Resumen

Este proyecto de final de carrera trata de diseñar y construir una maqueta acuática para el mantenimiento de parques eólicos offshore. Embarcación que se desplaza por la acción de cuatro motores que tiene en los extremos de su estructura, capaz de permanecer en una posición dinámica estable a pesar de perturbaciones externas.

Este proyecto está orientado al apoyo de personal de mantenimiento en situaciones de marea complicada. El sistema se puede diferenciar en una parte mecánica simple y otra electrónica más compleja.

La parte de electrónica se puede dividir en dos grandes grupos, circuito de maniobra o bloque de control y circuito de potencia.

El bloque de control está compuesto por entradas como sensores de tipo acelerómetro y giroscopio, la emisora de radio control y la gestión de estos mediante el software de la placa Arduino quien realiza los cálculos de inclinación (IMU), el algoritmo de error (PID), el control de estado de la batería, para finalmente crear una señal PWM que se aplica a los motores.

El circuito de potencia está constituido por: la batería de polímero de litio (LiPo), encargada de alimentar todo el sistema; el control de velocidad electrónico (ESC), que convierte la señal de control a la potencia de los motores brushless que con sus hélices propulsan la embarcación.

Palabras clave

Embarcación	Motor brushless	ESC	I2C	Sensores
Offshore	Batería LiPo	IMU	EEPROM	PID

Diseño de una embarcación con posicionamiento dinámico para el mantenimiento de parques eólicos offshore

Cristian Rodríguez de Rivera Salvador c.rodriguezderivera@gmail.com

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona

Abstracto

Este proyecto consiste en la búsqueda de información y montaje de una maqueta de embarcación de bajo coste y aproximadamente 1.5Kg de peso, utilizando como sensores mandos de la NintendoWii y como control una placa de Arduino. El objetivo principal del proyecto es que el vehículo pueda mantener una posición dinámica estable. Pudiendo ser extrapolado al servicio de parques eólicos offshore.

Introducción

La estructura de la embarcación se basa en un catamarán, este es un tipo de barco que consiste en dos cascos unidos por un marco, pueden ser propulsados a vela o motor. Se implementa esta embarcación con cuatro motores situados en los laterales de las extremidades de sus cascos, orientados a 45º simulando los ejes de una pirámide. Para su movimiento no utiliza velas y timón como la mayoría de embarcaciones, controla el movimiento ajustando la velocidad de rotación de cada rotor.

Desarrollo

El primer paso para la construcción de la embarcación ha consistido en escoger los materiales adecuados, una placa Arduino Duemilanove para su control, los mandos de la consola NintendoWii Nunchuck y Wii motion que contienen los sensores que nos permiten estabilizar el vehículo y el resto de materiales de aeromodelismo y radiocontrol como el emisor/receptor, baterías, motores, hélices y ESC han sido adquiridos en RCTecnic (bcn).

Primero se monta la estructura de la embarcación, basada en material polimérico y seguidamente sobre esta estructura se instala y comprueba toda la electrónica.

En la figura I podemos observar el montaje final de la embarcación, mediante una estructura de PVC, cuatro conjuntos de motores con sus respectivas hélices y todo el montaje electrónico necesario para poder conseguir un posicionamiento dinámico ajustado.

La mecánica es la parte menos relevante en este proyecto y nos centraremos más en la electrónica.

En primer lugar se integra la parte de maniobra, se extraen los sensores de los dos mandos de la NintendoWii. Como acelerómetro hemos usado el integrado que contiene el mando *nunchuck* de la Wii y como giroscopio utilizaremos el integrado que lleva la expansión de la *Wii motion plus*, los dos tienen medición en los tres ejes de coordenadas.

Figura II: Nunchuck + Wii motion plus

Se conectan ambos sensores en modo pass-through, trabajaran como un único sensor y enviaran la información recogida por un bus I2C a la placa Arduino que será la encargada de procesar los datos recibidos y obtener las mediciones de los dos sensores. Una vez montados los sensores y conectados a la placa Arduino se procede a analizar la información que estos envían mediante un balancín que nos permite modificar ángulos.

