



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola Superior d'Enginyeries Industrial,
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
MOTION CONTROL AND INDUSTRIAL APPLICATIONS

Estudio, diseño e implementación de un sistema de monitorización basado en dron

Memoria

Autor:
Gorka Unzueta

Director:
Dr. Miguel Delgado

Co-Director:
Dr. Luis Romeral

Trabajo de final de grado para
Grau en Enginyeria en Vehicles Aeroespacials

10 de junio de 2019

Resumen

En este trabajo de final de grado se detalla el estudio y desarrollo de un sistema de monitorización basado en dron. El sistema consta de dos partes, un nodo, que permanece estático en la zona de monitorización y se encarga de la adquisición de señales, y un UAV, que se pilota de manera autónoma hasta la ubicación del nodo y obtiene los datos adquiridos de manera inalámbrica.

Glosario

A	Amperio	m	Metro
ADC	Conversor de analógico a digital	mA	Miliamperio
AHB	Bus avanzado de alto rendimiento	mAh	Miliamperio hora
APB	Bus periférico avanzado	Mbps	Megabits por segundo
bps	Bits por segundo	MHz	Megahercio
CPU	Unidad central de procesamiento	mm	Milímetro
FPU	Unidad de coma flotante	Msp	Millones de muestras por segundo
DAC	Conversor de digital a analógico	mV	Milivoltio
F	Fuerza	mW	Milivatio
GPIO	Entrada/Salida para uso general	μA	Microamperio
GPS	Sistema de posicionamiento global	N	Newton
μW	Microvatio	P	Potencia ideal
h	Hora	P_r	Potencia real
Hz	Hercio	ROM	Memoria de solo lectura
IDE	Entorno de desarrollo integrado	RPM	Revoluciones por minuto
I²C	Circuitos inter-integrados	S	Área
kbps	Kilobits por segundo	SPI	Interfaz de periféricos serie
kg	Kilogramo	SRAM	Memoria estática de acceso aleatorio
kHz	Kilohercios	UART	Transmisor-Receptor Asíncrono Universal
ksp	Miles de muestras por segundo	W	Vatio
LSE	Externo de baja velocidad		

Índice general

1. Objetivo principal	7
2. Motivación	8
3. Alcance y requisitos	10
4. Tareas	12
5. Introducción	14
5.1. Dron	14
5.2. IoT	16
5.2.1. Microprocesador	16
5.2.2. Adquisición	16
5.2.3. Comunicaciones	17
6. Dron	19
6.1. Diseño	19
6.1.1. Clasificación de drones	19
6.1.2. Selección de la configuración	22
6.1.3. Composición quadróptero	22
6.1.4. Resumen diseño elegido	25
6.2. Selección de componentes	27
6.2.1. Chasis	27
6.2.2. Controlador de vuelo	28
6.2.3. Motores	29
6.2.4. Hélices	31
6.2.5. Variadores	31
6.2.6. Batería	32
6.3. Resumen componentes dron	32
6.4. Configuración software	33
7. Comunicaciones	35
7.1. Selección protocolo de comunicaciones	35
7.2. Selección del módulo transceptor	36
7.3. Integración comunicaciones	37
8. Microprocesador	41
8.1. Especificaciones	41
8.2. Integración	43

8.2.1. Microprocesador montado en el dron	43
8.2.2. Microprocesador montado en el nodo	50
8.3. Consumo	53
9. Validación	56
9.1. Pruebas de laboratorio	56
9.1.1. Pruebas comunes a todos los dispositivos	56
9.1.2. Pruebas sobre el dron	56
9.1.3. Pruebas sobre el microprocesador	57
9.1.4. Pruebas sobre las comunicaciones	58
9.2. Pruebas de campo	59
10.Revisión del presupuesto	60
11.Impacto ambiental	61
12.Futuro desarrollo	62
13.Conclusiones	63
Bibliography	65

Índice de figuras

2.1. Esquema sistema monitorización Dron-Nodo	9
4.1. Cronograma de las tareas del proyecto	13
5.1. Dron Mq-9 Reaper [1]	14
5.2. Dron DJI Inspire 2 [2]	15
6.1. Distintos ejemplos de UAVs de ala fija [3]	19
6.2. Ejemplo dron con rotor principal y rotor antipar [4]	20
6.3. Esquema UAV singlecopter [3]	20
6.4. Ejemplo dron con dos rotores coaxiales [5]	21
6.5. Diferentes configuraciones de drones multirrotores [3]	21
6.6. Ejemplo dron híbrido [6]	22
6.7. Ejemplo chasis para quadrópteros [7]	23
6.8. Esquema fuerzas sobre un rotor obtenido de los apuntes de la asignatura <i>Disseny d'helicopters i aeronaus diverses</i>	24
6.9. Chasis S500-PCB [8]	28
6.10. Paquete de productos del controlador [8]	29
6.11. Motor EMAX MT2213 [8]	31
6.12. Variador XRotor Micro BLHeli S 30A [8]	31
6.13. Batería Gens ACE 5000 mAh [8]	33
6.14. Interfaz del Mission Planner para el diseño de misiones	34
6.15. Puertos capaces de actuar como salidas digitales (Pin 50- Pin 55) [9] .	34
7.1. Módulo transceptor C8CKIT-142 [10]	37
7.2. Diagrama de bloques del transceptor C8CKIT-142 [10]	37
7.3. Configuración del BLE en el IDE PSoc Creator	38
7.4. Configuración HCI en el IDE PSoC Creator	39
7.5. <i>Pinout</i> del módulo en el IDE PSoC Creator	39
8.1. NUCLEO_L496ZG [11]	41
8.2. Diagrama matriz de buses AHB [11]	42
8.3. Diagrama circuito STM32L496 [11]	44
8.4. Distribución puertos microprocesador nodo en STM32CubeMX	45
8.5. Protocolo UART [10]	45
8.6. Configuración de los relojes del microprocesador del dron en STM32CubeMX	46
8.7. Diagrama del algoritmo del microprocesador del dron	49
8.8. Configuración de los relojes del microprocesador del nodo en STM32CubeMX	51
8.9. Diagrama del algoritmo del microprocesador del nodo parte 1	54

8.10. Diagrama del algoritmo del microprocesador del nodo parte 2	55
9.1. Debugger del programa Keil mostrando el vector con los valores adquiridos	58
9.2. Debugger del programa Keil mostrando el vector con los valores recibidos por bluetooth	59

Índice de cuadros

6.1.	Opciones con sus características de chasis de quadróptero	27
6.2.	Resultado OWA chasis quadróptero	28
6.3.	Precio paquete de productos del controlador	29
6.4.	Motores candidatos	30
6.5.	Resultado OWA motores quadróptero	30
6.6.	Baterías candidatas	32
6.7.	Resultado OWA selección de batería	32
6.8.	Composición final del dron	33
7.1.	Protocolos candidatos [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18]	35
7.2.	Resultado OWA selección de protocolo de comunicación	36
8.1.	Consumo microprocesador	53
10.1.	Presupuesto general	60

1 | Objetivo principal

Estudio de las etapas de diseño y desarrollo de un sistema basado en dron para la monitorización de zonas remotas. El trabajo pretende abordar la integración de un equipo de adquisición de datos montado sobre dron. El sistema debe ser capaz de, bajo unas indicaciones predefinidas de ruta, desplazarse para la adquisición de datos a través de comunicación inalámbrica con dispositivos y medidas climatológicas locales.

2 | Motivación

Actualmente, el sector de mercado dedicado a los UAVs se encuentra en pleno auge. Se estima que hoy en día el precio de este mercado se eleva a 100 mil millones de dólares estadounidenses[19] y, aunque la mayor parte va destinada a fines militares, en los sectores civil y comercial se está desarrollando en gran medida. Dentro de la gran variedad de posibilidades que ofrece el uso de UAVs, este proyecto busca aprovechar su potencial para la monitorización, creando un sistema IoT comunicándolo con un nodo, basado en un microprocesador, de manera inalámbrica.

El uso de microprocesadores ofrece una gran variedad de funciones, entre ellas adquisición de datos o señales, a los cuales se les puede realizar un acondicionamiento posterior para finalmente tratarlos mediante un algoritmo que permite extrapolar la información útil de la adquisición. Además, otra de las funcionalidades que presentan los microprocesadores es la gestión de un protocolo de comunicaciones mediante el acoplamiento a un módulo transceptor.

El objetivo de este proyecto trata de unificar las mejores calidades de cada una de estas partes. Por un lado, aprovechar la maniobrabilidad y alcance de un dron para acceder a zonas remotas de manera autónoma con relativa facilidad y, por el otro lado, incorporar el uso de microprocesadores para la adquisición, acondicionamiento y tratamiento de las señales que proporcionen diferentes sensores que requiera la situación, para finalmente transmitirlos al usuario.

Como muestra la figura 2.1 el sistema de monitorización constará de un nodo, que se encontrará en la zona que se desee monitorizar adquiriendo información de manera periódica, y de el dron, que cuando se necesite se mandará de manera autónoma a la posición del nodo donde, mediante el transceptor, almacenará la información que el nodo haya obtenido y tratado. Este sistema ofrece la posibilidad de realizar un historial de las variables captadas por los sensores y recogerlo únicamente cuando sea necesario. Usando un protocolo de comunicaciones y microprocesador de bajo consumo se pretende desarrollar un nodo con una larga esperanza de vida, en cuanto a suministro de energía se refiere, de manera que el mantenimiento sea mínimo. Esto ofrece una gran utilidad para la recolección de grandes cantidades de información, de manera que sea necesario acercarse con un dron para realizar la transmisión.



Figura 2.1: Esquema sistema monitorización Dron-Nodo

3 | Alcance y requisitos

En este proyecto se estudiará el desarrollo de un sistema de monitorización basado en dron, y la realización de un prototipo capaz de mostrar, en cierta medida, el potencial del sistema que se presenta en el trabajo, elaborando un nodo, basado en microprocesador, capaz de adquirir señales de algún tipo de sensor y enviarlas, mediante el protocolo de comunicaciones que se crea más conveniente, a otro microprocesador montado sobre un vehículo aéreo no tripulado capaz de actuar de manera autónoma. Así mismo, estudiar el impacto ambiental del proyecto.

Para realizar el estudio será necesario elegir la configuración de dron que se crea más conveniente para la elaboración del prototipo y, en caso de no encontrar un vehículo predeterminado que cumpla las especificaciones deseadas, seleccionar los componentes adecuados. Será necesario un UAV capaz de realizar una ruta predeterminada de manera autónoma, además de disponer de una salida digital que servirá como interrupción del microprocesador en la que empezará el algoritmo. La autonomía del vehículo se deberá encontrar entre los 15 y 30 minutos, lo suficiente para realizar una ruta corta hasta el nodo, mantenerse en la zona durante un tiempo definido y volver al inicio.

En cuanto al microprocesador, será proporcionado por el director del proyecto. Se tratará de un microcontrolador ARM, modelo STM32L496ZG, donde será necesario programar un algoritmo capaz de adquirir, tratar y enviar señales analógicas a un transceptor de comunicaciones en el caso del nodo y, en el caso del microprocesador montado en el UAV, programar un algoritmo capaz de despertar al recibir una entrada digital y controlar un transceptor de manera que solicite los datos del nodo. Se buscará disminuir el consumo al máximo, en medida de lo posible, aumentando la esperanza de vida del nodo con una fuente de alimentación corriente como puede ser una pila.

Para la comunicación entre el nodo y el dron se elegirá el protocolo más adecuado, teniendo en cuenta variables como la distancia y el consumo, y se elegirá un módulo capaz de usar esa tecnología, para desempeñar la función de transmisión. Se deberá configurar el módulo para comunicarse con el procesador mediante un puerto serie, como puede ser el UART, y conectarse con el otro módulo de manera inalámbrica transmitiendo la información necesaria de un dispositivo a otro.

Finalmente, se integrarán los diferentes componentes elegidos, elaborando un prototipo funcional, por lo que se realizarán diferentes pruebas de validación, tanto en el laboratorio como pruebas de campo, para corroborar el funcionamiento de los dispositivos. Así como una resolución del proyecto valorando la viabilidad y uti-

CAPÍTULO 3. ALCANCE Y REQUISITOS

alidad de este, en función al presupuesto y su impacto ambiental entre otras variables.

4 | Tareas

A continuación, se mostraran las diferentes tareas necesarias para la realización del trabajo:

- Estudio y selección de la configuración de dron más adecuada.
- Selección del vehículo predeterminado más adecuado o, en su ausencia, los componentes más adecuados.
- Estudio y selección del protocolo de comunicaciones más adecuado.
- Selección del módulo de comunicaciones más adecuado.
- Programación del módulo.
- Desarrollo e integración del algoritmo del microprocesador montado en el nodo.
- Desarrollo e integración del algoritmo del microprocesador montado en el dron.
- Integración del UAV y configuración.
- Validación de los algoritmos de los microprocesadores.
- Validación de las comunicaciones.
- Validación de el funcionamiento del vehículo.
- Estudio del presupuesto del proyecto.
- Estudio del impacto ambiental del proyecto.

En la figura 4.1 se muestra un cronograma con las tareas mencionadas.

Id.	Nombre de tarea	Comienzo	Fin	Duración	feb. 2019			mar. 2019			abr. 2019			may. 2019			jun. 2019	
					17/2	24/2	3/3	10/3	17/3	24/3	31/3	7/4	14/4	21/4	28/4	5/5	12/5	19/5
1	Estudio y selección de la configuración de dron más adecuada.	25/02/2019	04/03/2019	1,2s														
2	Selección del vehículo predeterminado más adecuado o, en su ausencia, los componentes más adecuados.	04/03/2019	07/03/2019	,8s														
3	Estudio y selección del protocolo de comunicaciones más adecuado.	08/03/2019	15/03/2019	1,2s														
4	Selección del módulo de comunicaciones más adecuado.	18/03/2019	22/03/2019	1s														
5	Programación del módulo de comunicaciones.	25/03/2019	27/03/2019	,6s														
6	Desarrollo e integración del algoritmo del microprocesador montado en el nodo.	27/03/2019	05/04/2019	1,6s														
7	Desarrollo e integración del algoritmo del microprocesador montado en el dron.	08/04/2019	17/04/2019	1,6s														
8	Integración del UAV y configuración.	18/04/2019	24/04/2019	1s														
9	Validación de los algoritmos de los microprocesadores.	25/04/2019	03/05/2019	1,4s														
10	Validación de las comunicaciones.	06/05/2019	15/05/2019	1,6s														
11	Validación de el funcionamiento del vehículo.	16/05/2019	22/05/2019	1s														
12	Estudio del presupuesto del proyecto.	27/05/2019	31/05/2019	1s														
13	Estudio del impacto ambiental del proyecto.	03/06/2019	07/06/2019	1s														

Figura 4.1: Cronograma de las tareas del proyecto

5 | Introducción

5.1. Dron

Un dron, o UAV, se define como cualquier tipo de vehículo aéreo no tripulado. En las últimas décadas el avance tecnológico alrededor de los drones ha sido abrumador, desde los primeros UAVs que consistían en cometas con cámaras, usados para tomar imágenes del campo de batalla en la guerra hispano-americana, hasta a día de hoy que se pueden encontrar drones con fines tanto de ocio como militares, capaces de volar durante horas de forma autónoma. [20]

Se estima que actualmente el consumo de drones se eleva a 100 mil millones de dólares en todo el mundo. Podemos separar esta industria en tres categorías según sus fines: por un lado, los drones con fines de defensa y militares que ocuparían un 70 % del total del consumo, por otro lado, drones centrados en el comercio, ocupando un 13 % y, en tercer lugar, drones para consumidores con el 17 % restante. [19]

En cuanto a los drones militares, es donde podemos encontrar una mayor variedad de UAVs, desde alas fijas con envergaduras de 39 metros hasta multirrotores más pequeños que un colibrí. Por ejemplo, dentro de los drones militares más avanzados encontramos el “MQ-9 Reaper”, se trata de un ala fija de unos 1600 kilogramos en vacío con un MTOW (*Maximum Take Off Weight*) de 4700 kg. Es capaz de volar a 15000 metros de altura durante más de 10 horas. [1]



Figura 5.1: Dron Mq-9 Reaper [1]

De todas formas, el dron que busca estudiar y desarrollar este proyecto entraría en la categoría de dron comercial. Este tipo de UAVs, según Nivedit Majumdar [21], se desarrolla principalmente en varios sectores. Por un lado, se desarrollan drones

en el sector de la agricultura que permiten monitorizar, mediante sensores climatológicos y captación de imágenes, los campos de manera rápida y accesible. También aparece el uso de drones para la inspección de estructuras y como método de respuesta en caso de desastre natural, ya que ofrece mucha maniobrabilidad. Además, se usa también en la minería y para la filmación de medios audiovisuales. Se puede observar que todos los sectores aprovechan los puntos fuertes del dron, permite llegar a sitios de difícil acceso y tomar imágenes desde una posición privilegiada.

