

Instituto Tecnológico de Costa Rica  
Área Académica de Ingeniería en Computadores

Programa de Licenciatura de Ingeniería en Computadores



## **Trabajo Final de Graduación**

### **Investigación de UAVs y Sistemas Empotrados**

Informe de comparación y selección de UAV y sistema  
empotrado junto con propuesta de personalización

**Desarrollo de un UAV modular de costo reducido  
con propósitos educativos y de investigación**

Elaborado por

Jose Ignacio Granados Marín  
Ingeniería en Computadores  
No. Carné: 2018319698

Supervisado por: MSc. Luis Alberto Chavarría Zamora

# Índice

|   |    |
|---|----|
| 1. Actividad 1 (A1): Investigación de principales fabricantes de UAV                              | 3  |
| 2. Actividad 2 (A2): Investigación de modelos adaptables de UAV                                   | 8  |
| 3. Actividad 3 (A3): Investigación de características principales por modelo de UAV               | 9  |
| 4. Actividad 4 (A4): Realización de tabla comparativa entre modelos de UAV                        | 12 |
| 5. Actividad 5 (A5): Análisis de modelos de UAV   | 14 |
| 6. Actividad 6 (A6): Justificación del modelo seleccionado de UAV                                 | 16 |
| 7. Actividad 7 (A7): Investigación de sistemas empotrados adaptables a un UAV                     | 18 |
| 8. Actividad 8 (A8): Investigación de características principales por modelo de sistema empotrado | 20 |
| 9. Actividad 9 (A9): Realización de tabla comparativa entre modelos de sistemas empotrados        | 26 |
| 10.Actividad 10 (A10): Análisis de modelos de sistemas empotrados                                 | 29 |
| 11.Actividad 11 (A11): Justificación del modelo seleccionado de sistema empotrado                 | 32 |
| 12.Actividad 12 (A12): Investigación de características modulares adaptables a un UAV             | 35 |
| 13.Actividad 13 (A13): Descripción de propuesta de personalización del UAV seleccionado           | 38 |

# 1. Actividad 1 (A1): Investigación de principales fabricantes de UAV

Dentro de las principales empresas que se dedican al diseño, construcción y manufactura de drones o UAV para el año 2023, se encuentran las siguientes [1]:

1. **DJI** es el mayor fabricante de drones a nivel mundial, el cual acapara más del 70 % del mercado global. La compañía ofrece una amplia gama de drones y la misma es ampliamente reconocida por sus productos de alta calidad, características avanzadas y excelente servicio al cliente. Los drones de DJI están equipados con funcionalidades avanzadas como sistemas para evitar obstáculos, cámaras 4K y módulos GPS, los cuales se encuentran diseñados tanto para uso recreativo como profesional. La compañía también ofrece una gran gama de accesorios y complementos para mejorar el rendimiento de sus dispositivos.
2. **Yuneec International** se ha establecido como uno de los principales fabricantes de drones en el mundo, con una historia de innovación en la industria aeronáutica. Dicha compañía, ganó un amplio reconocimiento por crear el primer avión radiocontrolado (RC por sus siglas en inglés) de ala fija para volar, en forma comercial. Luego, la empresa se dedicó a la producción de los populares cuadricópteros de vídeo aéreo. Por su parte, Los drones de Yuneec International son conocidos por su facilidad de uso y características innovadoras, como control por voz, evitación de obstáculos y cámaras de alta calidad.
3. **AeroVironment Inc.** es una empresa de soluciones tecnológicas que ha estado desarrollando y fabricando drones durante más de cuatro décadas, los cuales se utilizan principalmente en las industrias militar, de defensa, seguridad pública y comercial. Lo que hace que dicha compañía se destaque de las demás empresas, es su reputación de innovación y los numerosos premios que ha recibido por sus soluciones tecnológicas. AeroVironment Inc. también ha establecido asociaciones y colaboraciones notables en la industria de UAV, incluido el suministro de sus drones para el Ejército de los Estados Unidos y operaciones militares para las regiones de Asia y el Pacífico.

4. **PowerVision** se establece como la única compañía en el mundo que produce dispositivos robóticos aéreos de superficie de agua y submarinos. Dicha empresa, también se ha dedicado a la producción en masa de dispositivos robóticos de inteligencia artificial (AI por sus siglas en inglés) submarina, lo que la convierte en un productor único en la industria y mercado de la robótica. Actualmente, PowerVision se dedica, principalmente, a la investigación, desarrollo, fabricación, ventas y servicios de UAV industriales, drones de consumo y dispositivos robóticos submarinos y de superficie de agua.
5. **Parrot** es una conocida compañía francesa de drones que se ha establecido como un productor importante en la industria de los UAV. Dicha compañía, dispone de una amplia gama de drones para diversas aplicaciones, incluyendo fotografía aérea, videografía, carreras, agricultura, construcción y seguridad pública. Por su parte, Parrot está comprometida con la innovación y la tecnología de drones sencillos de utilizar, con un enfoque en el desarrollo de nuevos productos y la expansión de su alcance en el mercado.
6. **Autel Robotics** es una empresa líder de drones conocida por producir UAV de alta calidad, los cuales atienden tanto las necesidades de los consumidores como las exigencias de los profesionales. La compañía ofrece una gama de drones equipados con características avanzadas como sistemas para evitar obstáculos, cámaras de 360 grados y controles de vuelo intuitivos. Los dispositivos de Autel Robotics son populares entre los fotógrafos y videógrafos debido a que sus cámaras estabilizadas son capaces de grabar vídeo 4K30 y tomar fotos nítidas de hasta 50MP.
7. **Skydio** es uno de los principales emprendimientos de drones a considerar en la industria de los UAV. El vuelo manual de alta velocidad y las capacidades de evitación de obstáculos de sus dispositivos, han hecho que los drones Skydio sean populares en las industrias del deporte y el entretenimiento. Por su parte, dicha compañía fabrica UAV inteligentes impulsados por el aprendizaje automático (ML por sus siglas en inglés) para consumidores, empresas y gobiernos.

8. **Delair SAS** es una de las principales compañías de drones del mundo, que proporciona tecnología y servicios innovadores de UAV para uso comercial e industrial. La compañía ofrece una gama de drones avanzados para aplicaciones de topografía, inspección y seguridad. Además, proporciona software para la operación de múltiples dispositivos y la gestión de datos, lo que permite a los usuarios planificar y ejecutar vuelos para sus drones, así como analizar y compartir los datos recopilados por los mismos. La ventaja competitiva de dicha empresa, radica en que los UAV de largo alcance, son capaces de volar durante varias horas y cubrir grandes áreas territoriales, mientras que los drones equipados con sensores de imagen térmica y otras cargas útiles avanzadas, se emplean en aplicaciones de inspección y vigilancia.
9. **Ehang** es una de las empresas líderes en el desarrollo de vehículos aéreos autónomos (AAV por sus siglas en inglés). La compañía tiene un sólido historial de innovación y está bien posicionada para ser un productor destacado en el mercado de la movilidad aérea urbana. Los AAV de EHang están diseñados para ser seguros, fáciles de operar y amigables con el medio ambiente. Además, dichos dispositivos, se emplean en una amplia variedad de propósitos, incluido el transporte de pasajeros, la logística y la fotografía aérea.
10. **Freefly Systems** es un fabricante líder de sistemas de movimiento de cámaras, drones de cámara únicos y estabilizadores de cámaras cinematográficas. Los productos que fabrica dicha compañía, son utilizados por cineastas y videógrafos profesionales, alrededor del mundo, para crear tomas impresionantes con amplios ángulos y gran nitidez. Los productos de Freefly Systems son conocidos por su alta calidad, diseño innovador y facilidad de uso.
11. **AgEagle Aerial Sys** es un pionero de la industria de UAV, el cual es reconocido mundialmente por ofrecer una línea unificada de hardware, sensores y software de vuelo de alto rendimiento. Los drones de dicha empresa, se encuentran equipados con capacidades avanzadas de captura de imágenes, alta precisión y procesamiento de datos en tiempo real, lo que los hace ideales para la agricultura de precisión y el manejo de cultivos.

12. **Precisionhawk Inc.** es una de las principales compañías de soluciones tecnológicas de drones, ya que la misma ofrece soluciones para diversas industrias como agricultura, energía e infraestructura. Se especializa en tecnología avanzada de UAV y soluciones de software que tienen como objetivo mejorar la eficiencia y productividad de diferentes sectores. Los productos y servicios de PrecisionHawk incluyen dispositivos equipados con sensores y cámaras avanzadas, con capacidades de imágenes térmicas y multiespectrales, soluciones de software para la operación de drones, gestión de datos y análisis, así como su popular plataforma PrecisionAnalytics.
13. **Flyability** es una compañía suiza de drones que se especializa en UAV resistentes a colisiones para la inspección y exploración de interiores. Los dispositivos de dicha empresa, se encuentran encerrados en una jaula protectora que les permite permanecer estables al momento de colisionar con diversos obstáculos, lo que los hace ideales para llevar a cabo ciertas inspecciones y estudios en áreas de difícil acceso, como minas subterráneas, plantas de energía nuclear y plataformas petrolíferas. Flyability ofrece diversas soluciones a diferentes sectores, como energía, petróleo y gas, minería e infraestructura, entre muchos otros.
14. **Insitu** es una destacada compañía de drones que ha sobresalido en la industria tecnológica con sus innovadoras soluciones de UAV. El enfoque principal de esta compañía es proporcionar sistemas aéreos no tripulados (UAS por sus siglas en inglés) para aplicaciones militares y comerciales. Los drones de Insitu están diseñados para proporcionar datos e inteligencia en tiempo real, lo que los hace ideales para aplicaciones de búsqueda y rescate, vigilancia y monitoreo ambiental.
15. **Wingtra** es una empresa suiza que fabrica drones de carga pesada para aplicaciones industriales. Los UAV de Wingtra son capaces de transportar hasta 60kg de carga útil, lo que los hace ideales para tareas de topografía, mapeo e inspección.

