



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería en Ciencias y Sistemas

**DISEÑO Y PROGRAMACIÓN DE SOFTWARE PARA LA  
AUTOMATIZACIÓN DE DRONES UTILIZANDO LA PLATAFORMA ARDUINO**

**Luis Estuardo Sánchez Mejía**

Asesorado por el Ing. Otto René Escobar Leiva

Guatemala, marzo de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO Y PROGRAMACIÓN DE SOFTWARE PARA LA  
AUTOMATIZACIÓN DE DRONES UTILIZANDO LA PLATAFORMA ARDUINO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**LUIS ESTUARDO SÁNCHEZ MEJÍA**

ASESORADO POR EL ING. OTTO RENÉ ESCOBAR LEIVA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO EN CIENCIAS Y SISTEMAS**

GUATEMALA, MARZO DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Herman Igor Véliz Linares
EXAMINADOR	Ing. Miguel Ángel Cancinos Rendón
EXAMINADOR	Ing. César Augusto Fernández Cáceres
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **DISEÑO Y PROGRAMACIÓN DE SOFTWARE PARA LA AUTOMATIZACIÓN DE DRONES UTILIZANDO LA PLATAFORMA ARDUINO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería en Ciencias y Sistemas, con fecha julio de 2016.



**Luis Estuardo Sánchez Mejía**



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería en Ciencias y Sistemas

Guatemala, 27 de diciembre de 2016

Señor  
Ing. Carlos Azurdia  
Carrera de Ciencias y Sistemas  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala  
Guatemala, Ciudad

Respetable Ing. Azurdia:

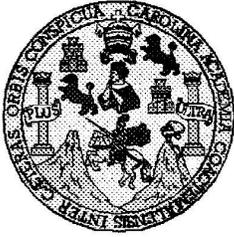
El motivo de la presente es para informarle que como asesor del estudiante Luis Estuardo Sánchez Mejía he procedido a revisar el trabajo de graduación titulado **"DISEÑO Y PROGRAMACIÓN DE SOFTWARE PARA LA AUTOMATIZACIÓN DE DRONES UTILIZANDO LA PLATAFORMA ARDUINO"** y que de acuerdo a mi criterio el mismo se encuentra concluido.

He tenido reuniones periódicas con el estudiante y luego de haber revisado cuidadosamente el trabajo, considero que cumple con los requisitos de calidad y profesionalismo que deben caracterizar a un futuro profesional de la informática.

Sin otro particular me suscribo de usted,

Atentamente,

F.   
Ing. Otto Rene Escobar Leiva  
**Otto Rene Escobar Leiva**  
**INGENIERO ELÉCTRICISTA**  
**Colegiado # 3123**



Universidad San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería en Ciencias y Sistemas

Guatemala, 25 de Enero de 2017

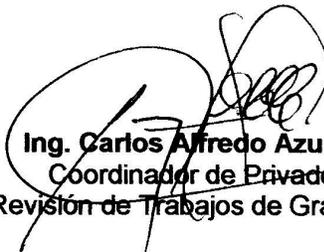
Ingeniero  
**Marlon Antonio Pérez Türk**  
**Director de la Escuela de Ingeniería**  
**En Ciencias y Sistemas**

Respetable Ingeniero Pérez:

Por este medio hago de su conocimiento que he revisado el trabajo de graduación del estudiante **LUIS ESTUARDO SÁNCHEZ MEJÍA** con carné **201021145**, titulado: **“DISEÑO Y PROGRAMACIÓN DE SOFTWARE PARA LA AUTOMATIZACIÓN DE DRONES UTILIZANDO LA PLATAFORMA ARDUINO”**, y a mi criterio el mismo cumple con los objetivos propuestos para su desarrollo, según el protocolo.

Al agradecer su atención a la presente, aprovecho la oportunidad para suscribirme,

Atentamente,

  
**Ing. Carlos Alfredo Azurdia**  
Coordinador de Privados  
y Revisión de Trabajos de Graduación



E  
S  
C  
U  
E  
L  
A  
  
D  
E  
  
I  
N  
G  
E  
N  
I  
E  
R  
Í  
A  
  
E  
N  
  
C  
I  
E  
N  
C  
I  
A  
S  
  
Y  
  
S  
I  
S  
T  
E  
M  
A  
S

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA EN  
CIENCIAS Y SISTEMAS  
TEL: 24767644

*El Director de la Escuela de Ingeniería en Ciencias y Sistemas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor con el visto bueno del revisor y del Licenciado en Letras, del trabajo de graduación **“DISEÑO Y PROGRAMACIÓN DE SOFTWARE PARA LA AUTOMATIZACIÓN DE DRONES UTILIZANDO LA PLATAFORMA ARDUINO”**, realizado por el estudiante **LUIS ESTUARDO SÁNCHEZ MEJÍA** aprueba el presente trabajo y solicita la autorización del mismo.*

**“ID Y ENSEÑAD A TODOS”**

Ing. *Marlon Antonio* Pérez Türk

**Director**

**Escuela de Ingeniería en Ciencias y Sistemas**



Guatemala, 14 de marzo de 2017

Universidad de San Carlos  
de Guatemala

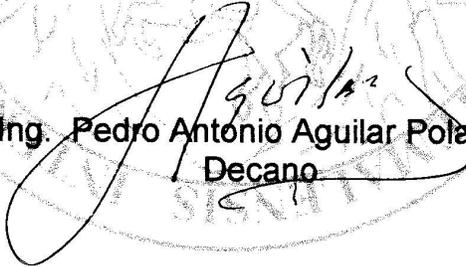


Facultad de Ingeniería  
Decanato

Ref.DTG.D.137.2017

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería en Ciencias y Sistemas, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO Y PROGRAMACIÓN DE SOFTWARE PARA LA AUTOMATIZACIÓN DE DRONES UTILIZANDO LA PLATAFORMA ARDUINO**, presentado por el estudiantes universitario: **Luis Eduardo Sánchez Mejía** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano



Guatemala, marzo 2017

/cc

## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Dios**

Por darme la fuerza para hacer las cosas bien, sabiduría para tomar las mejores decisiones y terminar la carrera.

### **Mi madre**

Odilia Mejía Barrientos, su amor y determinación serán mi guía en la vida.

### **Mis hermanos**

Ligia, Claudia y Erick, por siempre ayudarme en el transcurso de la carrera, entre otras cosas.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por darme los conocimientos adecuados para desempeñar actividades profesionales en un trabajo.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por ser una importante influencia en mi carrera.
<b>Mis amigos de la Facultad</b>	Aníbal Gómez, Raúl Hernández, Erick To, José Vargas, Jesús Guzmán, Sidney Osorio, José Cortes, Mario Rubio, Kevin Cardona, Kevin Godínez, Herber Vázquez, Víctor Castañeda, Fabelio Ajtun, David Pineda, Carlos Monzón, por ayudarme en todas las clases que cursamos juntos y brindarme un poco de su tiempo para solventar problemas en la carrera.
<b>Antonio Quintanilla</b>	Por brindarme ideas que me ayudaron a superar problemas en los diversos proyectos que hice en mi carrera.
<b>Asesor de trabajo de graduación</b>	Que me apoyó dándome ideas, experiencia sobre el tema, para terminar este trabajo de graduación.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	IX
GLOSARIO .....	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN .....	XVII
1. ASPECTOS GENERALES.....	1
1.1. Etimología.....	1
1.2. Historia de un dron .....	1
1.3. Ventajas.....	2
1.4. Desventajas.....	4
1.5. Clasificación .....	4
1.5.1. Blanco.....	5
1.5.2. Reconocimiento.....	5
1.5.3. Combate.....	6
1.5.4. Logística .....	6
1.5.5. Investigación y desarrollo .....	6
1.5.6. Drones comerciales .....	7
1.6. Aplicaciones .....	7
1.6.1. Internet .....	8
1.6.2. Agricultura.....	8
1.6.3. Servicios forestales.....	8
2. COMPONENTES TÍPICOS DE UN DRON .....	9

2.1.	Marco .....	9
2.2.	Motores, hélices y ESCs .....	10
2.3.	Controlador de vuelo.....	13
2.4.	GPS y brújula .....	15
2.5.	Radio receptor.....	15
2.6.	Cámara y estabilizador.....	16
2.7.	Baterías.....	17
2.8.	Presupuesto aproximado .....	18
2.9.	Estudio de autonomía .....	19
3.	DISEÑO .....	21
3.1.	Objetivo .....	21
3.2.	Diseño estructural .....	21
3.2.1.	Optimización de estructura.....	25
3.2.2.	Diagrama de estructura .....	37
3.2.3.	Estudio de la dinámica de un dron .....	40
3.2.4.	Configuraciones típicas de un dron .....	41
3.3.	Diseño electromecánico .....	44
3.3.1.	Selección y optimización de componentes.....	45
3.3.2.	Propuesta de diagrama de conexión .....	52
3.4.	Diseño de software.....	54
3.4.1.	Diagrama de secuencia.....	55
3.4.2.	Diagrama de componentes .....	55
3.4.3.	Diagrama de casos de uso.....	56
3.4.4.	Diagrama de flujo de funcionamiento del software.....	57
3.5.	Arquitectura de Arduino.....	59

4.	DESARROLLO DE SOFTWARE.....	63
4.1.	Objetivo .....	63
4.2.	Entorno de desarrollo .....	63
4.3.	Instalación de entorno de desarrollo.....	64
4.4.	Conectar Arduino.....	65
4.5.	Envío de información a motores .....	66
4.6.	Conexión inalámbrica vía Xbee .....	67
4.7.	Desarrollo de software.....	69
4.8.	Verificación de carga de la batería .....	70
5.	NORMAS DE REGLAMENTACIÓN .....	73
5.1.	Objetivo .....	73
5.2.	Pistas de lanzamiento y consideraciones de reglamentación con Aeronáutica Civil.....	73
5.3.	Pasos para registrar un dron en Aeronáutica Civil .....	74
5.4.	Autorizaciones para la operación de aviones no tripulados.....	75
	CONCLUSIONES .....	77
	RECOMENDACIONES.....	79
	BIBLIOGRAFÍA.....	81
	APÉNDICES .....	83

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Imagen representativa de un dron .....	2
2.	Marco de un dron .....	10
3.	Ecuación de empuje.....	11
4.	Motores, hélices y ESCs .....	12
5.	Controlador de vuelo Pixhawk.....	14
6.	Controlador de vuelo típico de un dron .....	14
7.	GPS y brújula de un dron .....	15
8.	Radio receptor de un dron.....	16
9.	Cámara y estabilizador típicos de un dron .....	17
10.	Batería típica de un dron .....	18
11.	3DR quadC .....	22
12.	Flujo de aire movido por una hélice .....	23
13.	Elección de maderas, densidad frente al límite elástico.....	26
14.	Deformación angular .....	27
15.	Fórmula flecha .....	27
16.	Tensión .....	28
17.	Flexión brazo.....	29
18.	Chasis. ....	31
19.	Placa sucia.....	33
20.	Soporte de motor .....	34
21.	Deformación sobre soporte de motor .....	35
22.	R-CLIP. ....	36

23.	Pasador .....	36
24.	Pasadores de nailon .....	37
25.	Diagrama de estructura por peso.....	38
26.	Modelo.....	39
27.	Ejemplo de principio físico de sustentación de drones y helicópteros .....	40
28.	Configuraciones típicas de un dron.....	41
29.	Mapa de movimientos de un dron (configuración X).....	44
30.	Motor EMAX CF2822.....	47
31.	ESC EMAX 25 <sup>a</sup> .....	48
32.	Batería LiPo 2200mAh.....	50
33.	Cargador de baterías LiPo.....	50
34.	Sensor Altimu-10 .....	52
35.	Raizor 9DOF .....	52
36.	Diagrama de conexión .....	53
37.	Conexión entre Pixhawk y Arduino nano .....	54
38.	Diagrama de secuencia .....	55
39.	Diagrama de componentes.....	56
40.	Diagrama de caso de uso propuesto .....	57
41.	Diagrama de flujo propuesto.....	58
42.	Arquitectura de Arduino .....	60
43.	Tarjeta Arduino .....	61
44.	IDE de Arduino.....	64
45.	Proyecto de enlace con Arduino .....	65
46.	Selección de puerto donde está conectado Arduino físico .....	66
47.	Configuración de un motor en Arduino .....	66
48.	Zigbee RF Modules Xbee Pro S2 .....	67
49.	Placa de conexión de módulo Xbee con entrada mini USB.....	68

## TABLAS

I.	Duración promedio de batería de un dron típico. ....	4
II.	Presupuesto aproximado de componentes de un dron .....	18
III.	Consumo de energía y peso de componentes .....	19
IV.	Componentes típicos para construir un dron.....	20
V.	Cálculos aproximados flexión de brazo .....	29
VI.	Elementos que conforman la estructura ordenados por peso .....	38
VII.	Listado de movimientos de un dron (configuración X).....	43
VIII.	Características de motor EMAX CF2822 .....	46
IX.	Descripción de componentes Arduino.....	59
X.	Descripción técnica de Arduino.....	59



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>RXD</b>	Comúnmente es la línea (pin) de entrada serial de datos un dispositivo digital.
<b>TXD</b>	Comúnmente es la línea (pin) de transmisión serial de datos en un dispositivo digital.
<b>GND</b>	Es el punto cero de todas las tensiones eléctricas que puedan estar presentes en un aparato eléctrico.
<b>g</b>	Gramo.
<b>Hz</b>	Hercio.
<b>Kg</b>	Kilogramo.
<b>C#</b>	Lenguaje de programación orientado a objetos.
<b>C++</b>	Lenguaje de programación.
<b>mA</b>	Miliamperio.
<b>mm</b>	Milímetro.
<b>ms</b>	Milisegundo.
<b><math>\Omega</math></b>	Ohmio.
<b>DTR</b>	Pin de transferencia de datos.

**VDD**

Tensión positiva de alimentación en un dispositivo electrónico.

**V**

Voltaje.

## GLOSARIO

<b>ARDUPILOT</b>	Software que se utiliza para la simulación de drones
<b>AGL</b>	Siglas que comúnmente se refieren a la altitud sobre el nivel del mar.
<b>Bancada</b>	Constituye la parte inferior de un motor.
<b>DGAC</b>	Dirección General de Aeronáutica Civil.
<b>FTDI</b>	Emulador de puerto serial.
<b>GIMBAL</b>	Estabilizador de vuelo utilizado en drones.
<b>GPS</b>	Sistema americano de navegación y localización.
<b>GPIO</b>	Pin genérico en un chip, el cual se puede controlar por el usuario en tiempo de ejecución.
<b>I2C</b>	Bus de comunicaciones en red, tipo serial.
<b>KV</b>	Constante de velocidad de un motor.
<b>Logística</b>	Conjunto de medios y métodos necesarios para llevar a cabo la organización de una empresa.

<b>MAVlink</b>	Protocolo para la comunicación con un pequeño vehículo no tripulado.
<b>Metodologías</b>	Conjunto de buenas prácticas racionales para alcanzar objetivos definidos.
<b>MJPEG</b>	Representa formatos multimedia donde cada fotograma de una secuencia de video.
<b>PWMx6</b>	Dispositivo utilizado para montar cables de electricidad.
<b>RPIO</b>	Módulo GPIO avanzado para el Raspberry Pi.
<b>Tecnología</b>	Conjunto de conocimientos técnicos, científicamente ordenados, que permiten crear y diseñar bienes y servicios que tienen como objetivo facilitar la vida del ser humano.
<b>UAV</b>	Vehículo aéreo no tripulado.
<b>Waypoints</b>	Coordenadas para ubicar puntos de referencia tridimensionales utilizados en la navegación fundamentada en GPS.

## RESUMEN

Este trabajo consiste en la investigación, diseño y programación de software mediante la plataforma Arduino.

El primer capítulo abarca la historia básica de un dron, y los conceptos relacionados al mismo, entre algunos conceptos podemos hablar sobre sus aplicaciones, ventajas, desventajas, etc.

El segundo capítulo trata sobre los componentes necesarios que se manipularán en el diseño y programación de un software que permita a un dron realizar acciones de manera autónoma. También se analiza el presupuesto que se requiere para adquirir cada componente y que se debe tener en cuenta para obtener el mayor rendimiento posible al unificar cada componente.

El tercer capítulo trata sobre crear un diseño general estable, en el cual entran en juego áreas específicas de estudio, como estructura física, análisis electromecánico y, por último, un diseño de software óptimo.

El cuarto capítulo desarrollara el software capaz de hacer que un dron pueda despegar, realizar maniobras y regresar sano y salvo a su origen. Se presentan tareas como monitorear el estado del dron, cómo verificar la carga de la batería, sensores.

Finalmente, en el quinto capítulo se presenta el reglamento que tiene Guatemala para el uso de drones, y qué pasos hay que cumplir para su registro.



