lib-python, software que proporciona bitcraze para el control de distintos drones por antena. El problema que surgió de esta libreria es que no es viable utilizarla para trabajos a alta frecuencia. Por estos y demás problemas se migró a trabajar con el proyecto Crazyswarm. Con éste, aún presentaba un aumento en el error euclidiano al momento de trabajar a una mayor frecuencia y con varios drones pero era menor que con el software anterior. El resultado de este trabajo se puede ver en la Figura 3 y Figura 4.

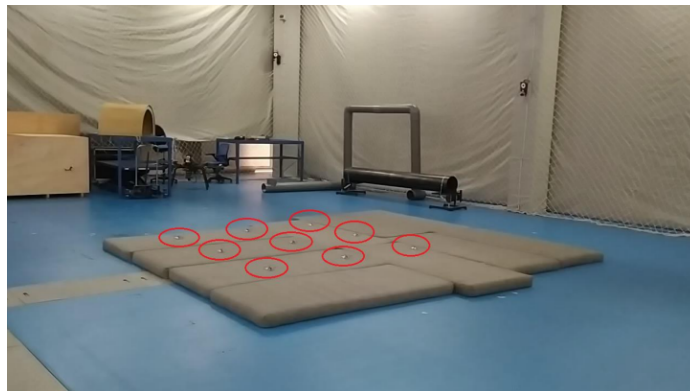


Figura 3: Nueve Crazyflies antes del despegue [3].



Figura 4: Nueve Crazyflies después del despegue [3].

### Simulación de formación de drones:

Luka Jeroncic, en mayo del 2021, desarrolló un conjunto de simulaciones de enjambre de UAVs [4]. Para estas simulaciones, encontró que al trabajar con varios UAVs, se debía considerar que estos deben tener cooperación entre si. Estas pruebas buscaban evitar colisiones entre ellos y las colisiones con el entorno.

Las simulaciones fueron desarrolladas en Unreal Engine 4 y AirSim, herramientas que permitían el uso del sensor que proporciona la pose del dron (orientación y posición). Estos parámetros pueden ser modificados en AirSim. Los drones cuentan con sensores que permite la lectura de objetos en un rango de 4 metros a la redonda. Se realizaron 15 iteraciones, los datos obtenidos fueron la desviación estándar, el tiempo promedio en completar la formación y la cantidad de colisiones que sufrieron durante la formación.

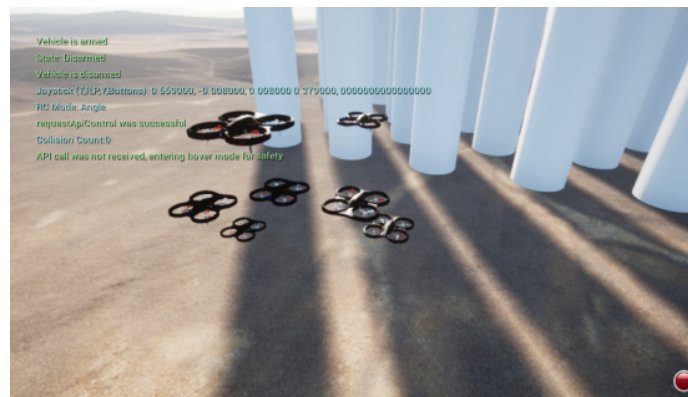


Figura 5: Pruebas de formación inicial con 6 drones [4]

### Algoritmo para trayectorias de UAVs

En el 2020, Hao Zhuo y su equipo trabajaron un algoritmo de planificación de trayectorias para UAVs, este algoritmo se basa en restricciones exactas de posicionamiento para el sistema [5]. Este trabajo garantiza que el UAV pueda llegar a una posición indicada a

través de la trayectoria mas corta desde el punto de salida hasta el punto final. Para esto se utilizan múltiples restricciones y la menor cantidad de correcciones de errores. La limitante de este trabajo es que no se tiene la retroalimentación del entorno por medio de un sistema de captura de movimiento, por lo que el algoritmo se basa en considerar el error de posicionamiento durante su vuelo debido a los factores presentes en el entorno. Esto lo trabajan a partir de puntos de corrección en el espacio de vuelo y así corregir el error, como se puede ver en la Figura 6. Con esto en mente, planifican la mejor trayectoria de forma que el UAV sea corregido por los puntos que se definieron como correctos para que el vuelo sea lo más corto y rápido posible.