En cuanto al mercado de este tipo de vehículos encontramos tres grandes competidores, el más importante es DJI, compañía china, que se mantiene líder controlando más del 70 % del mercado [22], seguido de Parrot y 3DRobotics. El mayor consumidor es Estados Unidos, ocupando el 35 % del total de gastos en drones, seguido de Europa (30 %) y China (15 %).

Según una encuesta realizada en 2017 [23] se pueden encontrar datos bastante interesantes sobre el uso de este tipo de drones comerciales. Dicha encuesta se centra en el uso de drones para sensorización remota, lo que entraría en la misma categoría que el proyecto que se propone realizar. Los resultados muestran que la gran mayoría de los propietarios de un dron se dedican a la investigación y además algunos granjeros empiezan a usarlos, lo cual es muy coherente teniendo en cuenta la gran subida de la influencia de los UAVs en el sector agrícola que en esta misma encuesta se coloca primero como campo de aplicación de los drones. También cabe apreciar que la mayoría de los UAVs usados para sensorizar se tratan de multirrotores.

Uno de los UAVs más avanzado de estas características es el Inspire 2, se trata de un multirrotor, quadcoptero, enfocado para ser usado como cámara permite volar a velocidades de hasta 94 km/h durante casi media hora. Tiene un alcance de 7 km y permite transmitir el video a tiempo real. Cuenta, además, con diferentes sensores de proximidad para evitar colisiones desde cualquier ángulo volando de manera inteligente. Su precio se encuentra sobre los 3400€. [2]



Figura 5.2: Dron DJI Inspire 2 [2]

5.2. IoT

Un IoT se entiende como la conectividad de internet a dispositivos físicos y objetos cotidianos. Actualmente, los dispositivos IoT están tomando gran importancia en el campo de la monitorización medioambiental, usando sensores es posible monitorizar infinidad de variables como la calidad del agua, o propiedades del suelo o atmosféricas, el proyecto realizado en este informe se sitúa en esta categoría.

Según el artículo de J.K. Hart [24], el uso de IoT para monitorización del medio ambiente provocará una revolución al sector gracias a la sensorización remota, previendo el desarrollo de redes a gran escala capaces de monitorizar amplias zonas a lo largo del planeta. Este campo ha visto un gran desarrollo en los últimos años y se prevé que siga aumentando viene dado gracias a la mejora en comunicaciones inalámbricas, tecnologías como Zigbee o BLE permiten transferencia de datos sin cables con un consumo energético realmente bajo comparado con las tecnologías anteriores.

5.2.1. Microprocesador

En cuanto al nodo, este será basado en un microprocesador. Cuando se habla de un microprocesador se refiere a un circuito integrado complejo donde, mediante núcleos físicos o lógicos, es capaz de realizar las operaciones y algoritmos deseados; suelen ser la parte central de un sistema informático. Se componen de diferentes elementos, como por ejemplo registros, memorias de alta velocidad y poca capacidad, o puertos, que permiten comunicar al procesador con otros elementos, además de unidades de memoria, como bien pueden ser flash o caché, y unidades aritméticas, que calculan operaciones lógicas. [25]

Estos procesadores se agrupan en diferentes categorías según su propiedades. Primero, se pueden agrupar según su arquitectura, se encuentran microprocesadores de 16, 32 y 64 bits donde el número de bits indica el ancho del bus de datos, de direcciones y el tamaño de los registros de la CPU y la ALU del procesador, la velocidad del reloj varía en función de cada procesador aunque en arquitecturas de más bits se observan frecuencias mayores, desde frecuencias bajas de 4,7 MHz en procesadores de 16-bit hasta 66 GHz en algunos de 64-bit. [26] También se clasifican en las siguientes categorías, según el modo de ejecutar las instrucciones:

- *Complex Instruction Set Computer* (CISC). Las instrucciones ejecutan diferentes operaciones de bajo nivel.
- *Reduced Instruction Set Computer* (RISC). Las instrucciones son mas simples y diseñada para ser realizadas rápidamente.
- *Explicitly Parallel Instruction Computing* (EPIC). Permiten ejecutar intrucciones en paralelo mediante compiladores.

5.2.2. Adquisición

Dentro de la gran variedad de procesadores que ofrece el mercado, en el proyecto se usa un microprocesador con arquitectura ARM, se trata de una arquitectura

RISC, de 32-bit. Uno de los módulos más importantes que poseen algunos de estos microprocesadores, que para el objetivo del estudio es de suma importancia, son los módulos ADC, siglas de *Analogic to Digital Converter*, estos módulos son capaces de realizar una adquisición de una señal analógica e interpretarla en el lenguaje digital, esto permite entender los valores de tensión proporcionados por los sensores e asociarlos a la magnitud física correspondiente.

Existen diferentes tipos de ADC, a continuación se muestran algunos.

- **Flash.** Utiliza diversos comparadores en paralelo, cada uno asignado a un rango. Este tipo de ADC permite tiempos de adquisición muy bajos pero conlleva resoluciones muy bajas, normalmente 8 bits, ya que el precio aumenta el doble con cada bit debido a los complejos circuitos que requiere.
- **Aproximación sucesiva.** Mediante un comparador se va aproximando sucesivamente siguiendo un algoritmo hasta estrechar el valor a la resolución deseada. En este caso se puede ganar velocidad de adquisición sacrificando resolución y a la inversa.
- **Integrador.** Mediante un circuito integrador básico, produce una rampa cargando un condensador hasta que supera la señal de entrada donde empieza a descargarse, conociendo el tiempo de carga y descarga el ADC interpreta el valor de la señal adquirida digitalmente.
- **Comparador de rampa.** El ADC produce una rampa escalonada que aumenta con cada pulso de reloj hasta superar la señal analógica que cae inmediatamente a cero. En el momento que empieza a crecer la rampa también empieza un contador, conociendo los pulsos hasta superar la señal y el incremento con cada pulso, es posible interpretar la señal digitalmente.

Los procesadores también suelen contar con un módulo UART, las siglas significan *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter* y se trata de un dispositivo que se encarga de controlar los puertos y dispositivos serie, es decir, es la unidad que se encarga de la comunicación con otros procesadores o dispositivos mediante señales digitales usando los puertos RX (de recepción) y TX (de transmisión).

5.2.3. Comunicaciones

Finalmente, es necesario realizar algún tipo de comunicación inalámbrica. En este tipo de comunicación emisor y receptor se transmiten información mediante la modulación de ondas que se propagan en el espacio. Para realizar dichas comunicaciones es necesario un módulo transceptor, que debe contar con un transmisor y un receptor además de una antena y el procesador necesario para gestionar los puertos y módulos pertinentes a la tecnología que corresponda. Entre las tecnologías más usadas de comunicación inalámbrica encontramos las siguientes.[27]

- **Zigbee.** Este protocolo de comunicaciones se caracteriza por la transferencia de cantidades reducidas de datos, a distancias próximas pero con un consumo de potencia realmente bajo. El uso de esta tecnología está enfocado a redes personales sobretudo en el sector de la domótica.

- **Wi-fi.** La tecnología esta basada alrededor del protocolo IEEE 802.11 y se usa mayoritariamente en redes inalámbricas locales. Los dispositivos con tecnología Wi-Fi son capaces de conectarse entre ellos y a aparatos conectados mediante Ethernet lo que les permite tener acceso a internet. El rango se encuentra sobre los 30 metros de distancia.
- **Bluetooth LE.** Se trata de una variante del Bluetooth convencional que permite una reducción considerable de consumo, de ahí su nombre (*Bluetooth Low Energy*), manteniendo el rango, que se encuentra entre los 10 y los 100 metros de distancia. Esta tecnología se encuentra presente sobretodo en *smartphones* y entre sus aplicaciones destacan las destinadas a salud, fitness, dispositivos de música y balizas.
- **LoRa.** Su nombre proviene del acrónimo *Long Range* y, como su nombre indica, permite comunicaciones inalámbricas a grandes distancias, superando los 10 kilómetros. Aún así el consumo es considerablemente bajo, en el orden de tecnologías Bluetooth, pero sacrificando velocidad de transmisión, por debajo de los 50 kbps, por lo que la cantidad de bytes que permite transmitir no es demasiado elevada.

Cada una de estas tecnologías presenta unas especificaciones distintas, lo que las hace más favorables o desfavorables según la situación y las condiciones en las que se deban utilizar. Por ello, será conveniente evaluarlas e elegir la más adecuada para el caso que presenta este proyecto.

6 | Dron

6.1. Diseño

Para empezar a definir los elementos claves es importante saber las especificaciones que se esperan del vehículo.

El objetivo es realizar un prototipo, capaz de hacer una pequeña demostración del proceso de monitorización basado en dron. Para ello, lo primero y más importante, es que sea capaz de realizar una ruta sobrevolando una zona. Luego, se requiere que realice esta ruta de manera autónoma y finalmente deberá ser capaz de sincronizarse con todo el sistema. Al ser un prototipo, el desarrollo no incluye una optimización de consumo en el dron ni ser capaz de adquirir unas velocidades concretas ni tener una autonomía específica, simplemente con realizar un pequeño recorrido y adquirir la información de un nodo será suficiente, un vuelo de alrededor de los 15-30 minutos.

Dicho esto, es necesario decidir el tipo de UAV que se desarrollará. Se pueden clasificar en tres grupos según su ala: de ala fija, de ala rotatoria e híbridos.

6.1.1. Clasificación de drones

UAVs de ala fija

Esta categoría está formada por aquellos drones que disponen de sus alas encastradas al fuselaje de manera fija. Se rige por el mismo mecanismo que cualquier avión convencional, el perfil aerodinámico a lo largo del ala produce una diferencia de presión que genera la sustentación. Suelen disponer de una o más hélices perpendiculares al plano longitudinal para producir una fuerza de empuje hacia adelante. En la figura 6.1 podemos observar tres modelos diferentes de UAV de ala fija.



Figura 6.1: Distintos ejemplos de UAVs de ala fija [3]

UAVs de ala rotatoria

En este caso, el mecanismo de sustentación se aproximaría al de un helicóptero en lugar de al de un avión. Estos drones disponen de diferentes palas girando alrededor de uno o más ejes, estas palas se encargarán de generar la sustentación. Dentro de esta categoría se pueden encontrar muchas configuraciones diferentes, por lo que se separan en 5 subcategorías.

Rotor principal y rotor de cola Un rotor principal en la parte superior del fuselaje se encarga de generar la sustentación necesaria para elevar el vehículo, mientras el rotor de cola contrarresta el momento producido por el rotor principal. En la figura 6.2 se puede observar un ejemplo.



Figura 6.2: Ejemplo dron con rotor principal y rotor antipar [4]

Singlecopter Usa solamente un rotor para sustentar y compensa el par mediante alerones. La figura 6.3 muestra un pequeño esquema.

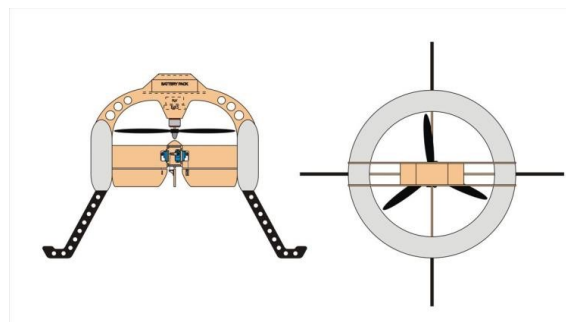


Figura 6.3: Esquema UAV singlecopter [3]

Dos rotores coaxiales Dos rotores, uno encima del otro, se encargan de generar la fuerza vertical. Giran en direcciones contrarias para contrarrestar-se el par mutuamente. Las interferencias entre ambos rotores producen una disminución en la eficiencia. Se puede observar un ejemplo en la figura 6.4.



Figura 6.4: Ejemplo dron con dos rotores coaxiales [5]

Dos rotores tándem En este caso también lleva dos rotores, pero se sitúan en dos extremos del vehículo reduciendo así la interferencia entre ellos. Deberán girar en direcciones opuestas como en la configuración anterior.

Multirrotores Engloba todas las configuraciones con más de dos rotores, pudiendo encontrar tricópteros, quadcópteros, hexacópteros o más. Algunas hélices giran en el sentido positivo mientras otras en el negativo para mantener el equilibrio. El paso de las palas es fijo y se controla el movimiento mediante la velocidad de cada rotor. Esto produce un dron de gran maniobrabilidad y estabilidad. Aun así, usar una gran cantidad de motores incrementa el consumo de la aeronave, lo que conlleva autonomías más reducidas. La figura 6.5 muestra los diferentes tipos de multirrotores.

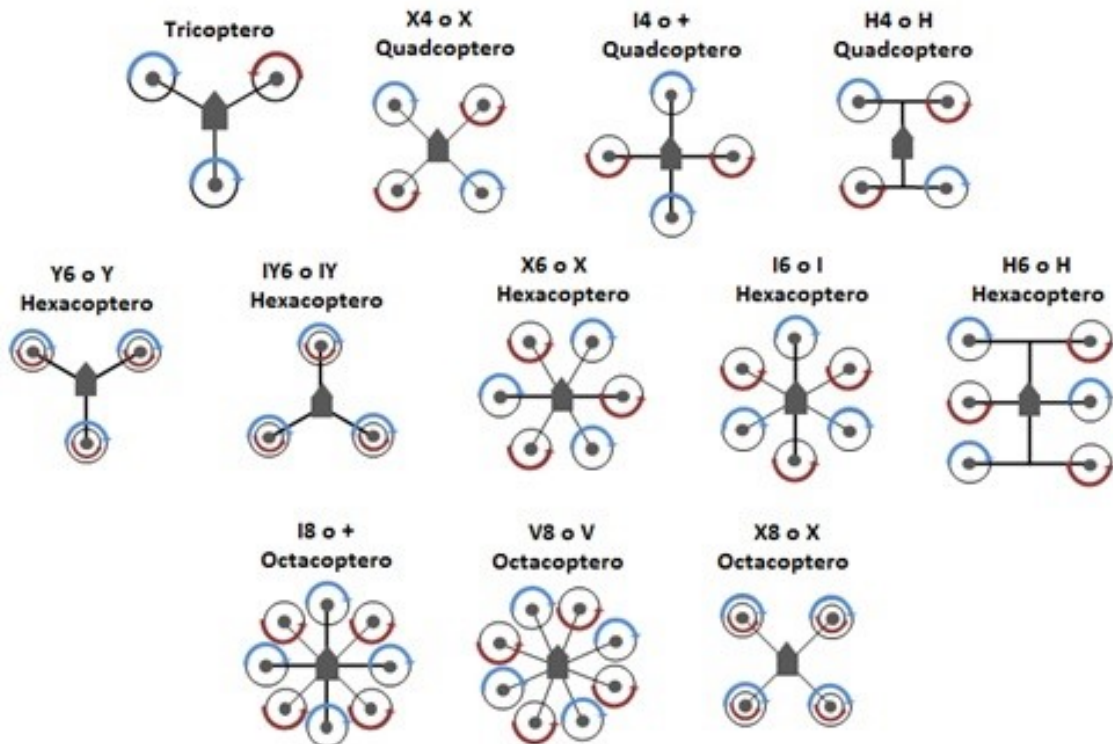


Figura 6.5: Diferentes configuraciones de drones multirrotores [3]

UAVs híbridos

Esta categoría, como su nombre indica, combina las dos categorías anteriores, los UAVs de ala fija y los UAVs de ala rotatoria. Los drones poseen alas rotatorias para poder realizar despegues y aterrizajes de forma vertical y alas fijas encastradas al fuselaje permitiendo ir a altas velocidades de crucero. La figura 6.6 muestra un ejemplo de estos drones.