Dichos dispositivos, también son conocidos por sus capacidades de topografía aérea de alta precisión y sus largos tiempos de vuelo, así como por estar equipados con cámaras y sensores de alta resolución. Los drones de Wingtra disponen de la capacidad de despegue y aterrizaje vertical (VTOL por sus siglas en inglés), lo que implica que los mismo no requieren de amplios espacios para ser operados.

16. **Aerobotics** es un fabricante líder de drones que se especializa en agricultura de precisión. La compañía ha desarrollado una gama de tecnologías avanzadas de UAV diseñadas para ayudar a los agricultores a optimizar el rendimiento de sus cultivos y reducir los costos. Dichos dispositivos, emplean múltiples sensores de imágenes multiespectrales para capturar imágenes de alta resolución de los cultivos, las cuales son analizadas posteriormente, para proporcionar información valiosa sobre la salud de los cultivos y el potencial de rendimiento de las plantaciones.
17. **JOUAV** es una compañía que se ha dedicado a la fabricación de una amplia gama de UAV, incluidos drones de carga pesada, drones agrícolas y drones de carreras. La compañía es conocida por su alto rendimiento y asequibilidad. Los dispositivos de JOUAV están equipados con sensores y cámaras avanzadas que proporcionan datos precisos e imágenes de alta resolución.
18. **Draganfly** es una notable compañía de drones que se especializa en el diseño y desarrollo de sistemas aéreos no tripulados avanzados. La compañía ofrece una amplia gama de plataformas y tecnologías de UAV que se adaptan a diversas aplicaciones, incluyendo fotografía aérea, videografía, seguridad pública, inspecciones industriales y estudios agrícolas. Los dispositivos de dicha compañía se encuentran equipados con características de última generación, como sistemas avanzados de control de vuelo, cámaras de alta resolución, capacidades de imagen térmica y modos de vuelo autónomos. Las características anteriores, permiten a los usuarios capturar imágenes y datos de alta calidad, los cuales pueden ser empleados para fines profesionales y comerciales.

19. **Propeller Aero** es una innovadora compañía de drones que se enfoca en proporcionar soluciones de la recopilación y análisis de datos aéreos para las industrias de la construcción y minería. Dicha compañía ofrece una combinación de soluciones de hardware y software que facilitan la recopilación de datos recolectados por los UAV, procesamiento basado en la nube y análisis procesables. Su plataforma permite a los profesionales de la construcción y la minería visualizar, medir y comparar el progreso del territorio mapeado, rastrear el inventario y realizar cálculos volumétricos.
20. **Bitcraze** es una compañía que se dedica al desarrollo y fabricación de los pequeños cuadricópteros llamados Crazyflie. Asimismo, la empresa desarrolla y mantiene una amplia infraestructura de apoyo con varios clientes, puentes de expansión, depuradores, entornos de desarrollo y herramientas para que los usuarios finales puedan modificar el Crazyflie de la forma que requieran o necesiten [2].

## 2. Actividad 2 (A2): Investigación de modelos adaptables de UAV

Dentro de los principales modelos adaptables de UAV para el año 2023, se encuentran las siguientes [3]:

1. DJI Matrice 300 RTK.
2. Parrot Anafi.
3. DJI Tello Quadcopter.
4. Parrot Mambo Fly Educational Drone.
5. Sky Viper E1700.
6. Bitcraze Crazyflie 2.1.
7. Robolink CoDrone.



8. Kit PlutoX.
9. Makeblock Airblock Hovercraft Drone.
10. DJI Tello Iron Man Edition.

### **3. Actividad 3 (A3): Investigación de características principales por modelo de UAV**

Dentro de las principales especificaciones de los modelos adaptables de UAV, antes mencionados, para el año 2023, se encuentran las siguientes [3]:

#### **1. DJI Matrice 300 RTK**

- Tiempo de vuelo: 55 min.
- Alcance: 15 km.
- Velocidad: 23 m/s.
- Cámara: 145°, 960p, 30 fps.
- Tamaño: 810×670×430 mm.
- Peso: 6.3 kg.

#### **2. Parrot Anafi**

- Tiempo de vuelo: 25 min.
- Alcance: 4 km.
- Velocidad: 15 m/s.
- Cámara: 1/2.4" CMOS, f/2.4, 4K Cinema 4096x2160 24fps, 21MP (5344x4016) / 4:3 / 84° HFOV.
- Tamaño: 175x240x65 mm.
- Peso: 320 g.

### 3. DJI Tello Quadcopter

- Tiempo de vuelo: 13 min.
- Alcance: 100 m.
- Velocidad: 8 m/s.
- Cámara: FOV: 82.6°, 5MP (2592x1936), HD720P30.
- Tamaño: 98×92.5×41 mm.
- Peso: 80 g.

### 4. Parrot Mambo Fly Educational Drone

- Tiempo de vuelo: 9 min.
- Alcance: 60 m.
- Velocidad: 18 mph.
- Cámara: cámara 4K.
- Tamaño: 6 x 3 x 0.4”.
- Peso: 63 g.

### 5. Sky Viper E1700

- Tiempo de vuelo: 8-10 min.
- Alcance: 100 m.
- Velocidad: 8 m/s.
- Cámara: No incluida.
- Medidas: 35.56 x 7.62 x 30.48 cm.
- Peso: 75 g.

### 6. Bitcraze Crazyflie 2.1

- Tiempo de vuelo: 7 min.
- Alcance: 1 km.

- Velocidad: 8 m/s.
- Cámara: No incluida.
- Tamaño: 92x92x29 mm.
- Peso: 27 g.

#### 7. Robolink CoDrone

- Tiempo de vuelo: 6 min.
- Alcance: 100 m.
- Velocidad: 8 m/s.
- Cámara: no incluida.
- Tamaño: 3.7 x 2.6 x 2.8 in.
- Peso: 36 g.

#### 8. Kit PlutoX

- Tiempo de vuelo: 7 min.
- Alcance: 70-100 m.
- Velocidad: No especificada.
- Cámara: Foto, Video@720p, Tarjeta SD.
- Tamaño: 16x16 cm.
- Peso: 80 g.

#### 9. Makeblock Airblock Hovercraft Drone

- Tiempo de vuelo: 20 min.
- Alcance: 10 m.
- Velocidad: 2.5 m/s.
- Cámara: No incluida.
- Tamaño: 335×192×127 mm.

- Peso: 200 g.

#### 10. DJI Tello Iron Man Edition

- Tiempo de vuelo: 13 min.
- Alcance: 100 m.
- Velocidad: 8 m/s.
- Cámara: FOV: 82.6°, 5MP (2592x1936), HD720P30.
- Tamaño: 98×92.5×41 mm.
- Peso: 80 g.

## 4. Actividad 4 (A4): Realización de tabla comparativa entre modelos de UAV

Dentro de las principales ventajas y desventajas de los modelos adaptables de UAV, antes mencionados y especificados, para el año 2023, se encuentran las siguientes [3]:

| Tabla comparativa entre modelos de UAV |   |  |
|--|---|--|
| Modelo                                 | Ventajas  | Desventajas  |
| DJI Matrice 300 RTK                    | Tiempo de vuelo largo<br>Buena gama<br>Cámara impresionante<br>Velocidad máxima rápida                  | Grande y pesado<br>Puede ser difícil de transportar                              |
| Parrot Anafi                           | Tiempo de vuelo largo<br>Rango extendido<br>Velocidad rápida<br>Cámara 4K<br>Campo de visión horizontal | No está disponible fácilmente  |
| DJI Tello Quadcopter                   | Fácil de usar<br>Asequible<br>Buena cámara<br>Pequeño y portátil<br>Programable                         | Tiempo de vuelo corto<br>Alcance limitado  |
| Parrot Mambo Fly Educational Drone     | Ligero y portátil<br>Cámara 4K<br>Fácil de volar<br>Muy duradero  | Tiempo de vuelo corto<br>Alcance limitado<br>Sin GPS u otras funciones avanzadas |
| Sky Viper E1700                        | Pequeño y ágil<br>Muy receptivo   | El tiempo de vuelo es más corto  |
| Bitcraze Crazyflie 2.1                 | Fácil de volar<br>Estable en el aire<br>Buen tiempo de vuelo  | No incluye cámara  |
| Robolink CoDrone                       | Fácil de usar<br>Perfecto para principiantes<br>Se puede utilizar para espectáculos de luces            | Menor tiempo de vuelo<br>Rango más pequeño<br>No incluye cámara                  |
| Kit PlutoX                             | Fácil de configurar y usar<br>Viene con todo lo que necesitas para empezar<br>Ligero y portátil         | La cámara podría ser mejor   |
| Makeblock Airblock Hovercraft Drone    | Precio asequible<br>Fácil de usar<br>Diseño modular<br>Ideal para principiantes                         | No incluye cámara  |
| DJI Tello Iron Man Edition             | Fácil de volar<br>Drone rápido<br>Cámara HD   | Corto alcance  |

## 5. Actividad 5 (A5): Análisis de modelos de UAV

Las características más sobresalientes del drone **DJI Matrice 300 RTK** son su tiempo de vuelo, ya que, a comparación de todos los modelos descritos anteriormente, este dispositivo es el que cuenta con la batería de mayor duración, y alcance del mismo, el cual permite al usuario realizar múltiples actividades, sin la necesidad de preocuparse por la distancia a la que se encuentra dicha persona respecto al drone. Asimismo, la cámara con la que dispone este UAV es de muy alta calidad y velocidad. Sin embargo, dadas sus grandes características, su tamaño y peso son aspectos que no son ampliamente beneficiosos para los diversos usuarios.

