

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:  
INGENIEROS ELECTRÓNICOS**

**TEMA:  
CONTROL DE UN CUADRICÓPTERO TELEOPERADO CON  
MANIPULADOR INCORPORADO PARA EL MOVIMIENTO DE OBJETOS**

**AUTORES:  
ÁLVARO RICARDO JARAMILLO LASCANO  
DIEGO ANDRÉS SALAZAR LUNA**

**TUTOR:  
ANÍBAL ROBERTO PÉREZ CHECA**

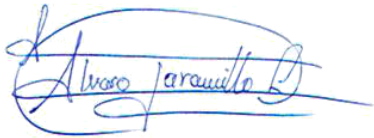
**Quito, diciembre del 2018**



## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Álvaro Ricardo Jaramillo Lascano y Diego Andrés Salazar Luna, con documentos de identificación N° 1719004945 y N° 1721124053 respectivamente, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado: “CONTROL DE UN CUADRICÓPTERO TELEOPERADO CON MANIPULADOR INCORPORADO PARA EL MOVIMIENTO DE OBJETOS”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingenieros Electrónicos, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



---

Álvaro Ricardo Jaramillo Lascano  
C.I.: 1719004945



---

Diego Andrés Salazar Luna  
C.I.: 1721124053

Quito, diciembre del 2018.

## **DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR**

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Proyecto Técnico, “CONTROL DE UN CUADRICÓPTERO TELEOPERADO CON MANIPULADOR INCORPORADO PARA EL MOVIMIENTO DE OBJETOS”, realizado por Álvaro Ricardo Jaramillo Lascano y Diego Andrés Salazar Luna, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, diciembre del 2018.



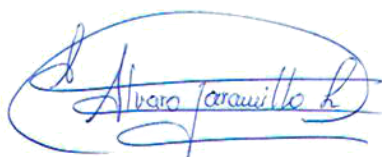
---

Aníbal Roberto Pérez Checa

C.I.: 1711423440

**CARTA DE AUTORIZACION DE USOS DE IMÁGENES, SONIDOS,  
PATENTES, INFORMACION EMPRESARIAL.**

Nosotros, Álvaro Ricardo Jaramillo Lascano y Diego Andrés Salazar Luna, con documentos de identificación N° 1719004945 y N° 1721124053 respectivamente, autorizamos el uso de imágenes, sonidos, patentes o información empresarial utilizados en este trabajo de titulación con el tema, “CONTROL DE UN CUADRICÓPTERO TELEOPERADO CON MANIPULADOR INCORPORADO PARA EL MOVIMIENTO DE OBJETOS”.



---

Álvaro Ricardo Jaramillo Lascano  
C.I.: 1719004945



---

Diego Andrés Salazar Luna  
C.I.: 1721124053

Quito, diciembre del 2018

## ÍNDICE

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR .....	i
DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR .....	ii
CARTA DE AUTORIZACION DE USOS DE IMÁGENES, SONIDOS, PATENTES, INFORMACION EMPRESARIAL .....	iii
ÍNDICE.....	iv
RESUMEN .....	ix
ABSTRACT.....	x
INTRODUCCIÓN .....	xi
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	1
<b>ANTECEDENTES</b> .....	1
1.1. Planteamiento del problema.....	1
1.2. Objetivos.....	1
1.2.1. Objetivo General .....	1
1.2.2. Objetivos Específicos .....	1
1.3. Justificación .....	2
1.4. Propuesta de solución .....	2
1.5. Alcance .....	3
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	4
<b>MARCO CONCEPTUAL</b> .....	4
2.1. Cuadricóptero .....	4
2.1.1. Tarjeta Controladora de vuelo .....	5
2.1.2. Controlador de velocidad electrónico .....	7
2.1.3. Transmisor y Receptor de radiofrecuencia .....	8
2.1.4. Motores de corriente continua .....	9
2.1.5. Hélice .....	11
2.1.6. Batería de Litio y polímero.....	14
2.2. Robot manipulador .....	15
2.2.1. Estructura del robot manipulador .....	15
2.3. Tarjeta electrónica de desarrollo .....	15
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	16
<b>DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN</b> .....	16
3.1. Cuadricóptero .....	16
3.1.1. Estructura del vehículo aéreo no tripulado .....	16
3.1.2. Torque y velocidad de motor sin escobillas .....	17

3.1.3. Consumo de Potencia de motor sin escobillas .....	18
3.1.4. Dimensionamiento del controlador electrónico de velocidad .....	19
3.1.5. Empuje de hélices.....	20
3.1.6. Selección de Tarjeta controladora de vuelo .....	24
3.2. Robot manipulador de 3 grados de libertad.....	24
3.3. Diseño y construcción de hardware. ....	28
3.3.1 Selección del módulo electrónico de control. ....	29
3.3.2 Diseño y fabricación del circuito de potencia. ....	30
3.3.3 Operación de la tarjeta controladora de vuelo. ....	34
3.3.4 Operación de la tarjeta controladora principal. ....	35
3.3.5 Operación de tarjeta controladora del manipulador robótico.....	36
3.3.6 Diseño y fabricación de la tarjeta electrónica principal. ....	38
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>40</b>
<b>PRUEBAS Y RESULTADOS</b> .....	<b>40</b>
4.1. Pruebas de vuelo y estabilidad sin manipulador con parámetros de control predefinido 40	
4.2. Verificación de sistema anticollisiones. ....	42
4.3. Pruebas de vuelo y estabilidad con manipulador en espacio abierto. ....	42
4.4. Pruebas de vuelo y estabilidad con manipulador en espacio cerrado. ....	45
<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>49</b>
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>51</b>
<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>52</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Cuadricóptero con estructura de fibra de carbono .....	4
Figura 2.2: Movimientos de control posible en cuadricóptero .....	5
Figura 2.3: Tarjeta controladora de vuelo .....	5
Figura 2.4: Sensor conjunto de acelerómetro y giroscopio.....	6
Figura 2.5: Magnetómetro.....	6
Figura 2.6: Barómetro .....	6
Figura 2.7: Controlador de velocidad electrónico .....	7
Figura 2.8: Forma de onda trifásica a la salida del controlador de velocidad electrónico.....	7
Figura 2.9: Transmisor de radiofrecuencia.....	8
Figura 2.10: Distribución de canales .....	8
Figura 2.11: Motor de corriente continua .....	9
Figura 2.12: Motor de corriente continua con escobillas.....	10
Figura 2.13: Motor de corriente continua sin escobillas .....	10
Figura 2.14: Motor trifásico sin escobillas .....	11
Figura 2.15: Desplazamiento de la hélice.....	12
Figura 2.16: Vista superior del disco de rotor .....	12
Figura 2.17: Condiciones de flujo de sección de h en vuelo vertical.....	13
Figura 2.18: Fuerzas aerodinámicas que se generan sobre la hélice .....	14
Figura 2.19: Batería de Litio y polímero .....	14
Figura 2.20: Similitud de robot manipulador con brazo humano .....	15
Figura 3.1: Relación de Torque-Velocidad en motores sin escobillas .....	17
Figura 3.2: Consumo de Potencia Eléctrica en función del diámetro de las hélices .....	19
Figura 3.3: Fuerzas que actúan sobre las hélices en movimiento .....	21
Figura 3.4: Soporte para balancear las hélices.....	21
Figura 3.5: Estructura para medir el empuje .....	22
Figura 3.6: Empuje respecto a la velocidad lineal .....	23
Figura 3.7: Variación de empuje con respecto al diámetro de la hélice.....	23
Figura 3.8: Diagrama de cuerpo libre de los torques del manipulador recogido.....	25
Figura 3.9: Diagrama de cuerpo libre de los torques del manipulador desplegado.....	26
Figura 3.10: Vista lateral del robot manipulador de 3 grados de libertad recogido .....	27
Figura 3.11: Vista lateral del robot manipulador de 3 grados de libertad desplegado .....	28
Figura 3.12: Vista lateral del robot manipulador de 3 grados de libertad extendido.....	28
Figura 3.13: Diagrama de bloques del sistema de vuelo.....	29
Figura 3.14: Configuración del Regulador de Voltaje LM338 .....	31
Figura 3.15: Modelado 3D del Circuito Impreso de Potencia .....	33
Figura 3.16: Ruteado de pistas y estañado .....	33
Figura 3.17: Tarjeta Electrónica de Potencia.....	34
Figura 3.18: Diagrama de Bloques del sistema de vuelo .....	34
Figura 3.19: Diagrama de bloques del sistema anticolidión.....	35
Figura 3.20: Diagrama de Flujo del controlador principal.....	36
Figura 3.21: Diagrama de bloques del brazo manipulador .....	37
Figura 3.22: Diagrama de flujo del manipulador.....	37
Figura 3.23: Diagrama esquemático de la tarjeta principal .....	38
Figura 3.24: Ruteado de pistas en la cara superior (b) e inferior (a) de la tarjeta principal....	39



Figura 3.25: Modelado 3D (a) e implementación (b) de la tarjeta electrónica principal .....	39
Figura 4.1: Cuadricóptero en el banco de pruebas (a) y en entorno cerrado (b) .....	41
Figura 4.2: Cuadricóptero en soporte de techo (a) y en entorno abierto (b).....	41
Figura 4.3: Cuadricóptero con sensores de distancia en el banco de pruebas (a) y en vuelo (b) .....	42
Figura 4.4: Sistema híbrido durante el despegue (a) y vuelo (b) prueba 1 .....	43
Figura 4.5: Sistema híbrido durante el despegue (a) y vuelo (b) prueba 2.....	43
Figura 4.6: Verificación de estabilidad por arrastre durante el despegue (a) y vuelo (b).....	44
Figura 4.7: Verificación de estabilidad por despliegue de manipulador .....	44
Figura 4.8: Verificación de estabilidad por manejo de manipulador .....	45
Figura 4.9: Toma de objeto desde soporte alto .....	46
Figura 4.10: Dejar objeto en soporte medio .....	46
Figura 4.11: Movimiento de objeto desde soporte bajo a soporte medio.....	47
Figura 4.12: Movimiento de objeto desde soporte bajo a soporte alto.....	48

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Características entre diferentes estructuras de vehículos aéreos no tripulados .....	16
Tabla 3.2: Revoluciones por minuto en los motores comerciales .....	18
Tabla 3.3: Tarjetas controladoras de vuelo comerciales .....	24
Tabla 3.4: Listado de elementos y peso neto del cuadricóptero .....	27
Tabla 3.5: Comparación de características técnicas de módulos Arduino .....	30
Tabla 3.6: Características de los reguladores de voltaje comerciales. ....	31
Tabla 4.1: Parámetros de estabilidad .....	40
Tabla 4.2: Resultados obtenidos de las pruebas .....	48

## RESUMEN

Existen entornos físicos de riesgo donde se requiere que las actividades se las realice de modo remoto con el fin de precautelar la seguridad de las personas, para ello se hace uso de la tecnología puesta a disposición, las principales herramientas utilizadas como reemplazo a las personas son los robots.

Este proyecto técnico de titulación tiene como objetivo implementar un vehículo aéreo teleoperado con manipulador incorporado, el cuadricóptero de arquitectura híbrida utiliza dos módulos electrónicos de control; el primero es un controlador de vuelo CC3D Revolution que dispone de varios sensores como barómetro, altímetro, giroscopio, necesarios para mantener la estabilidad del vehículo aéreo durante las maniobras; y, el segundo es un módulo Arduino Pro Mini que se encarga de controlar los movimientos de los servomotores que forman parte del manipulador de 3 grados de libertad.

Se realizaron las pruebas de verificación del sistema híbrido en un entorno al aire libre donde se pudo comprobar que el cuadricóptero requiere del 75% de aceleración para el despegue a causa del exceso de peso, lo cual incidió en la falta de maniobrabilidad durante el vuelo. Para corregir dicho problema se redujo el peso del sistema en un 27% al remover la batería, realizando pruebas de vuelo más exhaustivas en un entorno cerrado se logró el despegue con el 50% de aceleración donde se obtuvo una respuesta inmediata al desplazamiento y a los estímulos externos corrigiendo su posición e inclinación para mantener la estabilidad durante el traslado de objetos desde 3 posiciones a diferentes alturas.

## **ABSTRACT**

There are physical risk environments where activities are required to be carried out remotely in order to safeguard the safety of people, so that the technology made available is used, the main tools used as a replacement for the children. robots.

This technical titling project aims to implement a teleoperated aerial vehicle with built-in manipulator, the hybrid architecture quadcopter uses two electronic control modules, the first is a CC3D Revolution flight controller that has several sensors such as barometer, altimeter, gyroscope, necessary to maintain the speed of the aerial vehicle during the maneuvers and the second in an Arduino Pro Mini module that is responsible for controlling the movements of the servomotors that are part of the manipulator of 3 degrees of freedom.

System verification tests were performed in an outdoor environment where it was found that the quadcopter require 75% acceleration for takeoff due to excess weight, which implied the lack of maneuverability during the flight. To correct the problem, the weight of the system is reduced by 27% when the battery is removed, to perform more exhaustive flight tests in a closed environment, the takeoff was achieved with 50% of the acceleration, when an immediate response was obtained at the rhythm of external stimuli correcting their position and inclination to maintain speed during the movement of objects from 3 positions at different heights.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen entornos de trabajo de alto riesgo para las personas que realizan múltiples tareas poniendo en peligro su integridad física, razón por la cual ciertos procesos requieren ser ejecutados de manera remota. Es cuando la innovación tecnológica se ve implementada a fin de servir como una herramienta de trabajo que facilite los accesos a zonas peligrosas, permita mover objetos u optimice los tiempos. Con el propósito de mejorar a los procesos se requiere implementar un sistema robótico híbrido capaz de realizar las tareas que representan un riesgo potencial para el ser humano, ya sea por la complejidad de la acción o limitación propia del espacio físico.

Este proyecto técnico de titulación permitirá el desarrollo de un sistema híbrido teleoperado, constituido por un vehículo aéreo no tripulado determinado como cuadricóptero y un brazo manipulador de 3 grados de libertad. El sistema en conjunto está compuesto por varias tarjetas de control y potencia, permitiendo que el cuadricóptero mantenga la estabilidad mientras se desplaza cargando objetos de un lugar a otro.

El presente proyecto técnico abarca los siguientes capítulos:

Capítulo 1: Se presenta el análisis realizado entorno al problema, la propuesta de solución, la justificación para la realización, los objetivos a cumplir, el alcance y las limitaciones del proyecto técnico de titulación.

Capítulo 2: Se detalla la recopilación de toda la documentación e información técnica necesaria para el desarrollo del proyecto técnico de titulación.

Capítulo 3: Se describe la justificación teórica para la selección de los elementos de diseño, posteriormente la elaboración de las tarjetas electrónicas de control y la implementación del sistema. Así también el desarrollo de la lógica de programación para el control, comunicación y estabilidad.

Capítulo 4: Se detalla los resultados obtenidos al realizar pruebas de funcionamiento y operabilidad del sistema robótico híbrido, se comprueba su precisión y se obtiene las respectivas conclusiones y recomendaciones.



# **CAPÍTULO 1**

## **ANTECEDENTES**

Cuando se trabaja con elementos robóticos puede darse el problema de que estos no logren alcanzar ciertos puntos de la superficie de trabajo, ya sea por su limitada capacidad de movimiento o por barreras físicas que existen en el área, en donde el único camino posible sea a través del espacio aéreo, tanto en lugares de trabajo interiores como exteriores. En la actualidad, con el crecimiento vertical de las ciudades, existen ciertos problemas que se generan al momento de realizar mantenimiento de edificios o estructuras de gran altura. Esto conlleva a contratar trabajadores que acepten realizar tareas bajo condiciones muy peligrosas dentro de sistemas que requieren de mantenimiento constante y en caso de fallo una reparación inmediata en lugares no accesibles.