# OBJETIVOS

## General

Investigar y dar a conocer una propuesta sólida y viable de software que permita a un dron realizar tareas de forma autónoma, empezando primero con una selección óptima de componentes, tomando en cuenta presupuesto y realizando un estudio de autonomía para verificar si la selección fue la correcta. Luego, realizar un análisis y diseño pertinente para que el desarrollo de software para la plataforma Arduino permita cambios rápidos y sin demoras en los requerimientos iniciales y en donde pueda ser aplicado en drones comerciales.

## Específicos

1. Desarrollar un software que pueda ser utilizado en drones comerciales o caseros.
2. Explicar cómo diseñar, programar y optimizar la tecnología de un dron.
3. Dar a conocer una propuesta de diseño sólida y entendible para la construcción de software para drones utilizando la plataforma Arduino que pueda ser empleada por todos.



## INTRODUCCIÓN

El uso de la tecnología genera soluciones de alta calidad y su uso generalizado propondría soluciones de bajo costo a muchos de los problemas que aquejan al país. En Guatemala, la compra y manejo de tecnología no está explotado y las opciones están a la vuelta de la esquina, solo es cuestión de darlas a conocer y hacer que las personas se sientan cómodas con su uso.

El desarrollo de nuevas metodologías tecnológicas en Guatemala aun no se ha probado. Este trabajo de investigación permitirá que las personas conozcan que el uso de drones no solo es para entretener, sino para automatizar tareas. Así como en la programación se busca la automatización de procesos, también en todas y cada una de las tareas que realizan los drones hay que conseguir que hagan su trabajo por sí solos.

Este trabajo recopilará toda la información necesaria para que se sepa la historia de un dron, cómo se puede diseñar, programar y usar su tecnología para dar solución a problemas de diversa índole.



# 1. ASPECTOS GENERALES

Este capítulo trata sobre las bases y conceptos básicos para que una persona pueda establecer qué es un dron.

## 1.1. Etimología

Vehículo aéreo no tripulado (VANT) o dron, que proviene del inglés *unmanned aerial vehicle* (UAV). También es muy utilizada la denominación vehículo aéreo no tripulado.

## 1.2. Historia de un dron

Para conocer un poco de la historia que impulsó a las personas a desarrollar un dron hay que remontarse a los años siguientes a la primera Guerra Mundial. Los datos más antiguos que se tienen sobre el uso de dispositivos aéreos no tripulados datan de 1849, cuando el 22 de agosto de ese año, el ejército austriaco los utilizó en una guerra contra Venecia, con globos cargados con explosivos. Se lanzaron desde un barco austriaco llamado Vulcano.

Después se utilizó el Aerial Target que data de 1916, el cual era controlado mediante radiofrecuencia AM baja, para afinar la puntería de la artillería anti-aérea. Luego, el 12 de septiembre el Hewitt-Sperry *Automatic Airplane*, conocido como la bomba volante, hizo su primer vuelo para demostrar el concepto de UAV.

Como se observa, los orígenes de la creación y utilización de los drones fue para uso militar. Sin embargo, es hasta el siglo XX cuando se utiliza un dron mediante control de radio con toda su autonomía.

Los drones han demostrado en diferentes escenarios el gran potencial que tienen en cuanto a la exploración en busca de información, ya que sobrevuelan a alturas elevadas para que sea imposible su detección. En la figura 1 se muestra un dron típico.

Figura 1. **Imagen representativa de un dron**



Fuente: [www.gpsparaciclismo.es](http://www.gpsparaciclismo.es). Consulta: abril de 2015.

### **1.3. Ventajas**

Una de las principales ventajas por las que se considera que en Guatemala puedan jugar un papel importante es que puede reemplazar a una persona en la ejecución de labores riesgosas, por ejemplo, el monitoreo de actividades clandestinas.

En la actualidad, los drones están de moda debido a su versatilidad plasmada en el elevado número de aplicaciones, por ejemplo seguridad, entrega de productos, fotografías, entre otros.

Los drones tienen la posibilidad de entrar a lugares de alto riesgo o donde el acceso para el ser humano es difícil o imposible, dentro de estos se cuentan las zonas de alta delincuencia.

No requieren de pilotos para hacer su trabajo, ya que se pueden programar para que haga sus vuelos de reconocimiento.

Ahorro de combustible para transporte, traducida en una economía sustentable en cuanto a su uso, esto en el caso de entrega de productos, algo que en Guatemala no se aplica.

Es posible automatizarlos o controlarlos por medio de un control remoto. En este trabajo de graduación se muestra cómo construirlos y automatizarlos para reducir costos. También se presentan diversas aplicaciones y simuladores que pueden ayudar a lograr el objetivo.

Reducción general de precio, en especial frente a otras opciones que son piloteadas, por ejemplo, helicópteros. Los drones tienen una gran estabilidad la cual permite tomar fotografías de diferentes áreas, obtención de mapas 3D de un terreno y la reducción de personal, ya que solo una persona encargada del dron puede realizar el trabajo.

#### 1.4. Desventajas

Una de las principales desventajas de usar drones es su batería, ya que requiere de una gran cantidad de energía. Por ejemplo la batería de un celular está llena de circuitos, entre ellos, procesadores, sensores, pantalla; esta batería dura al menos un día sin cargar. En un vehículo no tripulado que cuenta con un sistema informático para permitirle estar automatizados, también hay una parte mecánica sustancial. Entre esas partes están los motores que deben tener la potencia suficiente para despegar e impulsar al dron en el aire. La siguiente tabla muestra los drones más conocidos y la duración de su batería:

Tabla I. **Duración promedio de batería de un dron típico**

<b>Nombre dron</b>	<b>Duración (minutos)</b>
Phantom	25
Parrot AR Drone	15
Dron 3D Robotics IRIS	13

Fuente: elaboración propia.

Otra de las principales desventajas es que los drones pueden ser utilizados para fines no deseados, como por ejemplo el contrabando de objetos, extorsiones, entre otros.

En cuanto a los problemas legales, se debe tener en cuenta que las leyes actuales de Guatemala no contemplan el uso de drones. Por ello se dará información sobre si se puede o no utilizarlos en cualquier parte.

## **1.5. Clasificación**

Dependiendo del trabajo que desempeñen, suelen ser clasificados en seis tipos:

### **1.5.1. Blanco**

Son utilizados para simular aviones o ataques enemigos en los sistemas de defensa de tierra o aire. Suelen ir armados y se les ha visto en la televisión, utilizados en el ejército, comúnmente para realizar bombardeos. Su éxito radica en lo preciso que son y en que si son derribados no se lamenta ninguna pérdida humana. El hecho de no ir tripulados los hace mucho más baratos que un avión de combate normal, por ese motivo varios países, entre ellos Estados Unidos de América, trabajan en proyectos para desarrollar drones que en un futuro cercano podría reemplazar a los aviones de combate comunes.

### **1.5.2. Reconocimiento**

Utilizados para enviar información de algún hecho que estén observando, por ejemplo de algún evento o fiesta, detección de clima, entre otros. En Guatemala se han utilizado drones en eventos deportivos para observar a la multitud, para detectar y evitar percances. Aun no se utilizan en el área de delitos que maneja la policía nacional civil. Vale la pena mencionar que en la actualidad existen drones especiales con dispositivos de captura y grabación de audio y video de alta definición. También pueden contar con cámaras infrarrojas para funcionar de noche, por ese motivo tienen un gran potencial en esta área y se cree que contribuirían mucho en misiones de búsqueda, planeación táctica o vigilancia preventiva.

### **1.5.3. Combate**

El futuro de la tecnología ya está aquí, el UAV es el mayor avance que se ha experimentado en la aviación desde que se le dio armas a los aviones y se les mandó a luchar en la Primera Guerra Mundial. El ejército los utiliza para llevar a cabo misiones muy peligrosas, por ejemplo disparar contra un delincuente o realizar alguna actividad de espionaje. El entusiasmo por utilizar drones se ha multiplicado por el simple hecho de que no se pierden vidas humanas al ser derribados y su precisión y éxito al realizar sus misiones son muy elevados.

### **1.5.4. Logística**

Utilizados para llevar carga, un ejemplo muy reciente es la nueva metodología que utiliza Amazon para entregar sus productos, para ello, utilizan drones ahorrando dinero ya que no se le paga a un repartidor y tampoco gasolina para el vehículo donde se transportaba la mercancía en el pasado.

En Guatemala para utilizar un dron se debe registrar en Aeronáutica Civil, el proceso es igual al de un helicóptero u otra aeronave.

### **1.5.5. Investigación y desarrollo**

Con este tipo de drones se prueban e investigan nuevas formas para desarrollar tecnologías para el desarrollo de algún gobierno. Por ejemplo, las universidades investigan con esta tecnología para poder aplicarla a más áreas.

También en el área de desarrollo ya que la tecnología de un dron aún se puede mejorar, por ejemplo, el área más vulnerable de un dron es la duración de su batería ya que si solo dura 25 minutos, cada una de sus rondas tiene que ser de 25 minutos y debe regresar a su punto de origen para reabastecerse y poder continuar su trabajo. En tal sentido debería estar equipado con un sistema autosustentable para que una vez puesto en el aire, este no baje hasta que termine su horario de trabajo.

#### **1.5.6. Drones comerciales**

Son construidos para propósitos civiles, filmar películas y entretenimiento, existen diversos drones entre los cuales se puede mencionar los drones que fabrica la empresa AR Drone, Parrot, entre otros. Estos drones no tienen mayor tecnología, están compuestos por un control remoto y no están automatizados para realizar un vuelo de forma autónoma, deben tener a un usuario que los controle vía remota.

#### **1.6. Aplicaciones**

Se pueden utilizar drones en diferentes escenarios, usarlo en un ambiente donde hay altos índices de toxicidad química; también es posible emplearlos en seguridad pública, narcotráfico, terrorismo; recurrir a esta tecnología para el ambiente, parametrizando el índice de contaminación lumínica, elaboración de mapas de polución lumínica y monitorizar la eficiencia de medidas eco-energéticas. En agricultura, monitoreando cultivos. En geología, realizando mapas para el análisis de impacto de minería. En la construcción, realizando inspecciones de obras desde el aire, para el control y análisis de multitudes, manifestaciones y conciertos.

También para la exploración de lugares de difícil acceso como cuevas o precipicios. Para la movilidad y tránsito grabando y monitoreando la situación vehicular y, por último, es posible grabar videos de alta definición para ser empleados como medios de prueba en algún juicio.

#### **1.6.1. Internet**

Se puede utilizar un dron para distribuir señal gratuita de internet en lugares en donde es inaccesible que llegue la señal, por ejemplo, en áreas montañosas o nevadas.

#### **1.6.2. Agricultura**

Se pueden utilizar drones para regar cultivos de manera periódica reduciendo drásticamente el trabajo necesario para mantener los cultivos; también se pueden programar para inspecciones periódicas en tiempo real de la tierra para detectar en dónde se necesita mantenimiento. Además, monitorear cultivos utilizando drones mediante imágenes multiespectrales, lo cual es otra mejora que no se puede hacer sin esta tecnología.

#### **1.6.3. Servicios forestales**

Seguimiento de las áreas boscosas, control de incendios, permite supervisar de manera constante en horas de alto riesgo a un área boscosa, en busca de puntos potenciales de incendios, y estudiando desde el aire, la evolución del fuego en un incendio ya declarado.

## **2. COMPONENTES TÍPICOS DE UN DRON**

El estudio de la composición de un dron es importante, para lograrlo se debe saber qué componentes se necesitan, presupuesto y un estudio de autonomía. Además, conocer los principios básicos de vuelo (principios básicos de sustentación en el aire) y los fenómenos físicos que lo explican. También es muy importante saber la duración promedio de batería de un dron típico. En este capítulo se abordan los temas sobre principios básicos de vuelo y los componentes de un dron típico según el área para el cual se quiere, ya sea seguridad o monitoreo, entre otros.

### **2.1. Marco**

Es el esqueleto que le da forma al dron y en donde todas las otras partes se instalan y aseguran, debe ser lo suficientemente fuerte para soportar las fuerzas que generarán los motores, también debe ser ligero para que los motores puedan elevarlo fácilmente. Depende de qué tipo de dron se busca, entonces se escogerá marco, por ejemplo, si se quiere un dron ágil y acrobático, se debe buscar un marco ligero de por lo menos 350 gramos, con una diagonal de motor a motor de 400 a 500 milímetros. Ahora bien, si se quiere un dron que cargue con una potente cámara, se ha de buscar un marco fuerte de 500 gramos con una diagonal de motor a motor de 450 a 700 milímetros. En la figura 2 se observa que existen diferentes diseños.

Figura 2. **Marco de un dron**



Fuente: <https://droningpage.wordpress.com>. Consulta: abril de 2015.

## 2.2. Motores, hélices y ESCs

Son los componentes fundamentales para mantener al dron en el aire. Los ESC (*Electronic Speed Control*) o controladores de velocidad electrónicos regulan la potencia eléctrica para lograr controlar el giro de los motores con agilidad y eficiencia. Este giro está conectado a las hélices cuya rotación a alta velocidad genera la sustentación del dron. Por lo general, estos tres componentes van juntos; para seleccionar motores en el dron que se desea construir la regla básica con multimotores es que los motores seleccionados deben ser capaces de producir dos veces el peso total de vuelo de la nave en el empuje. (ver figura 3)

Figura 3. **Ecuación de empuje**

$$\text{Empuje requerido por motor} = \frac{\text{Peso de la aeronave} * 2}{4 \text{ motores}}$$

Fuente: <https://dronecenter.blogspot.com>. Consulta: abril de 2015.

El margen de seguridad que brinda la ecuación anterior asegura que los motores serán aptos de responder ágilmente a cambios de movimiento repentinos, por ejemplo, un descenso vertical rápido, un cambio de dirección brusco, incluso cuando el voltaje de las baterías se va reduciendo con el paso del tiempo. Para drones de acrobacia aérea, lo que se debe buscar es que los motores sean de alrededor de 1000 a 1400 Kv, y hélices relativamente pequeñas, esto hará que su dron sea más rápido y pueda dar saltos y realizar maniobras acrobáticas. Si lo que se quiere es hacer un dron que lleve pequeñas cargas se debe buscar motores de 700 a 900 Kv motores que sean capaces de hacer el empuje deseado. Un dron típicamente utiliza hélices tipo *slow-fly*, dos palas de 8.12 pulgadas de diámetro y con un paso de 4 a 6 pulgadas el cual indica el avance de la hélice cuando da un giro completo de 360 grados.

Ahora para la selección de un ESC cabe anotar que la mayoría de estos funciona con el dron, pero otros lo hacen mejor que otros; algunos de los que está comprobado que tienen mayor calidad son de una frecuencia de actualización más rápida, número de veces por segundo en las que se comprueban nuevas instrucciones de la tarjeta de control y se ajusta la velocidad del motor.

En consecuencia, un ritmo más rápido de actualización significa un mayor control, una respuesta más rápida a la entrada del piloto, en definitiva una mayor estabilidad, considera que se necesitan 4 ESC idénticos para el dron, si no se tienen los recursos, se puede utilizar 4 ESC diferentes para el dron, pero será más difícil de controlar.

En cuanto a las hélices, hay que comprar, por lo menos, el doble de las necesarias, ya que son muy fáciles de romper cuando se está aprendiendo. Hay que tomar nota ya que algunas marcas de empresas que venden hélices para drones tienen de diferentes colores; la idea principal es que los dos motores delanteros estén equipados con hélices rojas, y los dos traseros con un color diferente, esto es para saber hacia qué camino apunta el dron y en qué dirección es hacia delante. A continuación se muestran motores, hélices y ESC típicos en un dron. (ver figura 4)

Figura 4. **Motores, hélices y ESCs**



Fuente: <https://droningpage.wordpress.com> Consulta: abril de 2015.

### 2.3. Controlador de vuelo

Este componente es el cerebro del dron, censa y controla todo lo que sucede con él, y es a donde prácticamente todos los componentes van conectados. En general, todos los controladores de vuelo suelen tener la misma estructura, y unos componentes más o menos sofisticados. Cuentan con un acelerómetro para medir la propia inercia de los movimientos que haga el dron; un giroscopio para medir la velocidad angular de los cambios de posición; un magnetómetro el cual es utilizado como brújula que permitirá saber en todo momento la dirección hacia la que apunta el dron; un sensor barométrico que se emplea para conocer con una precisión asombrosa la altura real de vuelo; GPS para poder conocer la ubicación exacta del dron y así se pueda desplazar de manera autónoma; por último, pero no menos importante un procesador lo suficientemente potente para realizar lecturas y operaciones por segundo en base a todos los datos que recibe de los otros componentes anteriormente mencionados.