Las características más notables del drone **Parrot Anafi**, al igual que el modelo anterior, son su tiempo de vuelo, el cual implica una batería de media duración, y alcance del mismo. Además, la cámara con la que es construido este UAV, es de gran calidad, alta definición, precisión y con un amplio campo de visión horizontal. No obstante, la disponibilidad y acceso a este dispositivo es escaso, aspectos que no son beneficiosos ni rentables para los diversos usuarios.

Las características más distinguidas del drone **DJI Tello Quadcopter** son sus dimensiones y peso, ya que dichos aspectos facilitan, a los usuarios, el uso y transporte del dispositivo. Por su parte, para ser un drone asequible, la cámara con la que dispone este UAV, presenta una resolución media-alta, así como la posibilidad de ser programado. A pesar de sus características anteriores, el tiempo de vuelo y alcance son bastante limitados, características que pueden llegar a perjudicar los diversos usos que los usuarios requieran.

Las características más destacadas del drone **Parrot Mambo Fly Educational Drone** son sus dimensiones y peso, ya que, al igual que el modelo anterior, facilitan su uso, manejo y control. A su vez, dispone de una cámara de alta definición que permite a los usuarios capturar imágenes de gran calidad.

Sin embargo, este UAV dispone de un corto tiempo de vuelo, un alcance limitado y falta GPS incorporado, aspectos que pueden complicar el uso de este dron para actividades específicas.

Las características más sobresalientes del dron **Sky Viper E1700** son su pequeño tamaño y peso ligero, rasgos que hacen a este dispositivo ágil durante su uso. Además, su software y hardware son muy receptivos ante diversas señales que los usuarios le transmitan al mismo, lo que implica una mayor experiencia de calidad. No obstante, aspectos a considerar de este modelo son su tiempo de vuelo y alcance, ya que los mismo, son relativamente cortos.

Las características más notables del dron **Bitcraze Crazyflie 2.1** son sus dimensiones y peso, así como sus diseño, que lo hacen un dron estable que cualquier usuario puede utilizar sin problema alguno. Además, para ser UAV de pequeño tamaño, su alcance es bastante amplio, lo que facilitará diversos tipos de tareas. A pesar de sus características anteriores, este dispositivo cuenta con una baja duración en su tiempo de vuelo y no dispone de una cámara integrada, aspectos que pueden perjudicar diversas tareas.

Las características más distinguidas del dron **Robolink CoDrone** son sus dimensiones y peso, ya que dichos aspectos facilitan su uso y transporte. Por su parte, este dispositivo es ideal para aquellos usuarios que disponen de poca experiencia con el uso de drones ya que el manejo del mismo es bastante intuitivo. Sin embargo, el tiempo de vuelo y alcance de este UAV son aspectos a considerar ya que dichos no son rasgos no son sobresalientes, así como el hecho de que este dron no disponga de una cámara incorporada.

Las características más destacadas del dron **Kit PlutoX** son sus dimensiones y peso, ya que facilitan su uso, manejo y control, así como su debido transporte. A su vez, el software es sencillo de configurar y emplear lo que mejora la experiencia que brinda los diferentes usuarios que adquieran dicho dispositivo.

No obstante, la captura de imágenes, a través de la cámara integrada, son de una definición media-alta, características que debe ser considerada, en caso de ser necesario.

Las características más sobresalientes del drone **Makeblock Airblock Hovercraft Drone** son sus dimensiones y peso, así como su diseño modular, ya que facilitan su uso y control. Además, dada su facilidad de manipulación y precio asequible, es ideal para usuarios principiantes en el uso de los drones. A pesar de sus características anteriores, el tiempo de vuelo y alcance no son muy amplios y este UAV no dispone de una cámara integrada, rasgo que debe ser valorado en que se de que se necesite realizar la captura de imágenes.

Las características más notables del drone **Bitcraze Crazyflie 2.1** son sus dimensiones y peso, así como alta resolución de su cámara, la cual permite capturar imágenes de alta calidad y definición. Asimismo, su diseño y uso permite que este dispositivo sea fácil de volar y manejar. Sin embargo, algunos aspectos a considerar son su tiempo de vuelo y alcance, ya que los mismos son relativamente cortos.

## 6. Actividad 6 (A6): Justificación del modelo seleccionado de UAV

Con base en los modelos previamente mencionados, especificados y comparados, el modelo a elegir, para llevar a cabo el proyecto en cuestión, será el drone **Bitcraze Crazyflie 2.0**. Dicha selección fue tomada con base en los siguientes aspectos:

- Disponibilidad en el Área Académica de Ingeniería en Computadores.
- Precio asequible.
- Pequeño tamaño.
- Uso sencillo.



- Fácil transporte.
- Programable.

Es importante destacar que el modelo descrito anteriormente, corresponde a la versión **2.1** del drone en cuestión. Sin embargo, las diferencias más significativas entre dicho modelo y el UAV **2.0**, son las siguientes:

| Tabla comparativa entre el drone Bitcraze Crazyflie 2.0 y Bitcraze Crazyflie 2.1 |  |  |
|--|--|--|
| Especificación   | Bitcraze Crazyflie 2.0 [4]   | Bitcraze Crazyflie 2.1 [5]   |
| Especificación IMU   | Giroscopio de 3 ejes (MPU-9250)<br>Acelerómetro de 3 ejes (MPU-9250)<br>Magnetómetro de 3 ejes (MPU-9250)<br>Sensor de presión de alta precisión (LPS25H)  | Acelerómetro/giroscopio de 3 ejes (BMI088)<br>Sensor de presión de alta precisión (BMP388)   |
| Especificación de radio  | Amplificador de radio de 20 dBm probado a >1 km de rango LOS con Crazyradio PA<br>Compatibilidad con Bluetooth Low Energy con clientes iOS y Android disponibles (probado en iOS 7.1+ y Android 4.4+)<br>Radio compatible con versiones anteriores de Crazyflie Nano y Crazyradio originales | Alcance aumentado con amplificador de radio de 20 dBm, probado a >1 km de alcance LOS con Crazyradio PA (depende del medio ambiente)<br>Compatibilidad con Bluetooth Low Energy con clientes iOS y Android disponibles<br>Soporte dual con antena de chip integrada y conector U.FL. |

Tal y como se puede observar en la tabla anterior, las diferencias más significativas, según la especificación IMU, entre ambos modelos, son las versiones de sus diferentes giroscopios, acelerómetros y sensores de precisión. Por otra parte, el modelo **2.1** depende, en cierto modo, del medio ambiente para que su amplificador de radio opere de la manera esperada. Asimismo, la versión **2.0** dispone de una determinada restricción de compatibilidad con diversos sistemas operativos de dispositivos móviles, limitante que el drone **2.1** no posee.

Además, el modelo **2.0**, es compatible con versiones anteriores de Crazyflie Nano y Crazyradio originales, característica que el UAV **2.1** no dispone. Finalmente, la versión más reciente cuenta con un soporte de antena dual con antena de chip integrada y conector U.FL, aspecto que su predecesor carece.

A pesar de las múltiples diferencias entre un modelo y otro, ambas versiones disponen de las mismas capacidades y habilidades programables para llevar a cabo los diversos comandos de software involucrados en el proyecto en cuestión.

## **7. Actividad 7 (A7): Investigación de sistemas em- potrados adaptables a un UAV**

Dentro de los posibles sistemas empotrados que pueden ser adaptables a un UAV, se encuentran las siguientes:

1. NVIDIA Jetson Nano Developer Kit es una computadora pequeña y potente que es capaz de ejecutar múltiples redes neuronales en paralelo para aplicaciones de clasificación de imágenes, detección de objetos, segmentación, procesamiento de voz, entre muchas otras. Dicho dispositivo dispone de un gran poder y capacidad computacional, así como un fácil manejo de mismo, con tan solo un requerimiento energético de 5V [6].
2. Raspberry Pi 4 Model B es una pequeña computadora de escritorio de doble pantalla con cerebros robóticos, centro de hogar inteligente, centro de medios, núcleo de IA en red, controlador de fábrica y entre muchos otros [7].
3. Raspberry Pi 3 Model A+ consiste en una pequeña computadora que dispone de un procesador de cuatro núcleos de 1 bits y 4,64 GHz, LAN inalámbrica de doble banda, Bluetooth 4.2/BLE en el mismo formato mecánico que la Raspberry Pi 1 Model A+ [8].