### **1.1. Planteamiento del problema**

Existen ciertos tipos de áreas de trabajo donde un robot móvil con ruedas o patas tiene limitada sus funciones para servir como herramienta a un ser humano, como puede ser la disposición física del lugar de trabajo con estructuras que no permitan la movilidad del robot. Pero también existen áreas de trabajo donde el personal se encuentra bajo ciertos riesgos por el traslado en estructuras altas, por citar un ejemplo.

El uso del cuadricóptero con manipulador incorporado permite brindar una solución al problema de acceso y movilidad sobre áreas de riesgo.

### **1.2. Objetivos**

#### **1.2.1. Objetivo General**

Solucionar el problema de movimiento de un dispositivo volador con manipulador incorporado, tanto con carga como sin carga para la realización de tareas.

#### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Analizar el funcionamiento de un cuadricóptero y de un robot manipulador para la composición de un sistema robótico híbrido.

- Desarrollar una estructura compatible y un sistema electrónico funcional para la unión de los dos tipos de mecanismos. (UAV y robot móvil).
- Diseñar un algoritmo de control estabilizador de vuelo del dispositivo o sistema híbrido para el trabajo con y sin carga, basado en el análisis de la cinemática del conjunto.
- Evaluar el desempeño en varios entornos del robot híbrido para validar su funcionamiento.

### **1.3. Justificación**

La creación de una herramienta capaz de transportar objetos o realizar tareas bajo condiciones peligrosas en alturas, ayudaría a prevenir accidentes como el que sucedió en Turquía en el año 2014 donde 10 trabajadores perdieron la vida en diferentes accidentes en la construcción de un edificio de viviendas. (ELPAIS, 2014)

Otra ventaja de tener una herramienta que ayude a manipular objetos vía aérea, es la de prevenir que el trabajador se mueva constantemente por su área de trabajo llevando o buscando herramientas y material que necesite, de esta forma se estaría evitando caídas y golpes de los trabajadores.

Al analizar los accidentes laborales ocurridos durante el 2015, a nivel mundial, se desprende que aquellos causados por resbalones, tropezones y caídas representan el 25%, mientras los causados por golpes de todo tipo representan el 21%. Esto implica un costo de alrededor de \$5.000 millones por concepto de pérdida de productividad, gastos médicos y pago de subsidios entre otros, según la OIT. (Organización Internacional del Trabajo). (Trabajo)

Por lo tanto, la tecnología actual de robótica móvil voladora puede crear una herramienta que permita facilitar el trabajo y evitar pérdidas humanas.

### **1.4. Propuesta de solución**

Para el presente proyecto se van a unir dos tipos de sistemas robóticos, un cuadricóptero al cual se le añadirá un manipulador robótico de tres grados de libertad,



para así crear un sistema robótico híbrido que estabilice su vuelo, con y sin carga, evite obstáculos y permita su libre maniobrabilidad por diferentes entornos para proporcionar soluciones a problemas cuando se trabaja a grandes alturas que ponen en riesgo la integridad de las personas.

### **1.5. Alcance**

El sistema robótico híbrido comprendido por un cuadricóptero y manipulador incorporado será capaz de realizar las siguientes tareas:

- Desplazarse controladamente mediante un mando teleoperado en entornos abiertos o cerrados.
- Transportar objetos de menor tamaño soportados por la pinza del brazo de un lugar a otro.
- Tomar objetos que se encuentren bajo el eje horizontal.
- Mantener la estabilidad durante el vuelo ante cualquier factor que genere turbulencia o alteración en la inercia del sistema.
- Enviar datos de vuelo mediante protocolo de telemetría hacia el computador que realiza el monitoreo.

El sistema robótico híbrido no podrá realizar:

- No será capaz de tomar objetos que se encuentren sobre el eje horizontal debido a la limitación de tamaño del brazo.
- No será capaz de mantener una amplia autonomía de vuelo debido a la cantidad de potencia que requiere el sistema.

## CAPÍTULO 2 MARCO CONCEPTUAL

### 2.1. Cuadricóptero

Es un modelo de vehículo aéreo no tripulado que tiene la capacidad de desplazarse libremente en el aire con la ayuda de 4 motores que producen empuje de la masa de aire. La estructura básica del cuadricóptero está dispuesta en cruz como se indica en la Figura 2.1, donde cada uno de los motores se sitúan en los extremos de sus brazos, con el fin de mantener la estabilidad durante el vuelo los motores giran en pares en sentido horario y antihorario, generando un empuje diferencial entre los motores alternos.

Figura 2.1: Cuadricóptero con estructura de fibra de carbono



Elaborado por: Álvaro Jaramillo y Diego Salazar

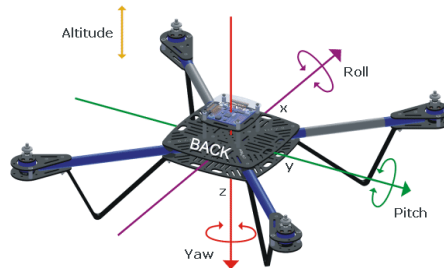
La estabilidad de vuelo es la capacidad que tiene un vehículo aéreo no tripulado de mantenerse en estado de equilibrio, que es un vuelo nivelado y recto, además, su capacidad de volver a su situación anterior de equilibrio tras sufrir una alteración sin que el piloto intervenga, una aeronave en vuelo está constantemente sometida a fuerzas y factores que pueden alterar su trayectoria, tales como vientos racheados o corrientes de aire cálido ascendente que pueden provocar que cambie su curso. (Cursopilotodedrones)

El desplazamiento de un cuadricóptero se encuentra controlado por 4 movimientos determinados (Toglefritz, 2014) como se muestra en la Figura 2.2, que son:

- Altitud: Controla el desplazamiento vertical del cuadricóptero al acelerar o desacelerar el movimiento de los motores.
- Yaw: Es la rotación angular generada sobre el eje vertical Z, produce los cambios de dirección del cuadricóptero.
- Pitch: Es la rotación angular generada sobre el eje lateral Y, produce los desplazamientos hacia adelante o hacia atrás del cuadricóptero.

- Roll: Es la rotación angular generada sobre el eje longitudinal X, produce los desplazamientos hacia la derecha o hacia la izquierda del cuadricóptero.

Figura 2.2: Movimientos de control posible en cuadricóptero



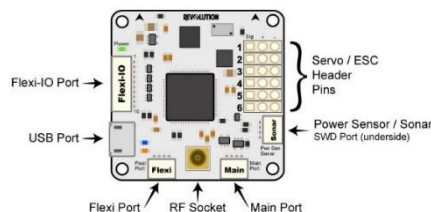
Fuente: (Parallax; Toglefritz, 2014)

El cuadricóptero está conformado por varios elementos que permiten su funcionamiento, entre los cuales se mencionan: tarjeta controladora de vuelo, motores, hélices, variadores de velocidad, transmisor y receptor de radiofrecuencia, batería de alta corriente LIPO (Litio y polímero).

### 2.1.1. Tarjeta Controladora de vuelo

Es un módulo electrónico que dispone de pines de entrada, salida, sensores y un microcontrolador como se muestra en la Figura 2.3. Se encarga de mantener la estabilidad en vuelo del cuadricóptero al procesar las señales que adquiere de los múltiples sensores disponibles en su arquitectura, luego de lo cual envía instrucciones hacia los puertos conectados a los actuadores y el sistema ejecuta acciones con el fin de corregir la posición, dirección y balance del vehículo aéreo no tripulado (Escura).

Figura 2.3: Tarjeta controladora de vuelo

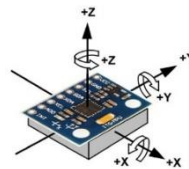


Fuente: (Openpilot)

Dispone de sensores que permiten medir los factores cinemáticos generados durante el vuelo (Triana, 2015), generalmente cuenta con:

- **Acelerómetro:** Es un sensor que mide la aceleración inercial que se genera sobre los planos X, Y, Z con respecto a la posición y orientación desarrollada en función de la fuerza de gravedad.
- **Giroscopio:** Es un sensor que mide la velocidad angular en función del grado de inclinación, generalmente viene en conjunto con el acelerómetro como se indica en la Figura 2.4.

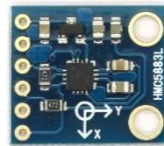
Figura 2.4: Sensor conjunto de acelerómetro y giroscopio



Fuente: (Naylamp)

- **Magnetómetro:** Es un sensor que mide la fuerza y dirección del campo magnético de la tierra, lo cual permite orientar hacia el norte el vehículo aéreo no tripulado durante su vuelo. En la Figura 2.5 se muestra la tarjeta electrónica que contiene el sensor.

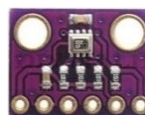
Figura 2.5: Magnetómetro



Fuente: (Electrónico)

- **Barómetro:** Es un sensor que mide la presión atmosférica a la que es sometida el vehículo aéreo no tripulado y en función de este valor permite obtener un estimado de la altitud a la que se encuentra. En la Figura 2.6 se muestra la tarjeta electrónica que contiene el sensor.

Figura 2.6: Barómetro



Fuente: (Inven)

La tarjeta controladora de vuelo a más de mantener la estabilidad del vehículo aéreo no tripulado, se encarga de procesar los datos que son enviados por el transmisor de radiofrecuencia y según la información contenida en el mensaje realiza una acción sobre el sistema.

### 2.1.2. Controlador de velocidad electrónico

Es una tarjeta electrónica de reducido tamaño mostrada en la Figura 2.7 compuesta por una unidad controladora de 8 bits o 32 bits que tiene un gestor de arranque precargado, la principal tarea es la de variar la velocidad de un motor eléctrico. El controlador recibe como entrada la señal Modulada por Ancho de Pulsos (PWM) desde la tarjeta controladora de vuelo y dependiendo de su ciclo útil de trabajo que puede variar de 1 a 2 milisegundos entrega mayor o menor potencia al motor (Robustos, 2014).

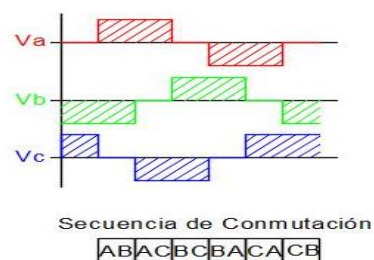
Figura 2.7: Controlador de velocidad electrónico



Fuente: (Liang)

El controlador o variador de velocidad electrónico está conformado por un inversor trifásico que convierte el voltaje continuo proveniente de la batería en 3 señales de voltaje alterno desfasadas  $120^\circ$  como se observa en la Figura 2.8, ajustando la frecuencia de estas señales según la longitud del ancho de pulso de la señal PWM.

Figura 2.8: Forma de onda trifásica a la salida del controlador de velocidad electrónico



Elaborado por: Álvaro Jaramillo

Existen controladores de velocidad para diferentes tipos de motores, se diferencian por el número de salidas que poseen. Utiliza 2 hilos para motores con escobillas y 3 hilos para motores sin escobillas, están clasificados en función de la corriente máxima que pueden tolerar.

### 2.1.3. Transmisor y Receptor de radiofrecuencia

Es un módulo de comunicación por radiofrecuencia que trabaja con una señal de portadora a 2.4 Ghz, compuesto por un transmisor y un receptor. El transmisor genera una señal modulada en función del movimiento de un interruptor, pulsador, perilla o palanca situados en el mando como se muestra en la Figura 2.9, mientras tanto el receptor esta calibrado de tal forma que recibe los datos sobre dicha frecuencia (FPV, 2018).

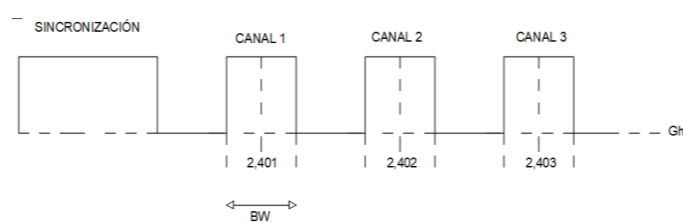
Figura 2.9: Transmisor de radiofrecuencia



Fuente: (Droneymas)

El número de canales asociados al transmisor depende de la cantidad de elementos a controlar, el ancho de banda de cada uno de los canales es de 1 Mhz como se muestra en la Figura 2.10.

Figura 2.10: Distribución de canales

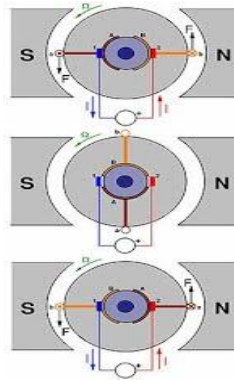


Elaborado por: Álvaro Jaramillo

#### 2.1.4. Motores de corriente continua

El motor de corriente continua es una máquina que transforma la energía eléctrica en movimiento mecánico rotacional, al aplicar un voltaje diferencial entre sus bobinas se produce un campo magnético que atrae o repele a los polos ubicados sobre el estator generando un movimiento progresivo y continuo con cada cambio de polaridad (Naranjo) como se muestra en la Figura 2.11.

Figura 2.11: Motor de corriente continua



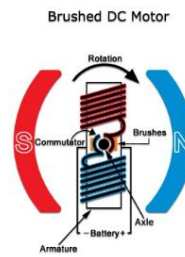
Fuente: (Quadrino)

Los motores de corriente continua se clasifican por su estructura en:

##### a) Motor con escobillas

Es un motor de corriente continua que se compone de un rotor, estator, colector y escobillas. El rotor contiene bobinas de cobre envueltas sobre un núcleo de hierro, las mismas que están conectadas directamente al conmutador. El conmutador es una estructura cilíndrica que tiene segmentos de contacto metálico sobre el cual se colocan las escobillas flexibles generalmente haciendo presión con resortes, el estator contiene imanes permanentes y cubre en su totalidad el rotor. Al energizar el motor se lo realiza directamente sobre los terminales de las escobillas, generando un campo magnético que será atraído o repelido por los polos de los imanes permanentes provocando un movimiento constante debido a la conmutación de la polaridad durante el giro (CLR), como se muestra en la Figura 2.12.

Figura 2.12: Motor de corriente continua con escobillas



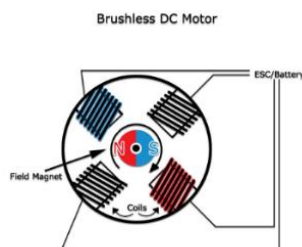
Fuente: (Midronedecarreras, 2017)

La principal desventaja de este tipo de motores es el desgaste que sufren las escobillas, debido al acople mecánico que posee no es capaz de desarrollar altas velocidades lo cual influye en el rendimiento. Requieren de un mantenimiento constante y por limitaciones en su estructura de conmutación no es posible reducir su tamaño.

#### b) Motor sin escobillas

Son motores de corriente alterna de reducido tamaño que no utilizan escobillas para energizar las bobinas con lo cual se reduce la fricción, el estator contiene las bobinas que son energizadas y siguen a los campos magnéticos generados por los imanes de neodimio que se encuentran en el rotor (CLR) como se muestra en la Figura 2.13.

Figura 2.13: Motor de corriente continua sin escobillas



Fuente: (Midronedecarreras, 2017)

Las principales ventajas de este tipo de motores son las de tener una mayor relación de torque - velocidad, mejor rendimiento y aumento de la eficiencia. Las desventajas son el costo de construcción y la necesidad de un sistema de control electrónico para su funcionamiento.



Generalmente, los motores utilizados con vehículos aéreos no tripulados son del tipo trifásico sin escobillas como se muestra en la Figura 2.14, requieren de un controlador de velocidad electrónico para generar la sincronización. El diseño de estos motores está clasificado según la cantidad de revoluciones por minuto que desarrolla al aplicarse un voltio (Kv), a medida que este factor aumenta la velocidad del motor también lo hace.