Figura 6.6: Ejemplo dron híbrido [6]

6.1.2. Selección de la configuración

Teniendo en cuenta la clasificación anterior, lo idóneo para este proyecto es decantarse por un UAV de ala rotatoria, concretamente un multirroto. Esta configuración proporciona una alta maniobrabilidad, lo que permitiría acceder a zonas poco accesibles. También permite mantenerse volando a punto fijo, permitiendo esperar a adquirir los datos del nodo.

Dentro de los multirrotores, se pueden descartar las configuraciones de más de 4 hélices, ya que conlleva un gran número de motores, lo que proporcionaría un aumento de consumo considerable además de un aumento en el coste del vehículo. De esta manera, se desarrollará un quadróptero, que proporciona una estabilidad y maniobrabilidad adecuada y, al tener un número par de motores, el equilibrio de momentos producido por el par de estos es más fácil de equilibrar, imponiendo-se así sobre una configuración trirroto.

Una vez escogida la configuración de quadróptero, la opción de encontrar un dron prefabricado en el mercado conlleva un gasto demasiado elevado, por lo que se definirán los diferentes elementos que componen el vehículo y se adquirirán las diferentes piezas por separado a un distribuidor.

6.1.3. Composición quadróptero

Para desarrollar un quadróptero son necesarios 6 elementos claves:

- Chasis

- Controlador de vuelo
- Motores
- Hélices
- Variadores
- Batería

Chasis

El chasis se podría denominar la estructura del dron. Definirá la geometría y el tamaño por lo que es importante considerar el peso, ya que será el elemento más pesado, y el espacio disponible, pues todos los demás elementos se montarán sobre este. En la figura 6.7 se muestran diferentes tipos de chasis para quadrópteros.



Figura 6.7: Ejemplo chasis para quadrópteros [7]

Controlador de vuelo

El controlador de vuelo funcionará como el cerebro del dron. Consta de un microprocesador y diferentes periféricos en función de cada controlador, normalmente siempre disponen de diferentes giroscopios y acelerómetros para conocer la posición y velocidad del dron mas un barómetro para conocer la altura. Este elemento se encargará de controlar la velocidad de los motores para conseguir el movimiento deseado por el piloto.

Para el dron que buscamos desarrollar es importante que el controlador posea piloto automático, que permitirá definir rutas que se ejecuten de manera automática.

Motores

Los motores se encargarán de convertir la señal emitida por el controlador de vuelo en el movimiento de las hélices. Los más comunes en el sector de los multirrotores son los de corriente continua sin escobillas, estos poseen un inversor para producir generar una corriente continua que excite la bobina produciendo así la rotación. En este tipo de motores se sustituyó el uso de escobillas como conmutadores por conmutadores electrónicos mediante transistores de manera que se reduce en

gran medida el rozamiento [28]. La velocidad de los motores sin escobillas se controla mediante un PWM.

Es importante elegir el motor adecuado para cada UAV, ya que la respuesta a la señal de entrada depende de las especificaciones del motor, esta respuesta se mide en Kv y representa las RPM a las que girará el motor por cada voltio de alimentación sin carga.

Hélices

Usando la potencia transmitida por el motor, generarán las fuerzas necesarias para despegar i desplazar-se. El funcionamiento es el mismo que en las hélices de un helicóptero, un generador o una turbina, debido a su geometría, al mover-se a una cierta velocidad por un fluido, generan una diferencia de presiones entre el intradós y el extradós del perfil en la sección de las palas que provocarán las fuerzas mencionadas.

Para elegir unas hélices adecuadas, hay que tener en cuenta tres parámetros: el número de palas, la longitud de las palas, y el paso. Conociendo estos parámetros y la velocidad de giro del motor es posible calcular la fuerza de sustentación generada según las teorías de elemento de pala y de cantidad de movimiento. La figura 6.8 muestra estos parámetros.

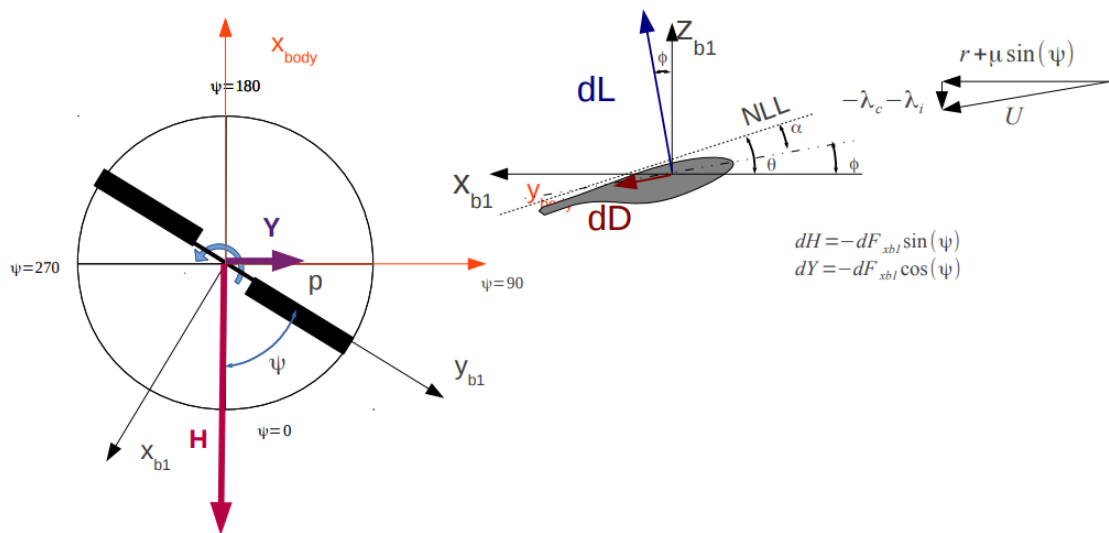


Figura 6.8: Esquema fuerzas sobre un rotor obtenido de los apuntes de la asignatura *Disseny d'helicopters i aeronaus diverses*

Variadores

Los variadores o ESC, del inglés “Electronic Speed Control”, como su nombre indica regula la velocidad del motor. Este se situará entre el controlador de vuelo y

el motor, alimentado directamente de la batería [29].

Ya que se ha decidido usar un motor sin escobillas el variador también deberá ser sin escobillas. Además, se tendrá que elegir el variador en función de la corriente máxima que permita, de manera que no pueda dañar el motor pero proporcione potencia suficiente.

Batería

Fuente de alimentación de todos los componentes electrónicos del dron. Lo más común son baterías Li-Po, que ofrecen una buena relación de capacidad-peso, donde el peso es clave para cualquier vehículo aéreo, y un buen coeficiente de descarga.

Para elegir una batería adecuada hay que tener en cuenta su capacidad y su ratio de descarga para tener una autonomía aceptable, y el número de celdas, ya que determinará el voltaje.

Además de estos elementos claves, también es necesario un módulo de GPS para poder realizar rutas preestablecidas, un módulo de potencia que actuará como convertidor DC/DC y permitirá conectar la batería al controlador de vuelo además de permitir que este conozca el estado de la batería.

6.1.4. Resumen diseño elegido

Conociendo todo esto, ya sabemos los diferentes componentes que necesitaremos para desarrollar el UAV.

- Una estructura de quadróptero, de tamaño micro (peso inferior a 5 kg), donde se apoyarán todos los elementos del dron más los elementos necesarios para la parte de comunicaciones.
- Un controlador de vuelo, con piloto automático, para realizar las rutas programadas, y programable para adecuarlo a nuestras necesidades específicas.
- Cuatro motores sin escobillas, dos que giren en sentido positivo y dos que giren en sentido negativo, para que contrarresten entre ellos el par que produce cada motor. Debemos decidir los motores con los Kv adecuados para el peso que estimemos del vehículo.
- Cuatro conjuntos de hélices, con el número de palas, la longitud y el paso necesarios para producir suficiente fuerza que permita maniobrar el UAV. Dependerán del peso estimado y de las RPM medias de los motores.
- Cuatro variadores sin escobillas, con la corriente máxima adecuada a los motores que se elijan.
- Una batería Li-Po, con las celdas necesarias para alimentar todos los dispositivos electrónicos y el ratio de descarga y capacidad adecuado para una autonomía razonable en función del peso estimado.

- Un módulo GPS, compatible con el controlador de vuelo seleccionado.
- Un módulo de potencia

6.2. Selección de componentes

La selección de todos los componentes a continuación proceden de un mismo distribuidor. Este distribuidor se ha escogido debido a ser el único encontrado capaz de realizar una factura proforma del pedido, lo cual era necesario debido a los métodos de pago disponibles en el momento de realizar el proyecto. Esta decisión conlleva una reducción de posibilidades donde elegir además de un ligero incremento de precio respecto otros distribuidores.

6.2.1. Chasis

Ya se ha especificado que debe ser un chasis de quadróptero, por lo que se realizará un OWA entre los siguientes candidatos, encontrados de un proveedor, que cumplen nuestros requisitos.

Candidato	Precio (€)	Peso (g)	Distancia entre ejes (mm)
QA303	129,00	558	580
S500-PCB	31,90	425	480
TL65S01	147,90	750	600
TL4X001	309,00	1600	960

Cuadro 6.1: Opciones con sus características de chasis de quadróptero

En la tabla 6.1 se muestran diferentes candidatos, con las diferentes propiedades que se tendrán en cuenta para la selección del componente idóneo. A continuación, se deben determinar los pesos de cada una de las variables.

- **Precio: 60.** Como menor sea el precio mayor será su puntuación. Esta propiedad recibe una ponderación de 60 ya que tiene una gran importancia mantener el presupuesto bajo ya que se trata de un prototipo.
- **Peso: 80.** En el sector aeronáutico el peso es un factor clave, por eso esta variable es la más importante, un menor peso conlleva un menor consumo, por lo que el vehículo será mas económico y respetuoso con el medio ambiente.
- **Distancia entre ejes: 20.** Una mayor distancia entre ejes significa mas espacio para colocar los componentes. Ya que el tamaño de los componentes no es muy significativo esta variable recibe la menor ponderación.

Los resultados del OWA se muestran en la tabla 6.2 y se concluye que la mejor opción es S500-PCB, que se muestra en la figura 6.9.

Criterio	QA303		S500-pcb		TL65S01		TL4X001	
	p	pxg	p	pxg	p	pxg	p	pxg
Precio	3,6	216	5	300	3,34	200,4	1	60
Peso	4,55	364	5	400	3,89	311,2	1	80
Tamaño	1,83	36,6	1	20	2	40	5	100
Suma	616,6		720		551,6		240	
OWA	0,77		0,9		0,69		0,3	

Cuadro 6.2: Resultado OWA chasis quadc6ptero



Figura 6.9: Chasis S500-PCB [8]

6.2.2. Controlador de vuelo

La especificaci6n mas importante de la controladora de vuelo es el piloto autom6tico. Actualmente, la gama *Pixhawk* desarrolla los controladores de vuelo con piloto autom6tico punteros en el mercado enfocado al uso civil. Se trata de un proyecto independiente *open-hardware* con el objetivo de desarrollar autopilotos de bajo costo. A6n as6 tambi6n existen clones como el *HKPilot* de la marca *HobbyKing* a un precio a6n menor.

De todas formas, en el distribuidor escogido, solo poseen una controladora en existencias. Se trata de la Pixhawk 2.4.7, la cual posee todas las caracter6sticas que se requieren. Es compatible con el *Mission Planner* mediante el cual se pueden configurar los diferentes sensores y dise6nar una ruta mediante coordenadas geoc6ntricas adem6s de configurar las salidas digitales necesarias.

Dicho controlador viene incluido en un conjunto de componentes pensados para formar parte de un UAV de las caracter6sticas que se buscan. El paquete incluye, adem6s del autopiloto Pixhawk 2.4.7, un m6dulo GPS Ublox NEO-6M con br6jula compatible con el controlador, un m6dulo de potencia, m6dulos de telemetr6a que permiten monitorizar el dron durante el vuelo adem6s de cargar las misiones del *Mission Planner* de forma inal6mbrica y una placa de amortiguaci6n que reducir6 las vibraciones sobre el autopiloto produciendo una mejora en la eficiencia de los sensores internos junto con los cables necesarios para realizar las conexiones sobre el controlador. El precio total se muestra en la tabla 6.3 y resulta menor que sus partes por separado. Se muestran todos los componentes en la figura 6.10.

Producto	Precio (€)
QA415	219,00

Cuadro 6.3: Precio paquete de productos del controlador



Figura 6.10: Paquete de productos del controlador [8]

6.2.3. Motores

Como se ha mencionado anteriormente se requieren motores de corriente continua sin escobillas. Aún así, para poder elegir un motor adecuado primero hay que aproximar la potencia que se requiere de cada motor, de manera que se descarten aquellos incapaces de proporcionar suficiente energía. En primer lugar es necesario tener una idea aproximada del peso total de la aeronave. Teniendo en cuenta el chasis elegidos y el peso de otros UAVs de tamaño parecido se puede aproximar que el peso se encontrará sobre los 1500 gramos, aunque para mantener un factor de seguridad se usaran 2000 gramos como valor inicial.

Según la ecuación 6.1 la fuerza de sustentación necesaria producida por cada motor para mantener el vuelo a punto fijo se aproxima a 5 Newtons.

$$F = \frac{\text{masa} \cdot \text{aceleracin}}{N^{\circ} \text{demotores}} = \frac{2 \cdot 10}{4} = 5N \quad (6.1)$$

En consecuencia, considerando cada rotor como un rotor ideal y sin interferencias entre ellos, según las ecuaciones de conservación de masa, conservación del momento lineal y conservación de la energía, se obtiene la ecuación 6.2 que permite expresar la potencia en función de la fuerza encontrada y la superficie, es decir, el tamaño de las hélices que se escojan.

$$P = F \cdot \sqrt{\frac{F}{2\rho S}} \quad (6.2)$$

Asumiendo un diámetro de hélices de 10 pulgadas, al ser un tamaño corriente, podemos descartar aquellos motores con una potencia máxima menos, aunque, al tratarse de la potencia para un caso ideal, se usará un factor de seguridad de 0,75.

$$P_r = \frac{P}{0,75} = 43W \tag{6.3}$$

A continuación se eligen 3 candidatos, y se escogerá el mejor de ellos valorando tres de sus propiedades como muestra la tabla 6.4.

Candidato	Precio (€)	Peso (g)	Kv
EMAX MT2213	16,50	55	935
LEOPARD 2830-12T	25,00	56	980
EMAX MT2216	19,90	62	810

Cuadro 6.4: Motores candidatos

Las tres variables que se tienen en cuenta son precio, peso y Kv, con las siguientes ponderaciones.