Con la combinación de todos estos componentes se logra tener suficiente información para tomar decisiones correctas sobre los actuadores que deberán hacer posible el vuelo. El controlador de vuelo más famoso es el Pixhawk; (ver figura 5) está controladora de vuelo posee un procesador de 32 bits ARM *cortex* M4F capaz de realizar unas asombrosas 252 MIPS a 168 MHz. Adicionalmente, incorpora un coprocesador de emergencia redundante de 32 bits, la alimentación se puede realizar desde un conector *Power*, desde el bus de entradas y salidas o desde el conector USB. Con un funcionamiento redundante se pueden tener todos conectados al mismo tiempo y poder conseguir una mejor tolerancia ante faltas de tensión en alguna entrada, en cuanto a los sensores que posee están un acelerómetro de seis ejes, un giroscopio de 16 bits de resolución, un barómetro con una precisión mayor a 50 cm.

En cuanto a comunicaciones y puertos de entrada y salida se tienen 5 puertos serie, 2 puertos Can Bus, puerto spektrum DSM satellite, 1 entrada de radio tipo PPM, RSSI (mediante PWM o tensión), 1 puerto SPI, 8 salidas para motor, 6 entradas/salidas auxiliares digitales, 1 puerto microUSB y microSDa.

Figura 5. **Controlador de vuelo Pixhawk**



Fuente: <https://vueloartificial.com>. Consulta: abril de 2015.

En la siguiente figura se muestran los controladores de vuelo típicos de un dron.

Figura 6. **Controlador de vuelo típico de un dron**



Fuente: <https://droningpage.wordpress.com>. Consulta: abril de 2015.

## 2.4. GPS y brújula

El GPS y la brújula conectados al controlador de vuelo permiten que este conozca la ubicación, altitud y velocidad exactas del dron. A partir de esto, y dependiendo del programa que tenga el controlador, se podría automatizar el comportamiento del dron para mantenerse estático en un mismo punto, volar en cierta dirección a velocidad relativa o volar hacia puntos predefinidos. A continuación se muestran diferentes GPS y brújulas utilizadas en un dron. (ver figura 7)

Figura 7. **GPS y brújula de un dron**



Fuente: <https://droningpage.wordpress.com>. Consulta: abril de 2015.

## 2.5. Radio receptor

Es el responsable de recibir la señal de radio enviada desde el control remoto, el cual ha interpretado el movimiento realizado por el usuario y lo ha transformado en onda radial.

La señal de radio es recibida por el radio receptor del dron y transformada en datos que se envían al controlador de vuelo para que ejecute la instrucción, normalmente con cambios coordinados en la velocidad de los motores (cuando se trate de una instrucción de movimiento). A continuación se muestran diversos radio-receptores típicos utilizados en un dron.

Figura 8. **Radio receptor de un dron**



Fuente: <https://droningpage.wordpress.com>. Consulta: abril de 2015.

## 2.6. Cámara y estabilizador

En la estructura del dron se puede acoplar una cámara para aprovechar el vuelo y capturar fotos o videos desde el aire. Dependiendo del tamaño del dron la cámara podrá ser desde una profesional hasta una liviana cámara de acción, como una GoPro Hero o Sony ActionCam. Normalmente, se utiliza un estabilizador o Gimbal para evitar que los movimientos propios del vuelo del dron afecten las tomas. Estos gimbal absorben la vibración de los motores y corrigen automáticamente la inclinación de la cámara para que siempre esté en el mismo ángulo respecto del suelo.

Algunos gimbal también pueden ser conectados al controlador de vuelo y a través del control remoto el usuario puede cambiar el ángulo de inclinación de la cámara mientras el dron está en el aire. A continuación se muestran diferentes cámaras y estabilizadores típicos utilizados en un dron.

Figura 9. **Cámara y estabilizador típicos de un dron**



Fuente: <https://droningpage.wordpress.com>. Consulta: abril de 2015.

## 2.7. Baterías

Proporcionan la energía necesaria para hacer funcionar el equipo. Son componentes muy pesados por lo que es esencial que sean capaces de tener una buena relación peso/capacidad para maximizar la autonomía de vuelo del dron. Las más utilizadas son las baterías LiPo (polímero de litio) debido a su densidad de energía, su bajo peso y su alta tasa de descarga que es ideal para maniobras ágiles como las de un dron. A continuación se muestran diferentes baterías típicas utilizadas en un dron.

Figura 10. **Batería típica de un dron**



Fuente: <https://droningpage.wordpress.com>. Consulta: abril de 2015.

## 2.8. Presupuesto aproximado

Para poder construir un dron funcional se debe tener un presupuesto preliminar de cada componente que necesita un dron para funcionar. En la siguiente tabla se detalla el componente y su precio.

Tabla II. **Presupuesto aproximado de componentes de un dron**

<b>Componente</b>	<b>Precio (quetzales)</b>
Marco	400,00
Motores, hélices y ECS	500,00
Controlador de vuelo	1 000,00
Radio receptor	500,00
Baterías	200,00
GPS y brújula	1 000,00
Cámara y estabilizador	800,00

Fuente: elaboración propia.

## 2.9. Estudio de autonomía

En los drones el mayor gasto de energía es producido por los motores, por eso la autonomía del sistema completo está limitado por la batería de los motores, para alimentar todo el sistema del dron se ha seleccionado una batería de LiPo de 8 celdas con una capacidad de 2500 mA. Con esta batería se ha estimado un tiempo de vuelo de 25 a 30 minutos, considerando que el dron pesa un máximo de 7.5 kg, incluyendo marco, electrónica y baterías. (ver tabla III)

Tabla III. **Consumo de energía y peso de componentes**

	<b>Corriente (mA)</b>	<b>Peso (g)</b>
Controlador de vuelo	250	38
GPS	40	16.8
Sensor de velocidad	3	7
Videocámara	500	1200
Servomotores	$200*4=800$	$200*4=800$
Sonar	100	5.9
ESC	$25*4=100$	$8*4=32$
<b>Total</b>	<b>1 793</b>	<b>2 099,70</b>

Fuente: elaboración propia.

Para construir un dron es necesario contar con los siguientes componentes (ver tabla IV):

Tabla IV. **Componentes típicos para construir un dron**

<b>Nombre componente</b>	<b>Peso (g)</b>
1 marco	1 000,00
4 ESC	32,00
4 servomotores	800,00
Controlador de vuelo	500,00
1 GPS	16,80
4 hélices	20,00
Videocámara	1 200,00
1 radio receptor	3 000,00 (no se toma el peso de dron)
1 batería	1 000,00
1 Arduino mega	300,00
<b>Total</b>	<b>5 858,80</b>

Fuente: elaboración propia.

El peso total promedio es de 5.8 kilos, que es menos de 7,5 kilos.

## **3. DISEÑO**

El estudio del diseño de un dron, es importante ya que a menudo es complicado manejar la gran variedad de componentes con los que cuenta en un dron, por lo que un buen diseño optimiza su desempeño.

### **3.1. Objetivo**

El objetivo de este capítulo es mostrar cómo diseñar un dron. Tras haber explicado los componentes, se modelarán teniendo en mente que se quiere diseñar una estructura sencilla de fabricar, de bajo costo, y con materiales fácilmente accesibles para las personas que tomen como base la propuesta de diseño que se tratará de explicar en este capítulo.

### **3.2. Diseño estructural**

La realización del diseño se hará con conocimientos meramente teóricos y se basará en diseños previamente definidos como el diseño del dron de 3drobotics quadC (ver figura 11), que fue realizado enteramente de aluminio y con modificaciones que se estimaron oportunas para la colocación de componentes.

Figura 11. **3DR quadC**



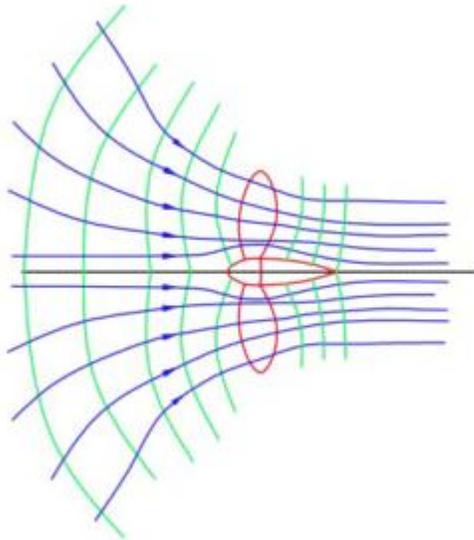
Fuente: <https://www.iit.comillas.edu>. Consulta: septiembre de 2016.

Diseñadores de drones concuerdan que al realizar pruebas de vuelo y tras sufrir varios accidentes tanto por la configuración del dispositivo como por la falta de práctica se comprueba que la mayor parte de los impactos se concentran en los brazos. En el diseño, los brazos forman parte integral del chasis, si no se tiene un diseño apropiado cualquier daño sufrido en los brazos supone un alto costo de sustitución, porque se requeriría retirar numerosos tornillos y pasadores, haciendo los tiempos de reparación largos y tediosos.

Otro problema que se da al no tener un diseño apropiado son las vibraciones que generan las piezas móviles las cuales se transmiten al controlador de vuelo, esto provoca falsas medidas y ruido en los sensores de vuelo tales como giroscopios o acelerómetros, más adelante se verá cómo se solucionan estos problemas al tener un diseño estructural apropiado.

El diseño tradicional de este tipo de aparatos ha colocado siempre las hélices por encima de los motores y, en consecuencia, arriba de los brazos, esto hace que el flujo de aire movido por la hélice golpee contra el brazo reduciendo el empuje. La solución es algo compleja porque es complicado soportar la estructura sin interferir con el flujo de aire, sin embargo, esto puede ser reducido, colocando la hélice empujando debajo del brazo, pues el flujo de aire a la entrada es más disperso que a la salida (ver figura 12), según se verá más adelante.

Figura 12. **Flujo de aire movido por una hélice**



Fuente: <https://www.iit.comillas.edu>. Consulta: septiembre de 2016.

Las hélices son los componentes más baratos, esto presenta ventajas, disponibilidad de cambio, ligereza, entre otros.

También se debe considerar que las hélices puedan tener pequeños defectos, imperceptibles a primera vista, pero que al girar a una alta velocidad angular, hace que la hélice genere vibraciones en el eje del motor y se transmiten a través del brazo a la estructura. Esto es un problema, ya que genera ruido de medida en los sensores de vuelo, dificultando el control del dron y, además, no se espera que el usuario sea capaz de equilibrar una hélice, entonces un buen diseño debe intentar aislar en gran medida todas las causas de vibración en los lugares donde deban colocarse los sensores.

Ahora tomando en cuenta la electrónica del dron en el diseño, concretamente el magnetómetro, este puede verse afectado por los campos magnéticos generados. Se debe dar dos áreas en el diseño del dron, una de ellas lo más alejada posible de todo tipo de interferencias electromagnéticas para poder tener lecturas de rotación precisas y asimismo, se debe asegurar la integridad de los componentes ante una colisión.

Un buen diseño debe tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- Bajo costo
- Alta accesibilidad a los materiales
- Ligereza
- Maximización de eficiencia
- Alta reparabilidad sin necesidad de herramientas complejas
- Maximización de elementos comunes

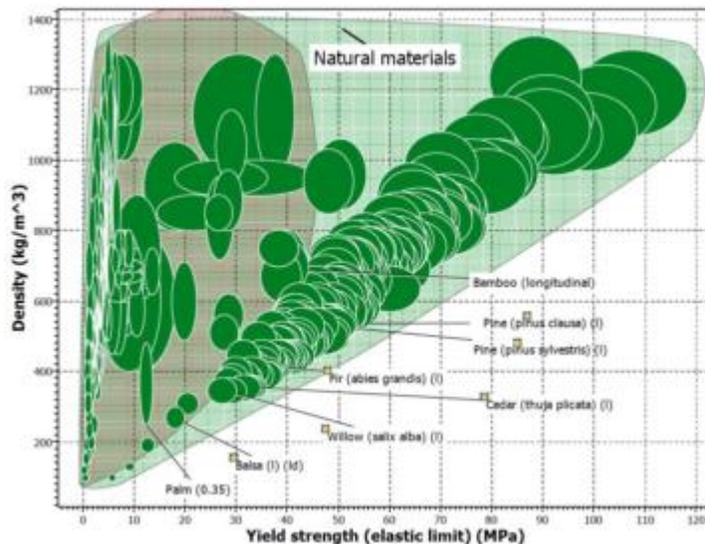
En cuanto a la selección de los materiales, se dividirá en dos categorías. En la uno estarán los elementos que se considera más susceptibles de ser reemplazados y en la categoría dos estarán los que no son susceptibles al cambio. Entre los que son susceptibles de ser reparados, se encuentran elementos fácilmente dañables ante una colisión. Entre ellos se consideran, los soportes del motor, los brazos y el tren de aterrizaje. Como se ha dicho anteriormente estos son los elementos que más sufren, por ello, se utilizarán piezas fácilmente mecanizables o realizadas en chapa. Para mantener el peso contenido se propone el uso de madera para los brazos y aluminio para el resto de piezas mencionadas, siempre teniendo en cuenta que sea fácil de adquirir esos materiales.

### **3.2.1. Optimización de estructura**

- Optimización de brazo

Como se ha mencionado anteriormente, el brazo (ver figura 13) tiene que ser un elemento fácilmente reparable y sustituible. Por ello, en este diseño se propone el uso de listones de madera estándar. Sin embargo, la madera no es un material fácil de medir. Las propiedades mecánicas de las maderas varían entre los distintos tipos de árboles, y la dirección de las fibras también altera sus propiedades mecánicas. Asimismo, se debe tomar en cuenta la humedad. Por ello, se hará un estudio para analizar densidad y tensión de rotura, pues se sabe que el brazo trabajará como una viga empotrada con una carga en un extremo. Se utilizará el software CES EDUPACK, para modelar los tipos de madera en una gráfica de densidad contra límite elástico.

Figura 13. Elección de maderas, densidad frente a límite elástico



Fuente: <https://www.iit.comillas.edu>. Consulta: septiembre de 2016.

Como se aprecia en la figura anterior, la elección lógica entre los tipos de madera son el sauce (*willow*), el cedro (*cedar*), y el pino (*pine*). Los tipos de árboles mencionados anteriormente proporcionan un bajo peso, con un límite elástico más que aceptable para el diseño propuesto.

La longitud del brazo, vendrá dada por el tamaño de las hélices, para este diseño se requieren hélices de un gran diámetro, por lo tanto, la longitud del brazo, deberá ser lo suficientemente larga como para que la hélice salve la estructura y para que su flujo de aire no interfiera con la estructura ni con la carga. Si se conoce la fuerza que ejerce cada motor y el material con el que se está diseñando cada brazo, se puede determinar la sección necesaria.

Adicionalmente al diseño, se decide limitar la flecha en el extremo a 5mm y el ángulo a 10 grados pues de no hacerlo así, el modelado y control del dron se complicaría o el diseño no sería el apropiado ya que los motores pierden su perpendicularidad respecto a los sistemas de orientación, convirtiendo el sistema en no lineal.

Como ya se había mencionado, la intención es utilizar materiales que sean fácilmente accesibles y baratos. Normalmente, las medidas típicas para los listones cuadrados, comienzan en 5mm de lado, llegando hasta valores muy por encima de lo que se espera que sea necesario antes de tener que elegir otro material.

La deformación angular en el extremo viene dada por:

Figura 14. **Deformación angular**

$$\theta_{\epsilon} = P \cdot \frac{L \cdot b^2}{2 \cdot E \cdot I}$$

Fuente: <https://www.iit.comillas.edu>. Consulta: septiembre de 2016.

La flecha viene dada por:

Figura 15. **Fórmula flecha**

$$f = P \cdot \frac{L \cdot b^3}{3 \cdot E \cdot I}$$

Fuente: <https://www.iit.comillas.edu>. Consulta: septiembre de 2016.

Donde P es la carga aplicada, L es la distancia del motor al centro de gravedad del dron, E es el módulo de elasticidad, I es el momento de inercia de la sección.

La tensión máxima viene dada por:

Figura 16. **Tensión**

$$\sigma_{max} = \frac{M \cdot \frac{A}{2}}{I}$$

Fuente: <https://www.iit.comillas.edu>. Consulta: septiembre de 2016.

Donde A es el ancho del brazo, I es el momento de inercia de la sección, M es el momento deflector.

Al basarse en un diseño ya elaborado se determina la sección que ha de tener el brazo, se utiliza una hoja de cálculo para poder iterar los valores (véase tabla V). Utilizando las ecuaciones que se mencionaron anteriormente se procede a calcular; al recorrer las medidas más comunes se encuentra que la medida que conviene en este diseño es de 20mm.