Figura 2.14: Motor trifásico sin escobillas



Fuente: (Robomart)

### 2.1.5. Hélice

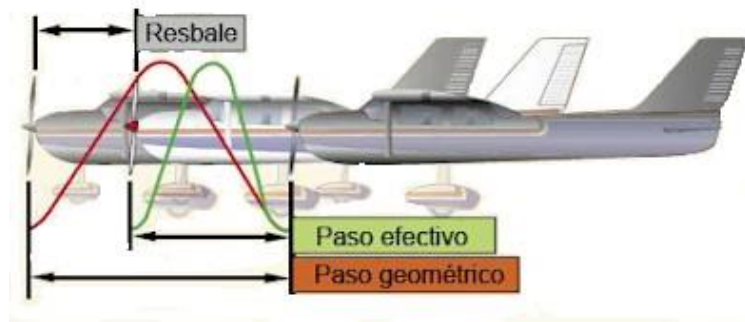
Es una estructura constituida por un determinado número de aspas que giran alrededor de un eje fijo y generan un empuje de aire, es fabricada con materiales resistentes y ligeros generalmente de plástico o fibra de carbono. Las aspas están diseñadas con perfiles aerodinámicos que permiten desarrollar una mayor fuerza propulsora gracias al movimiento rotacional obtenido por el acople con el motor. Las helices se clasifican según su ángulo de ataque y diámetro (FPV, 2017). La numeración 1045 indica que su diámetro mide 10 pulgadas y que su ángulo de avance mide 4,5 grados.

La distancia que la hélice recorre en una vuelta se divide en:

- Paso geométrico es la distancia teórica que recorre la hélice en una revolución.
- Paso efectivo es la distancia real que recorre la hélice debido a que el aire no es un fluido ideal y la hélice tiende a resbalarse.

En la Figura 2.15 se indica el desplazamiento que genera una hélice sobre el aire.

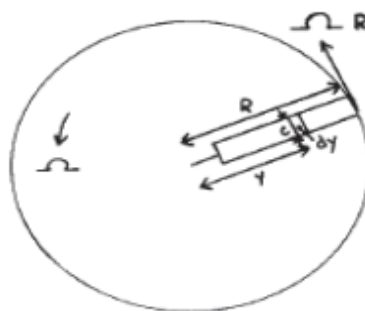
Figura 2.15: Desplazamiento de la hélice



Fuente: (Aerocomando)

La teoría del elemento de la cuchilla es la aplicación del proceso estándar de la teoría de perfil aerodinámico, se asume a la hélice como un cuerpo rígido debido a que en la rotación normal la fuerza centrífuga hacia el exterior es la mayor fuerza que actúa sobre una hoja. La Figura 2.16 muestra la vista superior del disco de rotor. La rotación de la cuchilla gira en sentido antihorario con velocidad angular  $\Omega$ , el radio de la cuchilla es  $R$ , la velocidad en la punta por lo tanto es  $\Omega R$ , escrito alternativamente como  $V_t$ . Una sección de la hoja primaria se toma en radio  $y$ , siendo la longitud de la cuerda  $c$  y  $dy$  el ancho de la envergadura (Javier Orna, 2015).

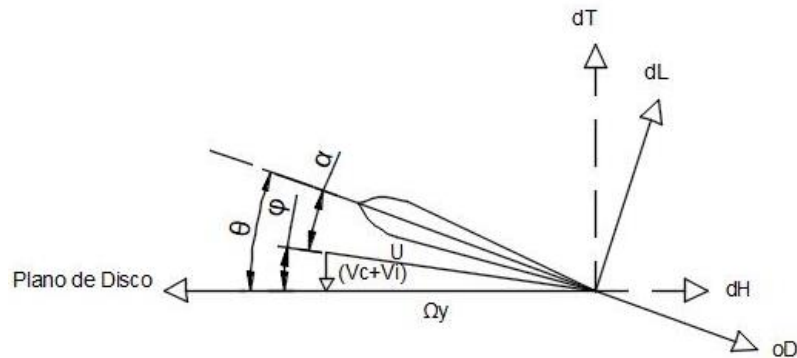
Figura 2.16: Vista superior del disco de rotor



Fuente: (Javier Orna, 2015)

Las fuerzas sobre la sección de la hélice se muestran en la Figura 2.17 el flujo visto por la sección tiene componentes de velocidad  $\Omega y$  en el plano del disco ( $v_i + V_c$ ) y es perpendicular a la misma (Javier Orna, 2015). La resultante de esto es:

Figura 2.17: Condiciones de flujo de sección de h en vuelo vertical



Elaborado por: Álvaro Jaramillo

El ángulo de las hélices, determinado por la configuración del control colectivo del piloto es  $\theta$ . El ángulo entre la dirección de flujo y el plano de rotación, conocido como ángulo de entrada  $\phi$  (Javier Orna, 2015), está dado por:

$$\phi = \tan^{-1}[(Vc + Vi)/\Omega y] \quad \text{Ec. (2.1)}$$

O para ángulos pequeños, se puede asumir,

$$\phi = [(Vc + Vi)/\Omega y] \quad \text{Ec. (2.2)}$$

El ángulo de incidencia de la sección de la hélice, denotado por  $\alpha$  es:

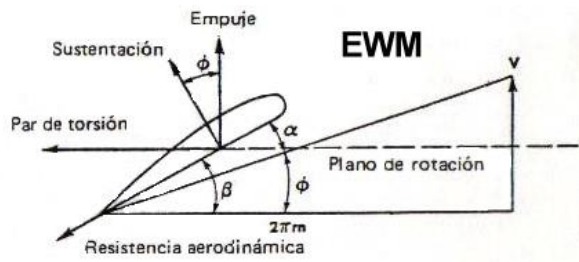
$$\alpha = \phi - \theta \quad \text{Ec. (2.3)}$$

Las fuerzas de sustentación y resistencia primaria se muestran en la Figura 2.18 y son:

$$dL = \frac{1}{2} \rho U^2 c dy C_L \quad \text{Ec. (2.4)}$$

$$dD = \frac{1}{2} \rho U^2 c dy C_D \quad \text{Ec. (2.5)}$$

Figura 2.18: Fuerzas aerodinámicas que se generan sobre la hélice



Fuente: (Alasewm)

### 2.1.6. Batería de Litio y polímero

Es un acumulador de energía de tipo recargable, consiste básicamente en una celda electroquímica que dispone de dos electrodos, uno positivo conocido como ánodo y otro negativo conocido como cátodo. Sus principales características son las de poseer una tasa de descarga elevada, gran capacidad de almacenamiento y peso ligero (Robotics).

Las baterías LIPO se pueden clasificar según los siguientes parámetros:

- La cantidad de celdas conectadas en serie mediante la designación numérica antepuesta a la letra “S”, cada celda contiene un voltaje de 3,7 vdc.
- La capacidad de carga en miliamperios que puede mantener por un periodo determinado de una hora.

La tasa de descarga determina la rapidez con la que la batería pierde su carga y es representado por la letra “C”. En la Figura 2.16 se muestra una batería LIPO

Figura 2.19: Batería de Litio y polímero

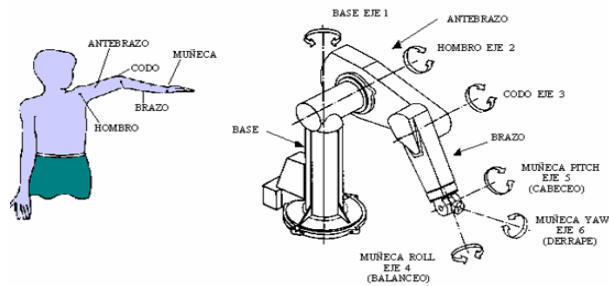


Fuente: (Center)

## 2.2. Robot manipulador

Es un robot multifuncional diseñado y construido para realizar una amplia variedad de tareas y aplicaciones, entre ellas mover partes, materiales o herramientas a través de movimientos programados (Reyes, 2016), son conocidos como brazos robots por analogía con el brazo humano como se muestra en la Figura 2.20.

Figura 2.20: Similitud de robot manipulador con brazo humano



Fuente: (Reyes, 2016)

### 2.2.1. Estructura del robot manipulador

Las partes principales de las que está constituido son:

- Articulaciones: Son la juntura formada por un servomotor que permite el movimiento lineal o rotacional controlado de los eslabones.
- Eslabones: Son las estructuras solidas que van sujetas a las articulaciones.
- Actuadores: Son elementos finales de control, pueden ser del tipo eléctrico, neumático, hidráulico. Dentro de la robótica los servomotores generan el torque necesario para producir movimiento de cada articulación del brazo.

## 2.3. Tarjeta electrónica de desarrollo

Es un módulo electrónico programable que generalmente dispone de microcontroladores, memorias, puertos de entrada y puertos de salida. Permite la implementación de proyectos en cualquier área de ingeniería, ya sea para control o supervisión de procesos desde los más simples hasta los más complejos. Según los requerimientos previstos se dispone de múltiples plataformas de hardware y software libre, cada una de las cuales maneja diferentes arquitecturas y características. La principal ventaja de un módulo electrónico de software y hardware libre es la de permitir la compatibilidad entre diferentes tecnologías sin importar su casa fabricante, protocolos, o arquitectura (Hacedores, 2014).

## CAPÍTULO 3

### DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

En el presente capítulo se detalla el diseño e implementación de la arquitectura física y lógica que comprende el sistema híbrido. Se describen los cálculos para determinar las dimensiones requeridas en la construcción del robot manipulador, los elementos para desarrollar el empuje del cuadricóptero y así también una breve descripción de los módulos utilizados para la comunicación y control en el sistema.

#### 3.1. Cuadricóptero

##### 3.1.1. Estructura del vehículo aéreo no tripulado

Existen múltiples estructuras disponibles para los vehículos aéreos no tripulados, entre las más populares existen: tricópteros, cuadricópteros, hexacópteros y octocópteros. En la Tabla 3.1 se presenta un listado de características que son determinantes al momento de elegir una estructura de vuelo, a cada una de las cuales se le asigna una ponderación en función de su autonomía de vuelo, agilidad, estabilidad, empuje, tamaño y costo.

Tabla 3.1: Características entre diferentes estructuras de vehículos aéreos no tripulados

<b>Estructura</b>	<b>Autonomía</b>	<b>Agilidad</b>	<b>Estabilidad</b>	<b>Empuje</b>	<b>Tamaño</b>	<b>Costo</b>
Tricópteros	Alta	Alta	Baja	Baja	Baja	Baja
Cuadricóptero	Media	Media	Normal	Normal	Normal	Normal
Hexacópteros	Normal	Normal	Media	Media	Media	Media
Octocópteros	Baja	Baja	Alta	Alta	Alta	Alta

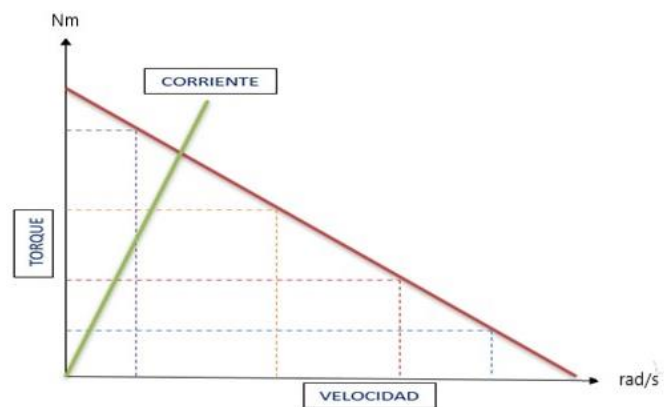
Elaborado por: Álvaro Jaramillo

Al analizar de cada estructura en función de los parámetros más significativos como son el costo, tamaño y autonomía. Se determinó que el cuadricóptero se ajusta a los requerimientos para la implementación del sistema híbrido, a más de ser la estructura con mayor uso para prototipos de vehículos aéreos no tripulados su precio significativamente es menor ya que solo utiliza 4 motores para mantener el vuelo, su tamaño lo adecua para desplazarse sin dificultad por espacios reducidos y por consecuencia a las características antes mencionadas puede mantener su autonomía sin la necesidad de aumentar el número de baterías.

### 3.1.2. Torque y velocidad de motor sin escobillas

Los motores recomendados para el uso de vehículos aéreos no tripulados están clasificados según la relación de revoluciones por minuto desarrollado por voltio aplicado. Con el fin de obtener un empuje adecuado para el desplazamiento del cuadricóptero se requirió que los motores sean capaces de levantar un peso equivalente de 2,0 kg, lo cual significó una generación de torque elevado en comparación a la velocidad. En la Figura 3.1 se muestra la relación torque-velocidad determinada a los motores.

Figura 3.1: Relación de Torque-Velocidad en motores sin escobillas



Elaborado por: Álvaro Jaramillo

Las revoluciones por minuto que produce cada motor en función del voltaje de batería y la constante KV se obtuvo a partir de la Ecuación (3.1).

$$v_{RPM} = V_{Bateria} * K_V \quad \text{Ec. (3.1)}$$

$$v_{RPM} = 11.1 V * 920 KV$$

$$v_{RPM} = 10212 rpm$$

En la Tabla 3.2 se indican las revoluciones por minuto generadas por diferentes motores sin escobillas según el valor de KV que se encuentran comercialmente utilizados en los vehículos aéreos no tripulados.

Tabla 3.2: Revoluciones por minuto en los motores comerciales

KV (constante)	Voltaje	Revoluciones por Minuto
800	11.1	8880
880	11.1	9768
920	11.1	10212
1000	11.1	11100
1300	11.1	14430
1500	11.1	16650
2300	11.1	25530

Elaborado por: Álvaro Jaramillo

Basado en los cálculos realizados y en función de la estructura del cuadricóptero se determinó que los motores con un bajo valor de KV permitirán al sistema híbrido desarrollar un torque superior en comparación con la velocidad, logrando el empuje necesario para levantar los 2.0 kg.

### 3.1.3. Consumo de Potencia de motor sin escobillas

Debido a que toda la energía que la hélice desarrolla es transmitida directamente por el motor. Se pudo obtener la potencia eléctrica que consumen conjuntamente según la Ecuación (3.2), en donde  $K$  es la constante aerodinámica de la hélice,  $R$  es el número de revoluciones por minuto que genera el motor,  $D$  es el diámetro de la hélice y  $P$  es el ángulo de avance de la hélice.

$$W = K * R^3 * D^4 * P \quad \text{Ec. (3.2)}$$

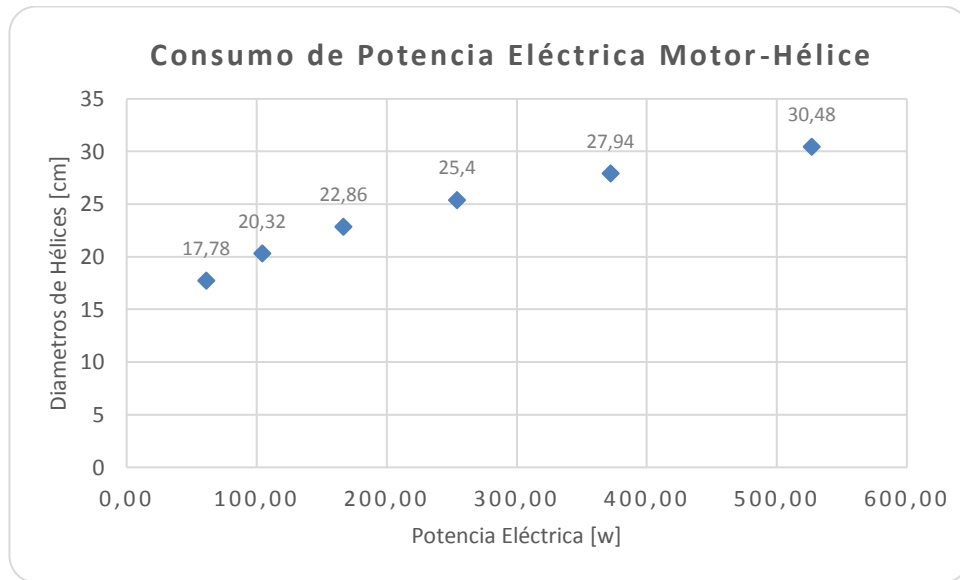
$$W = 5,3 * 10^{-15} * 10212^3 * 11^4 * 4,5$$

$$W = 371,87 \text{ W}$$

En la Figura 3.2 se muestra el incremento de energía que demanda el conjunto motor-hélice al utilizar aspas de mayor diámetro, estos datos permitirán dimensionar los elementos controladores de potencia que influyen directamente en el empuje que genera el cuadricóptero durante el vuelo.