- **Precio: 50.** Es importante mantener el presupuesto bajo para aumentar la viabilidad del proyecto. Hay que tener en cuenta que se necesitan cuatro motores.
- **Peso: 80.** Como ya se ha mencionado antes, mantener el peso bajo es clave en sector aeronáutico.
- **Kv: 20.** Kv representa la velocidad angular del motor cuando se aplica 1 Volt de tensión y sin carga. Para drones de competición se usan motores con Kv altos, permiten girar a altas velocidades pero con menos torque, por lo que usan hélices pequeñas. En este caso se prefiere acercarse al otro extremo aunque recibe una ponderación mas baja ya que no es un factor clave debido a que los candidatos serían capaces de operar en las condiciones necesarias.

Los resultados del OWA se muestran en la tabla 6.5.

Criterio	MT2213		S5002830-12T		MT2216	
	p	pxg	p	pxg	p	pxg
Precio	5	250	1	50	3,4	170
Peso	5	400	4,43	354,4	1	80
Kv	2,06	41,2	1	20	5	100
Suma	691,2		424,4		350	
OWA	0,92		0,57		0,47	

Cuadro 6.5: Resultado OWA motores quadróptero

Finalmente, el motor seleccionado es el modelo EMAX MT2213 que se muestra en la imagen 6.11



Figura 6.11: Motor EMAX MT2213 [8]

6.2.4. Hélices

El fabricante del motor, según el distribuidor, recomienda usar hélices de 10x4.5. Según los cálculos anteriores estas hélices permitirán al vehículo volar de forma correcta. Es posible que no se traten las hélices óptimas y el consumo pueda reducirse con una alternativa, pero la optimización del UAV queda fuera del alcance de este proyecto.

En consecuencia, se obtienen dos pares de hélices, una hélice CC y la otra CCW, ya que dos motores giraran en sentido horario y los otros dos en sentido antihorario para contrarrestar el par generado, a un precio de 50 céntimos cada par, debido a una oferta al comprar las hélices conjuntamente con el motor.

6.2.5. Variadores

Según el fabricante del motor, es necesario un variador de 30 Amperios para un buen funcionamiento de este. Por este motivo, en el catálogo del distribuidor se escoge el variador *Hobbywing XRotor Micro BLHeli S 30A 2-4S DShot*.

Se trata de un variador de amperaje en continua de 30 Amperios, como se requería, además de presentar un tamaño muy reducido, idóneo para su colocación en el chasis, y un peso de 6 gramos permitiendo mantener una configuración ligera. El precio de cada variador es de 14,90 €. Se muestra el ESC elegido en la figura 6.12.

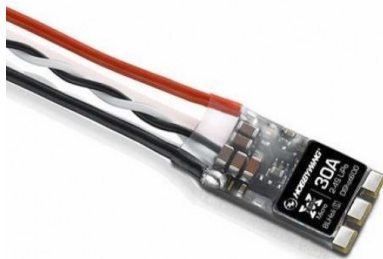


Figura 6.12: Variador XRotor Micro BLHeli S 30A [8]

6.2.6. Batería

De la batería escogida dependerá la autonomía del vehículo. Según los componentes que se han elegido anteriormente, el número de celdas debe ser tres o cuatro, de manera que la tensión sea correcta para todos ellos. Además, se han descartado capacidades menores a 4000 mAh ya que reduciría la autonomía por debajo de los 15 minutos. Se han encontrado tres candidatos, mostrados en la tabla 6.6, y se procederá a realizar un OWA, valorando precio, capacidad y peso, para escoger el más adecuado.

Candidato	Precio (€)	Peso (g)	Potencia (W)
Gens ACE 4s 14.8V 6750mAh 70C	89,99	615	99,99
Gens ACE 4s 6000mAh 35C	87,99	593	88,8
Gens ACE 4s 14.8V 5000mAh 45C	81,89	550	75

Cuadro 6.6: Baterías candidatas

Y las ponderaciones para el OWA serán las siguientes.

- **Precio: 30.** Como en los otros casos, se busca un presupuesto económico.
- **Peso: 80.** Es importante reducir el peso de la aeronave dentro de lo posible.
- **Potencia: 50.** A mayor potencia, mayor autonomía, aunque todos los candidatos cumplen la autonomía mínima requerida.

Los resultados del OWA se muestran en la tabla 6.7. Y la batería seleccionada se trata de Gens ACE 4s 14.8V 5000mAh 45C. Se muestra en la imagen 6.13.

Criterio	Gens ACE 6750 mAh		Gens ACE 6000 mAh		Gens ACE 5000 mAh	
	p	pxg	p	pxg	p	pxg
Precio	1	30	2	60	5	150
Peso	1	80	2,35	188	5	400
Potencia	5	250	3,21	160,5	1	50
Suma	360		408,5		600	
OWA	0,45		0,51		0,75	

Cuadro 6.7: Resultado OWA selección de batería

6.3. Resumen componentes dron

Finalmente, en la tabla 6.8 se aprecian los diferentes componentes seleccionados, junto con su peso y precio, mostrando el precio y peso final del vehículo.

Finalmente, se dispone de un dron de 1478 gramos, capaz de volar de forma autónoma durante aproximadamente 15-20 minutos por un precio de 459,39 €. Pese a no estar optimizado, se trata de un vehículo funcional, que cumple los requerimientos impuestos. Más adelante en el trabajo se realizarán un conjunto de pruebas para validar su funcionamiento.



Figura 6.13: Bateria Gens ACE 5000 mAh [8]

Componente	Peso (g)	Precio (€)
S500-PCB	558	31,90
Pixhawk 2.4.7	38	219,00
GPS Ublox NEO-6M	30	-
Módulo de potencia	30	-
EMAX MT2213	4 x 55	4 x 16,50
2 hélices 1045(CW CCW)	2 x 14	2 x 00,50
XRotor Micro BLHeli S 30A 2-4S DShot	4 x 6	4 x 14,90
Gens ACE 4s 14.8V 5000mAh 45C	550	81,89
Total	1478	459,39

Cuadro 6.8: Composición final del dron

6.4. Configuración software

Es necesario usar algún tipo de software que permita configurar la calibración de los sensores y permita establecer las rutas y procedimientos que debe realizar el UAV durante su ejecución. Existen diversos programas capaces de dicha tarea, es necesario que dispongan del protocolo de comunicaciones MAVLink, ya que es compatible con el controlador de vuelo seleccionado, y permitirá monitorizar el vehículo y cargar las rutas en la memoria mediante los módulos de telemetría adquiridos. El software escogido para el desarrollo del proyecto es conocido como *Mission Planner*.

Usando esta aplicación lo primero será calibrar los sensores, será posible realizar el proceso de calibración de los acelerómetros y la brújula para asegurar un buen comportamiento, sobre todo pensado en el modo automático, donde depende en su totalidad de las magnitudes interpretadas por estos sensores, además de la localización de satélites mediante el módulo GPS.

A continuación de haber calibrado el vehículo ya es posible realizar vuelos. Es por eso que será necesario diseñar una misión usando la interfaz que se muestra en la figura 6.14.



Figura 6.14: Interfaz del Mission Planner para el diseño de misiones

En esta interfaz será posible indicar las diferentes geolocalizaciones de los nodos para enviar al dron de forma autónoma. Además, nos permite configurar los puertos auxiliares del controlador de vuelo como salidas digitales. Usando el comando DO_SET_RELAY y configurándolo correctamente a la salida escogida, permite activar esta salida digital de manera que alerte al microprocesador montado en el dron que ha llegado a la localización del nodo, de manera que el microprocesador empezará el algoritmo para recibir los datos adquiridos por el nodo. La figura 6.15 muestra los puertos disponibles para ello.

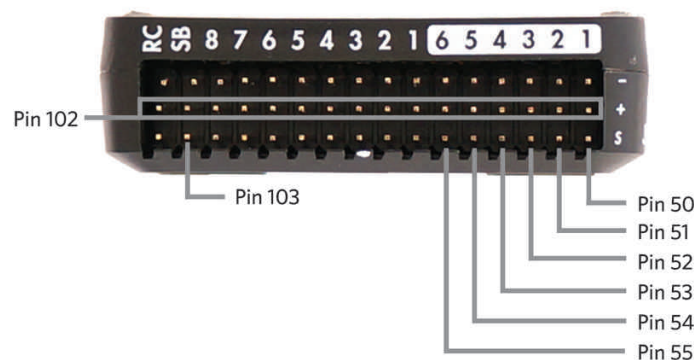


Figura 6.15: Puertos capaces de actuar como salidas digitales (Pin 50- Pin 55) [9]

7 | Comunicaciones

Como ya se ha mencionado anteriormente, se necesita de un dispositivo capaz de realizar comunicaciones inalámbricas. Para ello es necesario, en primer lugar, seleccionar el protocolo de comunicaciones más adecuado para las condiciones y requerimientos que plantea este proyecto. Principalmente, hay tres aspectos claves del protocolo de comunicaciones que se deben tener en cuenta.

Primero, el rango de la tecnología, es decir, la distancia a la cual se podrá mantener la comunicación sin pérdidas de información. Para la función que deberá desarrollar en el caso concreto de comunicaciones entre el nodo y el dron es conveniente que se trate del orden de decenas de metros, permitiendo que el dron pueda acercarse a una distancia prudente sin poner en peligro la integridad del vehículo por colisiones con accidentes en el terreno o vegetación.

Además, se debe tener en cuenta el consumo. Sobretudo en el caso del nodo, es necesario mantener un consumo bajo, de manera que se pueda alimentar durante largos periodos de tiempo en funcionamiento.

Finalmente, el tercer aspecto es el ratio de transmisión. El ratio de transmisión se mide, generalmente, en kilobits por segundo (kbps), por lo tanto, en función de la cantidad de datos que se necesiten enviar, el tiempo de conexión variará. Es necesaria un ratio relativamente alto, ya que se enviarán una gran cantidad de datos así que una velocidad baja comportaría un elevado tiempo de conexión que a su vez produciría un aumento del consumo.

7.1. Selección protocolo de comunicaciones

Para elegir el protocolo mas adecuado se analizaran las propiedades de las diferentes tecnologías que se comentaron anteriormente, Zigbee, Bluetooth LE, WiFi y LoRa, y se realizará un OWA. Las propiedades que se tendrán en cuenta son las que ya se han mencionado, rango, consumo y ratio de transmisión.

Candidato	Rango (m)	Consumo (mW)	Ratio de transmisión
Zigbee	100	100	250 kbps
Bluetooth LE	100	10	2 Mbps
WiFi	30	1000	20 Mbps
LoRa	10000	3	27 kbps

Cuadro 7.1: Protocolos candidatos [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18]

En la tabla 7.1 se muestran las propiedades de cada uno de los protocolos que se van a tener en cuenta.

Conociendo las especificaciones de cada protocolo, se procederá realizar el OWA. Pero antes, es necesario elegir las ponderaciones, de cada uno de los aspectos a tener en cuenta. Se muestran en la siguiente lista.

- **Rango: 5.** Recibe una menor ponderación debido a que, dentro de lo que cabe, todos los protocolos cumplen con los requisitos mínimos.
- **Consumo: 80.** Se trata de un aspecto muy importante, ya que el *quid* del estudio reside en desarrollar un nodo de bajo consumo.
- **Ratio de transmisión: 80.** Permitirá una mayor cantidad de transmisión de datos, lo que es interesante para el proyecto, por ello recibe la misma ponderación que el consumo, debe haber un equilibrio.

La tabla 7.2 muestra los resultados del OWA. Los resultados muestran que la mejor decisión consiste en usar un dispositivo que use Bluetooth LE. El protocolo nos permitirá comunicarnos a una distancia del orden que se deseaba, transferir una cantidad de datos considerable, teniendo en cuenta el ratio de transmisión, y manteniendo el consumo lo más bajo posible.

Criterio	Zigbee		Bluetooth LE		WiFi		LoRa	
	p	pxg	p	pxg	p	pxg	p	pxg
Rango	1,03	5,15	1,03	5,15	1	5	5	25
Consumo	4,61	368,8	4,97	397,6	1	80	5	400
Ratio	1,83	84	1,4	112	5	400	1	80
Suma	457,95		514,75		485		505	
OWA	0,56		0,62		0,59		0,61	

Cuadro 7.2: Resultado OWA selección de protocolo de comunicación

7.2. Selección del módulo transceptor

Una vez escogido el protocolo de comunicaciones, será necesario escoger un módulo transceptor capaz de usar esta tecnología. Para que la integración sea más sencilla y no sea necesario realizar ninguna soldadura compleja, se escogerá un módulo ya soldado en una placa, de esta manera los puertos serán más accesibles. Dentro de esta categoría los distintos módulos presentan características parecidas y, debido a la sencillez del proceso que se debe realizar con este módulo (simplemente realizar la conexión con otro dispositivo e intercambiar datos), se escogerá uno de los dispositivos más económicos.

El módulo seleccionado es el C8CKIT-142, mostrado en la figura 7.1. El transceptor consta con un procesador Cortex M0 de 48 MHz, además de 256 KB de memoria flash, 32 de SRAM y 8 KB de ROM. Este dispositivo cuenta con diferentes funciones, además de la función de Bluetooth LE, cuenta con algunos ADC y DAC

simples, distintos módulos de comunicación serie como I^2C , SPI o UART, distintos timers PWM y hasta 36 puertos GPIO. El precio del dispositivo es de 8,93€. La figura 7.2 muestra un diagrama del procesador.



Figura 7.1: Módulo transceptor C8CKIT-142 [10]

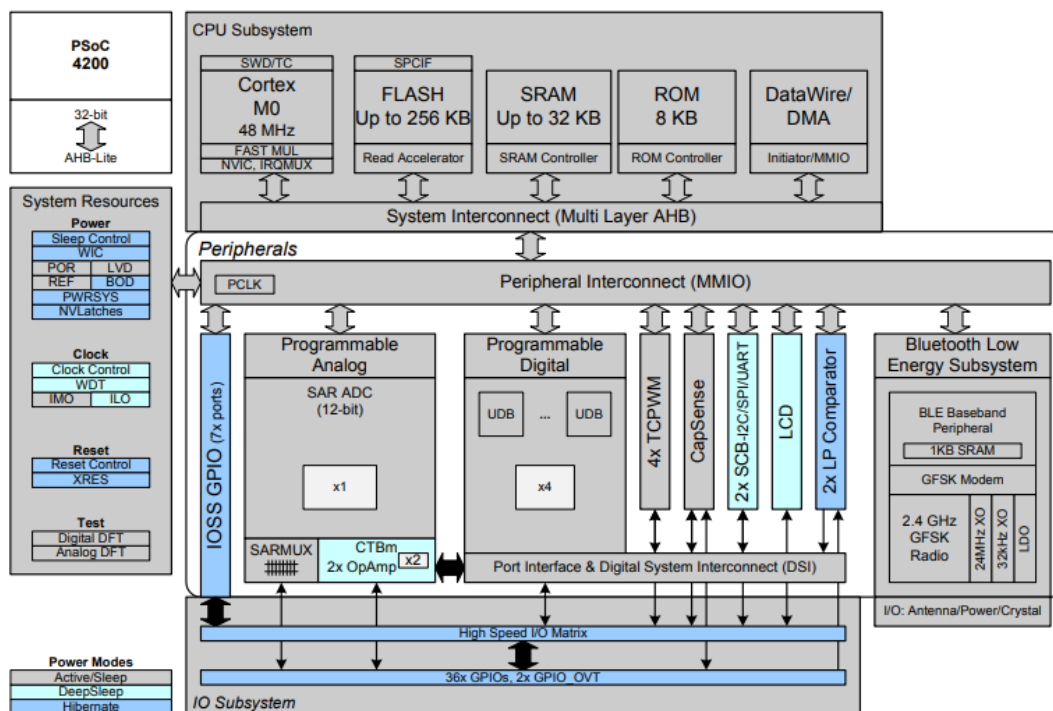


Figura 7.2: Diagrama de bloques del transceptor C8CKIT-142 [10]

7.3. Integración comunicaciones

De todas maneras, no todas las funciones disponibles serán necesarias. Se deberá programar el dispositivo y para ello, la marca del fabricante ofrece un IDE gratuito,

el PSoC Creator, que permite configurar y programar los algoritmos que se crean convenientes. El software proviene de una gran cantidad de ejemplos que permiten entender el funcionamiento del dispositivo.