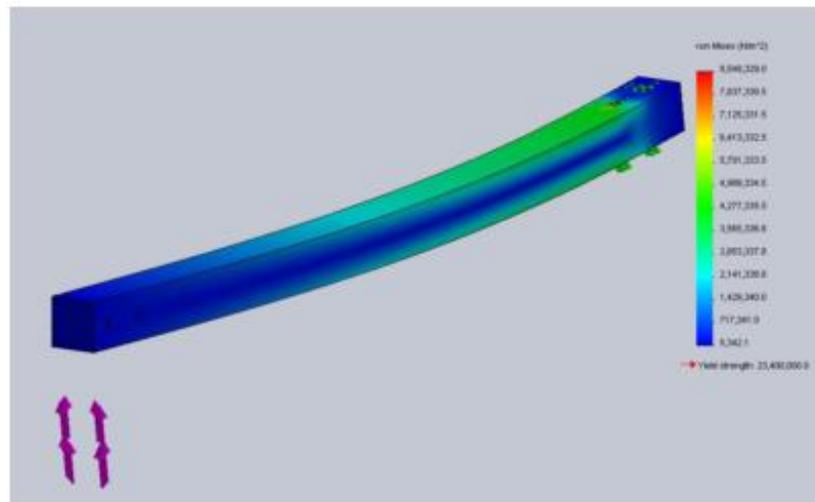
Para realizar un diseño preciso, se hará una simulación empleando el software CAD. El uso de 20mm es una medida óptima para este diseño. Analizando el grafico resultante de la simulación (ver figura 17), la tensión máxima que tendrá que soportar el brazo es de 8.5Mpa, que es un valor superior a lo que se había encontrado (ver tabla V), pero es un valor aceptable ya que el brazo no se quiebra.

Tabla V. **Cálculos aproximados flexión de brazo**

Ancho brazo (mm)	Momento de inercia	Ángulo en el extremo	Flecha en el extremo	Tensión máxima (Mpa)
13	2,38E-09	2,64	12,32	16,07
14	3,20E-09	1,96	9,16	12,87
15	4,21E-09	1,94	6,95	10,46
16	5,46E-09	1,15	5,37	8,62
17	6,96E-09	0,90	4,21	7,18
18	8,74E-09	0,72	3,35	6,05
19	1,08E-09	0,58	2,70	5,14
20	1,33E-09	0,47	2,20	4,41
21	1,62E-09	0,38	1,81	3,81
22	1,95E-09	0,32	1,50	3,71

Fuente: elaboración propia.

Figura 17. **Flexión brazo**



Fuente: <https://www.iit.comillas.edu>. Consulta: septiembre de 2016.

- Optimización de chasis

Analizando el chasis, se debe buscar una extrema ligereza, y una alta resistencia mecánica, pues el chasis al ser aligerado, aumenta los esfuerzos que deberán soportar las placas, por ello se propone el uso de materiales tipo *composite*, entre ellos se considera la fibra de carbono. Sin embargo, la conductividad que proporcionan las fibras de carbono, unido a su alto precio y considerando su difícil mecanización, hacen descartable esta opción.

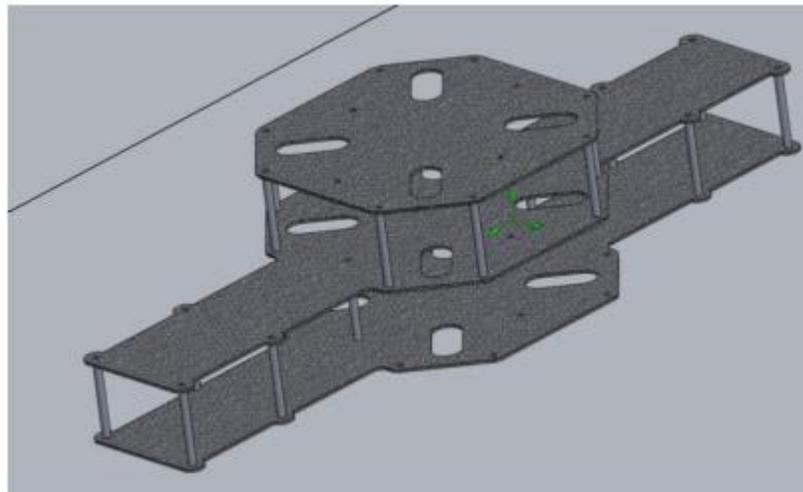
Entre las opciones que se tiene en el campo de los *composites*, está la fibra de vidrio. Es diferente a la fibra de carbono, ya que no es un material conductor de por sí, por tanto, no producirá alteraciones en los aparatos de vuelo. Se presta para utilizarse como PCB, llevando conexiones a distintos elementos del aparato, ahorrando así el peso de cableado. La fibra de vidrio es un material resistente y rígido, también es un buen aislante tanto térmico como eléctrico.

En el diseño del chasis para mejorar la eficiencia y evitar que ciertos motores trabajen más que otros, es necesario asegurar que el centro de empuje esté en la misma vertical que el centro de gravedad, ello se consigue creando simetrías en las piezas. Habrá que disponer espacios para la colocación de la batería, carga y electrónica, además de otros sensores que puedan verse afectados por las radiofrecuencias que se utilizan para la comunicación con el aparato.

El principal componente al que se une el chasis es la placa sucia, debido a que el chasis ha de ser unido a través de soportes antivibración, no pueden suspenderse de las placas anteriormente mencionadas, ya que este tipo de componente ha de funcionar por compresión, por ello, se propone una placa que habrá de colocarse en la parte superior de los brazos y en la que se apoyará los *silent-blocs* y de ella se suspenderá el resto de la estructura, que al no ir rígidamente unida a los motores, no se verá influida por las vibraciones.

A partir de la pieza superior, se imita la pieza inferior, sin embargo, esto no proporciona el espacio requerido para portar todos los componentes necesarios, por eso se deben añadir dos bahías simétricas en la parte delantera y trasera del aparato, proporcionando así el espacio necesario. Al igual que con la parte superior, se hacen taladros necesarios y se instalan las ranuras para la retirada de los pasadores que sostienen los brazos en posición. (ver figura 18)

Figura 18. **Chasis**



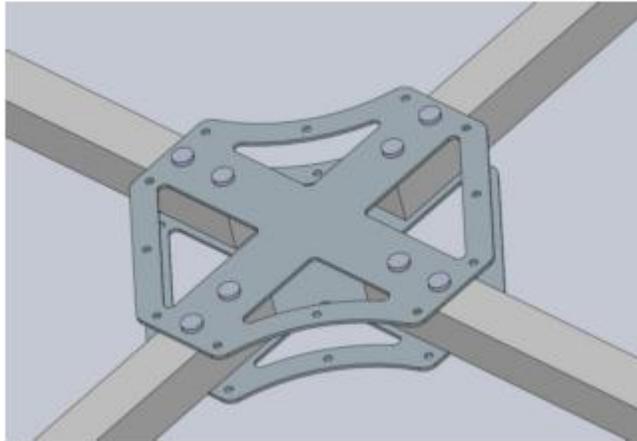
Fuente: <https://www.iit.comillas.edu>. Consulta: septiembre de 2016.

- Placa sucia

Lo único que debería causar ruido en un dron, proviene de cuando se exige a los motores, como ya se había mencionado antes, imperfecciones en los componentes tales como hélices, rotores o un vuelo errático pueden llegar a ser la causa de lecturas incorrectas en la IMU (*Inertial Measurement Unit*). Lo anterior puede causar imperfecciones en el video si se decidiera equipar el dron con una cámara. Por ello, en el diseño que se propone se decide montar todos los brazos con sus motores a una misma placa conocida como placa sucia (ver figura 19), y después anclar esta placa al resto del chasis a través de elementos anti vibratorios, aislando así toda la electrónica del ruido mecánico.

La placa sucia debe funcionar como intermediario entre los brazos y el chasis, transmitiendo la fuerza y deformándose lo menos posible. Para esto se crea dos piezas, ambas realizadas con el mismo material que el resto del chasis para minimizar el peso. Las piezas estarán divididas por unos separadores similares a los que se usan en electrónica de tal forma que al remover todos los brazos, las placas queden soportadas. Mecánicamente también se justifica, pues al tirar los brazos hacia arriba, la parte inferior de la placa se encuentra a tracción. No tener esta placa significa sobrecargar la placa superior.

Figura 19. **Placa sucia**



Fuente: <https://www.iit.comillas.edu>. Consulta: septiembre de 2016.

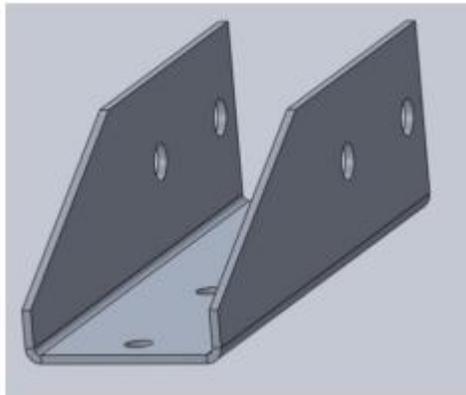
Tomar en cuenta que habrá cables por la electrónica que tiene el dron, por esto se debe realizar vaciados en la pieza para que se pueda pasar cables por el interior del aparato, con esto se logra un diseño con un peso menor.

- Soportes de motor

Estos componentes estructurales (ver figura 20) tienen como misión conectar el brazo con el motor, como se ha mencionado anteriormente, deberán ser de aluminio y del mismo grosor que la placa sucia, para que se aprovechen los pasadores. En este diseño se asumirá un espesor de 1mm.

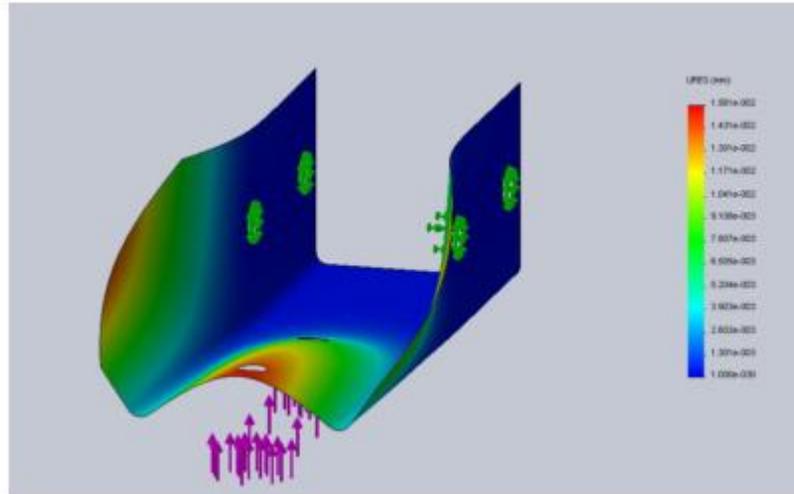
Se diseña este componente para que, una vez doblado el perno, la atraviese por dos laterales y los motores vayan anclados de una forma permanente. Para aligerar un poco la pieza, se recomienda retirar el mayor material posible sin complicar excesivamente la pieza. Para comprobar que la pieza tiene la resistencia mecánica necesaria, se fijan al espacio los puntos de anclaje, y se simula una carga de 2 kilogramos, que sería una fuerza de aproximada de 20N, en las proximidades de las marcas de montaje donde irán los motores (ver figura 21), se puede notar que se deforma un poco la pieza, desplazándose 15 décimas de milímetro y una tensión máxima de alrededor de los 15Mpa, muy alejado de la tensión límite del aluminio utilizado.

Figura 20. **Soporte de motor**



Fuente: <https://www.iit.comillas.edu>. Consulta: septiembre de 2016.

Figura 21. **Deformación sobre soporte de motor**



Fuente: <https://www.iit.comillas.edu>. Consulta: septiembre de 2016.

- Pasadores

Para sujetar brazos, soporte de motor y chasis, en este diseño se propone el uso de pasadores (ver figura 23). Para facilitar el desmontaje y evitar que puedan soltarse debido a las vibraciones, llevarán un taladro en el extremo para insertar un clip de seguridad tipo R (ver figura 22), de esta forma, la sustitución de los brazos puede llevarse a cabo en apenas unos segundos, sin que esta fijación pueda comprometer la integridad del aparato en el aire.

Figura 22. **R-CLIP**



Fuente: <https://www.iit.comillas.edu>. Consulta: septiembre de 2016.

Figura 23. **Pasador**



Fuente: <https://www.iit.comillas.edu>. Consulta: septiembre de 2016.

- Montaje de componentes

Aunque en el diseño propuesto el dron no sufrirá daños ante una colisión, más allá de los previstos, es posible que deba sufrir reparaciones. Por ello, el montaje entre las placas deberá ser llevado a cabo por alguien sin demasiada habilidad técnica y sin disponer de herramientas, solamente un destornillador y unos alicates.

Por eso se decidió que las tres placas que conforman el chasis, estarán unidas por unos separadores estándar de 40mm de longitud de nailon, similares a los utilizados en electrónica para la sujeción de circuitos impresos. De esta forma se puede disminuir el número de componentes distintos. Además, en caso de que los brazos no frenen el impacto cuando sufra una colisión, los pasadores de nailon (ver figura 24), serian lo próximo en romperse, resultando así en la sustitución de un componente alta accesibilidad y bajo precio. Todos los tornillos que se recomiendan son de métrica 3 que es una medida muy utilizada en electrónica, simplificando el diseño y unificando componentes.

Figura 24. **Pasadores de nailon**



Fuente: <https://www.iit.comillas.edu>. Consulta: septiembre de 2016.

### **3.2.2. Diagrama de estructura**

Analizando la lista de componentes que forman la estructura en este diseño, se puede realizar un modelo visual (ver figura 25) donde cada pieza se representa de un color según su peso.

Figura 25. **Diagrama de estructura por peso**



Fuente: <https://www.iit.comillas.edu>. Consulta: septiembre de 2016.

Tabla VI. **Elementos que conforman la estructura ordenados por peso**

Descripción	Peso (gramos)
Brazo	162,12
Chasis inferior	92,61
Chasis superior	49,06
Base alta	6,48
Soporte motor	10,21
Tren de aterrizaje	9,75
Perno	1,15
Separadores 40mm	1,09
<i>Silentblock</i>	0,43

Fuente: elaboración propia.

La configuración poco tradicional en este diseño ha permitido, mejorar la eficiencia del dron, la colocación inferior de las hélices posibilita lograr una menor diferencia de presiones en ambos lados de la hélice reduciendo la fuerza que ejerce el flujo de aire en dirección descendente.

Esta fuerza pudo haberse disminuido con la colocación de brazos circulares, los cuales presentan una mejor aerodinámica, sin embargo, el diseño mecánico se complica, ya que se requieren piezas adicionales para fijar los componentes, por esta razón, no se ha tomado en cuenta esta configuración. En la configuración propuesta se acerca el centro de empuje de los motores al centro de gravedad del dron, logrando una mejor dinámica y un mejor control, lo que se traduce en menos esfuerzo por parte de los motores para movilizar el dron en el aire y, por lo tanto, un menor consumo de electricidad alargando la autonomía del dron. El modelo que se propone en esta investigación (ver figura 26) es eficiente, robusto y de fácil mantenimiento.

Figura 26. **Modelo**

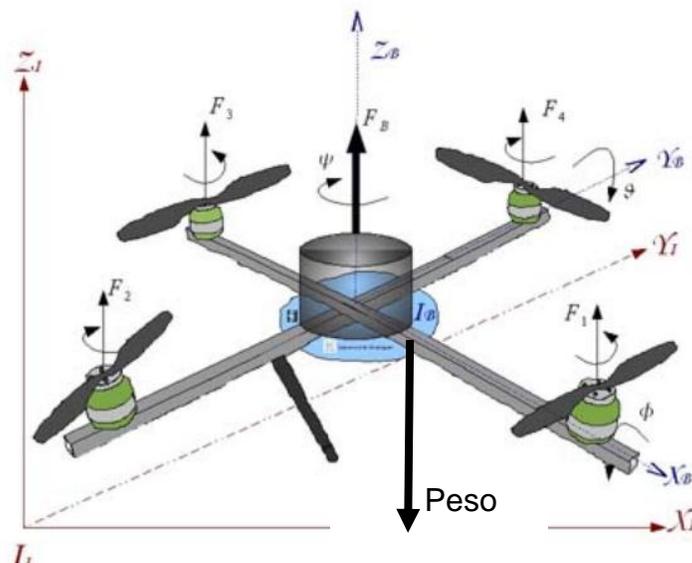


Fuente: <https://www.iit.comillas.edu>. Consulta: septiembre de 2016.