Figura 3.2: Consumo de Potencia Eléctrica en función del diámetro de las hélices



Elaborado por: Álvaro Jaramillo

Con el fin de mantener parámetros aceptables en el consumo de potencia, se realizaron pruebas con hélices de 25,4 y 27,94 centímetros de diámetro, se obtuvo una respuesta significativa en el sistema al incrementar el tamaño de las aspas mientras que la autonomía de las baterías disminuyó a casi la mitad del período normal de funcionamiento.

### 3.1.4. Dimensionamiento del controlador electrónico de velocidad

El controlador electrónico de velocidad se dimensiona por la máxima intensidad de corriente eléctrica que puede proveer, donde el conjunto motor-hélice es quien absorbe dicha energía y según los parámetros antes calculados de potencia consumida se obtuvo un valor estimado en la Ecuación (3.3).

$$I = \frac{P}{V} = \frac{371,87 \text{ W}}{11,1 \text{ V}} \quad \text{Ec. (3.3)}$$

$$I = 33,50 \text{ A}$$

El controlador de velocidad debe ser capaz de tolerar corrientes de 33,50 amperios, comercialmente se cuenta con elementos de capacidades en números enteros y en múltiplos de 10. En la implementación se cuenta con un variador de 30 amperios para cumplir con los requerimientos de potencia eléctrica.

Se pudo calcular el valor estimado de la corriente de descarga que la batería entrega en el lapso de una hora, según la Ecuación (3.4).

$$I_{descarga} = 25C * 6000mAh \quad \text{Ec. (3.4)}$$

$$I_{descarga} = 150000mAh = 150Ah$$

La corriente que entrega la batería es consumida por todos los elementos eléctricos y electrónicos conectados a ella, siendo los motores los dispositivos que más potencia demandan, mediante la Ecuación (3.5) se determinó el valor de corriente que individualmente circula en ellos.

$$I_{descarga-motor} = \frac{I_{descarga}}{4} = \frac{150A}{4} = 37,5A \quad \text{Ec. (3.5)}$$

La autonomía de vuelo del cuadricóptero está determinada por la Ecuación (3.6), tomando en cuenta la capacidad de la batería y la corriente que demanda el sistema. En el cálculo realizado no se toma en cuenta el desgaste que la batería LIPO posee en función de su tiempo de vida útil, por lo que el valor obtenido es una estimación.

$$t = \frac{3,6(6000mAh)}{60 \text{ min}(4*33,50A+5A)} = 2,60 \text{ min} \quad \text{Ec. (3.6)}$$

### 3.1.5. Empuje de hélices

Las hélices son los elementos que conjuntamente con los motores producen el empuje de aire requerido para la elevación del cuadricóptero, son elaboradas con materiales flexibles como el plástico y rígidos como la fibra de carbono. Cuando el material es flexible la hélice empieza a oscilar y eso provoca un desbalance durante el vuelo, mientras que con materiales rígidos la hélice mejora su dinámica en altas velocidades produciendo un empuje adecuado y por lo tanto la estabilidad del cuadricóptero aumenta. En la Figura 3.3 se muestra el factor de arrastre y oscilación que se produce en los puntos laterales a las aspas con respecto al eje de rotación de la hélice.

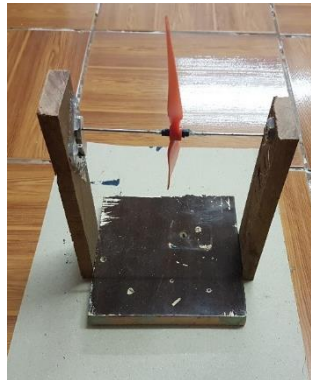
Figura 3.3: Fuerzas que actúan sobre las hélices en movimiento



Fuente: (Flight-mechanic)

El diámetro y el material de la hélice son factores que influyen en el empuje que desarrolla el cuadricóptero durante el vuelo. En ciertos casos es necesario compensar el desbalance físico que poseen las hélices y por lo tanto se recurre a equilibrarlo al añadirle pequeñas masas sobre las aspas, en este caso se utilizan trozos de cinta adhesiva. El soporte necesario para realizar esta calibración no debe generar rozamiento en el eje de giro, por esta razón se utilizó un sistema de imanes que permiten la libre movilidad de la hélice como se muestra en el soporte de la Figura 3.4

Figura 3.4: Soporte para balancear las hélices



Elaborado por: Álvaro Jaramillo y Diego Salazar

En la práctica se determinó el empuje del motor conjuntamente con la hélice midiendo el peso que genera sobre una balanza digital, es un método rudimentario ya que se desprecia el rozamiento de las estructuras. En la Figura 3.5 se muestra el soporte implementado para medir el empuje desarrollado por uno de los conjuntos motor-hélice.

Figura 3.5: Estructura para medir el empuje



Elaborado por: Álvaro Jaramillo y Diego Salazar

En la Figura 3.5 se observa el resultado de dicha prueba, donde se obtuvo un empuje de 392,5 gramos cuando el valor de la señal PWM a 50 Hz fue de 95% en ciclo de trabajo, siendo la máxima velocidad alcanzada. Tomando en cuenta que el cuadricóptero está conformado por 4 conjuntos de motor-hélice, se calculó el empuje neto del sistema mediante la Ecuación (3.7).

$$\text{Empuje Netopráctico} = 392,5 * 4 \quad \text{Ec. (3.7)}$$

$$\text{Empuje Netopráctico} = 1570 \text{ g}$$

Analíticamente a partir de la Ecuación (3.8) se calculó el valor de empuje desarrollado por el conjunto motor-hélice, donde R es las revoluciones por minuto del motor, P es el ángulo de ataque de la hélice, D es el diámetro de la hélice y Vo es la velocidad lineal del cuadricóptero.

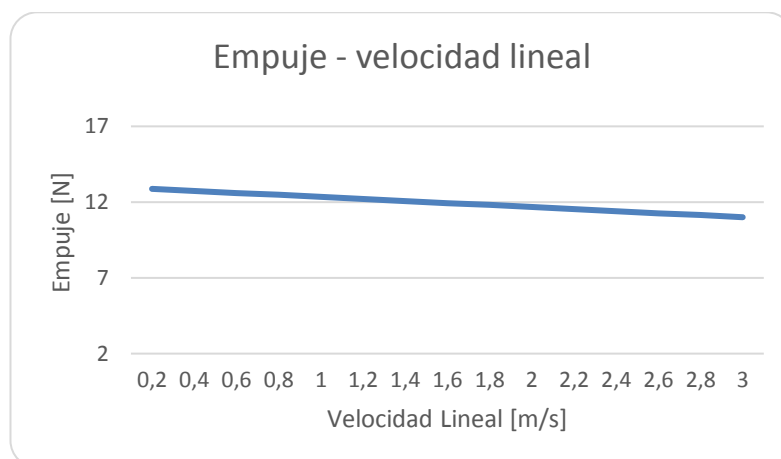
$$F = 4,392399 * 10^{-8} * R * \frac{D^{3.5}}{\sqrt{P}} * (4,23333 * 10^{-4} * R * P - V_o) \quad \text{Ec. (3.8)}$$

$$F = 4,392399 * 10^{-8} * 10212 * \frac{11^{3.5}}{\sqrt{4,5}} * (4,23333 * 10^{-4} * 10212 * 4,5 - 1)$$

$$F = 17,22 \text{ N}$$

Para efecto de un cálculo sencillo se asumió que la velocidad lineal del cuadricóptero es de 1 m/s. En la Figura 3.6 se muestra la variación del empuje con respecto a variaciones en Vo.

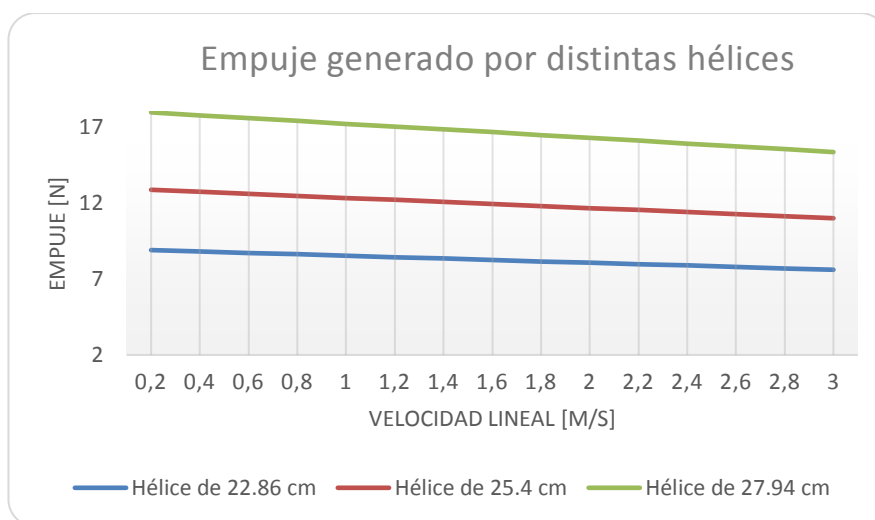
Figura 3.6: Empuje respecto a la velocidad lineal



Elaborado por: Álvaro Jaramillo

Conforme la velocidad lineal del cuadricóptero aumenta el empuje tiende a disminuir, cabe mencionar que el sistema híbrido a implementarse no tiene como fin alcanzar grandes velocidades. El diseño aerodinámico de la hélice es un factor presente en el empuje neto del sistema, en la Figura 3.7 se muestra la variación que se produce al intercambiar las hélices con diferentes diámetros.

Figura 3.7: Variación de empuje con respecto al diámetro de la hélice



Elaborado por: Álvaro Jaramillo

El empuje de aire que realiza la hélice repercute directamente sobre el consumo de la potencia eléctrica que necesita el motor para girar, siendo necesario elegir un valor intermedio con el fin de extender la autonomía de vuelo del sistema.

### 3.1.6. Selección de Tarjeta controladora de vuelo

En el mercado existen varias marcas de tarjetas electrónicas que sirven como controladora de vuelo para vehículos aéreos no tripulados, entre las cuales se menciona las más comerciales: Naze32, Pixhawk, Ardupilot, Omnibus, CC3D, CC3D revolution, etc. En la Tabla 3.3 se muestra las características detalladas de cada una de las tarjetas disponibles en el mercado.

Tabla 3.3: Tarjetas controladoras de vuelo comerciales

Controladora	Naze 32	Pixhawk	Ardupilot	Omnibus	CC3D Revolution
Procesador	STM32F103	STM32F427	ATmega2560	STM32F405	STM32F4
Canales ADC	0	2	16	0	3
Canales DAC	0	0	0	0	2
Comunicación USB/I2C/UART	Si	Si	Si	Si	Si
PWM	6	14	8	6	11
PPM	1	1	1	1	2
Modem / Telemetría	No	No	No	No	Si
Giroscopio	Si	Si	Si	Si	Si
Acelerómetro	Si	Si	Si	Si	Si
Magnetómetro	Si	Si	Si	Si	Si
Barómetro	Si	SI	No	No	Si

Elaborado por: Álvaro Jaramillo

La marca a elegir para el presente proyecto es la CC3D Revolution ya que cuenta con altas prestaciones de hardware, permite una configuración de software libre y su costo en promedio es accesible. Una de las principales características de esta tarjeta controladora de vuelo es la de poseer un módulo de comunicación inalámbrica incorporado para un canal de telemetría, el cual permite monitorear desde el computador el estado del cuadricóptero durante el vuelo.

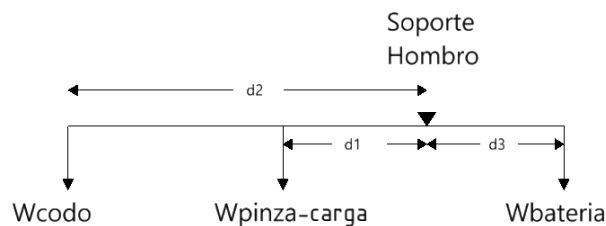
### 3.2. Robot manipulador de 3 grados de libertad

En el presente proyecto la estabilidad del sistema es algo crítico ya que no comprende una dinámica fija, sino más bien una dinámica variante que depende de dos estructuras complementarias e independientes. El diseño fundamental del robot manipulador se

basa en el análisis de un sistema de fuerzas en equilibrio que busca compensar el desbalance generado por el movimiento de las articulaciones.

En la Figura 3.8 se muestra el diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que actúan entorno al punto de equilibrio situado en la base del brazo para el manipulador recogido, despreciando el peso de los eslabones se tiene que la batería realiza un torque positivo mientras que el peso del codo y del conjunto pinza-carga producen un torque negativo. La Ecuación (3.9) denota el sistema de torques en equilibrio, luego de lo cual se expande.

Figura 3.8: Diagrama de cuerpo libre de los torques del manipulador recogido



Elaborado por: Álvaro Jaramillo y Diego Salazar

$$\sum \tau = 0 \quad \text{Ec. (3.9)}$$

$$\tau_{bateria} - \tau_{pinza-carga} - \tau_{codo} = 0$$

$$W_{bateria} * g * d3 - W_{pinza-carga} * g * d1 - W_{codo} * g * d2 = 0$$

$$W_{bateria} * d3 = W_{pinza-carga} * d1 + W_{codo} * d2$$

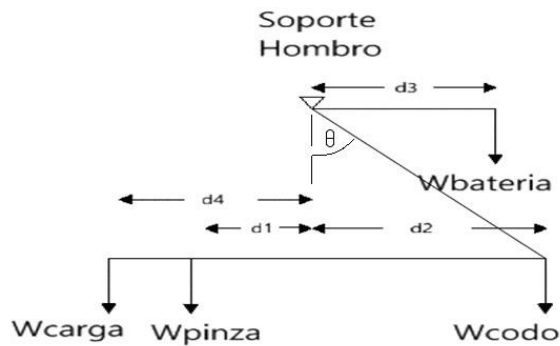
$$460 * 0,04 = (54,6 + 20) * 0,14 + 40 * 0,24$$

$$\Delta\tau = -1,644 \text{ Nm}$$

El peso de la batería es el elemento que permite balancear el sistema mientras el manipulador se mueve, los cálculos demuestran que el centro de gravedad de la batería debe estar próximo al punto de equilibrio denotado por el soporte de hombro. El servomotor ubicado en este punto es el que más torque va a realizar, ya que debe levantar todo el peso que contiene el resto de articulaciones y eslabones del brazo en conjunto. Con el fin de disminuir el desgaste de energía que consumen los motores para mantener el torque durante los períodos de inactividad se incluyó un sistema de soporte fijo para sostener todo el peso que genera desbalance.

En la Figura 3.9 se muestra el diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que actúan entorno al punto de equilibrio situado en la base del brazo para el manipulador extendido, de igual forma se plantea la ecuación expandida de equilibrio donde se tiene unas observaciones entorno al movimiento.