En primer lugar, el módulo más importante que se debe usar es el de BLE, de manera que en el proyecto del IDE se deberá incluir en el archivo TopDesign.cysch.

Este módulo ofrece una gran cantidad de posibilidades. Por lo general, cuando se usa BLE se define el dispositivo según un perfil, este perfil podrá actuar como cliente GATT o servidor GATT, y a su vez se deberá definir como periférico GAP o dispositivo central GAP. Estas propiedades definirán el tipo de atributos y como la información es transmitida en el caso del GATT, y en el caso del GAP definirá como se realizan las conexiones entre dispositivos. La figura 7.3 muestra las posibilidades que nos ofrece para configurar el BLE.

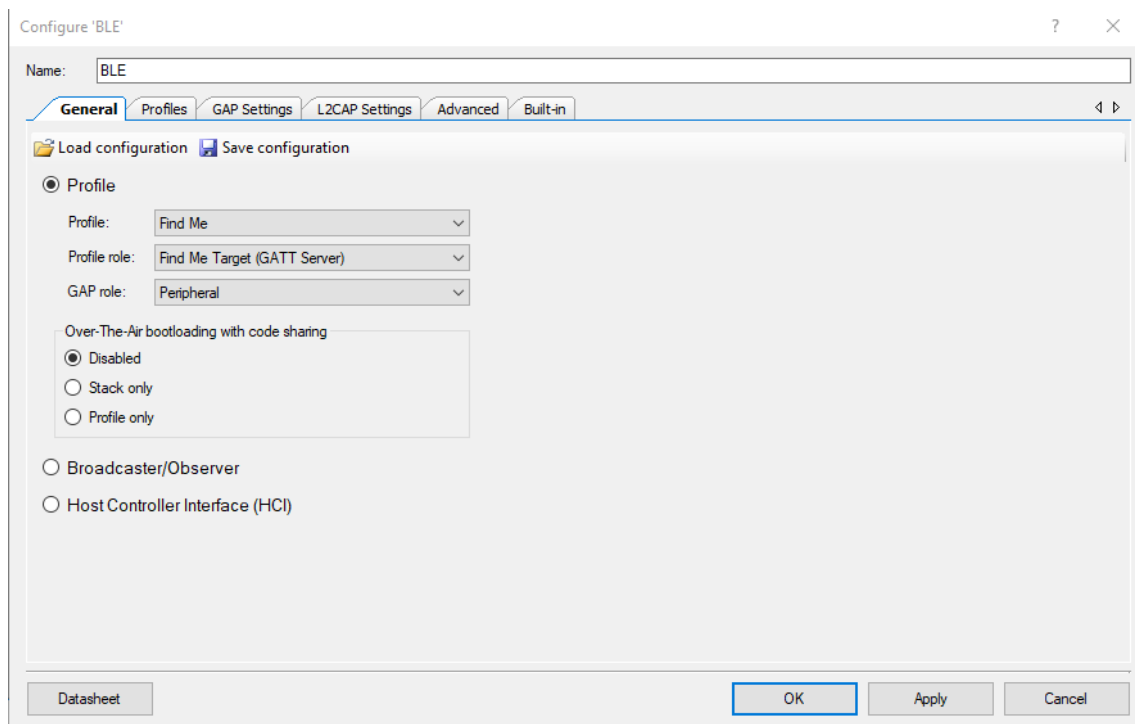


Figura 7.3: Configuración del BLE en el IDE PSoc Creator

Aún así, en este proyecto, no se usarán ningún tipo de perfil. En cambio, se usará la opción HCI, siglas de Host Controller Interface, y dentro de esta opción se configurará HCI over UART. La figura 7.4 muestra la configuración escogida.

Configurar el BLE de esta manera permite usar un procesador para controlar las acciones del dispositivo bluetooth enviando comandos a la HCI del dispositivo. Al configurar el dispositivo como "*HCI over UART*", se añadirá el módulo UART a la configuración y será el encargado de la transmisión de comandos, eventos y paquetes de información entre el dispositivo BLE y el procesador controlador. La configuración del UART está descrita en la misma figura 7.4, esta configuración debe ser la misma que la configuración del UART en el microprocesador. El motivo de escoger un *Baud rate* de 9600 bps se explica en el capítulo 8. Habilitar los pines RTS

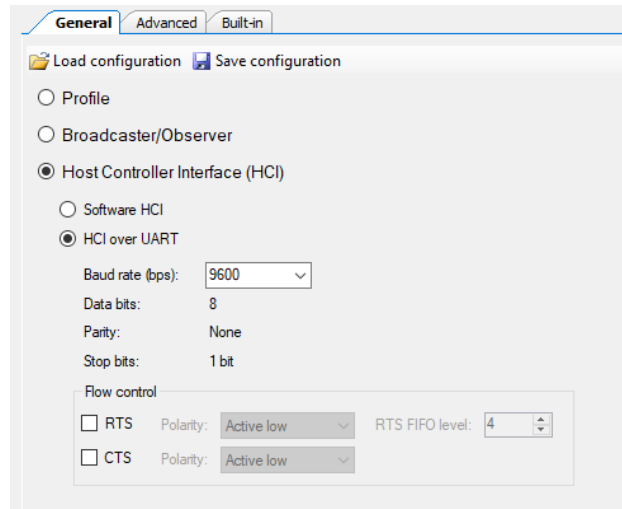


Figura 7.4: Configuración HCI en el IDE PSoc Creator

y CTS pueden evitar problemas en la transmisión y recepción de la UART, ya que mediante estos pines se informa al procesador si se esta enviando información o si la esta recibiendo, pero no son obligatorios, por lo que no se han habilitado ya que el algoritmo consiste en enviar preguntas y esperar respuestas de manera que no se envíen datos mientras se esta recibiendo y viceversa. Este estándar de comunicación serie es conocido como RS-232

A continuación se deben asignar puertos al RX (periférico de recepción) y al TX (periférico de transmisión) de la UART, en la figura 7.5 se muestran las asignaciones.

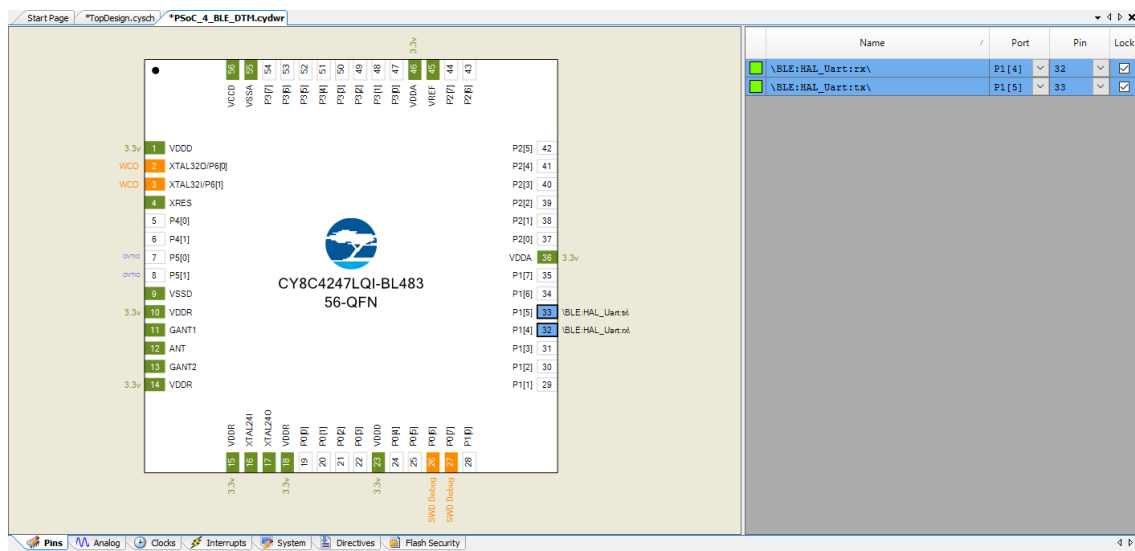


Figura 7.5: Pinout del módulo en el IDE PSoc Creator

Para dejar el transceptor plenamente operativo, será necesario, simplemente, habilitar el sistema y las interrupciones del módulo HCI. No será necesario ningún algoritmo ya que, como ya se ha mencionado, el HCI se encarga del control y se comunicará directamente con el microprocesador mediante la UART. El main.c se

puede encontrar en el anexo y el lenguaje utilizado es C.

Finalmente, cabe hacer mención a los consumos aproximados según el fabricante. Mientras el dispositivo este en modo *advertisement* consumirá $298 \mu A$ y, mientras está conectado con otro dispositivo, el consumo será de 2,1 mA. Se pueden considerar consumos realmente bajos.

8 | Microprocesador

8.1. Especificaciones

Como se ha mencionado anteriormente, el microprocesador usado en este proyecto es el STM32L496ZG, más concretamente, la placa con este microprocesador llamada NUCLEO-L496ZG-P, mostrado en la figura 8.1, que permite un uso más cómodo y sencillo de los puertos e incluye distintos elementos como un cristal externo (LSE) de 32,768 kHz, capaz de funcionar como fuente de diversos relojes.

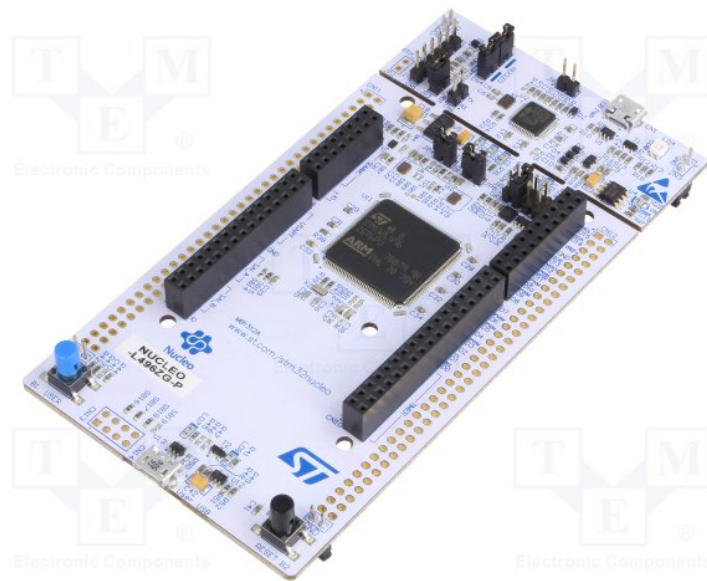


Figura 8.1: NUCLEO_L496ZG [11]

El procesador posee una MCU ARM Cortex M4, un procesador RISC de 32-bit capaz de operar hasta a 80 MHz. También dispone de una FPU que permite realizar instrucciones de procesamiento de información y el uso de variables en formato en coma flotante de simple precisión, es decir, permite usar números decimales de 32 bits e instrucciones y operaciones que los usen. Esta propiedad puede resultar muy útil en adquisición y tratamiento de datos.

Además el microcontrolador posee 1 Mbyte de memoria flash y 320 Kbyte de memoria SRAM y una gran variedad de periféricos, todos conectados mediante dos buses APB, dos buses AHB y una matriz de 32-bit multi-AHB, que conecta todos los periféricos, el procesador ya las memorias entre sí como muestra la figura 8.2.

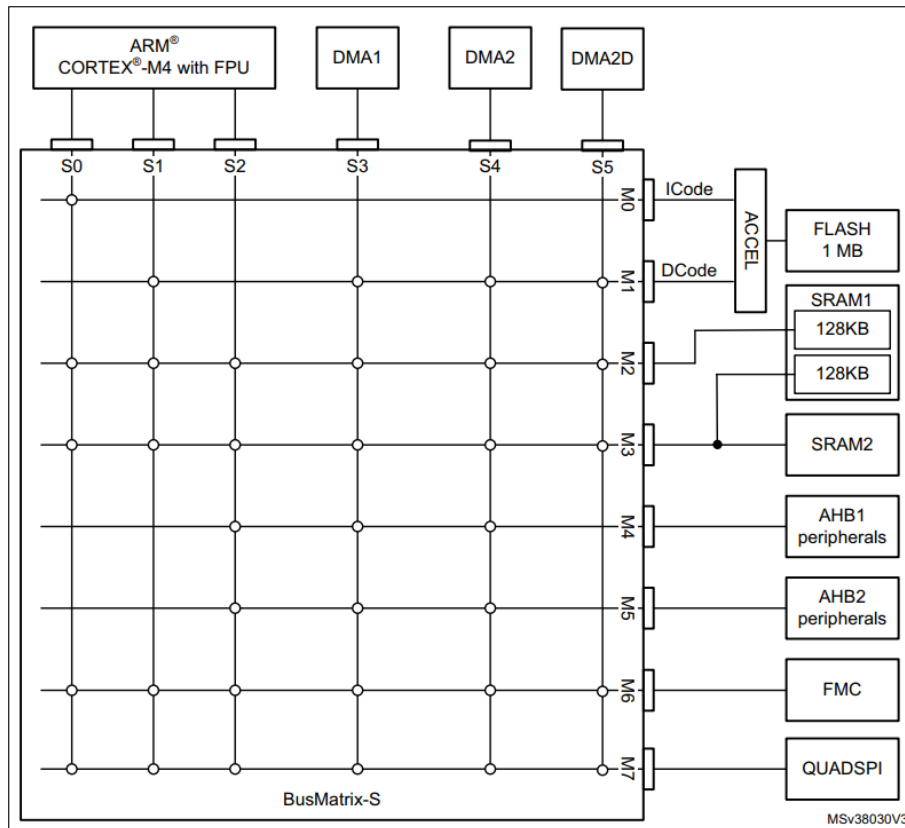


Figura 8.2: Diagrama matriz de buses AHB [11]

Este microprocesador destaca por ser un procesador *Ultra Low Power*, por lo que dispone de distintos periféricos pensados especialmente en el bajo consumo. En el proyecto se usan dos de estos que se mencionan a continuación.

LPUART. Se trata de un módulo que permite la comunicación serie asíncrona manteniendo un consumo energético mínimo. Igual que los módulos UART, sólo necesita de un puerto RX y otro TX, además dispone de la posibilidad de usar puertos CTS y RTS para controlar el flujo de las comunicaciones y evitar posibles fallos, aunque no es obligatorio habilitarlo. El punto fuerte del módulo reside en que su dominio de relojes es independiente del reloj de la CPU, esto permite que esté activo durante modos de bajo consumo como el *Stop mode* y usarlo como *wake up*. Es posible asignar el reloj LSE de 32,768 kHz y el módulo será capaz de usar *baud rates* de hasta 9600, aunque es posible usar otro reloj para ratios mas altos.

LPTIM. Se trata de un *Low Power Timer* y dispone de dos de este tipo. Al igual que el LPUART, los relojes de estos timers son independientes de la CPU y se mantienen activos durante el *Stop mode*, siempre que la fuente de su reloj sea el LSE, el LSI o un reloj externo, permitiendo despertar el procesador en este modo.