### 3.2.3. Estudio de la dinámica de un dron

Para lograr explicar cómo es que logran volar los aviones es necesario analizar el principio de Bernoulli el cual dice que los aviones pueden sustentarse en el aire gracias a una diferencia de velocidad en el paso del viento por sus alas y, por consiguiente, una diferencia de presiones que ejerce en este caso una fuerza de sustentación. Una vez conseguida la sustentación, un avión es capaz de moverse en sus tres ejes, los cuales son vitales recordar ya que son cruciales para referirse a movimientos de cualquier aeronave. El principio físico que explica de forma simple la sustentación de un dron, dice que lo que se tiene que hacer es crear una fuerza de empuje en dirección contraria a la gravedad y, para ello, se emplean rotores a los que se acoplan hélices que dependiendo del tamaño y la velocidad conseguirán, ejercer una determinada fuerza, permitiendo controlar el movimiento de la aeronave. (ver figura 27)

Figura 27. Ejemplo de principio físico de sustentación de drones y helicópteros



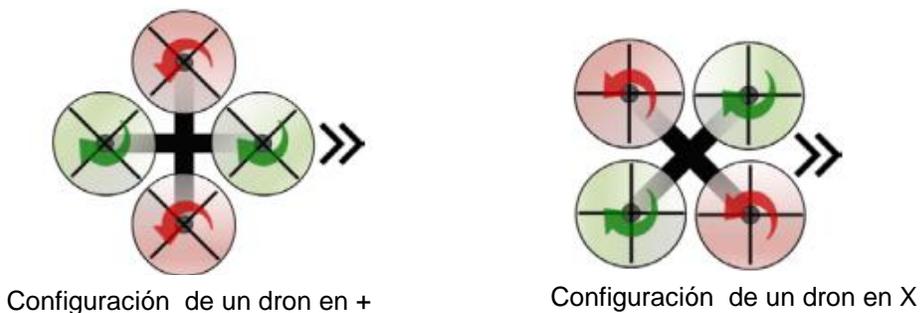
Fuente: <http://www.conaaii.org.mx>. Consulta: noviembre de 2016.

En donde  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ ,  $f_4$ , son las fuerzas de sustentación, que hacen una fuerza de empuje contraria al de la gravedad. Con esto se logra la estabilidad pero si se hace girar las hélices en una misma dirección, el torque total que se produciría el giro de todas ellas es suficiente para hacer girar el dron de manera descontrolada. Para solucionarlo, se instalan hélices en sentidos opuestos de rotación de forma diametral, es decir, se alternan hélices de giro a derecha con hélices de giro a izquierda resultando nula la suma de las fuerzas que se generan. Este juego de sumas y restas de fuerzas es el que permite el movimiento controlado de rotación en este tipo naves.

### 3.2.4. Configuraciones típicas de un dron

El movimiento de los drones se controla mediante variaciones en la velocidad de giro de cuatro motores eléctricos, generalmente sin escobillas (*brushless*). Combinando diferentes velocidades de giro en cada uno de los motores se logra controlar los movimientos de rotación y traslación del dron, la forma en que los drones deben girar depende de la configuración de la estructura. (ver figura 28)

Figura 28. Configuraciones típicas de un dron



Fuente: Arantxa.aum.es. Consulta: noviembre de 2016.

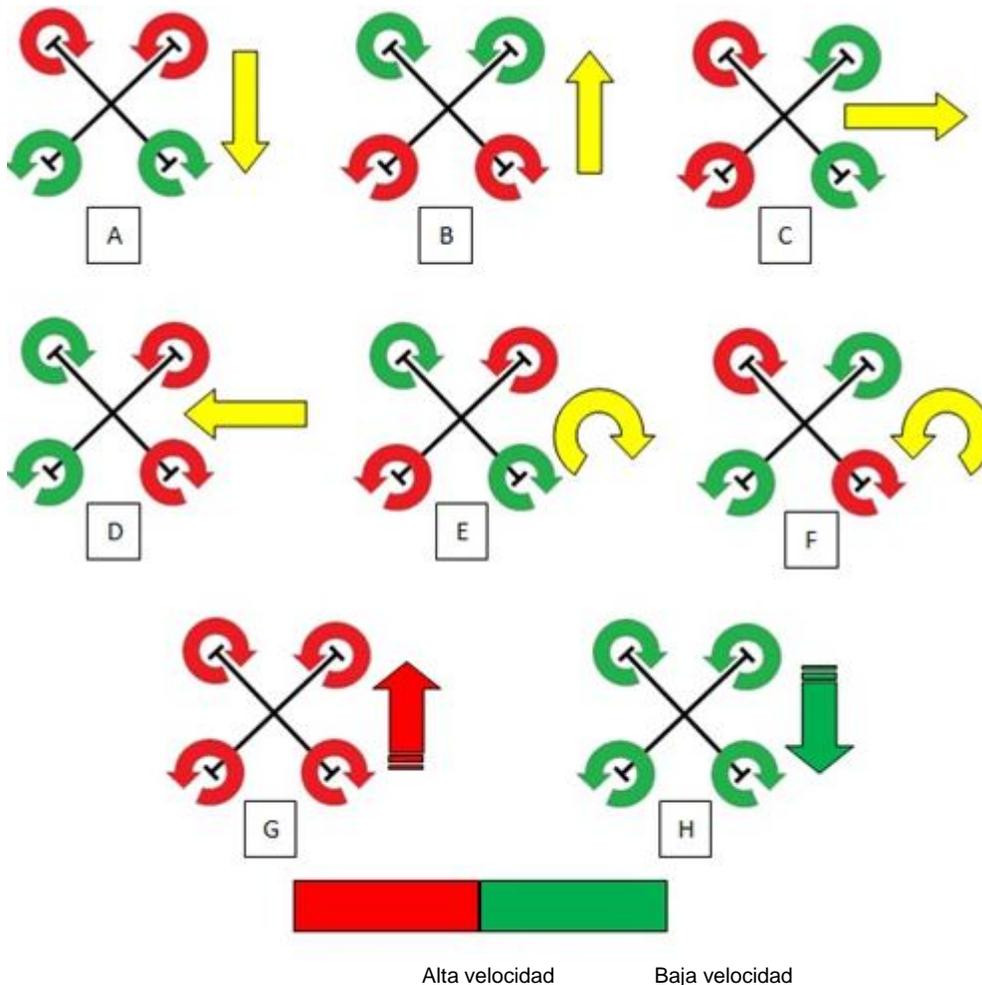
La configuración más sencilla de implementar es la +, pero la más utilizada es la configuración en X, en un dron configurado en +, varía la fuerza de un motor para realizar cada uno de los desplazamientos (delante, atrás, izquierda, derecha), mientras que en un dron configurado en X, varía la fuerza de dos motores en cada desplazamiento. Por este motivo se considera que un dron configurado en X funciona mejor que uno configurado en +, ya cuando se realizan desplazamientos esta configuración es mucho mejor ante cambios externos, ejemplo clima, viento, etc. La lista de movimientos detallados muestra qué se debe hacer para mover de manera deseada el dron (ver tabla VII) y el mapa de movimientos del dron muestra en una gráfica simple, cómo se comportará un dron de acuerdo con diferentes circunstancias. (ver figura 29)

Tabla VII. **Listado de movimientos de un dron (configuración X)**

	<b>Dirección</b>	<b>Descripción de cómo alcanzar el movimiento</b>
A	Adelante	Si se acelera los motores traseros del dron a alta velocidad y los de delante con una velocidad de estabilidad el dron avanza.
B	Atrás	Si se acelera los motores delanteros del dron a alta velocidad y los de atrás con una velocidad de estabilidad el dron retrocede.
C	Derecha	Si se acelera los motores laterales izquierdos del dron a alta velocidad y los laterales derechos con una velocidad de estabilidad el dron va hacia la derecha.
D	Izquierda	Si se acelera los motores laterales derechos del dron a alta velocidad y los laterales izquierdos con una velocidad de estabilidad el dron va hacia la izquierda.
E	Rotar dron en sentido agujas del reloj	Si se acelera los motores que están en línea diagonal izquierda del dron a alta velocidad y los motores que están en la línea diagonal derecha con una velocidad de estabilidad el dron rota.
F	Rotar dron en sentido contrario de las agujas de reloj	Si se acelera los motores que están en línea diagonal derecha del dron a alta velocidad y los motores que están en la línea diagonal izquierda con una velocidad de estabilidad el dron rota.
G	Ascender	Si se aumenta la velocidad de manera estable el dron asciende.
H	Descender	Si se disminuye la velocidad de manera estable el dron desciende.

Fuente: elaboración propia.

Figura 29. **Mapa de movimientos de un dron (configuración X)**



Fuente: <https://vueloartificial.com>. Consulta: noviembre de 2016.

### 3.3. Diseño electromecánico

Al analizar el diseño electromecánico, las principales necesidades que se debe tener en cuenta para hacer volar un dron son las siguientes:

- Determinar qué tipo de motor y que características son necesarias.
- Seleccionar el circuito que controlara los motores.
- Determinar cuánta potencia y energía son necesarias.
- Determinar qué tipo de sensores se requieren para saber la orientación del dron.
- Seleccionar un micro controlador que pueda comunicarse fácilmente con otros, y que tenga suficiente capacidad de cálculo para procesar toda la información.

### 3.3.1. Selección y optimización de componentes

En los siguientes apartados se discute cada uno de los componentes electrónicos y porque han sido seleccionados

- Selección de motores

La primera decisión de diseño por tomar es proponer tipo de motor. Básicamente, hay dos tipos de motor, motores con escobillas o sin escobillas los primeros utilizan las escobillas para contactar con el eje de rotación del motor, como consecuencia estas escobillas se desgastan y es ineficiente. Ahora bien, los motores sin escobillas (*brushless*) no tienen conexión física entre las partes eléctricas en movimiento, estos motores son mucho más eficientes y eliminan en gran parte el mantenimiento, eso sí tienen un costo más caro.

Dentro de los motores sin escobillas existen dos tipos, los *outrunner* y los *inrunner*.

Los motores *outrunner* están diseñados para trabajar a bajas revoluciones en aplicaciones de alto torque, la disposición de los imanes permanentes en este tipo de motores están en la carcasa externa, mientras que el bobinado se encuentra fijo en la bancada. La zona móvil del motor es la propia carcasa. Los motores *inrunner* están diseñados para trabajar a altas revoluciones, en aplicaciones de par bajo. En este tipo de motor es similar a un motor DC sin escobillas, pero los imanes están fijados al rotor. En esta propuesta de diseño se opta por motores sin escobillas *outrunner* ya que su principal virtud es que tienen mucha potencia en muy poco peso. Estos motores son controlados por una placa electrónica llamada ESC (*Electronic Speed Controller*) que generan 3 señales de sinusoidales que están conectadas al motor y regula su velocidad.

El motor propuesto es el EMAX CF2822 (ver figura 30), ya que son motores baratos y de poco peso, las principales características de este motor son el empuje máximo, la constante KV, la intensidad máxima del motor y el tipo de hélice que recomienda el fabricante. (ver tabla VIII)

Tabla VIII. **Características de motor EMAX CF2822**

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
Numero de celdas de batería	2-3X Li-Poly
Dimensiones del estator	22x10mm
Diámetro del eje	3mm
Peso	39g
Empuje	De 200 a 600g
Tamaños de la hélice	8", 9", 10"
Constante KV	1200
Rpm máximo	7700
Intensidad máxima	15 <sup>a</sup>

Fuente: elaboración propia.

Figura 30. **Motor EMAX CF2822**



Fuente: <https://upcommons.upc.edu>. Consulta: noviembre de 2016.

- Selección de ESC (Electronic Speed Control)

Como ya se había mencionado antes, el ESC es un circuito que se encarga de generar una señal trifásica que alimenta el motor, la velocidad de giro que se varía mediante una señal suministrada por el PWM. El ESC que se propone es el ESC EMAX de 25 amperios (ver figura 31), con el fin de sobredimensionar respecto de los 15 amperios que consume cada motor. Este ESC permite ajustar el rango de PWM a un mínimo de 1 ms hasta un máximo de 2 ms, por defecto detecta el 0 % de empuje a 1,2 ms y el 100 % de empuje a 2 ms.

Figura 31. **ESC EMAX 25<sup>a</sup>**



Fuente: <https://upcommons.upc.edu>. Consulta: noviembre de 2016.

Este ESC incorpora varios tipos de protecciones que se considera importantes:

- Protección de baja tensión: funciona cuando se apaga el motor de inmediato o para bajar la potencia cuando la entrada de tensión cae por debajo del umbral de protección programado.
- Pérdida de la protección de señal: se reduce la potencia automáticamente al 20 % o menos cuando se pierde la señal durante un segundo, y se reanuda cuando se detecte la señal de nuevo.
- Protección del sobrecalentamiento: cuando la temperatura aumenta hasta por encima de 110 grados Celsius, la potencia es reducida hasta un 35 %.

- Selección de batería

Analizando las diferentes baterías que se tienen en el mercado, se deben tener en cuenta principalmente tres cosas.

- Intensidad de descarga constante
- La capacidad de la batería
- El voltaje de la batería

Se propone el uso de baterías LiPo porque son capaces de dar mucha energía en poco tiempo, siendo muy ligeras, son ideales para su incorporación en el dron que se está diseñando, no se toma en cuenta las baterías de plomo o níquel porque pesan mucho y no sería adecuado proponerlas ya que afectarían el desempeño del dron.

Dentro de las baterías LiPo, se decide proponer el uso de la marca Tiger Power de 2200mAh (ver figura 32), porque con esta batería se garantiza un tiempo de vuelo más prolongado. Para cumplir con la intensidad que suministrar a los motores (60 A) se debe conectar dos baterías del mismo tipo en paralelo.

Figura 32. **Batería LiPo 2200mAh**



Fuente: <https://upcommons.upc.edu>. Consulta: noviembre de 2016.

Para optimizar la autonomía del dron se añadirá un cargador (ver figura 33) que balanceará las tres celdas de la batería LiPo, para así asegurar que todas tienen el mismo voltaje.

Figura 33. **Cargador de baterías LiPo**



Fuente: <https://upcommons.upc.edu>. Consulta: noviembre de 2016.

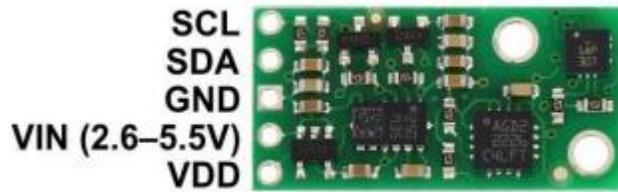
- Selección de sensores

Analizando los sensores que se incluirán en el dron, se busca una placa que integre como mínimo el magnetómetro, el acelerómetro y el giroscopio.

Principalmente, se debe tomar en cuenta los circuitos que tienen tres sensores incorporados, por un lado está Altimu-10 (ver figura 34) que es una placa de medición inercial que incorpora un giroscopio de tres ejes L3GD20, un acelerómetro con magnetómetro de tres ejes LSM303DLHC y un barómetro LPS331AP. Todos los sensores funcionan con el bus I2C que permite lecturas utilizando solo una línea de datos. Funciona con un rango de alimentación de 2.5V hasta 5.5V, también se tiene el Raizor 9DOF (ver figura 35) que es un sistema de medición inercial que dispone de tres sensores de alta calidad, un giroscopio de tres ejes ITG3200, un acelerómetro ADXL345 de tres ejes. El conjunto proporciona 9 grados para medición inercial. Todas las salidas de los sensores son procesadas por un ATmega328 que envía a su vez información por el puerto serial AURT para recuperarlos de forma limpia. La placa viene programada para ser utilizada con el IDE Arduino, además por defecto tiene un firmware que envía los datos de los sensores por el puerto UART y permite ver su funcionamiento.

Al analizar estas dos placas se ha seleccionado el Raizor 9DOF, ya que incorpora su propio micro controlador para procesar la información de los sensores, y así hacer un preprocesado de la información y devolver de manera sencilla la información por el puerto UART.

Figura 34. **Sensor Altimu-10**



Fuente: <https://upcommons.upc.edu>. Consulta: noviembre de 2016.

Figura 35. **Raizor 9DOF**



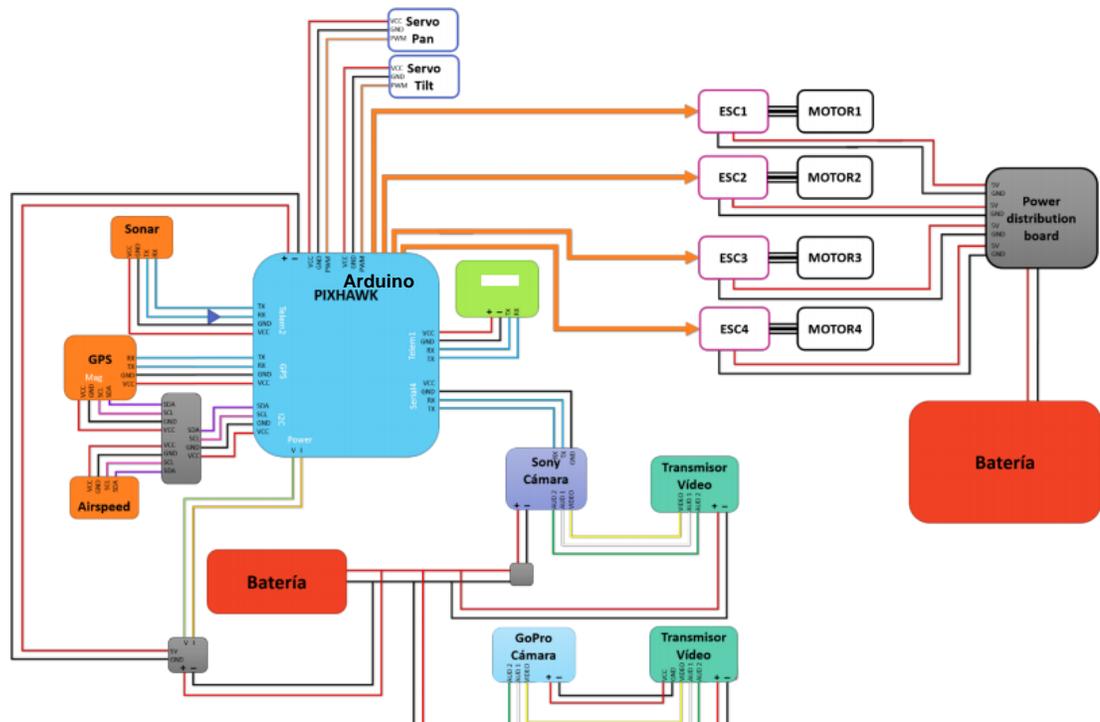
Fuente: <https://upcommons.upc.edu>. Consulta: noviembre de 2016.