Figura 3. 9: Diagrama de cuerpo libre de los torques del manipulador desplegado



Elaborado por: Álvaro Jaramillo y Diego Salazar.

$$W_{bateria} * g * d3 - W_{pinza} * g * d1 - W_{codo} * g * d2 - W_{carga} * g * d4 = 0$$

$$W_{bateria} * d3 - W_{pinza} * d1 - W_{codo} * d2 - W_{carga} * d4 = 0$$

$$460 * 0,04 - 54,6 * (d2 + 0,10) - 40 * 0,24 * \text{sen}(\theta) - 20 * (d2 + d1 + 0,08) = 0$$

Donde  $\theta$  es el ángulo que se forma entre el eje de referencia vertical y el eslabón del brazo, puede tomar un límite de valores para compensar el desequilibrio generado por el torque de cada vector, en giro positivo o negativo. Analíticamente el ángulo del brazo y el codo van a determinar la fuerza con la que el sistema pierde el balance, por ejemplo, cuando  $\theta = 38^\circ$  y el codo se mantiene horizontal  $\Delta\tau = -4,64 \text{ Nm}$ , mientras que para un valor de  $\theta = 90^\circ$  y el codo extendido, se tiene un brazo completamente desplegado, obteniéndose un cálculo de torque aproximado de  $\Delta\tau = -13,96 \text{ Nm}$ .

El sistema de compensación generado por el control de estabilización define la respuesta del cuadricóptero, así también el empuje que puedan desarrollar los motores en función de la autonomía de las baterías y el arrastre de las hélices. Se detalla en la Tabla 3.4 el listado de las piezas que conforman el cuadricóptero con sus respectivas masas.



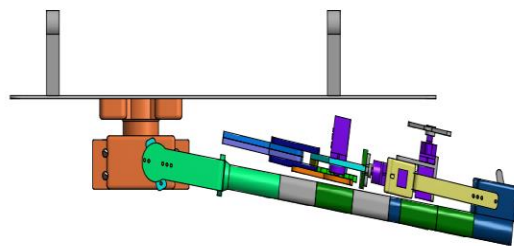
Tabla 3.4: Listado de elementos y peso neto del cuadricóptero

Elemento	Cantidad	Masa (gramos)	Masa Total (gramos)
Estructura	1	400	400
Batería	1	456	456
Motores + Hélices	4	78	312
Tarjetas / Módulos Electrónicos	7	-	150
Sensores Ultrasónicos	4	11	44
Pinza	1	67,1	67,1
Eslabones brazo	6	5,4	27
Soporte codo + Servomotor	1	45,2	45,2
Soporte hombro + Servomotor	1	156,8	156,8
Tubos Brazo	2	14	28
			<b>1687,1</b>

Elaborado por: Álvaro Jaramillo y Diego Salazar

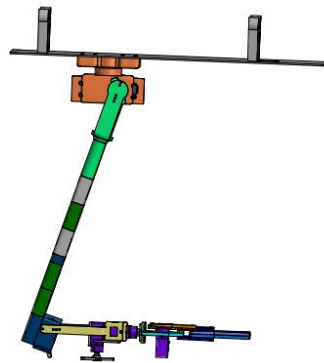
El diseño fue desarrollado en entorno Autodesk inventor con el fin de obtener de una manera más sencilla los archivos para la impresión 3D, el material con el que están fabricados las partes del manipulador influye sobre los pesos netos que generan alteraciones en la dinámica del movimiento, lo cual no está contemplado en los cálculos de diseño. En la Figura 3.10, Figura 3.11 y Figura 3.12 se muestra el diseño final del manipulador incorporado de 3 grados de libertad.

Figura 3.10: Vista lateral del robot manipulador de 3 grados de libertad recogido



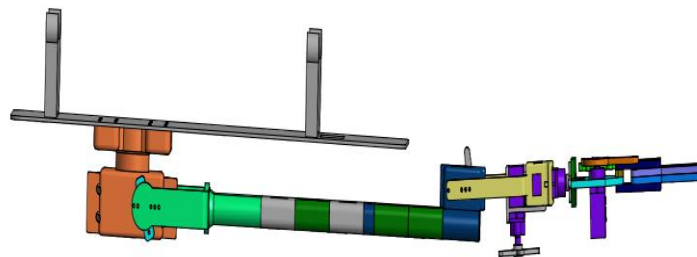
Elaborado por: Diego Salazar

Figura 3.11: Vista lateral del robot manipulador de 3 grados de libertad desplegado



Elaborado por: Diego Salazar

Figura 3.12: Vista lateral del robot manipulador de 3 grados de libertad extendido



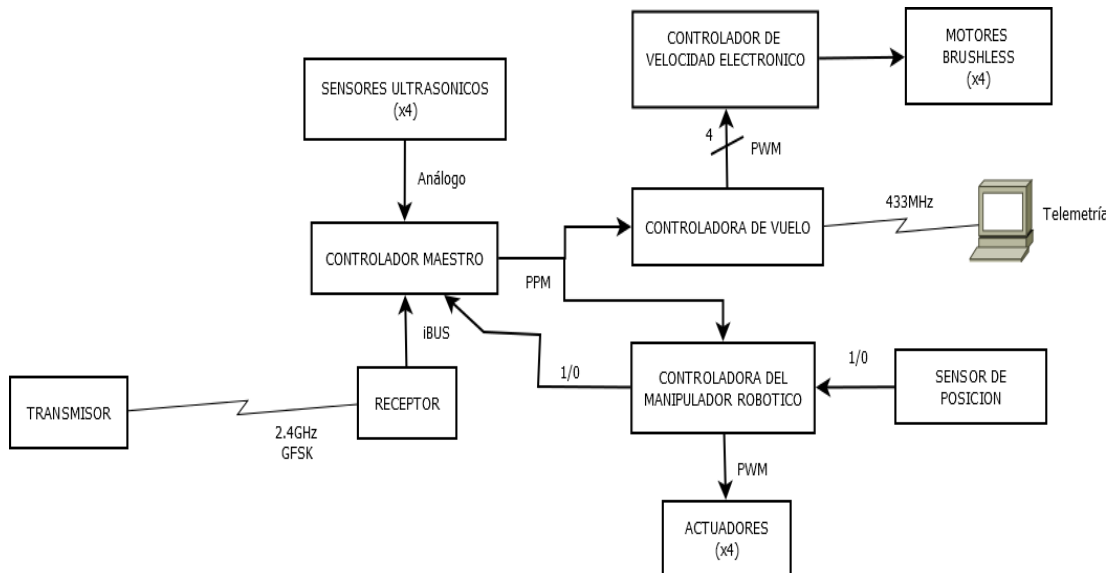
Elaborado por: Diego Salazar

El robot manipulador está constituido por 3 articulaciones y un elemento terminal en pinza, la primera articulación es del tipo rotacional dispuesto como una base fija de hombro que soporta todo el peso del brazo y es quien realiza el mayor torque, la segunda articulación también es del tipo rotacional semejante a un codo y es quien soporta el peso del conjunto pinza-carga, la última articulación comprende el elemento de sujeción y su movimiento es similar a la muñeca de la mano.

### 3.3. Diseño y construcción de hardware.

Para el diseño y fabricación del circuito que contendrá los microcontroladores que usará el dispositivo, se partirá por el diagrama de bloques, mostrado en la Figura 3.13 en el cual se puede observar la disposición necesaria para el funcionamiento requerido por el sistema robótico híbrido.

Figura 3.13: Diagrama de bloques del sistema de vuelo



Elaborado por: Diego Salazar

Se requiere que el transmisor envíe las señales de operación por medio de ondas de radiofrecuencia a 2.4 GHz, donde un receptor convertirá estas señales al protocolo iBus necesario para la conversión de 10 canales de los cuales se usarán 8 en el controlador principal. El controlador principal es el encargado de administrar los valores del iBus con la información de los 8 canales necesarios para la operación del cuadricóptero y del brazo robótico provenientes del receptor, además es el encargado de recibir las señales de los sensores ultrasónicos para evitar que el cuadricóptero se golpee con un obstáculo, las señales que salen del controlador principal serán convertidas a PPM (pulse-position modulation) para de este modo el controlador de vuelo y el controlador del manipulador robótico reciban las señales lo más pronto posible, la controladora de vuelo es la encargada de controlar las acciones del cuadricóptero por medio de señales PWM para de esta manera variar la velocidad de cada motor. La controladora del manipulador robótico es la encargada de manejar cada junta del brazo robótico; además es capaz de sensar si el brazo se encuentra en una posición inicial que permita el despegue y aterrizaje del cuadricóptero.

### 3.3.1 Selección del módulo electrónico de control.

El funcionamiento del sistema híbrido comprende el control dedicado para estabilización y vuelo del cuadricóptero mediante la tarjeta CC3D Revolution, un módulo de control para el robot manipulador de 3 grados de libertad y un controlador

de seguridad que verifica el estado de los sensores ultrasónicos de distancia. La plataforma electrónica de desarrollo a tomar en cuenta para los sistemas de control es Arduino ya que es una de las más comerciales, su precio es bajo y dispone de varios modelos que se adaptan a los requerimientos.

En la Tabla 3.5 se muestran las principales características de las 3 tarjetas más completas y compactas disponibles.

Tabla 3.5: Comparación de características técnicas de módulos Arduino

<b>ARDUINO</b>	<b>Mini Pro</b>	<b>Nano</b>	<b>Micro</b>
Microcontrolador	ATMega168	ATMega328	ATmega32U4
Velocidad	16 Mhz	16 Mhz	16 Mhz
RAM	2 kb	1 kb	2.5 kb
ROM	1 kb	512 b	1 kb
Comunicación Serial	1	1	1
Entradas/Salidas digitales	14	14	20
Entradas/Salidas analógicas	6	8	12
Salidas PWM	6	6	7
Voltaje	5 Vdc	5 Vdc	5 Vdc

Elaborado por: Álvaro Jaramillo

Se determinó que todas las tarjetas disponen de especificaciones técnicas similares, por lo que no habría diferencia alguna en el procesamiento y control. Sin embargo, el punto clave para el diseño de este proyecto radica en la optimización del espacio de tal forma se decidió utilizar el módulo de desarrollo Arduino Mini Pro.

### **3.3.2 Diseño y fabricación del circuito de potencia.**

La implementación del sistema híbrido dispone de múltiples elementos electrónicos que requieren para su funcionamiento una fuente de voltaje continuo a 5 Vdc capaz de suministrar altas cantidades de corriente. Dado que la batería suministra toda la energía que se necesita y tomando en cuenta que el valor de voltaje que entrega a la salida es de 11.1 Vdc fue necesaria la implementación de una fuente regulada mediante la utilización de circuitos integrados. Comercialmente se encuentran reguladores de voltaje fijo y variable, pero su funcionalidad radica en la cantidad de corriente eléctrica

que son capaces de suministrar a un circuito. En la Tabla 3.6 se detalla algunos de los circuitos integrados más comunes con sus principales características.

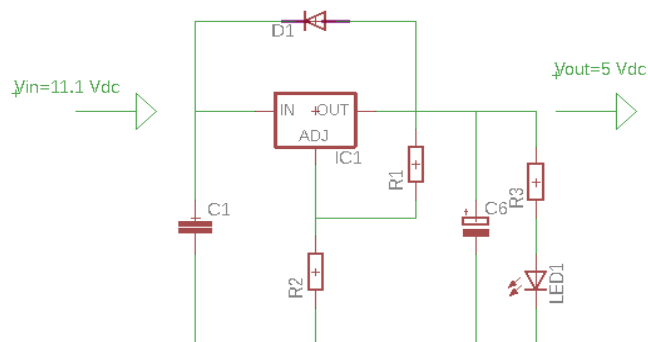
Tabla 3.6: Características de los reguladores de voltaje comerciales.

Integrado	Tipo	Voltaje de Salida	Corriente de Salida
LM7805	Fijo	5 Vdc	1 amperio
LM7806	Fijo	5 Vdc	1 amperio
LM317	Variable	1,2 a 37 Vdc	1,5 amperios
LM338	Variable	1,2 a 32 Vdc	5 amperios
LM350	Variable	1,2 a 35 Vdc	3 amperios

Elaborado por: Álvaro Jaramillo

Dado que los reguladores de voltaje variables se los puede configurar como fijos al colocar un divisor de tensión mediante resistencias en su pin de ajuste, fue factible diseñar el circuito que permita obtener un voltaje continuo a su salida así también se optó por un regulador capaz de manejar grandes cantidades de corriente ya que el robot manipulador contiene 5 servomotores que demandan gran cantidad de energía para mantener el torque. En la Figura 3.14 se muestra la configuración del regulador LM338 para obtener un voltaje continuo de 5 Vdc.

Figura 3.14: Configuración del Regulador de Voltaje LM338



Elaborado por: Álvaro Jaramillo

Dado que este regulador de voltaje es de tipo variable se parte de la Ecuación (3.10) obtenida de la hoja de características del fabricante, para calcular el valor de las resistencias que permitan obtener un valor determinado y fijo en la salida de 5 Vdc.

$$V_{out} = 1,25 \left( 1 + \frac{R2}{R1} \right) + I_{ajuste} R2 \quad \text{Ec. (3.10)}$$

De donde, se asume el valor de la resistencia fija  $R1=330$  ohmios e  $I_{ajuste} = 100\mu A$  (según la hoja del fabricante) mediante lo cual se obtiene el valor de la resistencia  $R2$ .

$$5 = 1,25 \left( 1 + \frac{R2}{330\Omega} \right) + (100 \times 10^{-6} A) R2$$

$$5 = 1,25 + 3,788 \times 10^{-3} R2 + 100 \times 10^{-6} R2$$

$$3,75 = 3,888 \times 10^{-3} R2$$

$$R2 = 964,51 \text{ ohmios}$$

Cuando  $R2=0$  el voltaje que se obtiene a la salida es de 1,25 Vdc por lo tanto, se puede calcular la potencia mínima que disipa  $R1$  según la Ecuación (3.11).

$$P_{R1} = \frac{V^2}{R1} = \frac{(1,25 V)^2}{330 \Omega} = 4,73 mW \quad \text{Ec. (3.11)}$$

Mientras que al aumentar  $R2=964,51$  ohmios se obtienen 5 Vdc de donde se calcula la potencia máxima que disipa cada una de las resistencias en dicha configuración.

$$P_{R1} = I^2 R1 = \left( \frac{5 V}{330\Omega + 964,51\Omega} \right)^2 * 330\Omega = 4,92 mW$$

$$P_{R2} = I^2 R2 = \left( \frac{5 V}{330\Omega + 964,51\Omega} \right)^2 * 964,51\Omega = 14,39 mW$$

Puesto que no existe una resistencia con ese valor, se la reemplaza por un tamaño comercial de 1 k $\Omega$ . Se calcula el voltaje de salida para comprobar la cercanía de los parámetros iniciales según la Ecuación (3.12).

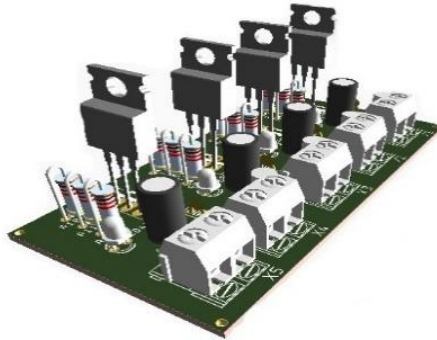
$$V_{out} = 1,25 \left( 1 + \frac{967\Omega}{325\Omega} \right) + (100 \times 10^{-6} A) (967\Omega) \quad \text{Ec. (3.12)}$$

$$V_{out} = 1,25(3,976) + 0,0967 = 5,07 V$$

La variación en el voltaje de salida no es significativa por causa de la resistencia de valor comercial. Debido a la gran cantidad de elementos electrónicos a utilizar entre

los cuales se mencionan servomotores, sensores ultrasónicos de distancia, y módulos Arduino fue necesario implementar 4 fuentes reguladoras de voltaje en la misma tarjeta de potencia a fin de distribuir las cargas en función de la potencia requerida. En la Figura 3.15 se muestra el diseño de la placa de circuito impreso modelado en Autodesk Eagle.