Aparte de las funciones de bajo consumo energético, cabe destacar su capacidad funcional para la adquisición de señales analógicas. El procesador posee tres módulos ADC, de aproximación sucesiva, independientes. La resolución máxima de los ADC

es de 12 bit, aunque, como se mencionó para los ADC de aproximación sucesiva, se puede reducir esta resolución para ganar velocidad de muestreo. Aún así, la frecuencia máxima de muestreo a máxima resolución es de 5,33 Msps por módulo, y permite la opción *interleaving*, que usa dos módulos para muestrear la misma señal, permitiendo doblar la frecuencia de adquisición. Los ADC pueden adquirir hasta 24 canales. También dispone de diferentes sensores internos, como por ejemplo un sensor de temperatura y otro de tensión de la batería, que pueden resultar útiles para mejorar el rendimiento.

El procesador integra dos DMAs, esta tecnología permite transferir datos de los periféricos a la memoria a altas velocidades sin utilizar instrucciones de la CPU, por lo que se pueden almacenar, por ejemplo, los datos adquiridos por el ADC de manera inmediata y paralela a las instrucciones y operaciones realizadas por la CPU, permitiendo ahorrar recursos. Cada DMA dispone de 7 canales, independientemente configurables. Es capaz de transferir hasta 65536 bytes.

Dispone, además, de una gran cantidad de funciones, como DACs, USART, timers convencionales, entre otros. La figura 8.3 muestra un diagrama del circuito del microprocesador.

8.2. Integración

Para la programación del microprocesador son necesarios dos aplicaciones. Por un lado se usará el STM32CubeMX para generar un proyecto con los periféricos configurados. Y luego, se programará el algoritmo mediante el *Keil μ Vision* en lenguaje C. Se deberán integrar dos microprocesadores iguales, aunque la configuración y el algoritmo serán distintos, un microprocesador será montado sobre el dron y el otro en el nodo.

8.2.1. Microprocesador montado en el dron

En el caso del microprocesador montado en el dron este será el que actúe como *master*. Se encargará de establecer la conexión y recibirá los datos del nodo mediante comunicación inalámbrica Bluetooth LE. Además, recibirá una entrada del controlador de vuelo indicando que es momento de establecer la conexión. Conociendo estas premisas, se integrará de la siguiente manera.

En primer lugar, se debe generar el proyecto usando STM32CubeMX, por lo que se debe decidir una configuración. Atendiendo a las necesidades que se presentan para este microprocesador, los periféricos necesarios serán la entrada digital, recibida del dron, y el LPUART, que se usará para la comunicación entre el transceptor Bluetooth y el microprocesador. De manera que los puertos del microprocesador se repartirían como se muestra en la figura 8.4. Además de la entrada digital, que se ha configurado como GPIO EXTI para que funcione en modo interrupción, y los puertos RX y TX del LPUART, se incluyen los puertos necesarios para las funciones de la placa, como por ejemplo los puertos designados al cristal LSE o aquellos necesarios para realizar un *debug*.

STM32L496

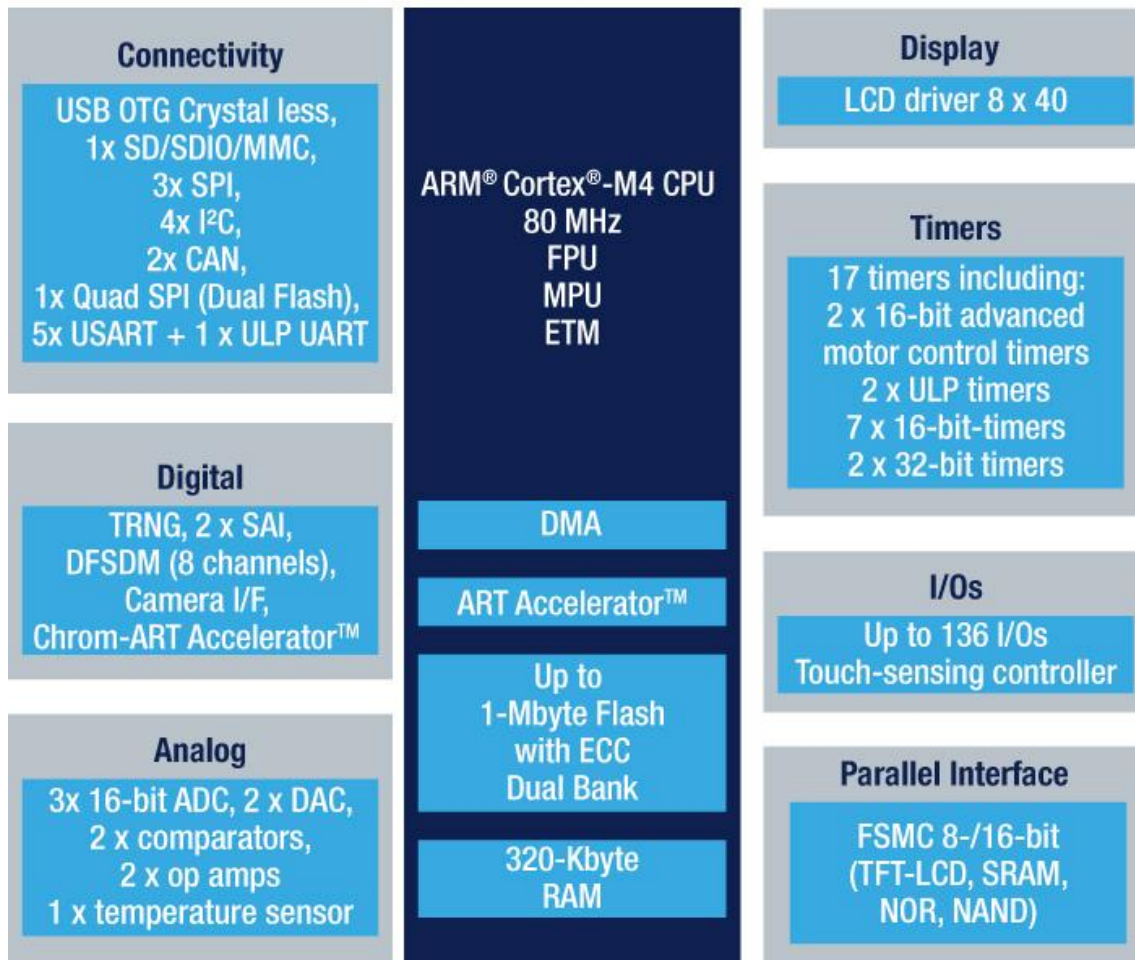


Figura 8.3: Diagrama circuito STM32L496 [11]

A continuación, es necesario configurar todos los relojes y sus fuentes. Para el caso del dron la velocidad de la CPU no es crítica, ya que únicamente enviará comandos y recibirá información del nodo, por lo cual se escogerán frecuencias relativamente bajas para reducir el consumo.

Tanto el SYSCLK como el HCLK funcionarán a 16 MHz, estos relojes coordinan las instrucciones generales del microprocesador y es una frecuencia suficientemente alta para no ralentizar el proceso y producir errores.

En cuanto al LPUART, se escogerá una frecuencia de 32,768 kHz, de manera que la fuente será el LSE incluido en la placa de que se dispone, esta frecuencia permite un baudrate máximo de 9600, suficiente para las comunicaciones con el transceptor bluetooth. Además se debe configurar igual que en dicho transceptor, el tamaño de los paquetes será de 8 bits, sin ningún bit de *parity*, que indica el signo si es necesario, y 1 único *stop* bit, indicando el fin de la secuencia de datos. La figura 8.5 muestra un ejemplo de la señal siguiendo el protocolo de la UART, se observa que siempre se inicia con un *Start* bit

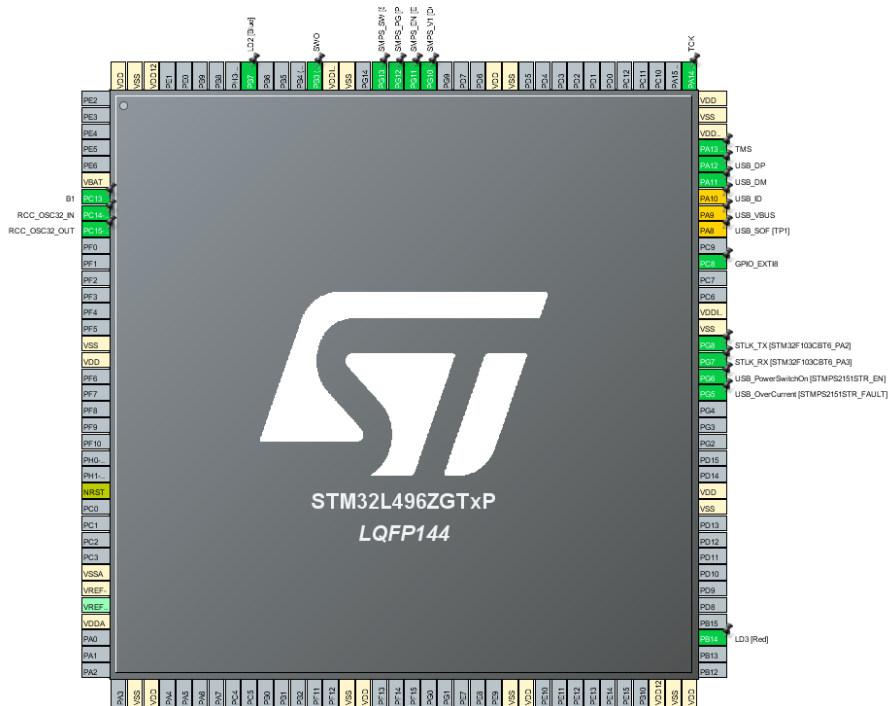


Figura 8.4: Distribución puertos microprocesador nodo en STM32CubeMX

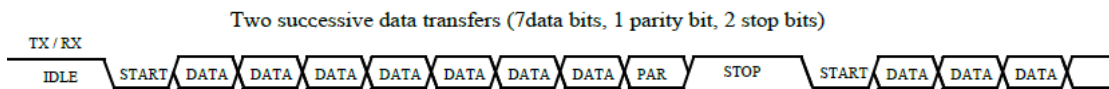


Figura 8.5: Protocolo UART [10]

La figura 8.6 muestra la configuración de relojes escogida en el software STM-CubeMX.

Una vez configurados los periféricos y los relojes, podemos generar un código base desde donde desarrollar el algoritmo. Se usarán dos tipos de drivers, el HAL (Hardware Abstraction Layer) y el LL (Low Layer). El HAL consiste de funciones muy genéricas que permiten la portabilidad entre distintos dispositivos de la misma gama, permiten un uso más simple aunque resultan en procesos menos optimizados y robustos. Por el otro lado, usar LL permite una mayor optimización a costa de portabilidad, debido a que opera al nivel de los registros. Los dos se pueden usar en un mismo algoritmo para periféricos distintos.

Para este microprocesador el algoritmo será muy sencillo, se puede observar un diagrama en la figura 8.7.

En primer lugar, nada más encenderse, el microprocesador debe configurar el sistema e iniciar los distintos periféricos y drivers como el HAL, ya que el LL no requiere inicialización. Cuando se hayan inicializado, se dispondrá a configurar el transceptor bluetooth mediante la UART.

Es pertinente decir que el HCI del Bluetooth LE usa 4 tipos distintos de paquetes de información para comunicarse, los comandos, los eventos, los paquetes de datos asíncronos y paquetes de datos síncronos. Como su nombre indica, se ordenan las acciones que se desean del transceptor mediante comandos y, resultante a un comando o a una conexión, se producen eventos que informan de la situación. Todos los tipos de paquetes se inician con un cabezal que indicarán el tipo de paquete, seguido del código que define el paquete y después los parámetros o la información enviada.

Para empezar la configuración del transceptor se enviará el comando RESET, permitiendo configurar el dispositivo de cero y reducir la probabilidad de fallo. Al enviar un comando, se espera una respuesta en forma de evento, en caso de que se reciba el evento de comando completado se podrá avanzar a la siguiente etapa.

A continuación, se deben habilitar los eventos LE, ya que por defecto aparecen enmascarados, de manera que no se pueden recibir. Para habilitarlos simplemente se usa el comando SET MASK AWAY, que en función del parámetro que se transmite habilitará los eventos que correspondan. En el caso de este algoritmo solo es necesario haber habilitado los eventos LE, ya que todas las acciones se realizarán mediante Bluetooth LE. Al enviar este comando también se espera recibir un evento de comando completado.

Con esta configuración ya es suficiente para realizar la conexión, de modo que que activa el modo *STOP*, donde el microprocesador detiene la mayoría de los relojes y se mantiene en un estado congelado manteniendo un consumo mínimo de aproximadamente $3\mu A$. Para despertar de este modo existen varias opciones, la que se usará en este caso es por interrupción del GPIO. Ya que se ha habilitado una entrada digital como GPIO EXTI, cuando en el puerto correspondiente se detecte una subida de tensión, se despertará el sistema y saltará la función correspondiente. Este puerto se encontrará conectado a la salida digital del controlador de vuelo del UAV.

Cuando se active la interrupción y el sistema se despierte, indicará que se encuentra en la zona del nodo, así que se enviara el comando `CREATE CONNECTION LE`. Este comando permite crear una conexión mediante Bluetooth LE, pero requiere de distintos parámetros que definirán la conexión. El comando permite introducir el objetivo concreto con el que se desea conectarse mientras se encuentre en modo *advertisement* y se conozca su dirección Bluetooth. Si se cumplen las condiciones y los dispositivos se encuentran a rango uno del otro se establecerá la conexión y ambos dispositivos recibirán un evento LE, por este motivo era necesario habilitarlo, que indicará que la conexión se ha establecido y el dispositivo al cual se encuentran conectados, así como el *handle*, un código propio de la conexión que será necesario para la transferencia de datos.

En caso que no se establezca ninguna conexión durante un periodo de tiempo, el sistema abandonará el intento y volverá al modo *STOP* a esperar otra interrupción del controlador de vuelo.

Si se establece la conexión, el nodo empezará a enviar los datos en paquetes ACL y se almacenarán para ser analizados posteriormente. Una vez se hayan recibido todos los datos, se habilitará el modo *STOP* y se esperará a la siguiente interrupción.

Se puede encontrar el archivo `main.c` del algoritmo en el anexo.