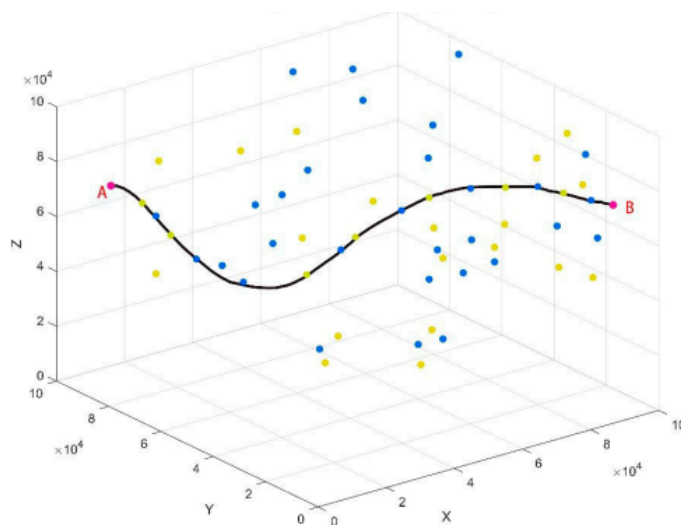


Figura 6: Algoritmo de trayectoria por medio de puntos [5]

## Trabajos previos en UVG:

Los trabajos realizados en UVG, permiten tener una base y ver los comportamientos del *Crazyflie 2.0* en distintos escenarios. Los trabajos nos otorgan la ventaja de poder modificar y estudiar los controladores de los drones.

En el 2019, Gabriel Martinez realizó el diseño e implementación de una plataforma para el *Crazyflie 2.0* con el propósito de tener un sistema controlado para poder configurar y realizar pruebas de algoritmos de control de actitud para el dron [6]. Este trabajo fue la base para que en el 2021, Francis Sanabria trabajara en la implementación del cuadricóptero a esta plataforma. El diseño de la plataforma con el dron se puede ver en la Figura 7.

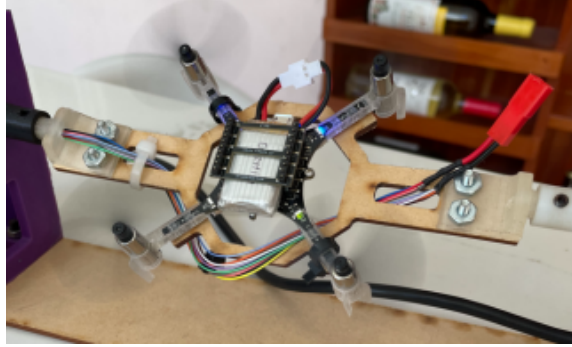


Figura 7: Plataforma con *Crazyflie 2.0* montado [7].

El trabajo de Sanabria permite configurar y estudiar el sistema de control del dron para entender cómo se orienta [7]. Esto lo logró trabajando con el control de actitud del *Crazyflie 2.0*. Para poder cumplir este objetivo, redactó una guía básica de cómo se utiliza el dron, en esta se indicaba qué pasos seguir para poder modificar el firmware del dron. Además, desarrolló una interfaz gráfica para poder controlar el dron de manera sencilla. La interfaz permite al usuario leer en tiempo real el ángulo de banqueo, modificar los parámetros del controlador PID y reiniciarlo a valores predeterminados del mismo y modificar el ángulo pitch al que se desea orientar el dron. En esta interfaz, también permite conectar, desconectar y tarar el dron. Como el objetivo de este proyecto era el estudio y análisis del comportamiento del dron, también cuenta con la función de guardar la data de la iteración. La interfaz se puede ver en la Figura 8. Las limitaciones de este trabajo fueron que no se tiene el comportamiento del dron con todos sus grados de libertad debido al diseño de la plataforma por lo que se tiene información del dron operando en un ambiente completamente controlado.