Posteriormente se instala el receptor de Radio Control (RC) sobre la estructura y se conecta a la placa Arduino, identificando y verificando la señal PPM de cada uno de los cinco canales que se utilizan en el proyecto.

Finalmente se instala la parte de potencia: Baterías, ESC, motores y hélices.

Para que este sistema tenga un posicionamiento estable se configura mediante un control PID.

Conclusiones

Este proyecto ha servido para iniciarme en la construcción de vehículos no tripulados. Se ha estudiado diversas maneras para la construcción de este sistema, finalmente he optado por la construcción más sencilla, ya que no tenía conocimientos de este tipo de naves. En un futuro se podría mejorar el proyecto añadiendo más sensores que le dieran más exactitud en su estabilidad y un control más robusto.

He tenido muchos inconvenientes en la construcción, pero finalmente se han resuelto satisfactoriamente y se ha logrado la navegación estable de la embarcació.

Índice

Resumen 1

Palabras clave 1

Diseño de una embarcación con posicionamiento dinámico 3

Índice 5

1 Introducción 9

1.1 Definición de Catamarán 10

1.2 Definición UMV: 11

1.3 Definición de parque eólico Offshore 13

1.3.1 La opinión sobre los parques eólicos marinos y primeras iniciativas en España 14

1.4 Definición de quadcopter 16

1.5 Objetivos 17

2 Descripción funcional 18

2.1 Estructura: 18

2.2 Funcionamiento: 20

Movimiento Vertical 22

Movimiento de tumbado (roll) 22

Movimiento de inclinación (pitch) 22

Movimiento de giro (yaw) 22

2.3 Diagrama de bloques 23

3 Circuito de potencia y alimentación 24

3.1 Etapa de potencia y alimentación 24

3.1.1 Baterías de polímero de litio (LiPo) 24

3.1.2 Electric Speed Control (ESC) 26

3.1.3 Motor Brushless 27

3.2 Hélices....29

4 Bloques de control....30

4.1 Control batería....30

4.2 Controles motores....32

4.2.1 Instrucción analogWrite....33

4.2.2 Librería servo.h....34

4.3 Sensores....35

4.3.1 Giroscopio....35

4.3.2 Acelerómetro....36

4.3.3 Lectura de sensores....37

4.4 Unidad de medición inercial (IMU)....39

4.4.1 Filtros complementarios....39

4.4.2 Calculo del ángulo de inclinación....42

4.5 Módulo de Radio frecuencia....44

4.5.1 Lectura Emisora....45

4.5.2 Registro PORT....46

4.5.3 Interrupciones PCINTx....46

4.6 Control PID....48

4.7 Micro-controlador....50

4.7.1 Memoria EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only))....51

5 Ensayos....52

5.1 Prueba características motor brushless....52

5.2 Prueba calibración sensores....55

5.3 Prueba características emisora RC....57

5.4 Prueba calibración PID....58

5.5 Calibración ESC....60

6 Software....61

7 Presupuesto. 65

8 Planificación. 66

9 Bibliografía y referencias. 67

10 Conclusiones. 69

11 Anexos. 71

A ESQUEMA ELECTRICO FINAL 71

B MANUAL CONTROL DE VELOCIDAD ELECTRONICO (ESC) 72

1 Introducción

El proyecto consiste en el diseño e implementación de un vehículo marítimo no tripulado *Unmanned Maritime Vehicles* (UMV) , el cual incluye la explicación de montaje y las partes más técnicas.

La elección para el desarrollo final ha sido implementar una embarcación a partir del principio de flotación de un catamarán, este es un tipo de barco que consiste en dos cascos unidos por un marco, pueden ser propulsados a vela o motor. Se implementa esta embarcación con cuatro motores situados en las extremidades de sus cascos orientados a 45º simulando los ejes de una pirámide. Para su movimiento no utiliza velas y timón como la mayoría de embarcaciones, controla el movimiento ajustando la velocidad de rotación de cada rotor.