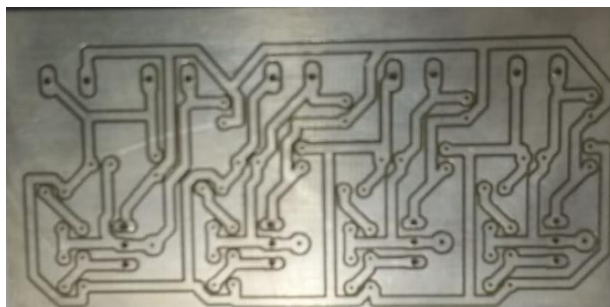
Figura 3.15: Modelado 3D del Circuito Impreso de Potencia



Elaborado por: Álvaro Jaramillo

La fabricación de la tarjeta electrónica se lo realizó mediante una máquina de control numérico computarizado (CNC), se obtuvo un labrado al detalle de las pistas y huecos de perforación para los distintos componentes como se muestra en la Figura 3.16

Figura 3.16: Ruteado de pistas y estañado



Elaborado por: Álvaro Jaramillo y Diego Salazar.

La implementación final de la tarjeta electrónica se muestra en la Figura 3.17 al colocar, soldar y verificar el funcionamiento de cada una de las fuentes reguladoras de voltaje.

Figura 3.17: Tarjeta Electrónica de Potencia



Elaborado por: Álvaro Jaramillo y Diego Salazar.

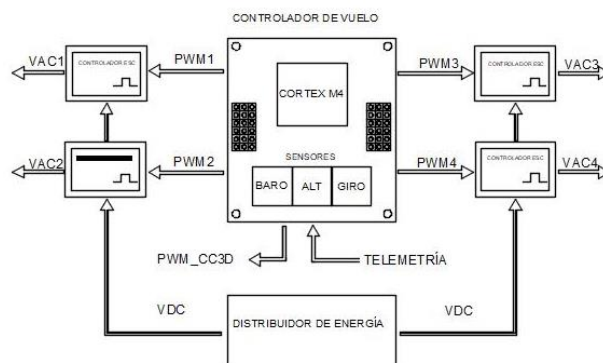
Cada una de las fuentes reguladoras contenidas en la tarjeta disponen de una luz indicadora que alerta la presencia de energía en los bornes, el voltaje que admite este módulo debe ser superior al valor que se obtiene a la salida. La distribución de elementos para cada uno de los integrados viene dada de la siguiente manera:

- Servomotor de Hombro.
- Servomotores de Codo y Muñeca.
- Servomotores de Pinza y Seguro.
- Tarjeta de Control (Arduinos) y Sensores ultrasónicos de distancia.

### 3.3.3 Operación de la tarjeta controladora de vuelo.

La tarjeta CC3D Revolution es la encargada de mantener la estabilidad del cuadricóptero durante el vuelo al controlar la velocidad de giro sobre los motores mediante una señal PWM entrante en el ESC (variadores de velocidad electrónicos), en la Figura 3.18 se muestra el diagrama de conexiones entre el módulo controlador de vuelo y sus periféricos.

Figura 3.18: Diagrama de Bloques del sistema de vuelo



Elaborado por: Álvaro Jaramillo

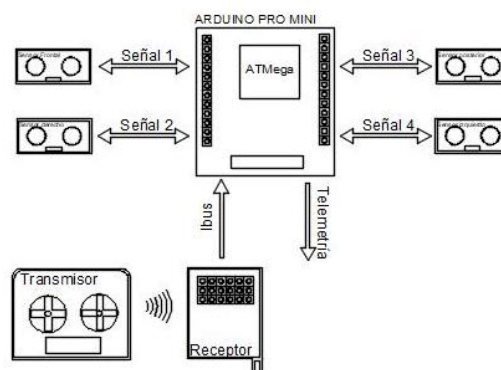


El sistema de mando del cuadricóptero es manual ya que requiere de un control inalámbrico para cumplir con las tareas de despegue, desplazamiento y aterrizaje por parte del operador. El sistema complementario que realiza la tarjeta controladora de vuelo de manera automática es la de estabilizar el vehículo durante la ejecución de dichas tareas. Esta controladora de vuelo recibe 3 señales para la navegación y una señal de potencia de motores del cuadricóptero, la señal de Roll o Alabeo para controlar los giros de rotación que generan movimientos que pueden ser derecha o izquierda, la señal de Pitch o Cabeceo que controla la rotación del cuadricóptero para generar movimientos hacia adelante y hacia atrás, la señal de Yaw o Guiñada para generar rotaciones sobre el vertical del cuadricóptero creando movimientos circulares sobre su propio eje, por último esta la señal de Throttle o aceleración que controla la velocidad de los motores en general.

### 3.3.4 Operación de la tarjeta controladora principal.

El microcontrolador principal es el encargado de recibir las señales del receptor y además cuenta con un sistema de asistencia anticollisiones, este módulo se encuentra conformado por micro Arduino Pro Mini, el cual procesa las señales del receptor, así como también recibe y procesa las señales de los 4 sensores ultrasónicos de distancia ubicados en cada uno de los frentes. En la Figura 3.19 se muestra la conexión entre el procesador y los periféricos de este sistema.

Figura 3.19: Diagrama de bloques del sistema anticollision

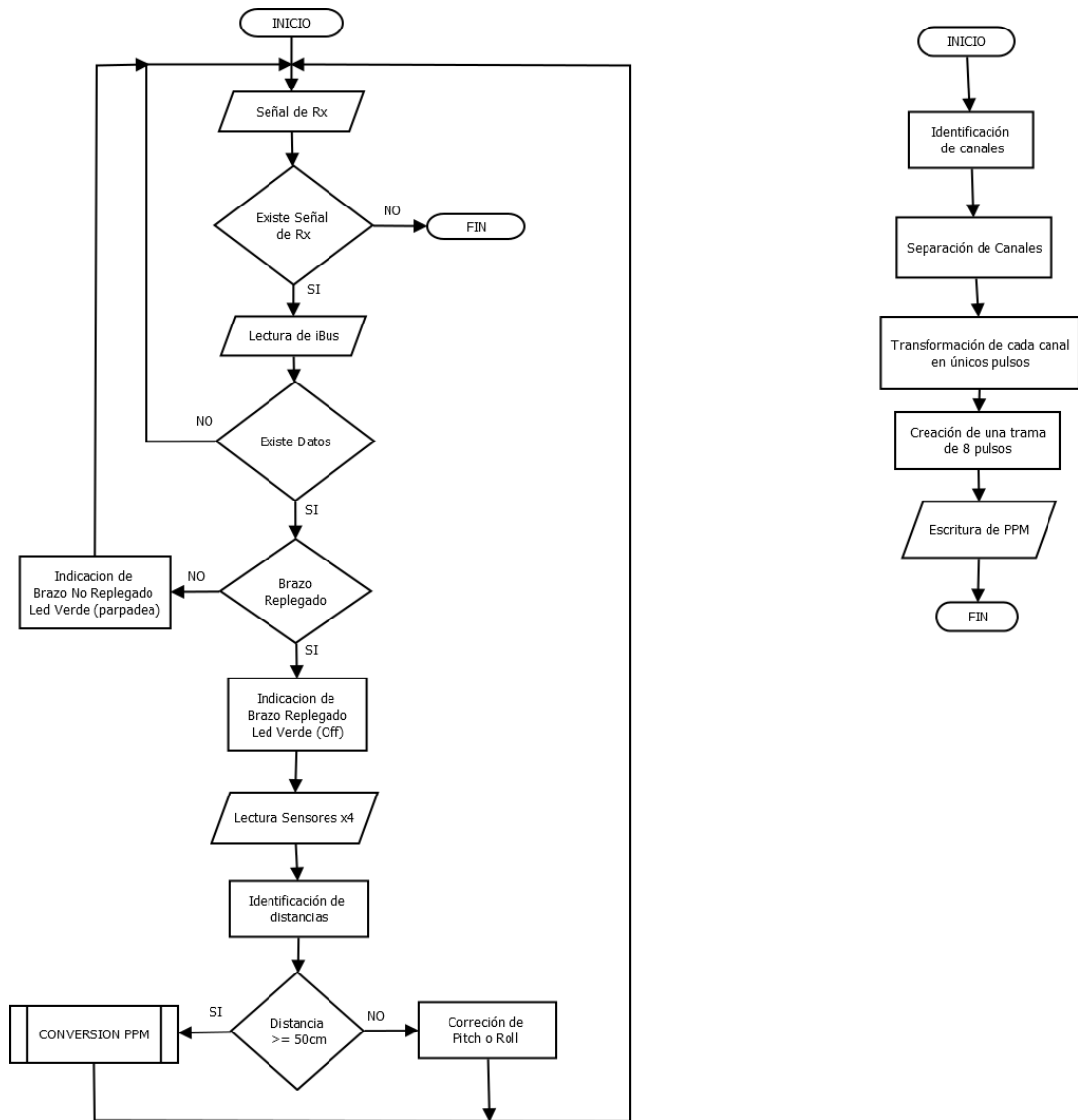


Elaborado por: Álvaro Jaramillo

En la Figura 3.20 se detalla la secuencia de sentencias que cumple la controladora principal con el fin de recibir las señales del receptor y cumplir una acción que impida el avance del vuelo en la dirección indicada por el piloto, durante el desplazamiento

del cuadricóptero. La controladora principal es la encargada de recibir las señales del receptor validarlas y distribuir las tanto a la controladora de vuelo como a la controladora del manipulador robótico.

Figura 3.20: Diagrama de Flujo del controlador principal

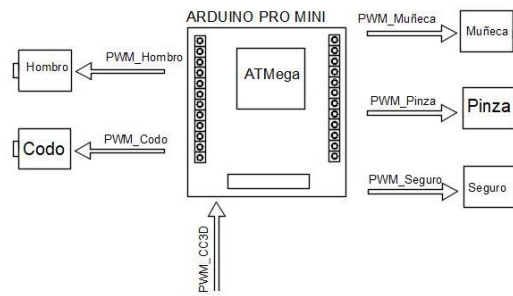


Elaborado por: Diego Salazar

### 3.3.5 Operación de tarjeta controladora del manipulador robótico.

El brazo manipulador de 3 grados de libertad es un sistema conformado por un módulo electrónico Arduino Pro Mini y 5 servomotores; denotados por un hombro, un codo, una muñeca, una pinza de sujeción y un seguro. En la Figura 3.21 se muestra la conexión entre el procesador y los elementos finales.

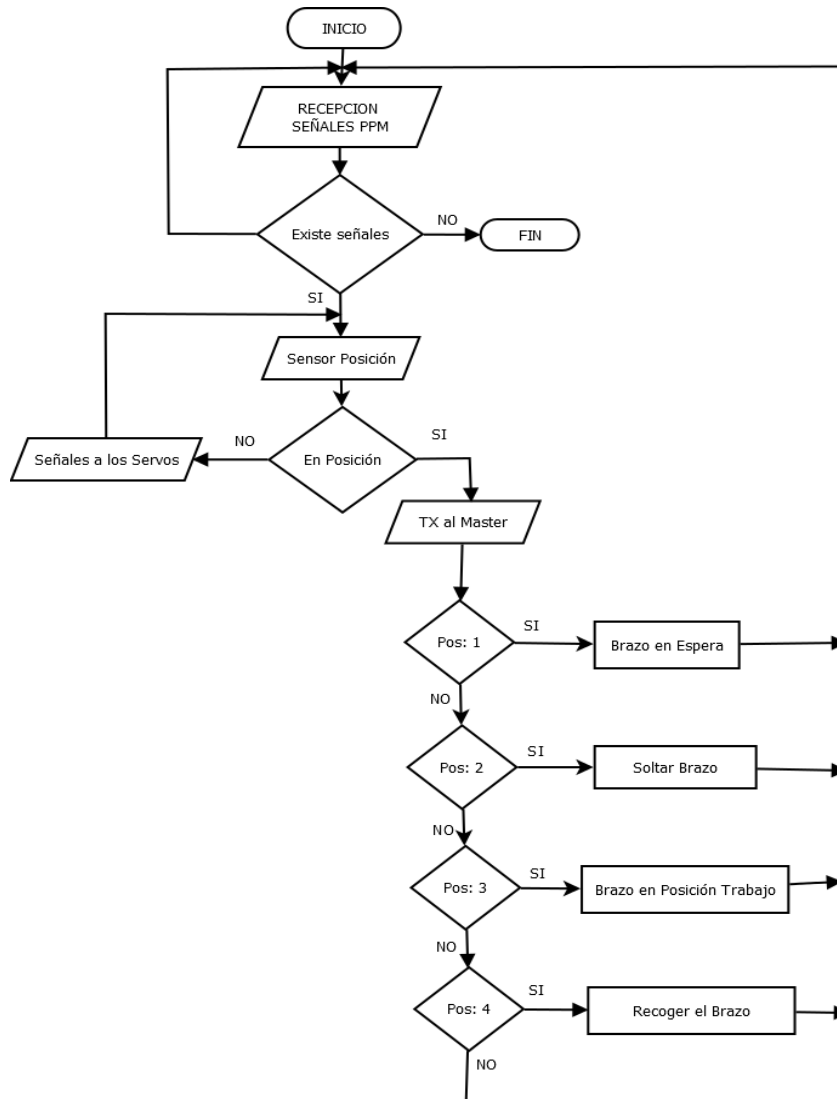
Figura 3.21: Diagrama de bloques del brazo manipulador



Elaborado por: Álvaro Jaramillo

En la Figura 3.22 se muestra en detalle el diagrama de flujo que requiere el manipulador para su funcionamiento.

Figura 3.22: Diagrama de flujo del manipulador



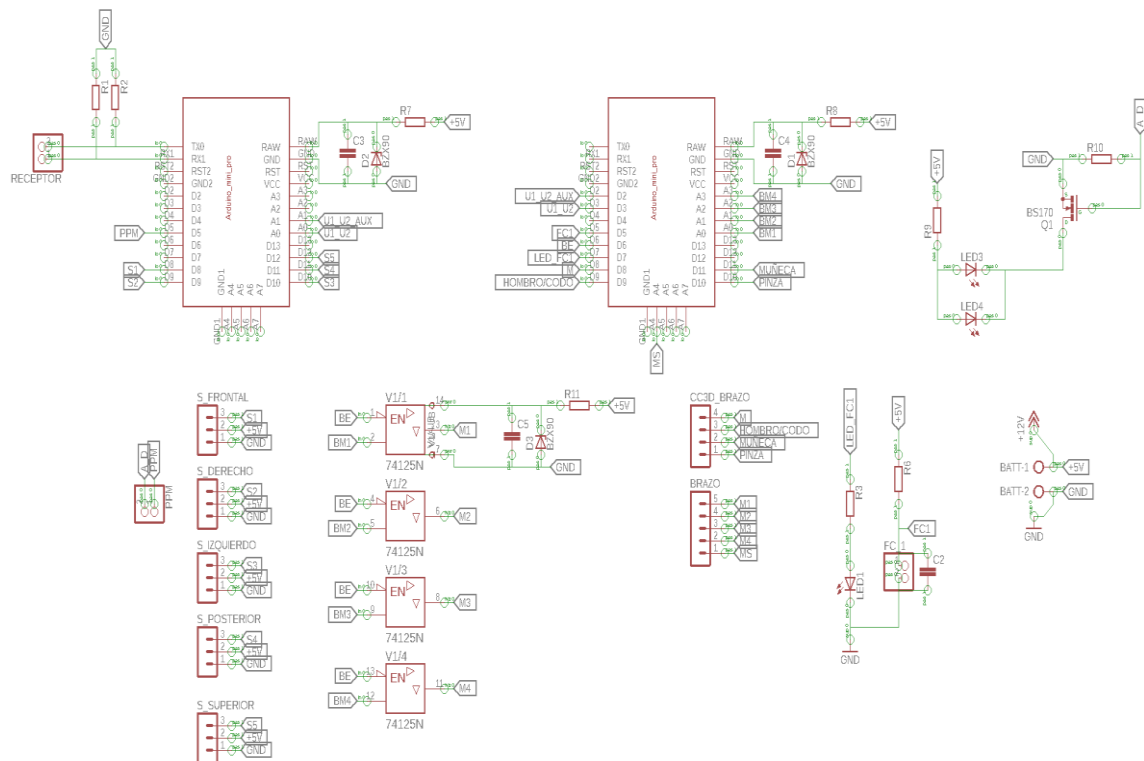
Elaborado por: Diego Salazar

Debido a que el manipulador debe permanecer recogido durante el despegue y aterrizaje del cuadricóptero, es necesario contar con un sensor que verifique el estado del brazo. Luego de lo cual los movimientos deberán ser secuenciales a fin de evitar daños; si se desea tomar un objeto se deberá desplegar el hombro y el codo en estricto orden, finalmente se podrá realizar movimientos con cada una de las articulaciones libremente. El manipulador está controlado desde el mando inalámbrico de vuelo, lo cual dificulta hasta cierto punto su maniobrabilidad.