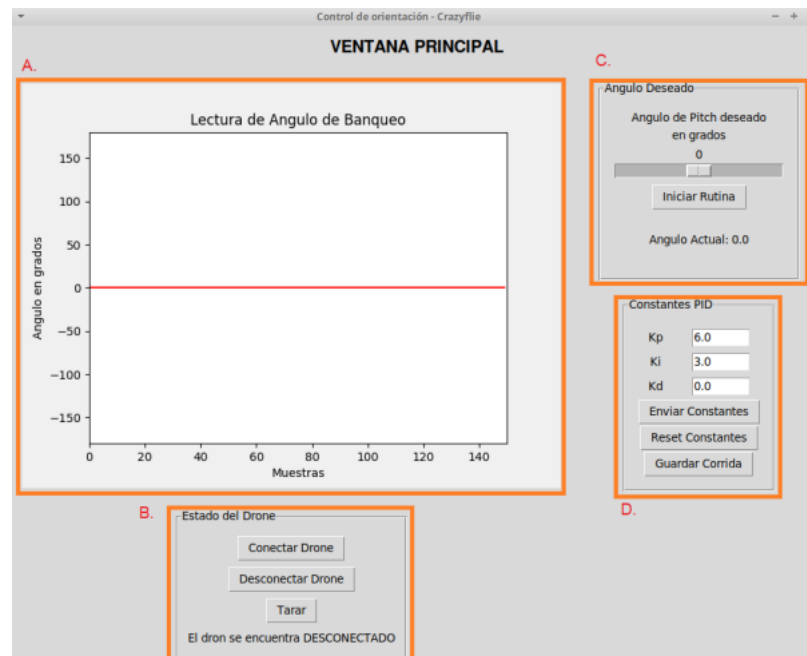


Figura 8: Interfaz gráfica [7].

Steven Castillo, trabajó una plataforma de pruebas en forma de *gimball* [8]. La ventaja de esta plataforma es que presenta 3 grados de libertad, que son los ángulos de vuelo del dron. Para el control de este dron, se utilizó el controlador de vuelo automático Pixhawk 1. Este controlador puede ser modificado a través de una herramienta en Matlab/Simulink. En esta herramienta modificaba los cambios de velocidad de los motores para posteriormente realizar análisis de esfuerzos de manera teórica y por simulaciones para las piezas del sistema.

Es importante mencionar que los trabajos previos no permiten su implementación para la realización de enjambres de drones, por lo que se restringe la posibilidad de utilizar los drones para ejecutar formaciones o trayectorias específicas.

## Justificación

El propósito de este proyecto es desarrollar algoritmos de enjambre de drones *Crazyflie 2.0* que utilicen un sistema de captura de movimiento Optitrack con el fin de realizar las formaciones que se le soliciten de forma autónoma. Esto permitirá crear enjambres inteligentes utilizando sistemas de control para la ejecución de trayectorias y evasión de obstáculos, utilizando la realimentación del ecosistema Robotat.

Estos algoritmos evitarán colisiones entre los drones del enjambre y con cualquier cuerpo que esté dentro del entorno de trabajo. Los obstáculos pueden estar en cualquier parte del ecosistema, inclusive dentro del área en dónde el enjambre ejecutará la formación. El algoritmo permitirá que si los drones ya están en la formación deseada, si un obstáculo se aproxima algún dron, estos

Por medio de las simulaciones, se obtendrán datos estadísticos que permitan ver cómo reaccionan los drones al algoritmo cuando sea ejecutado, con el fin de ver cuántos drones podrán ser controlados.

## Objetivos

### Objetivo General

Desarrollar algoritmos de coordinación de enjambre de drones *Crazyflie 2.0* para la ejecución de formaciones, utilizando técnicas de control y el sistema de captura de movimiento Optitrack.

### Objetivos Específicos

- Evaluar algoritmos de control y formación para drones *Crazyflie 2.0*.
- Definir los parámetros que necesita transmitir el sistema optitrack al *Crazyflie 2.0* para que el dron pueda conocer su entorno.
- Validar los algoritmos desarrollados por medio de simulaciones computarizadas.



- Realizar pruebas físicas con los algoritmos para verificar el correcto funcionamiento del *Crazyfly 2.0*.
- Obtener estadísticas de posición y trayectoria del *Crazyfly 2.0* durante la ejecución de la formación.

## Marco teórico

### Sistema Optitrack

El sistema de captura de movimiento, Optitrack, consiste en múltiples cámaras sincronizadas alrededor de un volumen de captura objetivo, este captura imágenes 2D con cada cámara. Posteriormente se calculan las posiciones 2D y los datos de posición de cada cámara se comparan para calcular las posiciones en 3D por medio de triangulación. Estas posiciones en 2D se obtienen por medio la detección de la luz reflejada que es emitida por las cámaras, como se puede ver en la Figura 9. Por esto se recomienda minimizar la iluminación ambiental para evitar interferencias como luz solar.



Figura 9: Cámara Prime"x 41 del sistema Optitrack en UVG

El conjunto de cámaras se recomienda instalarse alrededor de la periferia del volumen objetivo, las cámaras a distinta altura para obtener distintas perspectivas del volumen. Las cámaras Primex 41 cuentan con las siguientes especificaciones técnicas:

- **Resolución:** 2048x2048
- **Velocidad de fotogramas:** 180 Hz.
- **Precisión 3D:** +/- 0.10 mm.
- **Rango para marcadores pasivos:** 30 mm
- **Rango para marcadores activos:** 45m.