4. Raspberry Pi 3 Model B+ es un pequeño ordenador de placa única de tercera generación con un procesador de cuatro núcleos de 1,4 GHz y 64 bits, LAN inalámbrica de doble banda, Bluetooth 4.2/BLE, Ethernet más rápida y compatibilidad con Power-over-Ethernet (con HAT PoE independiente) [9].
5. Raspberry Pi 3 Model B es un pequeño ordenador de placa única con LAN inalámbrica y conectividad Bluetooth [10].
6. Raspberry Pi Zero 2W consiste en una pequeña computadora que cuenta con un procesador ARM Cortex-A64 de cuatro núcleos y 53 bits con velocidad de reloj de 1GHz y 512MB de SDRAM, Zero 2 es hasta cinco veces más rápido que el Raspberry Pi Zero original. Dicho dispositivo es ideal para una gama de aplicaciones domésticas inteligentes y otros proyectos de IoT. Desde cámaras de seguridad hasta altavoces Bluetooth [11].
7. Raspberry Pi Zero W consiste en una pequeña computadora que dispone de una LAN inalámbrica y conectividad Bluetooth [12].
8. Raspberry Pi Zero es una pequeña computadora cuyo tamaño es la mitad del Model A+ pero con el doble de utilidad y potencia [13].
9. MakerFocus ESP32 LoRa Development Board consiste en una pequeña computadora que se caracteriza por disponer de un procesador de doble núcleo Ten-silica LX6, con velocidad de reloj de 240MHz, potencia de cálculo de hasta 600DMIPS, chip incorporado 520 KB SRAM, transceptor Wi-Fi 802.11 b / g / N HT40, Bluetooth de modo dual integrado [18].
10. KeeYees ESP32S ESP32 es un pequeño ordenador que cuenta con 38 pines GPIO, Wi-Fi de modo dual de 2.4 GHz y chips Bluetooth ESP-WROOM-32, así como la tecnología de baja potencia de 40 nm [19].

## 8. Actividad 8 (A8): Investigación de características principales por modelo de sistema empujado

Dentro de las principales especificaciones de los sistemas empujados, antes mencionados, se encuentran las siguientes:

### 1. NVIDIA Jetson Nano Developer Kit [6]

- GPU Maxwell de 128 núcleos.
- CPU ARM A57 de cuatro núcleos @ 1.43GHz.
- Memoria LPDDR4 de 64GB y 4bits a 25,6GB/s.
- Almacenamiento microSD (no incluida).
- Codificación de vídeo 4K @ 30 — 4x1080p @ 30 — 9x720p @ 30 (H.264/H.265).
- Decodificación de vídeo 4K @ 60 — 2x4K @ 30 — 8x1080p @ 30 — 18x720p @ 30 (H.264/H.265).
- Cámara 2x carriles MIPI CSI-2 DPHY.
- Conectividad Gigabit Ethernet, M.2 Clave E.
- Monitor HDMI y puerto de pantalla.
- USB 4x USB 3.0, USB 2.0 Micro-B.
- Otros GPIO, I2C, I2S, SPI, UART.
- Dimensiones de 69 mm x 45 mm, conector de borde de 260 pines.

### 2. Raspberry Pi 4 Model B [7]

- Broadcom BCM2711, Quad core Cortex-A72 (ARM v8) SoC de 64bits @ 1.8GHz.
- SDRAM LPDDR1-2 de 4GB, 8GB, 4GB u 3200 GB (según el modelo).
- 2,4GHz y 5,0GHz IEEE 802.11ac inalámbrico, Bluetooth 5.0, BLE.

- Gigabit Ethernet.
- 2 puertos USB 3.0; 2 puertos USB 2.0.
- Cabezal GPIO estándar Raspberry Pi de 40 pines (totalmente compatible con placas anteriores).
- 2 puertos micro-HDMI de  $4 \times$  (admite hasta 60kpj).
- Puerto de pantalla MIPI DSI de 2 carriles.
- Puerto de cámara MIPI CSI de 2 carriles.
- Puerto de audio estéreo y vídeo compuesto de 4 polos.
- H.265 (decodificación 4kp60), H264 (decodificación 1080p60, codificación 1080p30).
- OpenGL ES 3.1, Vulkan 1.0.
- Ranura para tarjeta Micro-SD para cargar el sistema operativo y el almacenamiento de datos.
- 5VCC mediante conector USB-C (mínimo 3A).
- 5VCC a través del cabezal GPIO (mínimo 3A).
- Alimentación a través de Ethernet (PoE) habilitada (requiere HAT PoE independiente).
- Temperatura de funcionamiento: 0 – 50 grados C ambiente.

### 3. Raspberry Pi 3 Model A+ [\[8\]](#)

- Broadcom BCM2837B0, SoC Cortex-A53 (ARMv8) de 64bits @ 1.4GHz.
- SDRAM LPDDR512 de 2 MB.
- LAN inalámbrica IEEE 802.11b/g/n/ac de 5,802GHz y 11GHz, Bluetooth 4.2/BLE.
- Cabezal GPIO extendido de 40 pines.
- HDMI de tamaño completo.
- Puertos USB 2.0 individuales.

- Puerto de cámara CSI para conectar una cámara Raspberry Pi.
- Puerto de pantalla DSI para conectar una pantalla táctil Raspberry Pi.
- Salida estéreo de 4 polos y puerto de vídeo compuesto.
- Puerto Micro SD para cargar su sistema operativo y almacenar datos.
- Entrada de alimentación de CC de 5V / 2.5A.

#### 4. Raspberry Pi 3 Model B+ [\[9\]](#)

- Broadcom BCM2837B0, SoC Cortex-A53 (ARMv8) de 64bits @ 1.4GHz.
- SDRAM LPDDR1 de 2GB.
- LAN inalámbrica IEEE 802.11b/g/n/ac de 5,802GHz y 11GHz, Bluetooth 4.2, BLE.
- Gigabit Ethernet a través de USB 2.0 (rendimiento máximo de 300Mbps).
- Cabezal GPIO extendido de 40 pines.
- HDMI de tamaño completo.
- 4 puertos USB 2.0.
- Puerto de cámara CSI para conectar una cámara Raspberry Pi.
- Puerto de pantalla DSI para conectar una pantalla táctil Raspberry Pi.
- Salida estéreo de 4 polos y puerto de vídeo compuesto.
- Puerto Micro SD para cargar su sistema operativo y almacenar datos.
- Entrada de alimentación de CC de 5V / 2.5A.
- Compatibilidad con alimentación a través de Ethernet (PoE) (requiere HAT PoE independiente).

#### 5. Raspberry Pi 3 Model B [\[10\]](#)

- Quad Core 1.2GHz Broadcom BCM2837 64bit CPU.
- 1GB de RAM.
- LAN inalámbrica BCM43438 y Bluetooth Low Energy (BLE) a bordo.

- Ethernet base 100.
- GPIO extendido de 40 pines.
- 4 puertos USB 2.
- Salida estéreo de 4 polos y puerto de vídeo compuesto.
- HDMI de tamaño completo.
- Puerto de cámara CSI para conectar una cámara Raspberry Pi.
- Puerto de pantalla DSI para conectar una pantalla táctil Raspberry Pi.
- Puerto Micro SD para cargar su sistema operativo y almacenar datos.
- Fuente de alimentación Micro USB conmutada mejorada de hasta 2,5A.

#### 6. Raspberry Pi Zero 2W [11]

- CPU Arm Cortex-A1 de cuatro núcleos y 64bits a 53GHz.
- SDRAM de 512MB.
- 2.4GHz 802.11 b / g / n LAN inalámbrica.
- Bluetooth 4.2, Bluetooth Low Energy (BLE), antena integrada.
- Puerto mini HDMI® y puerto micro USB On-The-Go (OTG).
- Ranura para tarjeta microSD.
- Conector de cámara CSI-2.
- Huella de cabezal de 40 pines compatible con HAT (sin rellenar).
- H.264, decodificación MPEG-4 (1080p30); Codificación H.264 (1080p30).
- Gráficos OpenGL ES 1.1, 2.0.
- Alimentación micro USB.
- Video compuesto y reinicio de pines a través de puntos de prueba de soldadura.
- Dimensiones de 65mm x 30mm.

## 7. Raspberry Pi Zero W [\[12\]](#)

- LAN inalámbrica 802.11 b/g/n.
- Bluetooth 4.1.
- Bluetooth de baja energía (BLE).
- 1GHz, CPU de un solo núcleo.
- 512MB de RAM.
- Puerto mini HDMI y puerto micro USB On-The-Go (OTG).
- Alimentación micro USB.
- Cabezal de 40 pines compatible con HAT.
- Vídeo compuesto y encabezados de reinicio.
- Conector de cámara CSI.

## 8. Raspberry Pi Zero [\[13\]](#)

- CPU de un solo núcleo de 1GHz.
- 512MB de RAM.
- Puerto Mini HDMI.
- Puerto Micro USB OTG.
- Alimentación micro USB.
- Cabezal de 40 pines compatible con HAT.
- Vídeo compuesto y encabezados de reinicio.
- Conector de cámara CSI (solo v1.3).

## 9. MakerFocus ESP32 LoRa Development Board [\[18\]](#)

- Microprocesador: ESP32-S3FN8 (frecuencia hasta 240 MHz).
- SX1262 LoRa nodo chip.
- Con buen diseño de circuito de RF y diseño de baja potencia.