Una de las mayores motivaciones para la creación de esta maqueta es la posibilidad de aportar una idea de Tipo para crear un vehículo de soporte al personal de mantenimiento de parques eólicos offshore en mar relativamente agitado, ya que es una tecnología relativamente nueva.

Un pilar fundamental en el control de la embarcación es el conjunto de sensores encargados de mantener estable y re-direccionar el vehículo. Utilizamos acelerómetro y giroscopio, cada uno con una función diferente pero a la vez complementaria.

Para el control de la embarcación se ha utilizado la plataforma Arduino, ya que este micro-controlador es fácil de programar.

La embarcación tiene integrado por software un control Proporcional Integral Derivativo (PID) para su autocorrección. Control estudiado en la asignatura de control con computador e imprescindible en el mundo de la regulación.

En la facultad se han estudiado motores, tanto de corriente alterna, como de continua. En este caso se han utilizado motores brushless; combinación de los motores nombrados anteriormente.

También se investiga con el fin de adquirir nuevos conocimientos, dado que muchos aspectos que integra el proyecto no se han mostrado en la facultad y son de mi interés.

1.1 Definición de Catamarán

Un **catamarán** es un tipo de embarcación o buque que consiste en dos cascos unidos por un marco. Pueden ser propulsados a vela o motor.

La palabra *catamarán* viene del tamil*kaṭṭumaram* (கட்டுமரம்), donde *kaṭṭu* es paquete y *maram* árbol (Lit. «troncos unidos»). El pirata y aventurero británico William Dampier, fue el primero en describir catamaranes en 1697, que había visto en la región de Tamil Nadu (India), mientras navegaba por el golfo de Bengala. El *catamarán* era usado por los paravas, una comunidad de pescadores en la costa sur de Tamil Nadú, y la antigua dinastía tamil chola los empleaba desde el siglo V d. C. para trasportar sus tropas a conquistar regiones del Sudeste Asiático, como Birmania, Indonesia y Malasia.

En épocas prehistóricas, hace 3 o 4 milenios, los navegantes austronesios utilizaron canoas de doble casco para colonizar la Polinesia y asentarse en el grupo de islas más extendido del planeta. Figura1.4

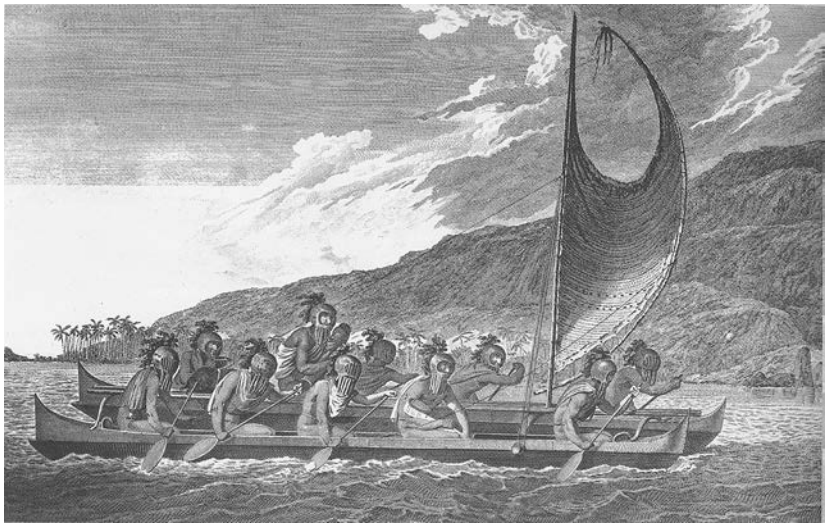


Figura 1.3 Catamarán utilizado por los polinesios

Los catamaranes son diseños relativamente nuevos en lo que respecta a las embarcaciones modernas de ocio o trabajo, y tuvieron que enfrentarse con un gran escepticismo por parte de algunos marineros acostumbrados a diseños más «tradicionales».