### **3.3.2. Propuesta de diagrama de conexión**

La conexión entre componentes de un dron (ver figura 36), en la cual es muy común que se utilice un controlador de vuelo Pixhawk como centro de operación de un dron, y donde se ve que está un Arduino, permitirá automatizar a un dron.

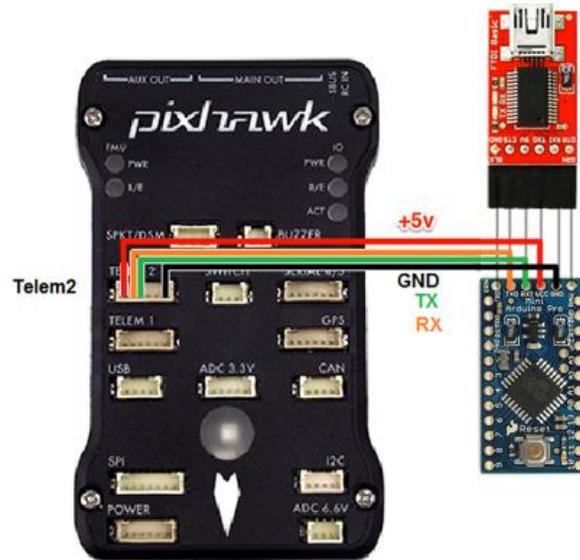
En esencia es manipular al Pixhawk con el Arduino de la manera en que se quiera que funcione; las conexiones se hacen a través del puerto telem2 de Pixhawk a los pines tx, rx, positivo y negativo de Ardupilot o Arduino. Obsérvese de forma más directa cómo se conecta el Pixhawk a un Arduino. (ver figura 37)

Figura 36. Diagrama de conexión



Fuente: Arantxa.aum.es. Consulta: noviembre de 2016.

Figura 37. **Conexión entre Pixhawk y Arduino nano**



Fuente: Arantxa.aum.es. Consulta: noviembre de 2016.

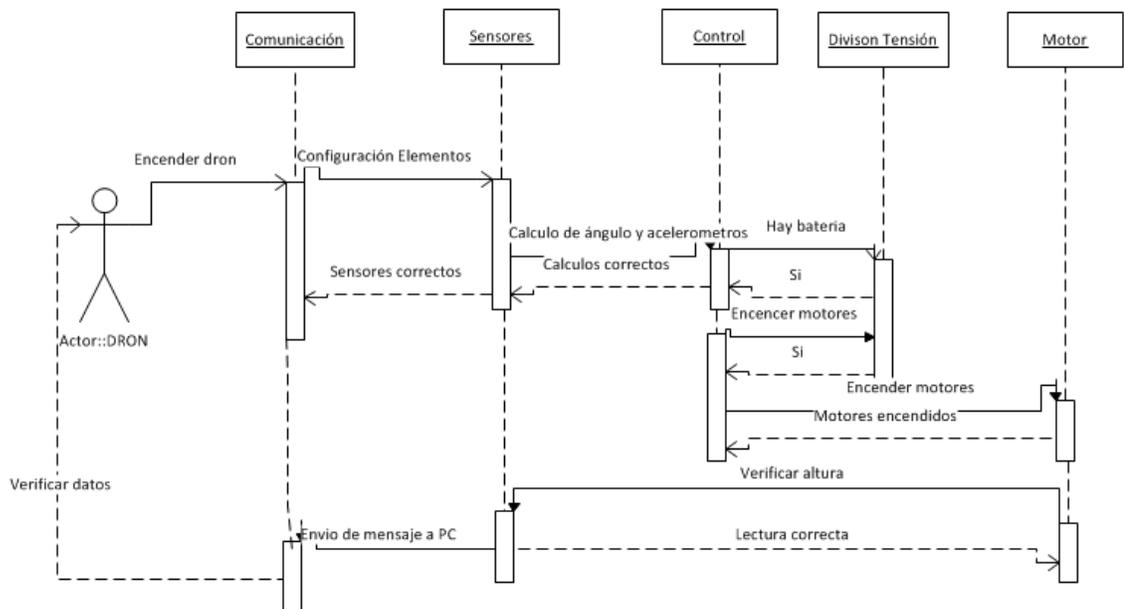
### 3.4. **Diseño de software**

Diseñar el software propuesto es un proceso muy importante porque permitirá maximizar la calidad y eficacia de la programación que se llevará a cabo en esta investigación de manera rápida y económica, permitirá dar soporte de manera más rápida y el código generado será más entendible y estructurado.

### 3.4.1. Diagrama de secuencia

En este diagrama se va a representar la comunicación entre objetos programados. (ver figura 38)

Figura 38. Diagrama de secuencia

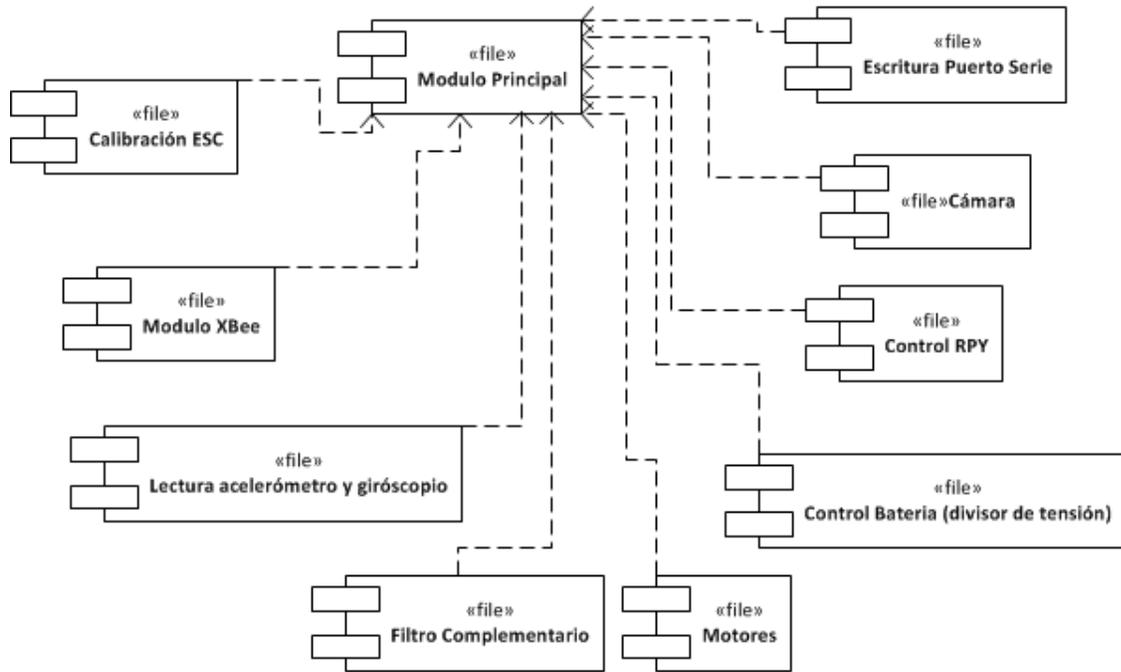


Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio.

### 3.4.2. Diagrama de componentes

Se modelará la arquitectura, describiendo todas las librerías, tablas, archivos, y documentos que formen parte del sistema que se está desarrollando en un diagrama de componentes. (ver figura 39)

Figura 39. Diagrama de componentes

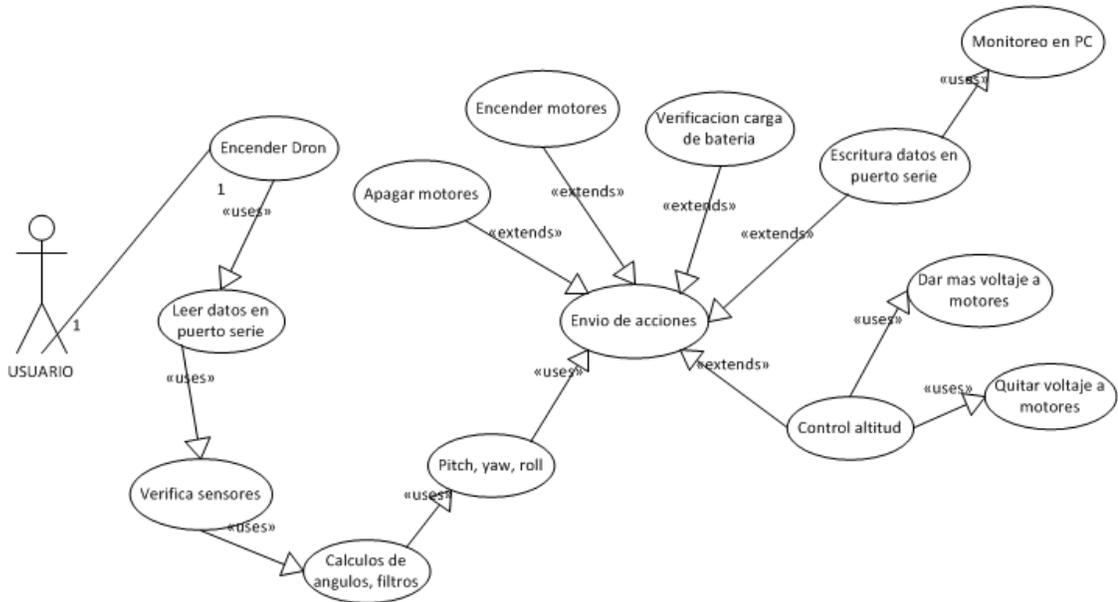


Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio.

### 3.4.3. Diagrama de casos de uso

Se describirá el comportamiento del sistema con un diagrama de casos de uso (ver figura 40) en el cual se modela desde que el usuario enciende el dron, así se comprenderá de manera fácil cómo es que se comportará el software que se desarrollará.

Figura 40. Diagrama de caso de uso propuesto

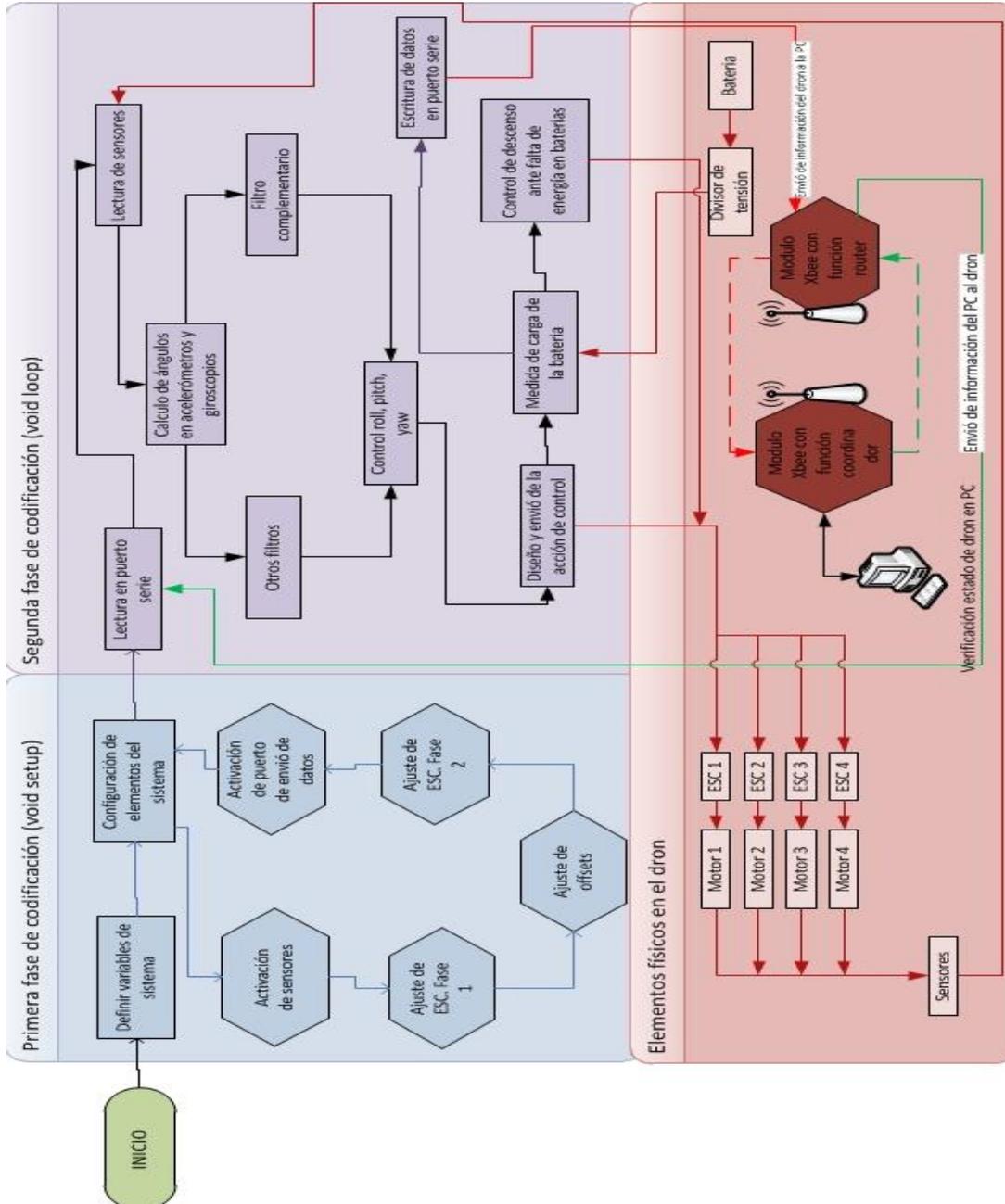


Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio.

### 3.4.4. Diagrama de flujo de funcionamiento del software

El propósito de incluir un diagrama de flujo del funcionamiento del sistema (ver figura 41) es para ofrecer una descripción visual de las actividades implicadas en el proceso de automatización propuesta, estas actividades están en secuencia facilitando la rápida comprensión de todo el sistema en conjunto.

Figura 41. Diagrama de flujo propuesto



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio.

### 3.5. Arquitectura de Arduino

La plataforma Arduino es *open-hardware* basada en una sencilla placa con entradas y salidas (E/S), analógicas y digitales. El elemento principal es el micro controlador Atmegaxx8, un chip sencillo y de bajo costo que permite el desarrollo de múltiples diseños. (ver figura 42) La descripción de los componentes de Arduino se detalla en la tabla IX y la descripción técnica de Arduino se detalla en la tabla X.

Tabla IX. **Descripción de componentes Arduino**

Descripción	Valor
Memoria flash	32 Kbyte
Memoria RAM	1 Kbyte
Frecuencia en las entradas y salidas	16 MHz
Pines para entradas y salidas	13 Pines
Pines para salidas analógicas	6 Pines

Fuente: elaboración propia.