### 3.3.6 Diseño y fabricación de la tarjeta electrónica principal.

Los sistemas de sensores y manipulador fueron contenidos en una tarjeta electrónica que permitió centralizar la cantidad de cables, señales y soportes. En la Figura 3.23 se muestra el diseño del diagrama esquemático que conforma este módulo.

Figura 3.23: Diagrama esquemático de la tarjeta principal

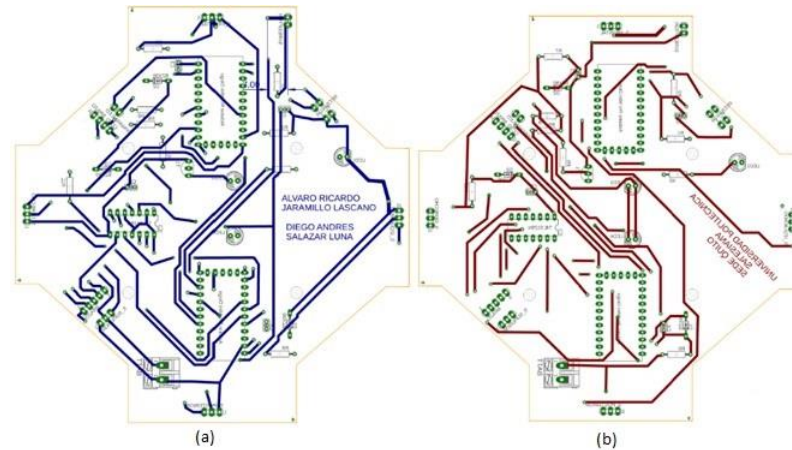


Elaborado por: Álvaro Jaramillo

El diseño del circuito impreso para ruteado y modelado de la tarjeta electrónica principal se la realizó en Autodesk Eagle por su gran disponibilidad de librerías. En la Figura 3.24 (a) y Figura 3.24 (b) se muestra la disposición de los elementos

electrónicos, así como las líneas de conexión entre las caras inferior y superior respectivamente.

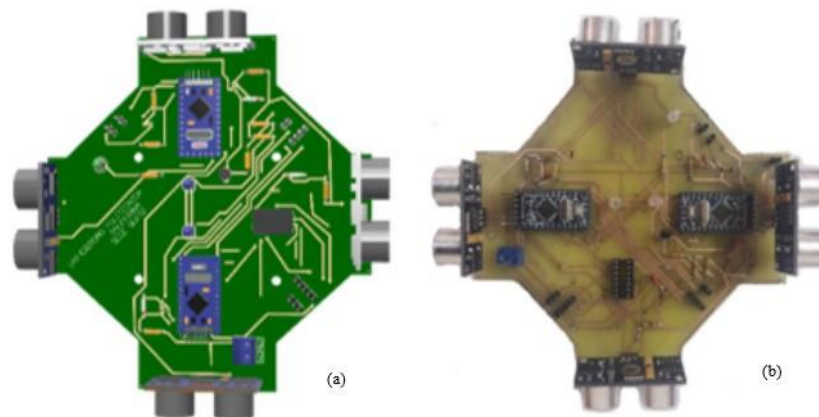
Figura 3.24: Ruteado de pistas en la cara superior (b) e inferior (a) de la tarjeta principal



Elaborado por: Álvaro Jaramillo y Diego Salazar.

En la Figura 3.25 se muestra el modelado 3D e implementación final de la tarjeta electrónica principal, la cual permite tener una idea clara de la disposición de cada uno de los elementos y pines que la conforman para de esta manera no tener problemas al unir las distintas partes del sistema. De igual manera se verifica su funcionalidad independientemente y en conjunto con el cuadricóptero.

Figura 3.25: Modelado 3D (a) e implementación (b) de la tarjeta electrónica principal



Elaborado por: Álvaro Jaramillo y Diego Salazar.

## CAPÍTULO 4

### PRUEBAS Y RESULTADOS

El prototipo desarrollado permitió verificar el funcionamiento del robot híbrido bajo ciertos parámetros de diseño en relación a los objetivos específicos planteados en el proyecto de titulación. La estabilidad del vehículo aéreo es la respuesta generada en función de parámetros de control denotados como proporcional, integral y derivativo a fin de reducir el error de compensación dando como respuesta oscilaciones tenues o bruscas. Para la realización de estas pruebas se vio la necesidad de construir un soporte que permita mantener el cuadricóptero en ejes fijos de pitch y roll, es así que se consideran ciertos parámetros para este tipo de calibración presentes en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Parámetros de estabilidad

	<b>Muy bajo</b>	<b>Bajo</b>	<b>Normal</b>	<b>Alto</b>
<b>Kp</b>	Sobre corrección con respuesta lenta e imprecisa desde el control.	Lento e impreciso.	Oscilación tenue con respuesta más fina al control.	Oscila rápidamente y gana altura con facilidad.
<b>Ki</b>	No mantiene la posición.	No mantiene la posición.	Mantiene la posición cuando se libera el control.	Oscilaciones continuas

Elaborado por: Álvaro Jaramillo y Diego Salazar.

#### **4.1. Pruebas de vuelo y estabilidad sin manipulador con parámetros de control predefinido**

En la Figura 4.1 (a) se muestra la verificación inicial del cuadricóptero sin el manipulador sobre el banco de pruebas y en la Figura 4.1 (b) en entorno cerrado, se utilizaron los parámetros predefinidos en la tarjeta controladora de vuelo obteniendo resultados casi aceptables en la estabilidad del sistema.

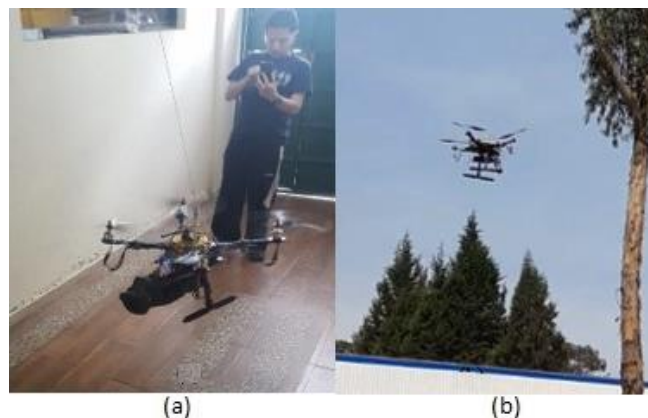
Figura 4.1: Cuadricóptero en el banco de pruebas (a) y en entorno cerrado (b)



Elaborado por: Álvaro Jaramillo y Diego Salazar.

Para la realización de pruebas bajo diferentes parámetros del controlador se dispuso la construcción de un soporte adicional en el techo con el fin de comprobar el empuje que generaba el cuadricóptero en función del valor proporcional y la respuesta a las instrucciones del control inalámbrico como se muestra en la Figura 4.2 (a). Así también se realizaron las pruebas en un espacio abierto donde se pudo comprobar la reacción oscilante del sistema ante afectaciones externas como las ráfagas de viento como se muestra en la Figura 4.2 (b), teniendo como resultado la caída del cuadricóptero y destrucción de las hélices.

Figura 4.2: Cuadricóptero en soporte de techo (a) y en entorno abierto (b)

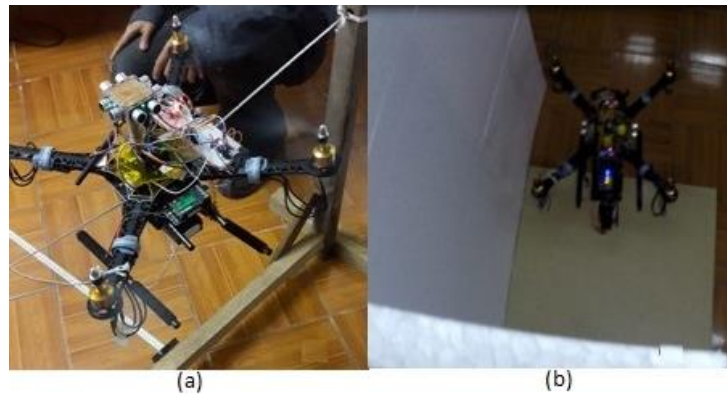


Elaborado por: Álvaro Jaramillo y Diego Salazar.

#### 4.2. Verificación de sistema anticollisiones.

La comprobación del sistema anticollisiones asistido inicialmente se lo realizó en el banco de pruebas con el fin de calibrar la compensación generada al movimiento de evasión en respuesta a los objetos como se muestra en la Figura 4.3 (a). El parámetro a sensor se configuró a 50 centímetros por dos factores: el primero es la distancia que existe entre la base del sensor ultrasónico hasta los extremos de las hélices y el segundo fue brindar un espacio adicional que permita compensar el tiempo de procesamiento. En la Figura 4.3 (b) se muestra la respuesta del sistema en vuelo.

Figura 4.3: Cuadricóptero con sensores de distancia en el banco de pruebas (a) y en vuelo (b)



Elaborado por: Álvaro Jaramillo y Diego Salazar.

#### 4.3. Pruebas de vuelo y estabilidad con manipulador en espacio abierto.

Durante las pruebas del cuadricóptero sin el manipulador se pudo lograr el empuje requerido al utilizar hélices de 25,40 cm; sin embargo al añadir el peso extra del brazo el sistema no fue capaz de generar la fuerza necesaria para elevarse. Razón por la cual se reemplazaron las hélices por unas de 27,94 cm de diámetro, lo cual implicó un mayor consumo de potencia y por lo tanto el tiempo de vuelo se redujo.

En la Figura 4.4 (a) se muestra el despegue del cuadricóptero con los primeros parámetros del controlador PID en el sistema híbrido completo, se determinó que el manipulador genera un desequilibrio en la estructura por causa de su forma y peso, fue necesario la implementación de nuevos parámetros de estabilización para compensar los movimientos de pitch y roll como se muestra en la Figura 4.4 (b).



Figura 4.4: Sistema híbrido durante el despegue (a) y vuelo (b) prueba 1



Elaborado por: Álvaro Jaramillo y Diego Salazar.

Se determinó los nuevos parámetros del controlador para mantener la estabilidad del sistema por lo cual se realizaron múltiples pruebas de vuelo, dando como resultado una mejora considerable en sus movimientos. En la Figura 4.5 (a) y Figura 4.5 (b) se muestra el desplazamiento horizontal del cuadricóptero desde diferentes tomas.

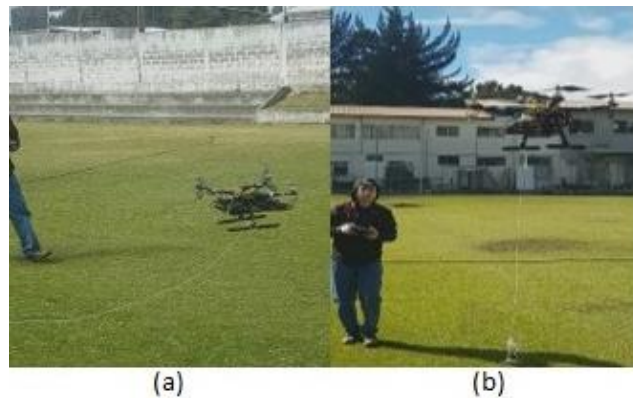
Figura 4.5: Sistema híbrido durante el despegue (a) y vuelo (b) prueba 2



Elaborado por: Álvaro Jaramillo y Diego Salazar.

El sistema logró mantener la estabilidad en el entorno abierto sin verse mayormente afectado por las ráfagas de viento, así también se comprobó la afectación que tiene el controlador al aumentar un peso que genere desbalance como se indica en la Figura 4.6 (a) durante el despegue. La primera observación que se tuvo fue que el cuadricóptero no pudo generar un mayor empuje para elevarse, a pesar de mantener la estabilidad no pudo superar los 1,8 metros de altura como se muestra en la Figura 4.6 (b).

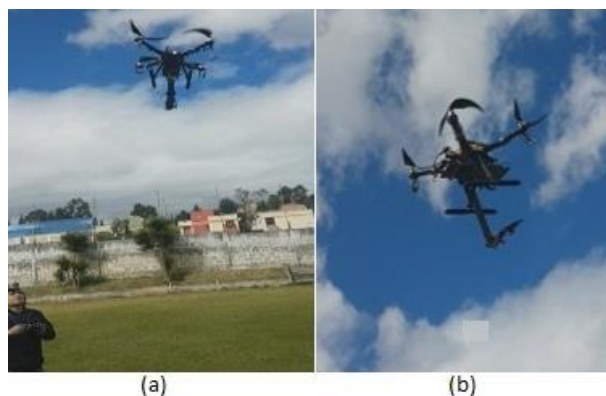
Figura 4.6: Verificación de estabilidad por arrastre durante el despegue (a) y vuelo (b)



Elaborado por: Álvaro Jaramillo y Diego Salazar.

Una de las pruebas que mayor riesgo implicó para demostrar la estabilidad del cuadricóptero fue el despliegue en vuelo del manipulador, ya que la liberación del brazo genera movimientos mecánicos que descompensan abruptamente el equilibrio del sistema. Se pudo comprobar que la respuesta del controlador de vuelo realizó la corrección casi instantánea como se muestra en la Figura 4.7 (a) en vista frontal y la Figura 4.7 (b) en vista lateral.

Figura 4.7: Verificación de estabilidad por despliegue de manipulador



Elaborado por: Álvaro Jaramillo y Diego Salazar.

La prueba final del sistema híbrido comprendió en tomar un objeto y trasladarlo hacia otro sitio, en este caso puntual se comprobó de manera absoluta que el sistema requiere de mayor empuje para realizar movimientos más detallados y finos. En la Figura 4.8 (a) y Figura 4.8 (b) se muestra el vuelo del cuadricóptero con el manipulador desplegado y listo para tomar un objeto, el sistema para su despegue

utilizó entre el 75% y 80% del acelerador lo cual redujo el margen de maniobrabilidad a casi nada.

Figura 4.8: Verificación de estabilidad por manejo de manipulador



Elaborado por: Álvaro Jaramillo y Diego Salazar.

Todas las pruebas se las realizó en un entorno seguro sin que exista riesgo para las personas, cabe mencionar que existen normativas a nivel nacional e internacional para volar este tipo de vehículos aéreos no tripulados. En Ecuador la entidad reguladora es la Dirección General de Aviación Civil (DGAC), la cual dispone de un reglamento en detalle para la manipulación de drones. Se hace mención de los parámetros más sobresalientes en este documento:

- Durante la operación del vehículo aéreo se deberá mantener alejado a una distancia superior a 9 kilómetros de cualquier aeródromo.
- La altura máxima de vuelo es de 122 metros.
- El propietario o responsable debe contratar una póliza de seguros estimada en \$3000.00 dólares para responder por daños a terceros cuando el vehículo aéreo sobrepase los 2 kg de masa.