A partir del concepto que representa este tipo de buque surgieron nuevas propuestas, diseños y patentes, que han dado lugar a los conocidos como FOILCAT o los WAVE-PIERCING de dos cascos flotantes.

1.2 Definición UMV:

Un vehículo marítimo no tripulado (del inglés Unmanned Maritime Vehicles), es una embarcación que navega y puede ser dirigida por un piloto o por un sistema de navegación inteligente, sin ninguna persona abordo. Lo puede hacer de forma autónoma o por control remoto.

Los UMV's son útiles, cuando nos encontramos en entornos de difícil acceso o con un cierto peligro. Los avances tecnológicos han hecho posible el desarrollo de estos vehículos, ya que por un lado los micro-controladores ofrecen la posibilidad de cálculos de forma más eficiente.

Este desarrollo siempre se ha visto motivado por el ejercicio militar. De 2014 a 2018 los servicios militares de los EEUU preveen un gasto de 23,9 millones de dólares en sistemas no tripulados (Figura 1.1)

FYDP		2014	2015	2016	2017	2018	Total
Air	RDTE	1189.4	1674.0	1521.4	1189.4	1087.9	6662.2
	Proc	1505.5	2010.2	1843.5	1870.7	2152.8	9382.7
	OM	1080.9	1135.2	1102.7	1156.9	1178.5	5654.1
Domain Total		3775.9	4819.4	4467.6	4217.0	4419.3	21699.1
FYDP		2014	2015	2016	2017	2018	Total
Ground	RDTE	6.5	19.1	13.6	11.1	10.6	60.9
	Proc	6.5	27.9	30.7	42.6	55.4	163.1
	OM	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Domain Total		13.0	47.0	44.3	53.7	66.0	223.9
FYDP		2014	2015	2016	2017	2018	Total
Maritime	RDTE	62.8	54.8	66.1	81.0	87.2	351.9
	Proc	104.0	184.8	160.1	158.1	101.1	708.2
	OM	163.4	170.3	182.4	190.5	193.6	900.2
Domain Total		330.2	409.8	408.6	429.7	381.8	1960.2
FYDP		2014	2015	2016	2017	2018	Total
All Unmanned Systems	RDTE	1,258.7	1,747.9	1,601.1	1,281.5	1,185.7	7,075.0
	Proc	1,616.0	2,222.9	2,034.3	2,071.4	2,309.3	10,253.9
	OM	1,244.3	1,305.4	1,285.1	1,347.4	1,372.1	6,554.3
Domain Total		4,119.1	5,276.2	4,920.5	4,700.4	4,867.1	23,883.2

Figura 1.1 Unmanned Systems Fundig

En la figura 1.2 se muestra un ejemplo de un vehículo no tripulado del ejercito de EE.UU.

Figura 1.2 Catamarán de ejercicio militar

1.3 Definición de parque eólico Offshore

Un **parque eólico** es una agrupación de aerogeneradores que transforman la energía eólica en energía eléctrica.

El número de aerogeneradores que componen un parque es muy variable, y depende fundamentalmente de la superficie disponible y de las características del viento en el emplazamiento. Antes de montar un parque eólico se estudia el viento en el emplazamiento elegido durante un tiempo que suele ser superior a un año. Para ello se instalan veletas y anemómetros. Con los datos recogidos se traza una rosa de los vientos que indica las direcciones predominantes del viento y su velocidad.

Figura 1.3 Parque eólico terrestre

Los parques eólicos proporcionan diferente cantidad de energía dependiendo de las diferencias sobre diseño, situación de las turbinas, y por el hecho de que los antiguos diseños de turbinas eran menos eficientes y capaces de adaptarse a los cambios de dirección y velocidad del viento. A pesar de que el impacto ambiental de las plantas eólicas es relativamente pequeño comparado con otras formas de generación, los aerogeneradores producen contaminación acústica y visual. Asimismo se cree que puede existir impacto importante en la fauna ya que las aves no son capaces de ver las aspas cuando éstas giran.