### *Crazyflie 2.0*

El *Crazyflie 2.0* es un dron de 4 motores, cuadricóptero, de bajo costo y ligero. Este permite ser controlado por medio de Bluetooth LE y por radiofrecuencia, utilizando un componente adicional, Crazyradio PA. El *Crazyflie 2.0* se carga en 40 minutos y permite un tiempo de vuelo de 7 minutos. Tiene integrado diversos sensores como un giroscopio, acelerómetro y magnetómetro de 3 ejes cada uno, así como un sensor de presión [9].



Figura 10: Cuadricóptero *Crazyflie 2.0* [1].

### Algoritmos de consenso

Cuando se tiene una red de agentes dinámicos, es común encontrarse con el problema de consenso. Para poder solucionar, cada agente debe llegar a un consenso, esto se refiere a un estado en el que se consigue un acuerdo para poder alcanzar una meta o valor en común según el interés dependiente del estado de los agentes que conforman la red. Este estado se alcanza cuando se tiene constante comunicación constante entre la red por medio de enlaces de comunicación o sensores. Este intercambio de información se le llama algoritmo de consenso.

Los algoritmos de consenso tienen el propósito de que cada agente actualice su información a partir de la información de los otros agentes [10].

Para estas redes multi-agentes, se trabaja la estructura con grafos para indicar que tipo de comunicación habrá entre la red. Se utilizan dos tipos grafos, figura 11, los dirigidos y no

dirigidos. Para el primer caso, cada arista es representada por una flecha, en dónde la cola indica el agente que envía la información, mientras que la punta indica el agente receptor de la información. Para el segundo caso, las aristas son líneas continuas, estos se utilizan en redes en dónde la comunicación entre los agentes es bidireccional [11].

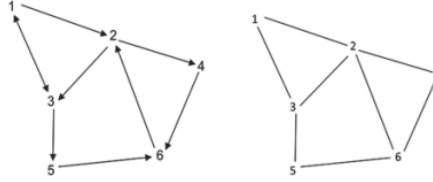


Figura 11: Tipos de grafos [11]

## Robótica de enjambre

La robótica de enjambre es el estudio del diseño de un gran número de agentes relativamente sencillos para que ejecuten un comportamiento colectivo a partir de las interacciones entre los agentes o entre los agentes y el entorno. Las interacciones tienen un papel clave en los enjambres, pues es necesario que cada agente tenga las capacidades de detección local y comunicación [12].

El rendimiento medio de un enjambre, depende del tamaño del enjambre si el espacio de trabajo se mantiene constante. Esto sucede porque, cuando se agregan más robots al sistema, la densidad de agentes va aumentando, y llegada una determinada cantidad, se tendrá el rendimiento óptimo del enjambre. Si pasado este punto, sigue aumentando la cantidad de robots, el rendimiento disminuye porque hay una mayor interferencia entre cada uno y esto ralentiza las acciones, esto puede aumentar hasta el punto que el enjambre no pueda moverse debido a las interferencias [12].

## Metodología

Para el desarrollo de los algoritmos, se debe realizar las siguientes investigaciones:

- Tipos de comunicación entre drones
- Métodos de toma de decisiones en conjunto
- Algoritmos de consenso

Posteriormente analizarán los resultados para elegir el método base para el algoritmo, tomando en cuenta que sean los métodos más adecuados para la aplicación de los *Crazyflie 2.0*.

Identificar los parámetros que serán necesarios obtener del sistema de captura de movimiento, Optitrack.

Para el desarrollo de las simulaciones, se debe investigar los programas que permitan simular cuadricópteros. La cantidad de iteraciones dependerá de los resultados de las simulaciones, procurando obtener un comportamiento óptimo en el enjambre. Posteriormente se realizarán simulaciones físicas, en dónde se trabajará con un dron y posteriormente agregar drones para verificar el comportamiento del dron al algoritmo. Tomando en cuenta que para proceder a las pruebas físicas, las simulaciones deben ser aceptables para cuidar la integridad de los *Crazyflie 2.0*.

Se realizarán comparaciones entre los resultados de la simulación y la aplicación física de los algoritmos. Se analizarán los datos obtenidos de ambos casos para identificar qué factores afectan al algoritmo.

## Cronograma de actividades

Semana 1 (4 - 8 julio): Realizar investigaciones sobre los algoritmos existentes para el control de enjambre de drones y métodos de comunicación entre drones.

Agregar información relevante al documento de la tesis.

Semana 2 (11 - 15 julio): Estudio de algoritmos Estudio y análisis del *Crazyflie 2.0*, controlador, plataforma existente.