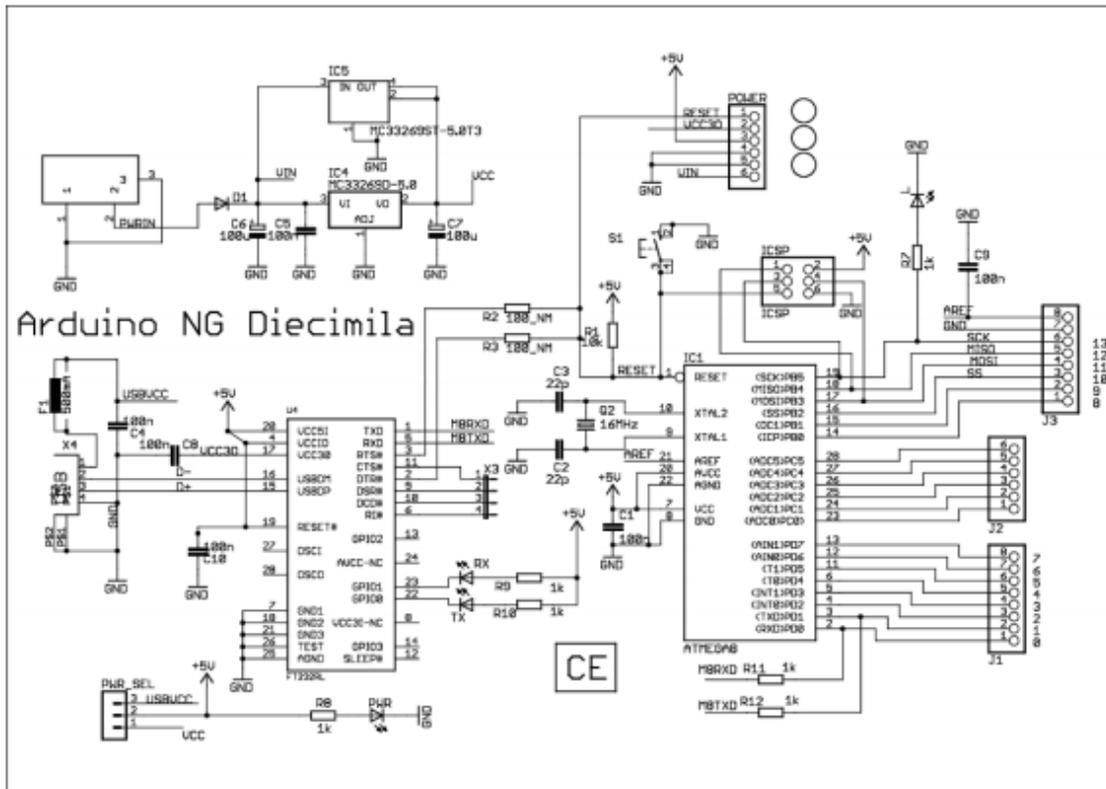
Tabla X. **Descripción técnica de Arduino**

Descripción	Valor
Micro controlador ATmega328	1
Voltaje de operación	5V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12V
Voltaje de entrada (limite)	6-20V
Cantidad de pines digitales	14
Cantidad de entradas analógicas	6
Corriente DC, entradas y salidas	40mA
Voltaje de salida en cada pin	3,3V
EEPROM	512 byte
Velocidad de reloj	16 MHz

Fuente: elaboración propia.

Las entradas analógicas son de 10 bits, por lo que entregan valores entre 0 y 1023. El rango de voltaje esta dado entre 0 y 5 voltios, pero utilizando el AREF, este rango se puede variar a algún otro deseado.

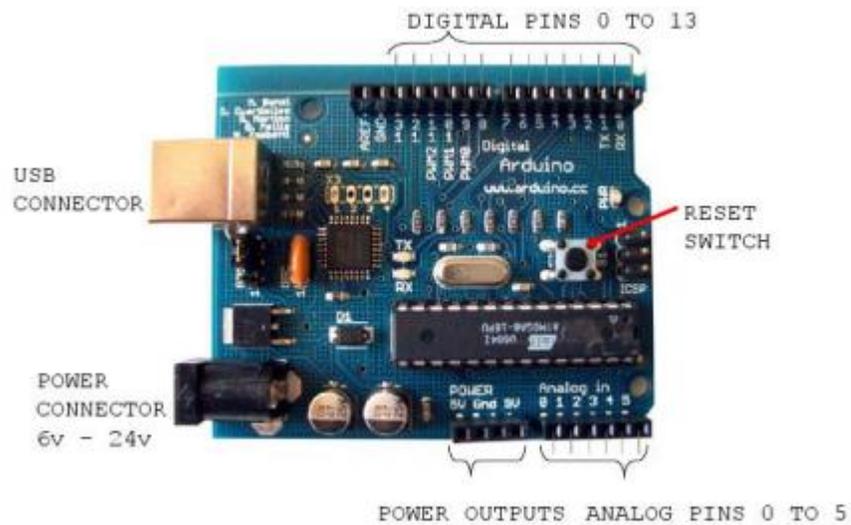
Figura 42. **Arquitectura de Arduino**



Fuente: [http://platea.pntic.mec.es/~mhidalgo/documentos/02\\_PlataformaArduino.pdf](http://platea.pntic.mec.es/~mhidalgo/documentos/02_PlataformaArduino.pdf). Consulta: diciembre de 2016.

La tarjeta Arduino (ver figura 43) contiene para interacción con el usuario trece entradas/salidas digitales, seis entradas analógicas y un puerto serial que permite realizar comunicación con periférico, además de un puerto serial, una conexión USB. También tiene un pulsador para restaurar cualquier fallo que exista en los procesos que se vayan a realizar con la tarjeta.

Figura 43. **Tarjeta Arduino**



Fuente: [http://platea.pntic.mec.es/~mhidalgo/documentos/02\\_PlataformaArduino.pdf](http://platea.pntic.mec.es/~mhidalgo/documentos/02_PlataformaArduino.pdf). Consulta: diciembre de 2016.



## 4. DESARROLLO DE SOFTWARE

### 4.1. Objetivo

El objetivo de este capítulo consiste en diseñar y proponer un software para controlar un dron ya sea vía control remoto o por la automatización del mismo consistiendo en agregar funcionalidades extras para que sea capaz de actuar por sí mismo.

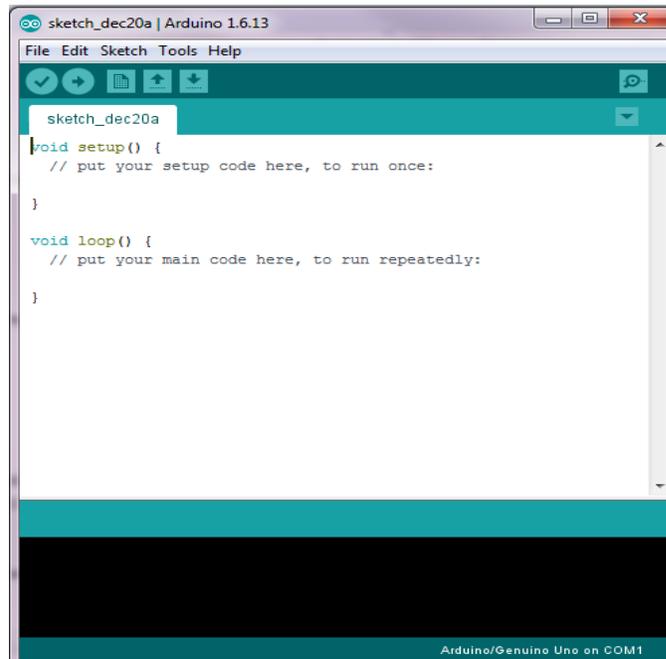
### 4.2. Entorno de desarrollo

La elección de Arduino como microprocesador implica el uso de un IDE para desarrollo, es un entorno basado en *processing* y *wiring*. La interfaz es muy similar a la del *processing* e incorpora todas las librerías que tiene *wiring*. Además cabe mencionar que se programa en C++.

Arduino tiene una extensa variedad de librerías que simplifican enormemente cualquier tarea por realizar como lectura y escritura de los puertos digitales y analógicos, implementación de los protocolos de comunicación como SPI, IC2, UART y además también permite el control de tiempo de los PWM. Esto resulta de gran utilidad ya que así se pueden desarrollar de forma rápida y sencilla.

El entorno que se utiliza en Arduino (ver figura 44), es amigable y sencillo de utilizar. Tiene muchas opciones pre configuradas que permiten simplificar procesos como la propia compilación y carga del programa en la placa Arduino, la comunicación con el PC para *debuguear* y la inclusión de librerías.

Figura 44. IDE de Arduino



Fuente: <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>. Consulta: diciembre de 2016.

Vale la pena mencionar que el IDE de Arduino viene con un conjunto de programas predeterminados que permiten estudiar cada una de las librerías y aprender a cómo utilizarlas. Acelerando así el aprendizaje sobre este entorno.

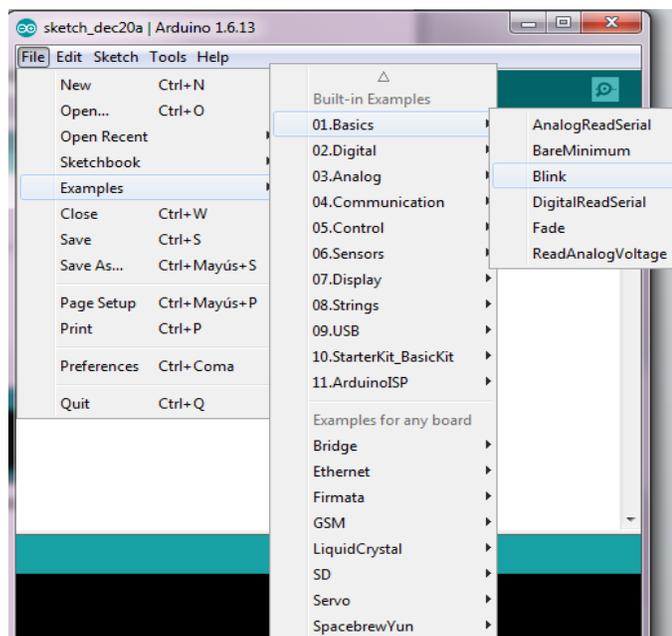
### 4.3. Instalación de entorno de desarrollo

Para proceder a realizar el desarrollo de software lo primero que se debe realizar es descargar la versión 1.6.13 de Arduino IDE de 86.5 MB. Se descomprimirá el fichero descargado en una carpeta, esta carpeta contendrá tanto el IDE de desarrollo de Arduino como los *drivers* (controladores) para la conexión USB en Windows.

#### 4.4. Conectar Arduino

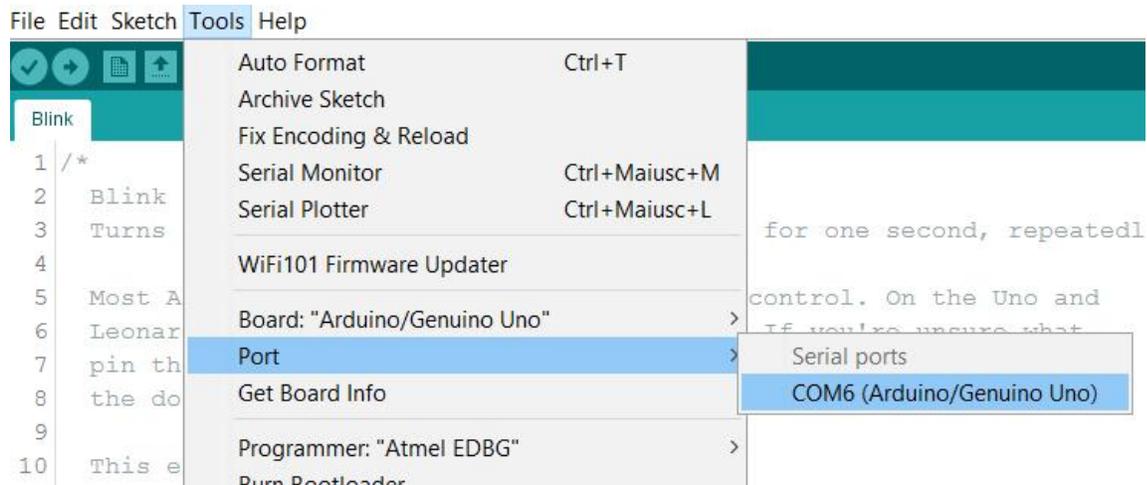
En este apartado lo que se debe hacer es abrir el IDE que se descargó de la página oficial de Arduino (ver figura 44), luego abrir un proyecto de los que trae el IDE de Arduino (ver figura 45). Luego, se selecciona el que pondrá como predeterminado el IDE y, por último, selecciona el puerto donde está conectado físicamente el Arduino (ver figura 46).

Figura 45. Proyecto de enlace con Arduino



Fuente: <https://www.arduino.cc/en/Guide/ArduinoUno>. Consulta: diciembre de 2016.

Figura 46. Selección de puerto donde está conectado Arduino físico



Fuente: <https://www.arduino.cc/en/Guide/ArduinoUno>. Consulta: diciembre de 2016.

#### 4.5. Envío de información a motores

En esta parte se explica cómo se enviará información a los servos; se necesita cuatro servos para manejar el dron (ver figura 47) y para entender cómo se declaran; se utiliza el pin 10 de Arduino.

Figura 47. Configuración de un motor en Arduino

```
digitalWrite(10,LOW);  
pinMode(10,OUTPUT);
```

Fuente: <https://riunet.upv.es/handle/10251/33064>. Consulta: diciembre de 2016.

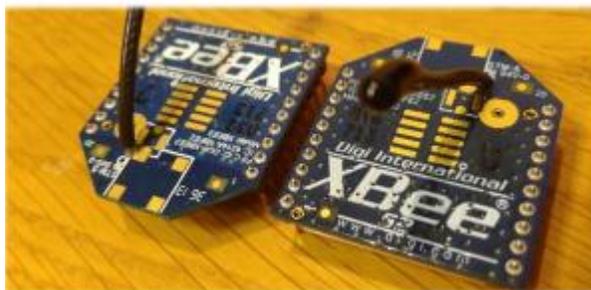
Donde *digitalWrite(10, LOW)* significa que se polarizara el pin 10 en cero lógico o voltios, *pinMode(10, OUTPUT)* significa que el modo del pin 10 es salida.

#### 4.6. Conexión inalámbrica vía Xbee

Uno de los principales objetivos alcanzados ha sido el de plantear un módulo para comunicar el dron con el ordenador, se había analizado el uso de otros métodos de comunicación pero todos ellos suponían mayores consumos de batería, por ejemplo, un par de métodos muy comunes son la comunicación *bluetooth* y la comunicación *wifi*. Xbee ofrece una longitud mayor a la de sus competidores antes mencionados, ya que puede alcanzar 1 km de distancia con algunos módulos.

Para lograr la comunicación se propone el uso de dos módulos Xbee *Zigbee* RF Modules Xbee PRO (Serie2 – S2) (ver figura 48), estos módulos deben ser de la misma serie para que puedan comunicarse entre sí.

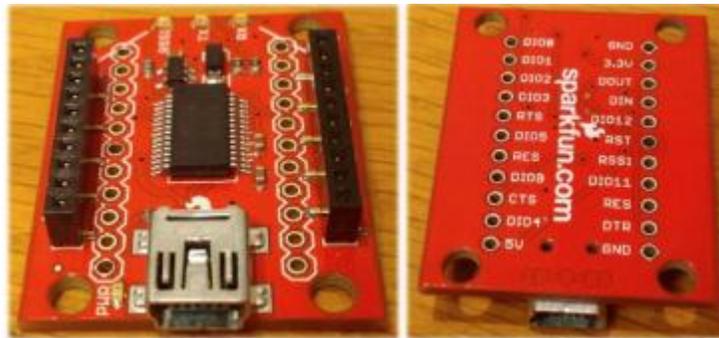
Figura 48. **Zigbee RF Modules Xbee Pro S2**



Fuente: <http://academica-e.unavarra.es>. Consulta: diciembre de 2016.

Se propone que uno de los módulos se encuentre conectado a la placa y se comunicara con el hardware de Arduino mediante una comunicación serie a través del conversor de niveles. El segundo módulo deberá estar conectado a una placa que permita la conexión serial con otros dispositivos través de un puerto mini USB-B, la Xbee Explorer USB BreakoutBoard. (ver figura 49)

Figura 49. **Placa de conexión de módulo Xbee con entrada mini USB**



Fuente: <http://academica-e.unavarra.es>. Consulta: diciembre de 2016.

Como parte de la propuesta el mini puerto deberá conectarse al ordenador y mediante el software XCTU proporcionado por el fabricante se configura la conexión. Sin embargo, no es necesaria la utilización de este software para configurar los módulos Xbee.

Se pone a disposición del usuario una serie de comandos, que precedidos por los caracteres AT, el módulo Xbee reconoce como órdenes de configuración.

Se podría hacer uno de Arduino para configurar los módulos pero el programa XCTU es una herramienta gratuita que facilita la configuración de los módulos al establecer contacto directo de forma automática y presentar sus distintas características. Para que ambos módulos puedan mantener una conversación las direcciones destino de los mensajes de cada uno deben ser la dirección del receptor. Esta dirección es un código de 2 bytes, *adress high* y *adress low*. En primer lugar, es para verificar que los dos módulos disponibles que se pueden comunicar entre sí deben tener la misma *adress high*.

A las redes zigbee también se les llama de área personal (*personal area network*) o por sus siglas PAN. Cada red Xbee se define en una única PAN ID, en todos los casos el PAN ID dispone de 16 bits de lo que permite 65535 redes distintas. Aunque se trata de un gran número de conexiones para ciertas aplicaciones era escaso, por lo que se desarrollaron los módulos de 64 bits de PAN ID. El módulo Xbee que se encuentra conectado al ordenador debe ser configurado como coordinador de la red Zigbee. Mientras que el módulo que se conecta a la placa y al Arduino debe ser configurado como *end device* o *router*.