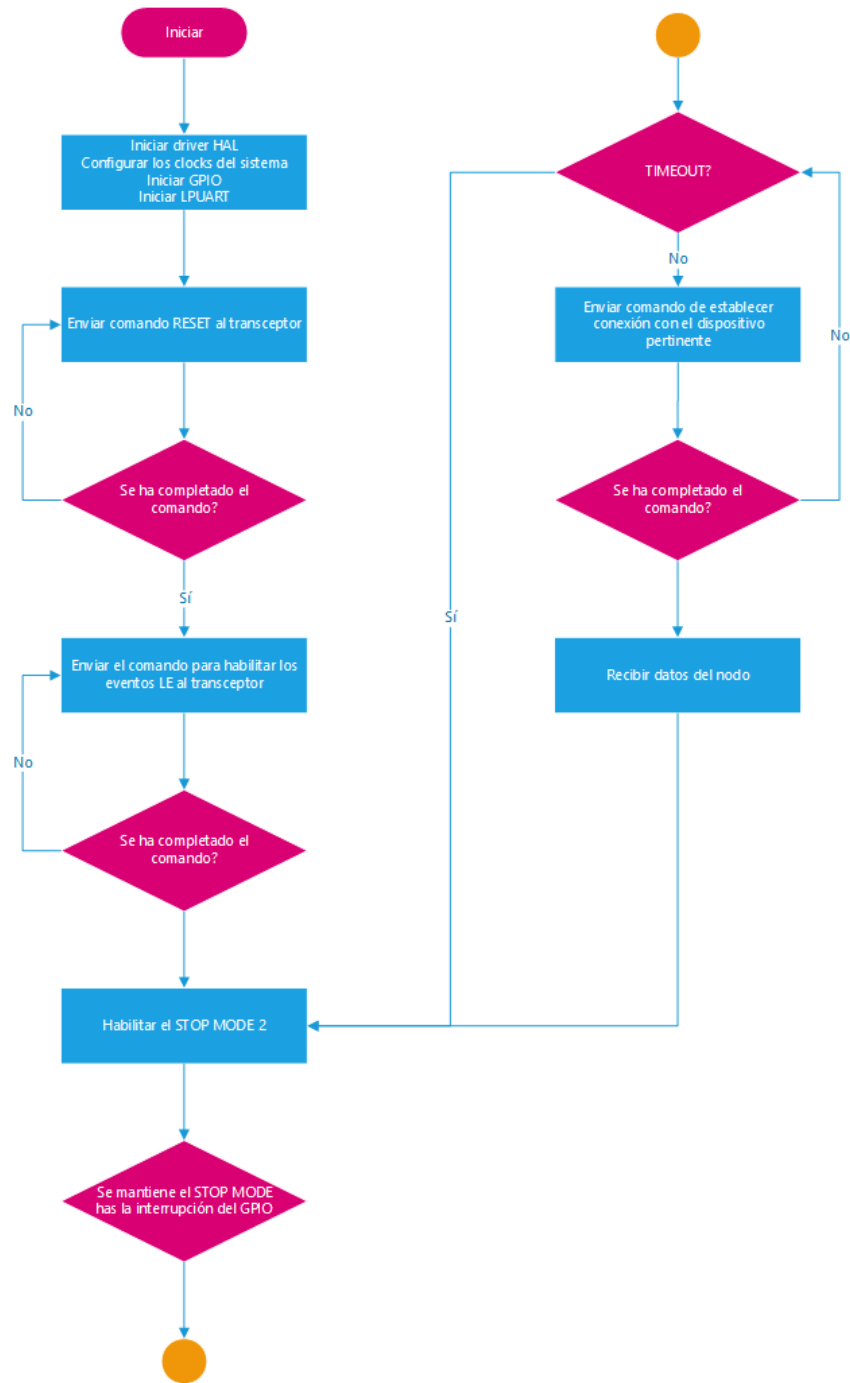


Figura 8.7: Diagrama del algoritmo del microprocesador del dron

8.2.2. Microprocesador montado en el nodo

Este dispositivo actuará como *slave* de la conexión con el dron. Se necesitará habilitar el modo *advertisement* del transceptor Bluetooth, para poder realizar la conexión en cualquier momento. También deberá realizar adquisiciones de señales analógicas periódicamente.

Se seguirá el mismo procedimiento que para la integración del microprocesador en el dron. Primero se configurará los distintos periféricos usando el STM32CubeMX. Para este procesador los periféricos serán ligeramente distintos al caso anterior, no será necesaria una entrada digital, aunque será necesario habilitar el ADC y el LPTIM. Como en el caso del dron, la LPUART será necesaria para la comunicación con el transceptor por puerto serie.

Para el ADC, la configuración será sencilla. Ya que es un prototipo, no se ha buscado ningún tipo de sensor sino que se usará el mismo sensor interno de temperatura que producirá el mismo efecto. El ADC se configurará al máximo de resolución y se buscará una frecuencia de adquisición de alrededor 1 Msps, aunque depende también de la frecuencia de la fuente que se le asigne a los módulos ADC. Por ello, se asigna al reloj del ADC una frecuencia de 16 MHz, teniendo en cuenta que el tiempo de muestreo mínimo son 2,5 ciclos y para una resolución de 12 bit el tiempo de conversión son 12,5 ciclos, con esta configuración se obtendría una frecuencia de muestreo de 1,067 Msps, un valor aceptable para el prototipo.

Además, será necesario configurar la DMA, que permitirá mover los datos adquiridos por el ADC directamente desde el periférico hasta el buffer en la memoria que se desee. Para la configuración y gestión tanto del ADC como de la DMA se usarán las funciones del driver LL en lugar del HAL, ya que permiten un mayor control y flexibilidad durante el algoritmo.

La función del LPTIM es sencilla, como en el caso anterior se pretende usar el *STOP* mode para ahorrar energía, y el LPTIM es capaz de despertar el sistema cuando se encuentra en este modo. Por ello, se configurará el LPTIM para despertar el sistema periódicamente para realizar las adquisiciones en el momento oportuno. Para permitir que el LPTIM funcione durante el modo *STOP*, la fuente del reloj del LPTIM debe ser el cristal LSE de 32,678 kHz.

Finalmente el LPUART se deberá configurar de la misma forma que para el caso del dron. El motivo de elegir un baud rate de 9600 se debe a que el LPUART es capaz de despertar el sistema durante el modo *STOP*, esto permite mantener el procesador al bajo consumo el mayor tiempo posible hasta recibir la interrupción al crearse la conexión Bluetooth LE. Para ser posible esta situación, la fuente del reloj del LPUART debe ser el cristal LSE, y al tener una frecuencia de 32,678 kHz, como ya se ha mencionado, el baud rate máximo es de 9600. Sin embargo, es más que suficiente para el motivo del proyecto.

La figura 8.8 muestra la configuración de los *clocks* en el microprocesador del nodo. Permite mantener un consumo energético realmente bajo para las condiciones en las que se encuentra.

El diagrama de el algoritmo que se explicará a continuación se encuentra en las figuras 8.9 y 8.10.

Los primeros pasos del algoritmo son muy parecidos a aquellos del algoritmo anterior. En primer lugar iniciar el HAL, el sistema y los distintos periféricos necesarios. Y a continuación se configura el transceptor Bluetooth.

El primer comando para configurar el transceptor es el comando RESET, como en el caso del dron, para reducir la probabilidad de errores, y, por el mismo motivo que en el caso anterior, se deben habilitar los eventos LE mediante el comando SET AWAY MASK. Para este algoritmo, también es cierto que solo es necesario habilitar los eventos LE ya que solo se usarán las propiedades LE.

A continuación, se debe habilitar el modo *advertisement* del transceptor mediante el comando SET ADVERTISEMENT LE ENABLE. Para configurar las propiedades del *advertisement* se puede usar el comando SET ADVERTISEMENT LE PARAMETERS, para reducir el consumo sería interesante reducir el intervalo de cada transmisión. Por los demás parámetros, en su estado por defecto son correctos para la aplicación del proyecto.

Habiendo habilitado el modo *advertisement* concluiría la etapa de configuración del sistema, así que el siguiente paso sería activar la interrupción del LPTIM y la interrupción del LPUART antes de entrar en el modo *STOP*, permitiendo ser despertado para realizar las acciones correspondientes a cada caso.

Interrupción LPTIM

Dada la situación de despertar el sistema debido a la interrupción del LPTIM se deberá proceder de la siguiente manera.

En primer lugar, se deberán configurar los módulos ADC y la DMA, para luego activarlo. Mantener el ADC desactivado reducirá el consumo. Luego, si el sistema no detecta ningún fallo, se pondrá en marcha la adquisición y se esperará a que finalice. Cuando haya finalizado, será posible realizar todo tipo de algoritmos para tratar los datos, desde filtros FIR o transformar la señal al dominio frecuencial y realizar todo tipo de cálculos que se necesiten, gracias, en parte, a la FPU, que permite realizar las operaciones con punto flotante facilitando todo este tipo de algoritmos y cálculos.

Habiendo realizado la adquisición y los cálculos necesarios, se habilitará el LPTIM de nuevo para despertar el sistema para la próxima adquisición y se habilitará el modo *STOP*.

Interrupción LPUART

En el caso de que la interrupción por el LPUART tenga lugar, el procedimiento será el siguiente.

En primer lugar se comprobará si la interrupción es debida a un evento de conexión completada. En caso contrario, se habilitará de nuevo la interrupción del LPUART y se habilitará el modo *STOP*.

En cambio, en el caso de haber establecido conexión con otro dispositivo, se dispondrá a enviar los datos, procesados o directamente los datos adquiridos, mediante paquetes ACL, paquetes asíncronos, usando el *handle* de la conexión que aparecerá en el evento de conexión completada.

Una vez enviados todos los datos, se reconfigurará la DMA y se reseteará el buffer, permitiendo almacenar las siguientes adquisiciones sin problemas de memoria.

Finalmente, se habilitará la interrupción de nuevo y el modo *STOP*. El *main.c* de este algoritmo se puede encontrar en el anexo.

8.3. Consumo

A continuación se contabilizará el consumo del microprocesador.

La tabla 8.1 muestra el consumo del microprocesador por cada fase y el tiempo que se mantiene en esa fase cada día teniendo en cuenta que realizará 20 adquisiciones de 0,5 segundos y transmitirá los datos al dron una vez.

Fase	Consumo	Tiempo
Modo STOP	3,98 μ A	86390 s
Despertando de STOP	2,1 mA	0,166 ms
Adquiriendo	3,32 mA	10 s
Durante la transmisión	3,04 mA	500 ms

Cuadro 8.1: Consumo microprocesador

Esto implica un consumo de media de 3,88 μ A, si le añadimos el consumo del transceptor Bluetooth que se mantiene en modo *advertisement* excepto los 500 ms de conexión obtenemos una media de 301,89 μ A. Esto significaría que, con una pila de 3,6 V y 3400 mAh se podría mantener el nodo operativo durante 1 año, 3 meses, 8 días y 11 horas. Aún teniendo en cuenta un margen de error del 20% el sistema se podría alimentar con una sola pila durante 1 año.

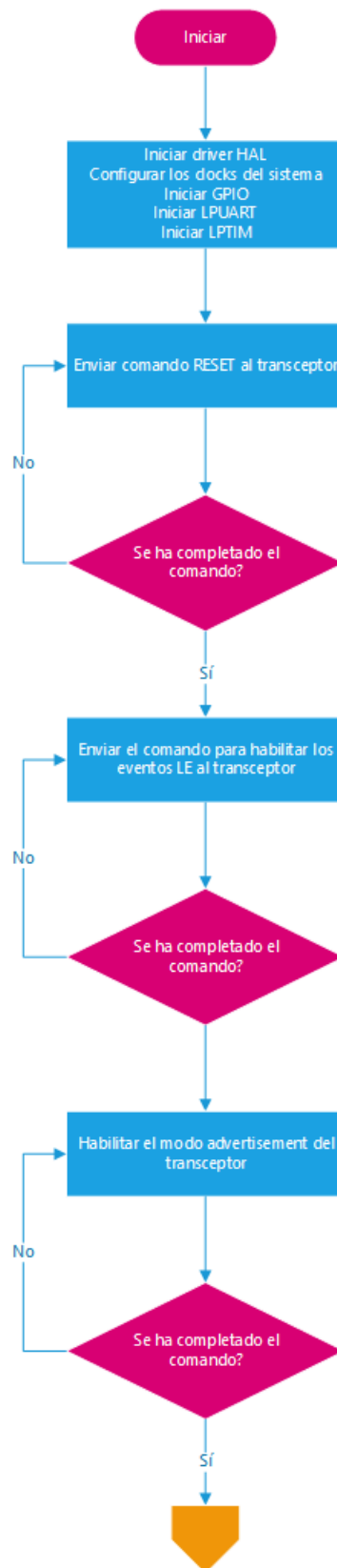


Figura 8.9: Diagrama del algoritmo del microprocesador del nodo parte 1

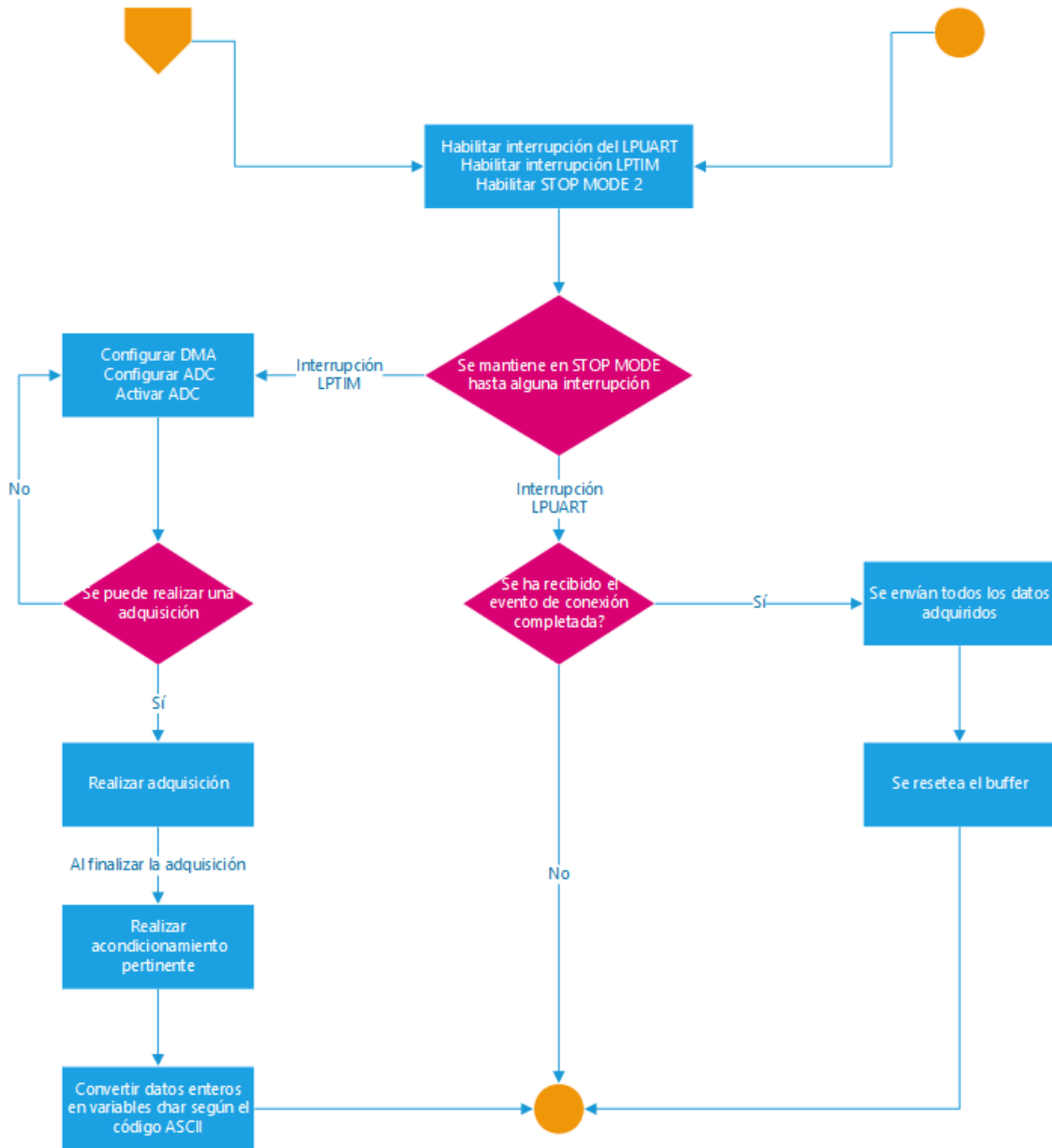


Figura 8.10: Diagrama del algoritmo del microprocesador del nodo parte 2

9 | Validación

A continuación, se identificarán las pruebas correspondientes que se han realizado para validar el prototipo elaborado según se ha detallado a lo largo del informe. Se detallará en que consiste la prueba, los resultados que se esperan obtener y los resultados obtenidos finalmente. Se distinguen dos categorías, las pruebas realizadas en el laboratorio y las pruebas realizadas en una zona exterior apta para ello.