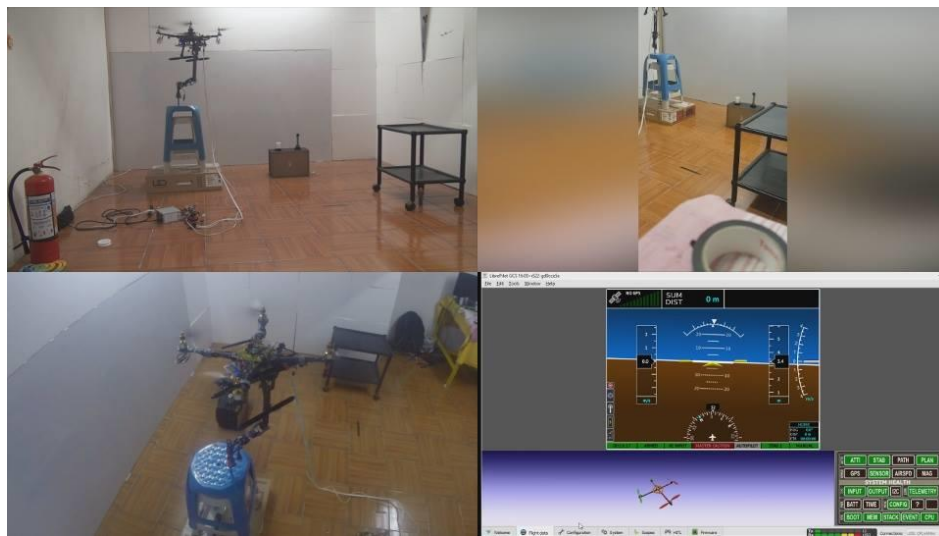
#### **4.4. Pruebas de vuelo y estabilidad con manipulador en espacio cerrado.**

Se realizaron pruebas complementarias en un entorno cerrado al eliminar el peso de la batería y energizar el cuadricóptero con una fuente de voltaje externa, el resultado de maniobrabilidad que se obtuvo permitió mover objetos desde 3 diferentes soportes a diferentes alturas.

### a) Movimiento Alto a Medio

La primera prueba que se realizó fue la de mover un caudín desde el soporte más alto hacia la mesa de altura media, como se muestra en la Figura 4.9 y Figura 4.10 respectivamente, el tiempo para la realización de esta tarea fue de 50 segundos.

Figura 4.9: Toma de objeto desde soporte alto



Elaborado por: Álvaro Jaramillo y Diego Salazar

El resultado de esta acción comprueba la maniobrabilidad que tiene el robot híbrido en un espacio cerrado logrando cumplir con el objetivo de mover el caudín.

Figura 4.10: Dejar objeto en soporte medio



Elaborado por: Álvaro Jaramillo y Diego Salazar

### b) Movimiento Bajo a Medio

La segunda prueba que se realizó fue la de mover un cepillo de base cuadrada desde un soporte bajo hacia la mesa de altura media como se muestra en la Figura 4.11, el tiempo estimado para la realización de esta tarea fue de un minuto con cinco segundos.

Figura 4.11: Movimiento de objeto desde soporte bajo a soporte medio



Elaborado por: Álvaro Jaramillo y Diego Salazar.

La tarea se la realizó de manera exitosa teniendo en cuenta que durante las pruebas y por acción de las ráfagas de viento creadas por el cuadricóptero los objetos tendían a caerse sobre sus soportes lo cual requirió repetir la misma acción por más de 7 veces, a pesar de la colocación de cinta adherente en las bases del cepillo. Así también el cable que energiza al robot híbrido generó un pequeño desbalance por el arrastre que produce su peso, siendo recomendable esta forma de maniobras únicamente para pruebas y entornos de investigación.

### c) Movimiento Bajo a Alto

La tercera prueba que se realizó fue la de mover un carrito de estaño desde un soporte bajo hacia el soporte alto como se muestra en la Figura 4.12, el tiempo estimado para la realización de esta tarea fue de un minuto con quince segundos.

Figura 4.12: Movimiento de objeto desde soporte bajo a soporte alto



Elaborado por: Álvaro Jaramillo y Diego Salazar.

Se logró cumplir la acción de una manera exitosa, durante el despegue de todas las pruebas antes mencionadas se verificó que el cuadricóptero gano empuje para ascender con el 50% de aceleración lo cual permitió utilizar el otro 50% para maniobrabilidad. En la Tabla 4.2 se muestra los resultados obtenidos en las distintas pruebas.

Tabla 4.2: Resultados obtenidos de las pruebas

Prueba	Tiempo (s)	Repetición	Resultado	Causa de demora
Alto a Medio	50	12	Completo	Maniobras de pilotaje
Bajo a Medio	65	7	Completo	Maniobras de pilotaje y material del objeto
Bajo a Alto	75	9	Completo	Maniobras de pilotaje y forma del objeto

Elaborado por: Álvaro Jaramillo y Diego Salazar.

## CONCLUSIONES

Se desarrolló un prototipo de cuadricóptero con manipulador incorporado el cual logró cumplir el objetivo de transportar objetos a diferentes alturas y en ambientes distintos de forma parcial, puesto que debido a la dinámica de un cuadricóptero este no puede generar demasiado empuje vertical que permita levantar al propio dispositivo aumentado en peso a un manipulador robótico y una pequeña carga, lo cual supuso que se modifique la masa del conjunto y se añada una fuente externa para cumplir con el objetivo.

En las pruebas de vuelo y maniobrabilidad se verificó que el sistema utilizaba el 75% de aceleración neta desde el control de radio para alcanzar el empuje suficiente que permita el despegue, esto conlleva en reducir a menos de 25% el margen para maniobrabilidad. Tomando en cuenta que el valor óptimo durante el despegue debe ser del 50% de aceleración, es necesario reducir el peso del conjunto o incrementar la cantidad de motores lo cual repercute directamente en el aumento del consumo de corriente.

Existe un error del 10,54% entre el empuje real que desarrollan los motores y el empuje teórico obtenido a partir de especificaciones técnicas de cada uno de los elementos. El empuje real puede verse afectado por el tipo de motores, el desgaste de sus bobinas, el controlador de velocidad, la calibración de las helices, el tamaño de las helices, y el eje de acople motor-hélice. Mientras que el empuje teórico lo relaciona de forma ideal a través de una ecuación matemática, donde ciertas constantes han sido obtenidas en entornos de prueba.

La estabilidad del sistema híbrido en el despegue, durante el vuelo, y en el aterrizaje radica en mantener el centro de masa de las dos estructuras en un único punto. La relación de un cuadricóptero simple y un cuadricóptero híbrido con un manipulador robótico demostró durante las pruebas que un pequeño desplazamiento del centro de masa puede generar un momento de fuerza que desestabilice al cuadricóptero, haciendo que este ladee hacia el punto donde está concentrado la mayor cantidad de peso.

De la cinemática del conjunto se concluyó que la relación de posición final del robot híbrido es mínima en comparación a la posición del usuario, de esta forma cuando se controla el dispositivo de forma teleoperada la posición del gripper necesaria para la manipulación de objetos, puede ser modificada mediante pequeños ajustes en el control ya que la disposición del conjunto del brazo manipulador, no varía en mucha distancia y ángulo en relación al frame del cuadricóptero.

El mantener módulos electrónicos dedicados para tareas específicas permitió obtener una pronta convergencia del sistema, sin que ello cause demora en la respuesta del conjunto. El controlador de vuelo mantuvo la estabilidad del cuadricóptero a todo momento, mientras que el manipulador respondió a las instrucciones recibidas desde el control de radio frecuencia. Otra ventaja importante de manejar sistemas independientes es la facilidad de encontrar problemas en el funcionamiento del conjunto.

Se demostró el funcionamiento del dispositivo en un ambiente cerrado, en donde se observó la principal característica de un cuadricóptero teleoperado con manipulador incorporado, el cual no es un dispositivo ideal para la realización de tareas, pues carece de tiempo de autonomía, carece de empuje necesario para mantenerse estable y cargar pesos, para solucionar el problema se tuvo que alivianar el peso más significativo como es la batería, de este modo se logró un mejor control de este en un 80%, pero se perdió autonomía puesto que se requirió alimentar al prototipo mediante fuente externa para de este modo lograr cumplir el objetivo de forma parcial.

En las pruebas en entorno abierto con el prototipo se logró observar que es capaz de despegar con el manipulador recogido, desplegar el brazo con un mínimo de error que la controladora de vuelo pudo corregir, es capaz de recoger un objeto que se encuentre dentro de su rango de funcionamiento y desplazarlo, pero también se observó que el prototipo no tiene una autonomía mayor a los 30 segundos puesto que los motores requieren mucha energía para poder mantenerse en el aire y poder elevar los 1.65Kg de peso total del dispositivo.



## RECOMENDACIONES

El cuadricóptero tiene un comportamiento anormal al estar cerca de fuentes generadoras de ruido electrónico, magnético o electromagnético ya que cuenta con sensores susceptibles a estas interferencias; tales como el magnetómetro, acelerómetro, barómetro. La presencia de estas afectaciones impide que el sistema pase a modo de vuelo.

Para facilitar la operabilidad del sistema durante las maniobras de vuelo se debe independizar el mando del manipulador y del cuadricóptero valiéndose de otros medios de control.

El uso de baterías LIPO incurre en alto riesgo para las personas que las manipulan ya que por desgaste tienden a inflarse lo que puede provocar un incendio, luego de utilizarlas removerlas del vehículo aéreo y mantenerlas en lugares adecuados para su almacenamiento.

Para mejorar la respuesta al empuje y maniobrabilidad del sistema se puede reemplazar la estructura por un hexacóptero u octocóptero, ya que estas disponen de motores adicionales que permiten generar una mayor fuerza durante el despegue, vuelo y aterrizaje.

Cuando se realiza la calibración de los controladores de velocidad en conjunto con los motores retirar las helices para evitar daños en la estructura del cuadricóptero y así también en la integridad física de las personas.

El uso y manipulación de un vehículo aéreo no tripulado está reglamentado en leyes ecuatorianas mediante una licencia de manejo y un seguro de accidentes, por lo que se debe evitar manipular el drone en lugares de concurrencia pública.

## REFERENCIAS

- Reyes, F. (2016). *ROBÓTICA: CONTROL DE MANIPULADORES*. México D.F: Alfaomega.
- ELPAIS. (07 de 09 de 2014). Recuperado el 01 de 05 de 2018, de [http://elpais.com/internacional/2014/09/07/actualidad/1410119138\\_169780.html](http://elpais.com/internacional/2014/09/07/actualidad/1410119138_169780.html)
- Trabajo, O. M. (s.f.). Recuperado el 01 de 05 de 2018, de <http://www.achs.cl/portal/ACHS-Corporativo/MediosACHS/Paginas/Golpes-y-caidas-una-de-las-principales-causas-de-los-accidentes-laborales.aspx#.WayDI8aQz4Y>
- Parallax. (s.f.). Recuperado el 01 de 05 de 2018, de <https://learn.parallax.com/tutorials/robot/elev-8/multirotor-flying-guide-elev-8-v2/learn-your-transmitter-controls>
- Openpilot. (s.f.). Recuperado el 01 de 05 de 2018, de [http://opwiki.readthedocs.io/en/latest/user\\_manual/revo/revo.html](http://opwiki.readthedocs.io/en/latest/user_manual/revo/revo.html)
- Aliexpress. (s.f.). Recuperado el 01 de 05 de 2018, de <https://www.aliexpress.com/item/Mystery-M-30A-30A-SimonK-ESC-with-BEC-For-RC-Quadcopter-Helicopter/1607950133.html>
- Banggood. (s.f.). Recuperado el 01 de 05 de 2018, de [https://www.banggood.com/es/FlySky-FS-i6-2\\_4G-6CH-AFHDS-RC-Transmitter-With-FS-iA6-Receiver-p-922606.html?stayold=1&cur\\_warehouse=CN](https://www.banggood.com/es/FlySky-FS-i6-2_4G-6CH-AFHDS-RC-Transmitter-With-FS-iA6-Receiver-p-922606.html?stayold=1&cur_warehouse=CN)
- Robomart. (s.f.). Recuperado el 01 de 05 de 2018, de <https://www.robomart.com/dji-2212-920kv-brushless-motor-for-multicopter>
- Ebay. (s.f.). Recuperado el 01 de 05 de 2018, de [https://www.ebay.com/itm/Master-Airscrew-windsor-Propeller-Nylon-Glass-Propeller-10x7-1-MAS1070G3-/291492669742?\\_ul=CL](https://www.ebay.com/itm/Master-Airscrew-windsor-Propeller-Nylon-Glass-Propeller-10x7-1-MAS1070G3-/291492669742?_ul=CL)
- Electronica-jaimes. (30 de 06 de 2010). Recuperado el 01 de 05 de 2018, de <http://electronica-jaimes.blogspot.com/2010/06/descripcion-de-un-brazo-robotico.html>
- Sparkfun. (s.f.). Recuperado el 01 de 05 de 2018, de <https://learn.sparkfun.com/tutorials/using-the-arduino-pro-mini-33v>
- Rivasrobotics. (07 de 06 de 2017). Recuperado el 01 de 05 de 2018, de <http://rivasrobotics.com/robot-manipulador-de-3-grados-de-libertad/>
- Cursopilotodrones. (s.f.). Recuperado el 01 de 05 de 2018, de <https://cursopilotodrones.net/leccion/4-6-estabilidad-y-tipos-de-estabilidad/>

Flight-mechanic. (s.f.). Recuperado el 01 de 05 de 2018, de <http://www.flight-mechanic.com/propeller-aerodynamic-process/>

Naylamp. (s.f.). Recuperado el 01 de 05 de 2018, de [https://naylampmechatronics.com/blog/45\\_Tutorial-MPU6050-Aceler%C3%B3metro-y-Giroscopio.html](https://naylampmechatronics.com/blog/45_Tutorial-MPU6050-Aceler%C3%B3metro-y-Giroscopio.html)

Electrónico, M. (s.f.). Recuperado el 15 de 06 de 2018, de <https://www.makerelectronico.com/producto/hmc58831-brujula-digital-3-ejes/>

Inven. (s.f.). Recuperado el 15 de 06 de 2018, de <http://inven.es/temperatura-y-humedad/571-modulo-barometro-gy-bme280-sensor-de-presion-atmosferica.html>

Liang, O. (s.f.). Recuperado el 15 de 06 de 2018, de <https://oscarliang.com/choose-esc-racing-drones/>

Corredor, J. M. (06 de 2010). *Universidad Nacional de Colombia*. Recuperado el 15 de 06 de 2018, de <http://www.bdigital.unal.edu.co/1896/1/jorgemariocottecorredor.2010.pdf>

Center, R. H. (s.f.). Recuperado el 15 de 06 de 2018, de <https://rogershobbycenter.com/lipoguide/>

Quadrino. (s.f.). Recuperado el 15 de 06 de 2018, de <http://www.quadrino.com/guia-2/materiales-necesarios-1/motores-brushless>

Midronedecarreras. (03 de 11 de 2017). Recuperado el 15 de 06 de 2018, de <https://www.midronedecarreras.com/drones/noticias-reviews/guia-de-los-mejores-micro-drones-fpv-2017/>

Droneymas. (s.f.). Recuperado el 15 de 06 de 2018, de <http://droneymas.es/guia-para-aprender-a-volar-tu-drone/>

Digikey. (s.f.). Recuperado el 15 de 06 de 2018, de <https://www.digikey.com/en/articles/techzone/2015/jan/rf-links-for-civilian-drones>

vuelo, M. (s.f.). Recuperado el 15 de 06 de 2018, de <http://www.manualvuelo.com/SIF/SIF32.html>

Aerocomando. (s.f.). Recuperado el 15 de 06 de 2018, de <https://aerocomando.blogspot.com/2015/08/la-helice.html>

Javier Orna, P. D. (03 de 07 de 2015). Recuperado el 15 de 06 de 2018, de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/10924>

Alasewm. (s.f.). Recuperado el 15 de 06 de 2018, de <http://www.alasewm.com.ar/helicewm.htm>