- Interfaz USB tipo C con un regulador de voltaje completo, protección ESD, protección contra cortocircuitos, blindaje RF y otras medidas de protección.
- Interfaz de batería SH1.25-2 integrada, sistema integrado de gestión de batería de litio.
- WiFi integrado, LoRa, Bluetooth tres conexiones de red, Wi-Fi a bordo, antena de resorte metálico Bluetooth dedicada a 2.4GHz, interfaz IPEX reservada ( U.FL ) para uso LoRa.
- La pantalla OLED de matriz de puntos de 0.96 pulgadas y 128 \* 64 se puede usar para mostrar información de depuración, batería y otra información.
- Chip integrado de puerto serie CP2102 USB a serie, conveniente para descargar programas e imprimir información de depuración.
- Apoya el entorno de desarrollo Arduino.
- Proporcionamos la biblioteca Arduino del protocolo ESP32 + LoRaWAN, este es un protocolo LoRaWAN estándar que puede comunicarse con cualquier puerta de enlace LoRa que ejecute el protocolo LoRaWAN.

#### 10. KeeYees ESP32S ESP32 [\[19\]](#)

- 38 pines GPIO.
- Compatible con placa de pan.
- Compatible con el programa Lua.
- Soporte de tres modos: AP, STA y AP + STA.
- Wi-Fi de modo dual de 2.4GHz.
- Chips Bluetooth ESP-WROOM-32.
- Tecnología de baja potencia de 40 nm.
- WLAN (802.11bgn).
- CPU con 2 núcleos Tensilica LX6.

- Reloj de hasta 240 MHz.
- 512 kilobytes SRAM en un solo chip de microcontrolador.

## **9. Actividad 9 (A9): Realización de tabla comparativa entre modelos de sistemas empotrados**

Dentro de las principales ventajas y desventajas de los sistemas empotrados adaptables, antes mencionados y especificados, se encuentran las siguientes:

| Tabla comparativa entre modelos de UAV |   |   |
|--|---|---|
| Modelo                                 | Ventajas  | Desventajas   |
| NVIDIA Jetson Nano Developer Kit [14]  | El mejor rendimiento de IA de su clase<br>Consumo de energía conservador<br>Fácil de poner en marcha  | Sin codificador de vídeo NVENC integrado<br>La velocidad de reloj del procesador limita un poco el rendimiento en ciertos escenarios  |
| Raspberry Pi 4 Model B [15]            | SoC más rápido<br>RAM más rápida<br>Soporte de salida de video 4K para dos monitores<br>Hosts USB 3.0<br>Verdadero Gigabit Ethernet<br>Compatible con ciertos accesorios de Raspberry Pi como PoE HAT | No hay soporte para accesorios como estuches<br>Raspberry Pi 2/3/3 B+<br>Todavía no hay compatibilidad con el módulo eMMC<br>Requiere sistemas operativos basados en Debian Buster<br>Gran tamaño |
| Raspberry Pi 3 Model A+ [15]           | Procesador de cuatro núcleos<br>LAN inalámbrica<br>Bluetooth<br>Cabezal GPIO de 40 pines<br>Puerto HDMI de tamaño completo<br>Mucha variedad de sistemas operativos                                   | Bajos 512 MB de RAM<br>Carece de Ethernet   |
| Raspberry Pi 3 Model B+ [15]           | 1 GB de RAM<br>Compatibilidad con alimentación a través de Ethernet<br>Enorme biblioteca de accesorios<br>Inmensa elección de sistema operativo<br>Poderoso<br>Asequible                              | Gran tamaño   |
| Raspberry Pi 3 Model B [16]            | WIFI y Bluetooth integrados en la placa<br>La Raspberry Pi más rápida hasta el momento<br>Procesador de cuatro núcleos de 64 bits   | Se necesita mucha energía y se necesita una fuente de alimentación de 2.5A<br>La configuración puede ser imponente para algunas personas  |

|  |   |  |
|--|---|--|
| Raspberry Pi Zero 2W [17]                    | Reemplazo directo del Pi Zero<br>Compatible con todos los complementos de GPIO<br>Alimentación micro USB  | 512 MB de RAM es demasiado poco para aplicaciones de escritorio<br>Lento, incluso cuando está overclockeado<br>GPIO no viene pre-soldado   |
| Raspberry Pi Zero W [15]                     | Bajo costo<br>Excelente compatibilidad con sistemas operativos<br>Toneladas de accesorios<br>Asequible<br>Wi-Fi<br>Bluetooth  | Baja RAM<br>Sin Ethernet<br>El cabezal GPIO de 40 pines requiere soldadura   |
| Raspberry Pi Zero [15]                       | Toneladas de sistemas operativos compatibles con Raspberry Pi Zero<br>Un montón de accesorios<br>Bajo consumo de energía<br>Ultra asequible<br>Factor de forma pequeño                              | Sin redes inalámbricas (Bluetooth, Wi-Fi)<br>Carece de Ethernet<br>Sin puerto HDMI de tamaño completo<br>Necesidad de soldar un cabezal GPIO de 40 pines<br>Un puerto micro USB para datos |
| MakerFocus ESP32 LoRa Development Board [18] | Potente y versátil<br>Cuenta con pines GPIO para leer sensores a través de I2C u otros protocolos comunes<br>Equipado con una pantalla transparente, enchufe de batería y administración de energía | Mala documentación disponible<br>No es compatible con Arduino<br>No funciona con VS Code / Platform IO<br>No hay bibliotecas disponibles para la placa                                     |
| KeeYees ESP32S ESP32 [19]                    | Precio asequible<br>Puede trabajar con varios firmware y lenguajes de programación  | Pinout confuso<br>Sin opción de antena externa<br>Falta de documentación   |

## 10. Actividad 10 (A10): Análisis de modelos de sistemas empotrados

Las características más sobresalientes del sistema empotrado **NVIDIA Jetson Nano Developer Kit** son su bajo y controlado consumo de energía, así como su sencilla utilización y manejo. Además, es considerado como el mejor sistema de IA de su clase, por ser capaz de ejecutar grandes redes neuronales en paralelo para aplicaciones de clasificación de imágenes, detección de objetos, segmentación y procesamiento de voz. Sin embargo, dicho sistema empotrado no cuenta con un codificador integrado de vídeo y la velocidad de reloj de su procesador, en algunos casos, puede limitar el rendimiento. Por lo que, los aspectos anteriores deben ser considerados según la aplicación que se desea desarrollar.

Las características más notables del sistema empotrado **Raspberry Pi 4 Model B** son su soporte de vídeo 4K, conexión Ethernet y puertos USB 3.0. Además, los SoC y RAM de alta velocidad son de gran utilidad para aplicaciones de cerebros robóticos, hogares inteligentes, centros de medios, núcleo de IA en red y controlador de fábrica. No obstante, dicho sistema empotrado carece de soporte para accesorios de otros modelos de Raspberry Pi, aún no dispone de compatibilidad con el módulo eMMC y solo es compatible con sistemas operativos basados en Debian Buster. Por lo que, los aspectos anteriores deben ser considerados, con base en las necesidades que dispongan.

Las características más distinguidas del sistema empotrado **Raspberry Pi 3 Model A+** son su gran procesador de cuatro núcleos, puerto HDMI de tamaño completo y cabezal GPIO de 40 pines. Asimismo, se caracteriza por soportar gran variedad de sistemas operativos, aspecto que resulta conveniente para ser utilizado en una gran cantidad de proyectos y actividades. A pesar de sus características anteriores, dicho dispositivo carece de una amplia memoria RAM y conexión Ethernet. Por lo que, los aspectos anteriores deben ser considerados, según sea necesario.

Las características más destacadas del sistema empotrado **Raspberry Pi 3 Model B+** son su amplia memoria RAM, gran biblioteca de accesorios y compatibilidad con alimentación a través de Ethernet. A pesar de ser un dispositivo cuyo precio es asequible, su poder y rendimiento son características ampliamente valoradas por gran cantidad de usuarios. Sin embargo, un aspecto a considerar, en caso de que el dispositivo necesite ser transportado, es su gran tamaño. Por lo que, dicha característica debe ser considerada según la aplicación que se desea desarrollar.

Las características más sobresalientes del sistema empotrado **Raspberry Pi 3 Model B** son su poderoso procesador de cuatro núcleos de 64 bits junto con una amplia conexión WIFI y Bluetooth, que se encuentran integrados en la placa única. Por su parte, dicho dispositivo es considerado como la Raspberry Pi más rápida hasta el momento, característica que es altamente preferida por los desarrolladores. No obstante, dado el gran poder de procesamiento, la energía requerida para alimentar esta pequeña computadora, es muy alta y su respectiva configuración puede llegar a ser complicada. Por lo que, los aspectos anteriores deben ser considerados, con base en las necesidades que dispongan.

Las características más notables del sistema empotrado **Raspberry Pi Zero 2W** son su reemplazo directo de la Raspberry Pi Zero, la cual corresponde a un modelo anterior de la misma, su compatibilidad con todos los complementos de GPIO y su cómoda alimentación micro USB. Por su parte, dicho sistema embebido es de gran utilidad en aplicaciones domésticas inteligentes y otros proyectos de IoT, desde cámaras de seguridad hasta altavoces Bluetooth. A pesar de sus características anteriores, carece de una amplia memoria RAM, aspecto que vuelve ralentiza el dispositivo, y los puertos de GPIO no vienen pre-soldados de fábrica. Por lo que, los aspectos anteriores deben ser considerados, según sea necesario.