Agregar información relevante al documento de la tesis.

Semana 3 (18 - 22 julio): Análisis del algoritmo de control y posición ya existente para *Crazyflies 2.0*.

Agregar información relevante al documento de la tesis.

Semana 4 (25 - 29 julio): Inicios de desarrollo del algoritmo de control, basádo en parámetros que requiera el *Crazyflie 2.0*.

Semana 5 (1 - 5 agosto): Continuar con el desarrollo del algoritmo de control y posición para los drones.

Semana 6 (8 - 12 agosto): Investigación de plataformas para realizar simulaciones de cuadricópteros.

Agregar información relevante al documento de la tesis.

Semana 7 (15 - 19 agosto): Inicio de desarrollo de simulaciones

Agregar información relevante al documento de la tesis.

Semana 8 (22 - 26 agosto): Realizar modificaciones al algoritmo según resultados de las simulaciones

Agregar información relevante al documento de la tesis.

Semana 9 (29 agosto - 2 de septiembre): Inicio de pruebas físicas del algoritmo con los *Crazyflies 2.0*.

Agregar información relevante al documento de la tesis.

Semana 10 (5 - 9 septiembre): Análisis de datos obtenidos de las pruebas físicas de los algoritmos.

Agregar información relevante al documento de la tesis.

Semana 11 (12 - 16 septiembre): Modificaciones al algoritmo según resultados obtenidos en las pruebas físicas

Semana 12 (19 - 23 septiembre): Agregar información relevante al documento de la tesis.

Semana 12 (26 - 30 septiembre): Agregar información relevante al documento de la tesis.

## Índice preliminar

- Resumen
- Abstract
- Introducción
- Antecedentes
- Justificación
- Objetivos
- Alcance
- Marco teórico
- Parámetros de control para el *Crazyflie 2.0*
- Información transmitida del sistema de captura Optitrack.
- Espacio de trabajo del enjambre
- Algoritmo de control para el *Crazyflie 2.0*
  - Programa utilizado para desarrollar el algoritmo
- Resultado de pruebas
  - Simulaciones
    - Programa utilizado para simulaciones
    - Resultados
  - Pruebas físicas
    - Implementación en dos *Crazyflie 2.0*
    - Resultados
- Conclusiones

- Recomendaciones
- Bibliografía
- Anexos

## Referencias

- [1] «Crazyflie 2.0.» dirección: <https://store.bitcraze.io/products/crazyflie2>.
- [2] J. A. Preiss, W. Honig, G. S. Sukhatme y N. Ayanian, «Crazyswarm: A large nano-quadcopter swarm,» en *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2017, págs. 3299-3304.
- [3] R. Zahínos, «Sistema de coordinación y control de múltiples vehículos aéreos no tripulados en testbed de interiores,» Universidad de Sevilla, 2020.
- [4] L. Jeroncic, «Drone Swarm Simulator,» Tesis de mtría., The Arctic University of Norway, Tromsø, Norway, 2021.
- [5] H. Zhou, H.-L. Xiong, Y. Liu, N.-D. Tan y L. Chen, «Trajectory planning algorithm of UAV Based on System Positioning Accuracy Constraints,» *Electronics*, vol. 9, n.º 2, pág. 250, 2020. DOI: 10.3390/electronics9020250.
- [6] G. Martínez, «Plataforma de pruebas y ajustes de sistemas de control para vehículos multirrotores,» Tesis de licenciatura, Universidad Del Valle de Guatemala, 2019.
- [7] F. J. S. Salazar, «Diseño e implementación de una plataforma de pruebas para sistemas de control para el dron Crazyflie 2.0,» Tesis de licenciatura, Universidad Del Valle de Guatemala, 2021.
- [8] S. J. C. Lou, «Implementación y desarrollo de plataforma tipo gimbal para pruebas de control de drones de mediana potencia,» Tesis de licenciatura, Universidad Del Valle de Guatemala, 2021.
- [9] *Crazyflie 2.0*, SKU: 110990440, Rev. 2, Bitcraze, nov. de 2021.
- [10] E. Hernández, «Sistema multi-cámara para la reconstrucción volumétrica de objetos 3D,» Tesis de mtría., Universidad Zaragoza, 2019.
- [11] J. Ávila, «Diseño e implementación de estrategias de consenso líder-seguidor para un sistema multi-agentes,» Tesis de mtría., Universidad autónoma del estado de Hidalgo, 2019.
- [12] H. Hamann, *Swarm Robotics: A Formal Approach*. Springer, 2018.