9.1. Pruebas de laboratorio

9.1.1. Pruebas comunes a todos los dispositivos

Prueba 1.1. Comprobar la conexión eléctrica

En esta prueba se comprobaba, visualmente y mediante la función de continuidad de un multímetro, si el cableado y las conexiones se encuentran en buen estado y correctamente en la posición pertinente. Esta prueba es de suma importancia ya que un error podría producir un cortocircuito capaz de freír los distintos dispositivos eléctricos, produciendo daños irreparables.

De los resultados se espera que la conexión sea satisfactoria.

Como se esperaba las diferentes conexiones están bien realizadas.

9.1.2. Pruebas sobre el dron

Prueba 2.1. Comprobar el funcionamiento de los motores

En esta prueba, se quitarán las hélices del vehículo, ya que al encontrarse dentro de un edificio podría ser peligroso, y se proporcionarían diferentes señales para valorar la respuesta de los motores.

Unos resultados correctos consistirían en los motores girando en la dirección correcta, la esquina superior derecha e inferior izquierda en sentido positivo y los restantes en sentido negativo. Además, al variar la señal se debería apreciar una variación en la velocidad de los motores.

Una vez realizada la prueba, los resultados han sido satisfactorios.

Prueba 2.2. Comprobar el funcionamiento del módulo de telemetría

En esta prueba, se conectará el segundo dispositivo a un ordenador y, al conectar la batería en el vehículo, se observará si se recibe alguna señal en el *Mission Planner*.

Si el módulo funciona correctamente, la aplicación nos mostrará que ha establecido conexión con un vehículo. Al mover el vehículo, las variables que aparecen en pantalla deberían cambiar.

La prueba se ha realizado con éxito.

Prueba 2.3. Comprobar el funcionamiento de la salida digital

Se usará la aplicación *Mission Planner*, para planear una ruta donde simplemente se use el comando `DO_SET_RELAY` para levantar la salida digital. Se medirá la tensión usando un voltímetro.

Se espera que antes de iniciar la misión el voltímetro marque 0 Voltios y una vez empezada 5 Voltios.

Los resultados obtenidos han sido los mismos que el caso que se ha descrito anteriormente. Se puede validar el funcionamiento de la salida digital.

9.1.3. Pruebas sobre el microprocesador**Prueba 3.1. Comprobar la magnitud de la adquisición**

Primero, se modificará el canal de adquisición a un puerto fácilmente accesible. Luego, mediante una fuente de alimentación, se conectará el puerto designado a una tensión de 1 V y se realizará una adquisición.

Si el algoritmo funciona correctamente, los valores adquiridos se encontrarán alrededor de 1200, ya que la resolución es de 12 bits de manera que el valor máximo que es capaz de adquirir, 3,3 V, se corresponde a 4095 ya que $2^{12} = 4096$ por lo que, incluyendo el cero disponemos de 4096 valores.

Usando el debugger de Keil, se observa que el resultado se encuentra en los límites deseados. La figura 9.1 muestra los resultados obtenidos en el debugger.

Prueba 3.2. Comprobar el funcionamiento del *stop mode*

Para comprobar si el microprocesador entra y sale correctamente del *stop mode* se modificará el código para conmutar un LED integrado en la placa cuando se produzca una interrupción. De manera que nos indicará que ha salido del *stop mode*.

Name	Value	Type
aADCxADCyMultimodeDua...	0x2000008C aADCxAD...	unsigned short[60300]
[0]	1194	unsigned short
[1]	1192	unsigned short
[2]	1194	unsigned short
[3]	1196	unsigned short
[4]	1196	unsigned short
[5]	1195	unsigned short
[6]	1199	unsigned short
[7]	1192	unsigned short
[8]	1192	unsigned short
[9]	1197	unsigned short
[10]	1194	unsigned short
[11]	1193	unsigned short
[12]	1199	unsigned short
[13]	1202	unsigned short
[14]	1197	unsigned short
[15]	1194	unsigned short
[16]	1197	unsigned short
[17]	1197	unsigned short
[18]	1188	unsigned short
[19]	1194	unsigned short
[20]	1196	unsigned short

Figura 9.1: Debugger del programa Keil mostrando el vector con los valores adquiridos

Si el algoritmo funciona correctamente, el LED conmutará cada vez que conectemos el puerto correspondiente a la interrupción a una tensión cercana a 3'3 voltios.

La prueba ha sido un éxito y el LED ha conmutado.

9.1.4. Pruebas sobre las comunicaciones

Prueba 4.1. Comprobar la transferencia de datos mediante bluetooth

Se preparará el algoritmo en el microprocesador del nodo de manera que al realizar la conexión envíe un mensaje concreto, por ejemplo *"Hello"* y, una vez programado, se alimentará. Usando el debugger ejecutaremos el programa del microprocesador del nodo que se encargará de establecer la conexión.

El resultado que se espera es observar el mensaje *"Hello"* en el debugger tras establecer conexión.

Se ha realizado la prueba con éxito. La imagen 9.2 muestra el vector con el paquete de data recibido mediante bluetooth.

Name	Value	Type
TxBuffer	0x2000012A TxBuffer[] ...	unsigned char[256]
RxBuffer	0x2000002A RxBuffer[]...	unsigned char[256]
[0]	0x02	unsigned char
[1]	0x20 ' '	unsigned char
[2]	0x20 ' '	unsigned char
[3]	0x05	unsigned char
[4]	0x00	unsigned char
[5]	0x48 'H'	unsigned char
[6]	0x65 'e'	unsigned char
[7]	0x6C 'l'	unsigned char
[8]	0x6C 'l'	unsigned char
[9]	0x6F 'o'	unsigned char

Figura 9.2: Debugger del programa Keil mostrando el vector con los valores recibidos por bluetooth

9.2. Pruebas de campo

Prueba 5.1. Realización de un vuelo previamente establecido

En este caso se diseñará una misión que consista en trasladarse a un punto y volver. Si el dron desempeña este acto se podrá considerar un vehículo plenamente funcional.

Se espera que el dron realice la misión de manera estable y precisa.

Los resultados han sido suficientemente aceptables, el viento ha influido en la estabilidad del vehículo aunque la misión se ha realizado con éxito.

Prueba 5.2. Realización de una misión completa

La prueba consistirá en depositar el nodo con el algoritmo final en un punto determinado. El dron deberá ser capaz de obtener los datos del nodo.

Para considerar la prueba valida, será necesario que el dron se desplace hasta la posición del nodo, active la salida digital, espere 5 segundos y retorne a la zona de despegue. En el tiempo que se mantenga estable, los el microprocesador sobre el dron deberá establecer conexión con el nodo y obtener los datos que haya adquirido.

Finalmente, el sistema de monitorización ha funcionado en todos sus aspectos y se puede considerar válido.

10 | Revisión del presupuesto

En el documento presupuesto se puede encontrar un desglose más detallado. Aún así, la tabla 10.1 muestra, en términos generales, los costes del proyecto.

Recursos humanos	8550 €
Prototipo	517 €
Total	9067 €

Cuadro 10.1: Presupuesto general

Se trata de un proyecto viable y económico. Durante la realización se ha intentado mantener los costes del prototipo bajos y los resultados se han mostrado satisfactorios.

11 | Impacto ambiental

Este proyecto, como ya se ha mencionado, propone un sistema de monitorización. Este sistema está enfocado a la captación de señales analógicas, magnitudes físicas en una localización.

El uso de estos dispositivos, permitiría monitorizar zonas muy diversas, como por ejemplo un campo de cultivos muy amplio, de manera que monitorizando variables de temperatura, humedad y propiedades del suelo se podría optimizar el sistema de riego y la utilización de abonos. También sería posible colocar el nodo en grandes masas de agua, pudiendo analizar corrientes, la temperatura y calidad del agua, la intensidad de las mareas o la velocidad del viento entre otras para estudiar el efecto de agentes externos o incluso la evolución de estas magnitudes con el cambio climático.

En definitiva, este sistema propone soluciones a diversos problemas que conllevaría una mejora en el aspecto ambiental, pudiendo controlar la huella humana sobre el planeta Tierra y prevenir daños irreparables.

Además, el consumo energético del nodo es considerablemente reducido, de manera que sería posible incorporar en algunos casos una fuente de energías renovables, por ejemplo mediante placas fotovoltaicas, que mantuvieran el dispositivo autosuficiente.

En cuanto al prototipo realizado, el diseño del vehículo por piezas permite una configuración modulable, de manera que en caso de fallar algún elemento o al finalizar su función como parte de este sistema, puede ser reconfigurado y reutilizado, alargando su vida útil. También es cierto que diversos componentes poseen productos químicos, sobretodo los componentes electrónicos. Cabe decir, que todos los componentes electrónicos usados siguen la directiva europea 2011/65/UE (Reestructuración de sustancias peligrosas) [30].

12 | Futuro desarrollo

Pese a todo el trabajo desarrollado, el concepto de este proyecto permitiría realizar ampliaciones para perfeccionar el estudio y desarrollar un sistema aún más completo. A continuación se proponen algunos desarrollos interesantes para un futuro.

- Optimización del dron. En este proyecto se ha desarrollado un UAV funcional, sería conveniente la realización de un estudio para optimizar su funcionamiento en las condiciones que se proponen.
- Desarrollo del chasis del UAV. En el proyecto se escogió un chasis prefabricado, el diseño de una estructura especialmente pensada para esta aplicación sería conveniente.
- Desarrollo de una red. En el prototipo se ha desarrollado únicamente un nodo. El uso de diferentes nodos permitirían abarcar una gran zona monitorizada y ampliar la calidad de los datos obtenidos creando una red interconectada.
- Desarrollo de una estación base. El desarrollo de una estación base desde donde controlar el vehículo y recibir los datos traídos por el dron, ya sea para analizarlos o subirlos a internet para compartirlos, aportaría una gran mejora al sistema de monitorización.
- Estudio energético. Realizar un estudio para la incorporación de sistemas de energías renovables que mantuvieran el dispositivo autosuficiente sería positivo.

13 | Conclusiones

El objetivo del trabajo consistía en tres puntos. Primero, estudiar la posibilidad de realizar el desarrollo de un sistema de monitorización basado en dron. En segundo lugar diseñar el sistema y finalmente realizar un prototipo.

Para resolver el problema planteado, en primer lugar se ha propuesto un sistema formado por un dron y un nodo, el nodo se encarga de la adquisición de las propiedades a monitorizar y el vehículo las recoge de manera inalámbrica cuando se cree necesario. Este sistema permite registrar las variables en diversos instantes de forma autónoma sin ser necesario usar el vehículo para cada adquisición.

En cuanto al UAV se ha diseñado como un quadcopter, con piloto automático incorporado en el controlador de vuelo. El vehículo ofrece maniobrabilidad suficiente y presenta unas buenas prestaciones para el fin con el que se ha diseñado, es capaz de volar de forma autónoma durante 15-25 minutos.

Para las comunicaciones, se ha incorporado al vehículo un microprocesador y un transceptor Bluetooth LE que se encarga de la recepción de datos cuando el controlador lo pide. Esta solución permite mantener el sistema en bajo consumo hasta que resulta necesario. Las comunicaciones han probado dar buenos resultados tanto en efectividad como en consumo.

Finalmente, para resolver el problema, se ha usado la misma combinación nodo y transceptor Bluetooth para actuar como nodo. El microprocesador es capaz de realizar las adquisiciones y las transferencias de datos correctamente presentando un consumo mínimo gracias a las opciones de bajo consumo que ofrece el microprocesador y la mejora en la tecnología Bluetooth que ha desarrollado esta nueva versión de consumos mucho mas bajos. El nodo sería capaz de mantenerse operativo durante un año con una sola pila de 3,6 V y 3400 mAh.

El motivo de esta solución surge de la unión entre los sistemas IoT y los UAVs, ambos en pleno crecimiento actualmente y con proyección de futuro. Permite un sistema de monitorización relativamente económico, accesible y eficaz, con la posibilidad de crear una gran red de monitorización interconectada, pudiendo prevenir consecuencias ambientales u optimizar sistemas de control.

Bibliografía

- [1] U.S. Air Force. MQ-9 Reaper > U.S. Air Force > Fact Sheet Display.
- [2] DJI Inspire 2 - Tu ingenio amplificado - DJI.
- [3] Ernesto Santana. Tipos de drones - Conoce todos los tipos de drones que existen.
- [4] Pulse aerospace - Class leading UAS systems.
- [5] Andrea Zamuner. Coax Copter with Pixhawk - DIY Drones, 2015.
- [6] Affordable Ready-to-Fly Hybrid VTOL Drone – UAS VISION.
- [7] Hobbyking.
- [8] RC Innovations.
- [9] Copter Home — Copter documentation.
- [10] Cypress - Microcontrollers, Connectivity, Memory Solutions.
- [11] STMicroelectronics - life.augmented.
- [12] Ferran Adelantado, Xavier Vilajosana, Pere Tuset-Peiro, Borja Martinez, Joan Melià-Seguí, and Thomas Watteyne. Understanding the Limits of LoRaWAN. Technical report.
- [13] Ramon Sanchez-Iborra, Jesus Sanchez-Gomez, Juan Ballesta-Viñas, Maria-Dolores Cano, Antonio Skarmeta, Ramon Sanchez-Iborra, Jesus Sanchez-Gomez, Juan Ballesta-Viñas, Maria-Dolores Cano, and Antonio F. Skarmeta. Performance Evaluation of LoRa Considering Scenario Conditions. *Sensors*, 18(3):772, mar 2018.
- [14] Mario Zwiers. First LoRa Node - The real power consumption - Mario Zwiers.
- [15] Brian Ray. A Bluetooth & ZigBee Comparison For IoT Applications, 2015.
- [16] What is ZigBee, specification and its applications - RF Page.
- [17] Mohammed Afaneh. Bluetooth 5 & BLE: Achieving maximum throughput and speed | Novel Bits, 2017.
- [18] Lin Zhong. Power Consumption by Wireless Communication. Technical report, 2011.

- [19] Goldman Sachs. Drones: Reporting for Work.
- [20] Paul Fahlstrom and Thomas Gleason. Introduction to UAV Systems, 4 ed. Technical report, 2012.
- [21] Nivedit Majumdar. The Consumer Drone Market: Trend Analysis – Emberify Blog.
- [22] Masha Borak. World’s top drone seller DJI made \$2.7 billion in 2017 · Tech-Node.
- [23] Helge Aasen. State-of-the-art in UAV remote sensing survey-First insights into applications of UAV sensing systems. 2017.
- [24] Jane K. Hart and Kirk Martinez. Toward an environmental Internet of Things. *Earth and Space Science*, 2(5):194–200, 2015.
- [25] Microprocesador: Concepto, Historia y Características.
- [26] Microprocessor - GeeksforGeeks.
- [27] Tecnología Inalámbrica, Principales Redes y Modos de Uso - Quonty.
- [28] R. (Ramu) Krishnan. *Permanent magnet synchronous and brushless DC motor drives*. CRC Press/Taylor & Francis, 2010.
- [29] Electronic Speed Control (ESC) | Information & Guide to Electronic Speed Controllers System.
- [30] Parlamento Europeo. Directiva 2011/65/UE del parlamento europeo y del consejo. Technical report, 2011.
- [31] DRONE REPORT POLICY REPORT. Technical report, 2018.
- [32] DroneThusiast. Drone Market Analysis (The Commercial Drone Market In 2019).
- [33] DroneDeploy. Commercial Drone Industry Trends. Technical report, 2018.
- [34] Francesco Castellano. The Drone Market and Industry Trends | Toptal.
- [35] Zeeshan Kaleem and Mubashir Rehmani Husain. Amateur Drone Monitoring: State-of-the-Art Architectures, Key Enabling Technologies, and Future Research Directions. Technical report.
- [36] Richard K Barnhart, Stephen B Hottman, Douglas M Marshall, and Eric Shappee. UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS. Technical report.
- [37] Eva María Urbano González. Autonomous aerial vehicle: flight control and energy management. jun 2017.