Las características más distinguidas del sistema empotrado **Raspberry Pi Zero W** son su excelente compatibilidad con una gran variedad de sistemas operativos, conexiones Wi-Fi y Bluetooth. A pesar de ser un dispositivo cuyo precio es asequible y de bajo costo, posee una alta disponibilidad con múltiples accesorios. Sin embargo, carece de una amplia memoria RAM, conexión vía Ethernet y el cabezal GPIO de 40 pines requiere soldadura manual. Por lo que, dichas características deben ser consideradas según la aplicación que se desea desarrollar.

Las características más destacadas del sistema empotrado **Raspberry Pi Zero** son alta compatibilidad con una gran variedad de sistemas operativos, bajo consumo de energía y pequeñas dimensiones. A pesar de ser un dispositivo cuyo precio es bastante asequible, posee una alta disponibilidad con múltiples accesorios. No obstante, no cuenta con conexiones Bluetooth, Wi-Fi, Ethernet, carece de puerto HDMI de tamaño completo y el cabezal GPIO de 40 pines no viene soldado de fábrica. Por lo que, los aspectos anteriores deben ser considerados, con base en las necesidades que dispongan.

Las características más sobresalientes del sistema empotrado **MakerFocus ESP32 LoRa Development Board** son potencia y versatilidad de uso, así como la disposición de pines GPIO para leer sensores a través de I2C u otros protocolos comunes. Además, se encuentra equipado con una pantalla transparente, enchufe de batería y administración de energía. A pesar de sus características anteriores, dicho dispositivo carece de una amplia documentación, bibliotecas y compatibilidad con la plataforma de Arduino y VS Code. Por lo que, los aspectos anteriores deben ser considerados, según sea necesario.

Las características más notables del sistema empotrado **KeeYees ESP32S ESP32** son capacidad de trabajar con diversos firmwares y lenguajes de programación, así como su precio, el cual es bastante asequible, característica ideal para una gran cantidad de usuarios y desarrolladores. Sin embargo, dicho dispositivo, cuenta con un pinout confuso, carece de antena externa y documentación accesible.

Por lo que, dichas características deben ser consideradas según la aplicación que se desea desarrollar.

## 11. Actividad 11 (A11): Justificación del modelo seleccionado de sistema empotrado

En la siguiente tabla, se muestra una comparación directa de cada uno de los sistemas empotrados antes descritos con las diversas características del drone Bitcraze CrazyFlie 2.0:

| Tabla comparativa de los sistemas empotrados con las características del drone Bitcraze CrazyFlie 2.0 (parte 1) |                                  |                        |                         |                         |                        |
|---|----------------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| Características del drone Bitcraze CrazyFlie 2.0  | NVIDIA Jetson Nano Developer Kit | Raspberry Pi 4 Model B | Raspberry Pi 3 Model A+ | Raspberry Pi 3 Model B+ | Raspberry Pi 3 Model B |
| Bluetooth LE  | ✗                                | ✓                      | ✓                       | ✓                       | ✓                      |
| micro-USB   | ✓                                | ✗                      | ✓                       | ✓                       | ✓                      |
| USB   | ✓                                | ✓                      | ✓                       | ✓                       | ✓                      |
| EEPROM  | ✗                                | ✓                      | ✓                       | ✓                       | ✓                      |
| Vcc 3.0V  | ✓                                | ✓                      | ✓                       | ✓                       | ✓                      |
| I2C   | ✓                                | ✓                      | ✓                       | ✓                       | ✓                      |
| SPI   | ✓                                | ✓                      | ✓                       | ✓                       | ✓                      |
| UART  | ✓                                | ✓                      | ✓                       | ✓                       | ✓                      |

| Tabla comparativa de los sistemas empotrados con las características del drone Bitcraze CrazyFlie 2.0 (parte 2) |                      |                     |                   |            |         |
|---|----------------------|---------------------|-------------------|------------|---------|
| Características del drone Bitcraze CrazyFlie 2.0  | Raspberry Pi Zero 2W | Raspberry Pi Zero W | Raspberry Pi Zero | MakerFocus | KeeYees |
| Bluetooth LE  | ✓                    | ✓                   | ✗                 | ✓          | ✓       |
| micro-USB   | ✓                    | ✓                   | ✓                 | ✓          | ✓       |
| USB   | ✓                    | ✗                   | ✗                 | ✗          | ✗       |
| EEPROM  | ✗                    | ✗                   | ✗                 | ✗          | ✗       |
| Vcc 3.0V  | ✗                    | ✗                   | ✗                 | ✓          | ✓       |
| I2C   | ✗                    | ✗                   | ✗                 | ✓          | ✓       |
| SPI   | ✗                    | ✗                   | ✗                 | ✓          | ✓       |
| UART  | ✗                    | ✗                   | ✗                 | ✗          | ✗       |



Ahora bien, con base en la información anterior, se puede observar que los tres modelos potenciales a ser seleccionados como sistema empotrado adaptable al drone Bitcraze Crazyflie 2.0 son:

- Raspberry Pi 3 Model A+.
- Raspberry Pi 3 Model B+.
- Raspberry Pi 3 Model B.

Por lo que, en la siguiente tabla, se destacan las diferencias principales entre dichos modelos:

| Tabla comparativa de los sistemas empotrados Raspberry Pi 3 Model A+, Raspberry Pi 3 Model B+ y Raspberry Pi 3 Model B |  |  |  |
|--|--|--|--|
| Características  | Raspberry Pi 3 Model A+  | Raspberry Pi 3 Model B+  | Raspberry Pi 3 Model B   |
| Procesador   | Broadcom BCM2837B0, Cortex-A53 64-bit SoC @ 1.4GHz   | Broadcom BCM2837B0, Cortex-A53 64-bit SoC @ 1.4GHz   | Broadcom BCM2387, Cortex-A53 Quad-Core @ 1.2GHz  |
| Memoria  | 512MB LPDDR2 SDRAM   | 1GB LPDDR2 SDRAM   | 1GB LPDDR2   |
| Conectividad   | 2.4GHz and 5GHz IEEE 802.11.b/g/n/ac wireless LAN, Bluetooth 4.2/BLE<br>1 × USB 2.0 port                             | 2.4GHz and 5GHz IEEE 802.11.b/g/n/ac wireless LAN, Bluetooth 4.2, BLE Gigabit Ethernet over USB 2.0<br>4 × USB 2.0 ports | 802.11 b/g/n Wireless LAN and Bluetooth 4.1<br>4 × USB 2.0 ports   |
| Video y sonido   | 1 × full size HDMI<br>MIPI DSI display port<br>MIPI CSI camera port<br>4 pole stereo output and composite video port | 1 × full size HDMI<br>MIPI DSI display port<br>MIPI CSI camera port<br>4 pole stereo output and composite video port     | 1 × HDMI<br>Composite RCA<br>Display Serial Interface (DSI)<br>15-pin MIPI Camera Serial Interface (CSI-2) |
| Alimentación   | 5V/2.5A DC via micro USB<br>5V DC via GPIO header  | 5V/2.5A DC via micro USB<br>5V DC via GPIO header<br>Power over Ethernet (PoE)-enabled                                   | 5V/2.5A DC via micro USB<br>5V DC via GPIO header  |

Por lo tanto, con base en toda la información brindada y comprada anteriormente, el modelo seleccionado como sistema empotrado adaptable para el drone Bitcraze CrazyFlie 2.0 es la **Raspberry Pi 3 Model B+**. La selección anterior se debe principalmente a las siguientes razones:

- La Raspberry Pi 3 Model B+, al igual que la Raspberry Pi 3 Model A+, dispone de un procesador que opera a una mayor frecuencia que el de la Raspberry Pi 3 Model B.

- La Raspberry Pi 3 Model B+ dispone de la misma cantidad de almacenamiento que la Raspberry Pi 3 Model B, pero se caracteriza por ser SDRAM, mientras que Raspberry Pi 3 Model A+ opera con la mitad de memoria.
- La Raspberry Pi 3 Model B+ es la única que dispone de conexión Ethernet.
- La Raspberry Pi 3 Model B+ dispone de Bluetooth 4.2, mientras que la Raspberry Pi 3 Model B cuenta con Bluetooth 4.1.
- La Raspberry Pi 3 Model B+, al igual que la Raspberry Pi 3 Model B, dispone de 4 puertos USB 2.0, mientras que la Raspberry Pi 3 Model A+ solo cuenta con uno de ellos.
- La Raspberry Pi 3 Model B+, al igual que la Raspberry Pi 3 Model B, dispone de una salida estéreo de 4 polos y un puerto de vídeo compuesto, mientras que la Raspberry Pi 3 Model A+ no cuenta con dicha característica.
- La Raspberry Pi 3 Model B+ es la única que dispone de alimentación a través de Ethernet.

## **12. Actividad 12 (A12): Investigación de características modulares adaptables a un UAV**

En el desarrollo del proyecto en cuestión, se busca diseñar un UAV modular que cuente con la conectividad necesaria para poder ser conectado a diversos dispositivos como cámaras, GPS, micrófonos y sensores infrarrojos. Por lo que, a continuación, se detallan las posibles interfaces en la cuales dichos periféricos pueden ser conectados.