#### **4.7. Desarrollo de software**

- Código para comunicación Xbee: sirve para comunicar el dron a la computadora de manera inalámbrica. (ver apéndice 1)
- Código para monitorear batería: sirve para hacer una lectura en un pin analógico de Arduino, en donde está conectado el divisor de tensión del que se habló anteriormente, se hace un escalado de voltaje para que se pueda interpretar de manera correcta la carga de la batería. (ver apéndice 2)

- Código para controlar *Roll, Pitch, Yaw* (RPY): sirve para controlar las referencias de giro *roll, pitch, yaw*, el cual moverá el dron en los 3 ejes, eje x, y, z. (ver apéndice 3)
- Código para lectura de acelerómetro y giroscopio: en este código se inicializan los giroscopios, se leen sensores y se calculan ángulos de movimiento. (ver apéndice 4)
- Código para escritura de datos en puerto serie: en este código se mandarán a la PC todas las tareas que se realicen en el dron, capturando todas las variables escritas en código para que después el usuario pueda ver todo lo que ha pasado como que si fuera una bitácora de acciones. (ver apéndice 5)

#### 4.8. Verificación de carga de la batería

Para monitorear la carga de la batería se propone utilizar un divisor de tensión 1:4 para escalar los 12 voltios de la batería a 3 voltios para medirlos con la entrada analógica de Arduino. El divisor de tensión que se propone deberá estar formado por una resistencia de 33 K $\Omega$  y otra de 100 K $\Omega$  quedando la relación:

$$V_{out} = V_{in} * \frac{33 \text{ k}\Omega}{100 \text{ k}\Omega + 33 \text{ k}\Omega} = V_{in} * 0,248$$

Ahora bien, si se aplica a la batería de 12 voltios:

$$V_{out} = 12V * 0,248 = 2,977V$$

Al analizar se sabe que por el pin analógico de Arduino deben entrar valores con tensión entre 0 y 5 voltios. Estos valores serán traducidos por el ADC (*Analogic-Digital Converter*) integrado en Arduino. El conversor tiene una resolución de 10 bits, lo que significa que traduce los valores a números enteros entre 0 y 1024. Esto supone que para obtener el resultado de voltaje se debe escalar a la medida. Dividiendo el valor de entrada máximo, entre 1024 se obtiene el número de mV por unidad digital.

$$\frac{5V}{1024LSB} = 4,883$$

De forma inversa se predice el valor original:

$$\frac{1024LSB}{5V} = \frac{204,8 LSB}{V}$$

Sabiendo que la tensión máxima que se va a alcanzar en el pin analógico es tres voltios, el ADC traduce esta tensión a 614. El objetivo es saber el valor de la tensión que hay en bornes de la batería, antes de aplicar el divisor de tensión que modifica su valor. Para corregir esto se debe dividir la señal entre el mismo factor de conversión que se consigue con el divisor de tensión 0,248.

$$V_{divisor} = lectura\ ADC * 4,883 \frac{mV}{LSB} = 614 * 4,883 \frac{mV}{LSB} = 2928,2mV$$

$$V_{bateria} = \frac{V_{divisor}}{0,248} = \frac{2998,2mV}{0,248} = 12089,4mV \cong 12,1V$$

Se desarrollara un sencillo código para aterrizar el dron en caso de que la batería empiece a descargarse. Para verificar si a la batería le hace falta carga se comparará el valor de tensión de descarga obtenido de las hojas de especificaciones de la batería. Para las baterías LiPo de 12V, por lo general, el valor suele estar en 10V.

Si el resultado de la comparación indica que la carga es menor que este valor, disminuye en una unidad la variable altura. De esta forma, el dron desciende progresiva y lentamente. Utilizando este método se consigue mantener el resto de funciones de control operativas durante el descenso, este código de programación se incluye en el inciso 4.7 de esta investigación.

## **5. NORMAS DE REGLAMENTACIÓN**

En este capítulo se exponen las normas de reglamentación que se tiene en Guatemala para el uso de drones.

### **5.1. Objetivo**

Detectar las diferentes formas en las que un dron asistiría diversas instituciones, tratando de identificar:

- Los posibles usos que se le pueden dar a los drones para detener hechos delictivos, en instituciones que se dedican a brindar servicios de seguridad.
- Los conocimientos que debe tener una persona para utilizar los drones de una manera correcta.
- En qué tipo de tareas se puede usar drones, para maximizar eficiencia y reducir riesgos.
- La viabilidad de usar drones en Guatemala, para contribuir al desarrollo del país.

### **5.2. Pistas de lanzamiento y consideraciones de reglamentación con Aeronáutica Civil**

Para utilizar un dron en Guatemala se deben registrar en Aeronáutica Civil, estos dispositivos son tratados como si fueran un helicóptero o un avión.

Para emplear un dron en Guatemala se debe respetar la siguiente regulación:

- El interesado puede solicitar a la DGAC (Dirección General de Aeronáutica Civil) la aprobación para operar en un área.
- El interesado no debe operar una aeronave no tripulada de manera que produzca un peligro a otra aeronave, a personas o a propiedades.
- Ninguna persona puede operar una aeronave lo suficientemente cerca de otra aeronave de modo que pueda crear un peligro de colisión.
- Una persona no debe operar una aeronave no tripulada en un área restringida o en una zona prohibida o sobre ella, excepto con el permiso de la autoridad que controla la zona y sus condiciones.
- Una persona no debe operar una aeronave no tripulada por encima de 400 pies AGL en el espacio aéreo controlado, excepto en un área aprobada para la operación de aviones no tripulados de la misma naturaleza que la aeronave, y de acuerdo con las condiciones de la aprobación, o de acuerdo con una autorización del control de tránsito aéreo.
- Una persona no debe operar una aeronave no tripulada por encima 400 pies AGL, dentro de 3 millas náuticas de un aeródromo a menos que la operación de la aeronave esté respaldada por un certificado operativo (CO), o se ha emitido un permiso especial para una operación específica.

### **5.3. Pasos para registrar un dron en Aeronáutica Civil**

En todos los casos el solicitante para la operación de una aeronave no tripulada deberá incluir en su solicitud inicial lo siguiente:

- El nombre, dirección y teléfono de la persona que va a operar la aeronave o si varias personas están involucradas, el nombre, dirección y teléfono del coordinador de la operación.
- La fecha y hora de la operación y/o la liberación y cuánto tiempo va a durar.
- El área específica de operación que incluya: punto geográfico y sus coordenadas, altura del vuelo, velocidad del vuelo, distancia máxima a la redonda desde la coordenada fija, tipo de comunicación que utilizaría con el centro de control más cercano.

#### **5.4. Autorizaciones para la operación de aviones no tripulados**

La DGAC otorgará el permiso para la operación de aeronaves no tripuladas si se cumplen dos condiciones:

- Operaciones regulares o constantes: un certificado operativo (CO) emitido por el departamento de estándares de vuelo, que cumpla con el proceso de certificación y los requisitos establecidos por el departamento de transporte aéreo para su obtención.
- Al examinar si se debe dar una aprobación o certificado operativo, la DGAC debe tener en cuenta que el solicitante proporcione información adicional como la siguiente: el grado de redundancia en sistemas críticos de la UAV, cualquier otra prueba de fallos características de diseño de la UAV; y la seguridad entre sus comunicaciones y sistemas de navegación.

Antes de dar una aprobación, la DGAC deberá cerciorarse de que la persona que tiene la intención de utilizar el UAV toma las precauciones necesarias para evitar que el vuelo propuesto no pueda ser peligroso para las personas y los bienes en la superficie.

## CONCLUSIONES

1. Es posible diseñar una propuesta sólida y viable de software para controlar y automatizar un dron. El software que se diseñó servirá para diferentes tipos de drones, ya sea caseros o comerciales, y ya que el modelo es estándar permitirá realizar mejoras que no se hayan tomado en consideración en esta investigación.
2. En la presente investigación se logró explicar de manera clara y concisa cómo diseñar un dron sabiendo optimizar y manejar cada uno de sus componentes. Para programar un dron desde cero, se requiere de una gama especializada de conocimientos técnicos y manejo de dispositivos complejos, además, se aprendió que cada uno de los componentes de un dron es vital y tienen un funcionamiento específico imposible de ser sustituido.
3. Es posible combinar la tecnología de Arduino con los elementos electrónicos en un dron, permitiendo la automatización de procesos internos y la realización de tareas de manera autónoma.



## RECOMENDACIONES

1. Divulgar las ventajas que tienen los drones en diferentes áreas, por ejemplo, seguridad, transporte, entre otros.
2. Intentar utilizar el modelo propuesto en esta investigación para construir un dron y tratar de reducir costos, orientando el dron hacia una aplicación específica, por ejemplo búsqueda y rescate, para que así la población en general conozca de ellos.
3. Buscar los componentes más importantes de un dron y leer las especificaciones que brindan los fabricantes para no tener problemas en su construcción.
4. Utilizar Arduino para automatizar un dron ya que su plataforma es barata, su software es abierto, flexible para programar y, además, está basado en C++.
5. Respetar las regulaciones que brinda Aeronáutica Civil, ya que el 95 % de los drones que hay en Guatemala no está registrado y se usa clandestinamente.



## BIBLIOGRAFÍA

1. *Arquitectura de Arduino* [en línea]. <[http://platea.pntic.mec.es/~mhidalgo/documentos/02\\_Plataforma Arduino.pdf](http://platea.pntic.mec.es/~mhidalgo/documentos/02_Plataforma_Arduino.pdf)>. [Consulta: 21 de diciembre de 2016].
2. *Conexiones a un controlador de vuelo Pixhawk* [en línea]. <[https://github.com/ArduPilot/ardupilot\\_wiki/blob/master/common/source/docs/common-pixhawk-wiring-and-quick-start.rst](https://github.com/ArduPilot/ardupilot_wiki/blob/master/common/source/docs/common-pixhawk-wiring-and-quick-start.rst)>. [Consulta: 10 de octubre 2016].
3. *Lista de componentes de un dron* [en línea]. <<http://dronecasero.blogspot.com/2014/10/lista-materiales-componentes-quadrotor.html>>. [Consulta: 21 de abril de 2015].
4. *Manual de conexión de Arduino a Pixhawk* [en línea]. <<http://diydrones.com/forum/topics/how-to-connect-pixhawk-to-arduino>>. [Consulta: 12 de octubre 2016].
5. *Módulo Xbee* [en línea]. <<http://academicae.unavarra.es/xmlui/bitstream/handle/2454/19208TFG%20Jose%20Etxeberria.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. [Consulta: 10 de diciembre de 2016].
6. *Partes de un dron* [en línea]. <<https://droningpage.wordpress.com/2014/10/19/que-partes-componen-un-drone-multirotor/>>. [Consulta: 20 de abril de 2015].

7. *Primer vistazo a los principios de vuelo de un dron* [en línea].  
<<https://vueloartificial.com/introduccion/toma-de-contacto/>>.  
[Consulta: 15 de octubre 2016].
8. *Reglamentación para drones en Guatemala* [en línea].  
<<http://www.dgac.gob.gt/>>. [Consulta: 20 de octubre de 2016].
9. *Selección de componentes para construir un dron* [en línea].  
<<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/21902/102664.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. [Consulta: 19 de diciembre 2016].
10. *Simuladores de vuelo para dron* [en línea].  
<<http://mydronelab.com/blog/drone-simulator.html>>. [Consulta: 25 de octubre de 2016].
11. *Vehículo aéreo no tripulado* [en línea].  
<[http://es.wikipedia.org/wiki/Veh%C3%ADculo\\_a%C3%A9reo\\_no\\_tripulado](http://es.wikipedia.org/wiki/Veh%C3%ADculo_a%C3%A9reo_no_tripulado)>. [Consulta: 5 abril de 2015].

# APÉNDICES

## Apéndice 1. Código de módulo Xbee

```
char ch='0';
int posicion=0;
int terminado =0;
char lectura[8]={0,0,0,0,0,0,0,0};
char parametro[2]={0,0};
int poslect=0;
char medida[6]={0,0,0,0,0,0};
float valor;
void setup() {}
void loop() {
//configuracion modulo XBee
if (Serial.available())
{
XBee ();
}
}
void XBee (void)
{
ch=Serial.read();
Serial.println(ch);
if (terminado==1)
{
for (inti=0;i<=8;i++)
{
lectura[i]=0;
}
for (inti=0;i<=2;i++)
{
parametro[i]=0;
}
for (inti=0;i<=6;i++)
{
medida[i]=0;
}
valor=0;
terminado=0;
}
if (ch!='f')
{
lectura[poslect]=ch;
++poslect;
}
else
```

## Continuación apéndice 1.

```
{
lectura[poslect]='\0';
for(int i=0;i<=1;i++)
{
parametro[i]=lectura[i];
}
for(int i=0;i<=poslect-2;i++){
medida[i]=lectura[i+2];
}
valor=atof(medida);
poslect=0;
terminado=1;

switch(parametro[1])
{
case'a':
//alfa
break;
case'l':
//altura
break;
case'x':
//referencia roll
break;
case'y':
//referencia pitch
break;
case'z':
//referencia yaw
break;
}
}
}
```

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 2. Código para monitorear carga de batería

```
float voltajeDivisor=0;
float voltajeBateria=0;
float lecturaAnalogicaDivisor=0;
int altura=0;
void setup() {}
void loop()
{
VerificarVoltaje();
```

## Continuación apéndice 2.

```
}  
void VerificarVoltaje (void)  
{  
lecturaAnalogicaDivisor=analogRead(1);  
delay(100);  
voltajeDivisor=lecturaAnalogicaDivisor*5/1025;  
voltajeBateria=voltajeDivisor/0.248;  
  
if(voltajeBateria<=9) {  
if(altura>-180)  
{  
--altura;  
}  
}  
}
```

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 3. Código para control RPY

```
float altura=110;  
int pulsoMin=800;  
int pulsoMax=2100;  
int Espera=0;  
int accion[3];  
Servo motor1;  
Servo motor2;  
Servo motor3;  
Servo motor4;  
void setup()  
{  
ControlPYR();  
}  
void loop() {}  
void ControlPYR(void)  
{  
motor1.attach(3); //D3  
motor2.attach(4,pulsoMin,pulsoMax); //D4  
motor3.attach(5,pulsoMin,pulsoMax); //D5  
motor4.attach(6,pulsoMin,pulsoMax); //D6  
delay(100);  
  
motor1.writeMicroseconds(pulsoMax);  
motor2.writeMicroseconds(pulsoMax);  
motor3.writeMicroseconds(pulsoMax);  
motor4.writeMicroseconds(pulsoMax);
```

### Continuación apéndice 3.

```
espera=millis();
while(millis()-espera<=2500);
motor1.writeMicroseconds(pulsoMin);
motor2.writeMicroseconds(pulsoMin);
motor3.writeMicroseconds(pulsoMin);
motor4.writeMicroseconds(pulsoMin);
}
```

Fuente: elaboración propia.

### Apéndice 4. Código para lectura de acelerómetro y giroscopio

```
int readings[6];
float anguloAcc[3];
float offsetAccelX, offsetAccelY, offsetAccelZ;
float SGiro[3]; float anguloGiro[3];
float offsetGiroX, offsetGiroY, offsetGiroZ;
int dT=0;
double last=0;
void setup()
{
  InicializacionGiroscopio();
}
void loop()
{
  InicializacionAcelerometro();
}
void InicializacionGiroscopio(void)
{
  for(int i=0; i<3; i++)
  {
    anguloGiro[i]=0;
  }
  SGiro[0]=0.0000076;
  SGiro[1]=0.0000076;
  SGiro[2]=0.0000076;
}
void InicializacionAcelerometro(void)
{
  readings[0]= readings[0]-offsetAccelX;
  readings[1]= readings[0]-offsetAccelY;
  readings[2]= readings[0]-offsetAccelZ;
  readings[3]= readings[0]-offsetGiroX;
  readings[4]= readings[0]-offsetGiroY;
  readings[5]= readings[0]-offsetGiroZ;
```

#### Continuación apéndice 4.

```
//calculo de angulos desde acelerometros
anguloAcc[0]=atan2(readings[1],readings[2]);
anguloAcc[0]*=57.29577;
anguloAcc[1]=atan2(-readings[0], readings[2]);
anguloAcc[1]*=57.29577;

//calculo de angulos desde giróscopios
dT=millis()-last;
last=millis();
for(int i=0;i<3;i++){
anguloGiro[i]=anguloGiro[i]*readings[i+3]*dT;
}
}
```

Fuente: elaboración propia.

#### Apéndice 5. Código de escritura en puerto serial

```
void setup() {}
void loop()
{
Escritura();
}void Escritura(void)
{
//OBTENER TODAS LAS VARIABLES DE TODOS LOS MODULOS EN EL PROYECTO
Serial.println("ROW, SET, 2");}
```

Fuente: elaboración propia.