Dentro de las principales interfaces que emplean los sistemas empotrados para hacer uso de diversas cámaras, se encuentran las siguientes:

**MIPI CSI-2** es una de las interfaces de visión integrada más comunes, cuyo ancho de banda es de 300 MB/s, el cual es ideal para sistemas de visión integrados de alto rendimiento. La longitud máxima del cable MIPI CSI-2 es inferior a 30 cm, lo que resuelve los desafíos de diseño de aplicaciones que implican una mayor diferencia de distancia entre la cámara y los sistemas de procesamiento. Además, dispone de cuatro carriles de datos de imagen que son capaces de 1,5 Gb/s. MIPI CSI-2 es más rápido que USB 3.0. Es un protocolo eficiente y confiable que puede manejar vídeo de 1080p a 8K y más. Asimismo, utiliza menos recursos de la CPU debido a los procesadores multinúcleo. Pero en algunos casos, si no hay un controlador para la cámara disponible, se puede incurrir en costos de desarrollo adicionales [29].

La interfaz **USB 3.0** tiene un ancho de banda mucho mayor que la interfaz USB 2.0, hasta 360 MB/s. Para sistemas de visión integrados, USB 3.0 se puede integrar fácilmente con el estándar de visión USB3. La funcionalidad plug-and-play de USB 3.0 reduce drásticamente los costes de desarrollo. También permite que los dispositivos de visión integrados se intercambien con facilidad, lo que facilita el reemplazo de una cámara dañada. El USB tiene conectores grandes y cableado bastante rígido que puede no ser ideal para algunos componentes de visión integrados compactos. La mayoría de las cámaras de visión USB integradas aprovechan la interfaz USB 3.1 Gen 1 para proporcionar hasta 5 Gbit/s de ancho de banda de datos de imagen entre la cámara y el sistema host. USB 3.1 Gen 1 puede simplificar el diseño del sistema al suministrar hasta 4,5 W de potencia a una cámara de visión integrada [29].

La interfaz Ethernet, que ahora se implementa principalmente como **Gigabit-Ethernet (GigE)**, ofrece la flexibilidad más amplia en términos de ancho de banda, longitud de cable y funcionalidad multicámara. Esta interfaz puede transferir velocidades de datos de hasta 120 mb/s con una longitud máxima de cable de hasta 100 m y se puede integrar en todas las aplicaciones de procesamiento de imágenes. GigE proporciona hasta 1 Gbit/s de ancho de banda de datos de imagen y está disponible con un blindaje robusto [29].

**GMSL** es una conexión punto a punto de varios gigabits que se dirige predominantemente al espacio automotriz. Una interfaz GMSL puede transportar video de alta velocidad, datos de control bidireccional y alimentación a través de un solo cable coaxial. Las cámaras GMSL se pueden colocar a 15 metros de distancia del procesador host a través de un cable coaxial y aún admiten menos latencia y una alta velocidad de fotogramas. GMSL admite multihilo y protocolos agregados como Ethernet y DisplayPort a través de un solo enlace [29].

Dentro de las principales interfaces que emplean los sistemas empotrados para hacer uso de diversos micrófonos, se encuentran las siguientes:

La interfaz **Pulse Density Modulation (PDM)** se utiliza para convertir un voltaje de señal analógica en un flujo digital modulado por densidad de pulso de un solo bit. Las señales PDM se parecen más a una onda longitudinal que a la onda transversal estereotipada que se asocia con el audio, pero son una representación digital de una señal analógica [30].

**Inter-IC Sound (I<sup>2</sup>S)** es otra opción de interfaz popular. Al igual que con PDM, es una interfaz de doble canal, pero ahí es donde termina la similitud. El protocolo I<sup>2</sup>S es un protocolo serie de tres hilos con un reloj, datos y línea de "selección de palabras". En este caso, "word select" indica el canal, derecho o izquierdo, con el que se asocian los datos que se transmiten actualmente. A diferencia de PDM, I<sup>2</sup>S es una señal totalmente digital que no necesita ser codificada o decodificada [30].

Los sistemas integrados con una interfaz **USB Host** pueden utilizar completamente dispositivos de audio como micrófonos, altavoces, auriculares, sistemas de conferencia o adaptadores USB a audio. Esto hace que una interfaz de USB host sea aún más valiosa en un sistema integrado. Al igual que todas las demás clases de dispositivos compatibles, el audio se agrega en tiempo de ejecución, manteniendo la huella de memoria al mínimo, agregando solo el código al sistema como se desee.

Una conexión USB Host simple y económica es todo lo que se necesita para agregar capacidades de audio [31].

Por lo general, la principal interfaz que emplean los sistemas empotrados para hacer uso de diversos módulos GPS y diferentes tipos de sensores infrarrojos (IR), corresponde al pin genérico **GPIO**, el cual dispone de una gran variedad de pines y conexiones que se adaptan a numerosas finalidades. Para el caso de módulos GPS, los mismos requieren de una conexión de cuatro pines: VCC (voltaje de alimentación), GND (tierra), Tx (transmisor) y Rx (receptor), para realizar el cálculo de la posición geográfica actual [32]. Para el caso de sensores infrarrojos, los mismos requieren de una conexión de tres pines: VCC (voltaje de alimentación), GND (tierra) y OUT (indicador de movimiento), para detectar alguna señal de movimiento [33]. Por lo que, dichos tipos diferentes de módulos, pueden ser fácilmente conectados a través de dicha interfaz.

## 13. Actividad 13 (A13): Descripción de propuesta de personalización del UAV seleccionado

Dadas las diversas las interfaces anteriores para cada uno de los módulos previamente mencionados, las posibles propuestas de desarrollo que permitirán modularizar el drone Bitcraze CrazyFlie 2.0, son las siguientes:

1. La primera propuesta consiste en el desarrollo de los siguientes módulos:

- Cámara: interfaces USB y MIPI CSI-2.
- Micrófono: interfaces USB y I<sup>2</sup>S.
- GPS y sensor IR: interfaz GPIO.

2. La segunda propuesta consiste en el desarrollo de los siguientes módulos:

- Cámara: interfaces USB y GigE.
- Micrófono: interfaces USB y PDM.

- GPS y sensor IR: interfaz GPIO.

3. La tercera propuesta consiste en el desarrollo de los siguientes módulos:

- Cámara: interfaces USB, MIPI CSI-2 y GigE.
- Micrófono: interfaces USB, I<sup>2</sup>S y PDM
- GPS y sensor IR: interfaz GPIO.

En general, cada una de las propuestas anteriores, planteando los diversos módulos que serán desarrollados durante la elaboración del proyecto en cuestión. Por lo que, la únicas diferencias entre una propuesta y otra, son las diferentes interfaces que serán codificadas para el sistema empujado seleccionado, el cual corresponde a la Raspberry Pi 3 Model B+, ya que, como fue explicado anteriormente, dicho dispositivo comparte la mayor cantidad de características con el drone Bitcraze CrazyFlie 2.0.

## Referencias

- [1] "The Top 25 Drone Companies in 2023". Drone U™. <https://www.thedroneu.com/blog/top-drone-companies/> (accedido el 27 de julio de 2023).
- [2] "About Bitcraze". Bitcraze <https://www.bitcraze.io/about/bitcraze/> (accedido el 14 de setiembre de 2023).
- [3] R. Gross. "10 Best Programmable Drones — Updated List July 2023". Propel RC. <https://www.propelrc.com/best-programmable-drones/> (accedido el 27 de julio de 2023).
- [4] "Datasheet Crazyflie 2.0 - Rev 2". Bitcraze. [https://www.bitcraze.io/documentation/hardware/crazyflie\\_2\\_0/crazyflie\\_2\\_0-datasheet.pdf](https://www.bitcraze.io/documentation/hardware/crazyflie_2_0/crazyflie_2_0-datasheet.pdf) (accedido el 27 de julio de 2023).
- [5] "Datasheet Crazyflie 2.1 - Rev 3". Bitcraze. [https://www.bitcraze.io/documentation/hardware/crazyflie\\_2\\_1/crazyflie\\_2\\_1-datasheet.pdf](https://www.bitcraze.io/documentation/hardware/crazyflie_2_1/crazyflie_2_1-datasheet.pdf) (accedido el 27 de julio de 2023).
- [6] "Jetson Nano Developer Kit". NVIDIA Developer. <https://developer.nvidia.com/embedded/jetson-nano-developer-kit> (accedido el 28 de julio de 2023).
- [7] "Buy a Raspberry Pi 4 Model B". Raspberry Pi. <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/> (accedido el 28 de julio de 2023).
- [8] "Buy a Raspberry Pi 3 Model A+". Raspberry Pi. <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-a-plus/> (accedido el 28 de julio de 2023).
- [9] "Buy a Raspberry Pi 3 Model B+". Raspberry Pi. <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/> (accedido el 28 de julio de 2023).
- [10] "Buy a Raspberry Pi 3 Model B". Raspberry Pi. <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b/> (accedido el 28 de julio de 2023).



- [11] "Buy a Raspberry Pi Zero 2 W". Raspberry Pi. <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-zero-2-w/> (accedido el 28 de julio de 2023).
- [12] "Buy a Raspberry Pi Zero W". Raspberry Pi. <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-zero-w/> (accedido el 28 de julio de 2023).
- [13] "Buy a Raspberry Pi Zero". Raspberry Pi. <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-zero/> (accedido el 29 de julio de 2023).
- [14] "Jetson Orin Nano Developer Kit Review • magazin Mehatronika". magazin Mehatronika. <https://www.magazinmehatronika.com/en/jetson-orin-nano-developer-kit-review/> (accedido el 29 de julio de 2023).
- [15] M. Long. Raspberry Pi 4 vs Raspberry Pi 3 B+ vs Raspberry Pi 3 A+ vs Raspberry Pi Zero: Which Raspberry Pi Should You Buy". Maker Projects Community & Hobbyist Electronics Store - Electromaker. <https://www.electromaker.io/blog/article/raspberry-pi-3-vs-raspberry-pi-3-a-vs-raspberry-pi-zero-which-raspberry-pi-should-you-buy> (accedido el 29 de julio de 2023).
- [16] Raspberry Pi 3 Model B". TechSpot. <https://www.techspot.com/products/desktop-pcs/raspberry-pi-3-model-b.131030/> (accedido el 29 de julio de 2023).
- [17] L. Pounder. Raspberry Pi Zero 2 W Review: The Long Awaited Sequel". Tom's Hardware. <https://www.tomshardware.com/reviews/raspberry-pi-zero-2-w-review> (accedido el 29 de julio de 2023).
- [18] "MakerFocus ESP32 Development Board SX1262 863 928MHz Costa Rica — Ubuy". Ubuy Costa Rica. <https://www.ubuy.cr/es/product/EQEKKB2-esp32-lora-32-v2-esp32-development-board-wifi-bluetooth-lora-dual-core-240mhz-cp2102-with-0-96inch-o> (accedido el 31 de julio de 2023).
- [19] "KeeYees ESP32S ESP32 Development Board 2.4 GHz Dual Algeria — Ubuy". Ubuy Algeria. <https://www.algeria.ubuy.com/en/product/DMAIFC8-keeye-es-development-board-2-4-ghz-dual-core-wlan-wifi-bluetooth-2-in-1>

- [-microcontroller-esp-wroom-32-chip-cp2102-for-esp32-for-arduino-2-pcs](#) (accedido el 31 de julio de 2023).
- [20] Jetson Nano - eLinux.org. (2023, 2 de enero). eLinux.org. [https://elinux.org/Jetson\\_Nano#Ports\\_.26\\_Interfaces](https://elinux.org/Jetson_Nano#Ports_.26_Interfaces) (accedido el 7 de agosto de 2023).
- [21] Raspberry Pi Documentation - Raspberry Pi hardware. Raspberry Pi. <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberry-pi.html> (accedido el 7 de agosto de 2023).
- [22] Raspberry Pi Trading Ltd. (2021). Raspberry Pi 4 Computer Model B. Raspberry Pi Datasheets. [https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-product-brief.pdf?\\_gl=1\\*qboekq\\*\\_ga\\*MTc4MjA0MjUyNi4xNjkxNDYxNDI3\\*\\_ga\\_22FD70LWDS\\*MTY5MTQ2MTQyOC4xLjEuMTY5MTQ2MjIwMy4wLjAuMA](https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-product-brief.pdf?_gl=1*qboekq*_ga*MTc4MjA0MjUyNi4xNjkxNDYxNDI3*_ga_22FD70LWDS*MTY5MTQ2MTQyOC4xLjEuMTY5MTQ2MjIwMy4wLjAuMA) (accedido el 7 de agosto de 2023).
- [23] Raspberry Pi Foundation. (2018). Raspberry Pi 3 Model A+. Raspberry Pi Datasheets. [https://datasheets.raspberrypi.com/rpi3/raspberry-pi-3-a-plus-product-brief.pdf?\\_gl=1\\*9gowb1\\*\\_ga\\*MTc4MjA0MjUyNi4xNjkxNDYxNDI3\\*\\_ga\\_22FD70LWDS\\*MTY5MTQ2MTQyOC4xLjEuMTY5MTQ2Mzc0O0S4wLjAuMA](https://datasheets.raspberrypi.com/rpi3/raspberry-pi-3-a-plus-product-brief.pdf?_gl=1*9gowb1*_ga*MTc4MjA0MjUyNi4xNjkxNDYxNDI3*_ga_22FD70LWDS*MTY5MTQ2MTQyOC4xLjEuMTY5MTQ2Mzc0O0S4wLjAuMA) (accedido el 7 de agosto de 2023).
- [24] Raspberry Pi Foundation. Raspberry Pi 3 Model B+. Raspberry Pi Datasheets. [https://datasheets.raspberrypi.com/rpi3/raspberry-pi-3-b-plus-product-brief.pdf?\\_gl=1\\*1u2w3to\\*\\_ga\\*MTc4MjA0MjUyNi4xNjkxNDYxNDI3\\*\\_ga\\_22FD70LWDS\\*MTY5MTQ2MTQyOC4xLjEuMTY5MTQ2NDA1NS4wLjAuMA](https://datasheets.raspberrypi.com/rpi3/raspberry-pi-3-b-plus-product-brief.pdf?_gl=1*1u2w3to*_ga*MTc4MjA0MjUyNi4xNjkxNDYxNDI3*_ga_22FD70LWDS*MTY5MTQ2MTQyOC4xLjEuMTY5MTQ2NDA1NS4wLjAuMA) (accedido el 7 de agosto de 2023).
- [25] Raspberry Pi 3 Model B. RS Components. <https://us.rs-online.com/m/d/4252b1ecd92888dbb9d8a39b536e7bf2.pdf> (accedido el 7 de agosto de 2023).
- [26] Raspberry Pi (Trading) Ltd. (2021, octubre). Raspberry Pi Zero 2 W. Raspberry Pi Datasheets. [https://datasheets.raspberrypi.com/rpizero2/raspberry-pi-zero-2-w-product-brief.pdf?\\_gl=1\\*u1nyka\\*\\_ga\\*MTc4MjA0MjUyNi4xNjkxNDYxNDI3\\*\\_ga\\_22FD70LWDS\\*MTY5MTQ2MTQyOC4xLjEuMTY5MTQ2NDA1NS4wLjAuMA](https://datasheets.raspberrypi.com/rpizero2/raspberry-pi-zero-2-w-product-brief.pdf?_gl=1*u1nyka*_ga*MTc4MjA0MjUyNi4xNjkxNDYxNDI3*_ga_22FD70LWDS*MTY5MTQ2MTQyOC4xLjEuMTY5MTQ2NDA1NS4wLjAuMA)

yNi4xNjkxNDYxNDI3\*\_ga\_22FD70LWDS\*MTY5MTQ2MTQyOC4xLjEuMTY5MTQ2NDUyOC4wLjAuMA (accedido el 7 de agosto de 2023).

- [27] MakerFocus ESP32 LoRa Development Board WIFI Bluetooth with 0.96inch OLED Display and 2dBi Antenna. MakerFocus. <https://www.makerfocus.com/products/makerfocus-esp32-lora-development-board-wifi-bluetooth-with-0-96inch-oled-display-and-2dbi-antenna-1> (accedido el 7 de agosto de 2023).
- [28] KeeYees ESP32S ESP32 - Placa de desarrollo 2.4 GHz de doble núcleo WLAN WiFi + Bluetooth 2 en 1 Microcontrolador ESP-WROOM-32 Chip para Arduino. Amazon.com. <https://www.amazon.com/KeeYees-Development-Bluetooth-Microcontroller-ESP-WROOM-32/dp/B07QCP2451?th=1> (accedido el 7 de agosto de 2023).
- [29] Maruthaiyan, B. (2021, 12 de julio). How to choose the right interface for an embedded vision system? - e-con Systems. e-con Systems. <https://www.google.com/url?q=https://www.e-consystems.com/blog/camera/technology/how-to-choose-the-right-interface-for-an-embedded-vision-system/&sa=D&source=docs&ust=1691809501746922&usg=AOvVaw3tDSf-aiSvjQKXWeyv5ZI6> (accedido el 9 de agosto de 2023).
- [30] Smoot, J. PDM vs. I<sup>2</sup>S: Comparing Digital Interfaces in MEMS Microphones — CUI Devices. CUI Devices. <https://www.cuidevices.com/blog/pdm-vs-i2s-comparing-digital-interfaces-in-mems-microphones#interface-suitability-for-different-applications> (accedido el 10 de agosto de 2023).
- [31] Kalnoskas, A. (2019, 13 de junio). Audio-class support for USB-Host interfaces. Tips on coding, designing, and embedding with microcontrollers. <https://www.microcontrollertips.com/audio-class-support-usb-host-interfaces/> (accedido el 10 de agosto de 2023).
- [32] Interfacing GPS Module With Raspberry Pi. (2020, 14 de mayo). Autodesk Instructables. <https://www.instructables.com/Interfacing-GPS-Module-W>

[ith-Raspberry-Pi/](#) (accedido el 10 de agosto de 2023).

- [33] Das, D. (2022, 16 de marzo). Interfacing IR Sensor Module with Arduino. Circuit Digest - Electronics Engineering News, Latest Products, Articles and Projects. <https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/interfacing-ir-sensor-module-with-arduino> (accedido el 10 de agosto de 2023).