Pero los mayores inconvenientes de esta fuente energética son que: es intermitente y no siempre puede obtenerse la potencia deseable; no puede ser almacenada como energía eólica, cosa que encarece el coste; es dispersa y se necesitan grandes superficies. Sin embargo el terreno utilizado para los parques puede ser aprovechado para actividades agrícolas, zonas de recreo. Comienza además a haber problemas de emplazamiento: hay menos energía al abrigo del viento de una turbina (y más turbulencia) que delante de ella. En parques eólicos, los aerogeneradores suelen espaciarse entre 150 y 300 metros los unos de los otros o con otros obstáculos. Evitar interferencias entre aerogeneradores requiere grandes superficies para instalar los parques y podemos considerar que en cada región existe una potencia máxima extraíble.

En Estados Unidos se encuentran los parques eólicos más grandes del mundo.

Los parques eólicos se pueden situar en tierra o en el mar (*ultramar*), siendo los primeros los más habituales, aunque los parques *offshore* han experimentado un crecimiento importante en Europa en los últimos años.

Figura 1.4 Parque eólico offshore, en Copenhague.

1.3.1 La opinión sobre los parques eólicos marinos y primeras iniciativas en España

La creciente preocupación en la opinión pública por el medio ambiente está llevando a la sociedad a plantearse nuevas formas de producir energía que dañen menos el entorno y asegure la supervivencia de nuestro planeta para generaciones futuras. Un ejemplo de energía alternativa es la eólica y las innovaciones dentro de este ámbito, en concreto la creación de parques eólicos en el mar. La energía eólica tiene una serie de ventajas como el hecho de ser una energía renovable, es limpia porque no produce emisiones ni residuos contaminantes, puede instalarse en espacios no aptos para otros fines (como el mar o el desierto), es compatible con otros usos del suelo (prados, etc.), tiene una instalación rápida y crea numerosos puestos de trabajo en las zonas de ensamblaje e instalación y además la situación actual permite cubrir la demanda de enegía en España en un 30%. Por el contrario, también tiene unos inconvenientes.

El mayor de ellos es que la energía eólica no puede ser utilizada como única fuente de energía eléctrica y tiene que ser utilizada con otras energías convencionales. Los grupos ecologistas españoles (y también a nivel europeo y mundial), están a favor de la energía eólica marina, y están haciendo todo lo posible para convencer a los gobiernos de que el cambio climático es una lucha y una tarea de todos, pero la última palabra la seguirán teniendo ellos, porque son los que realmente tienen el poder en sus manos para crear leyes y políticas acordes con un mayor respeto por el planeta. Una muestra de este escepticismo por parte de los políticos es el Ayuntamiento gaditano, el cuál mostró su rechazo a los parques eólicos marinos en el pleno, ya que se cree que existe poca información sobre este tema, así como la falta de consenso por parte de los municipios que se verían “afectados” por estos. Se ha hecho hincapié en que esta proposición ha trasladado a la opinión pública una información confusa y poco fiable sobre la instalación y ubicación de dicho

parque en las costas del noroeste de Cádiz. El “Mar de Trafalgar” es una de las primeras iniciativas en España, y estaría ubicado a 18 km de la costa y sería el primer parque eólico marino del país.

Es por esta creciente demanda de energía limpia y generada fuera de suelo urbano que se opta por hacer este tipo de embarcación en medidas reducidas para poder extrapolar su eficacia a la hora de maniobrar en un mar movido a estos grandes mástiles.

Figura 1.5 aerogenerador marino

Figura 1.6 Personal de mantenimiento trabajando en la góndola

1.4 Definición de quadcopter

Un quadcopter es una aeronave que se eleva y se desplaza por el movimiento de cuatro motores colocados en los extremos de una estructura en forma de cruz o equis.

Tal como se presenta en la figura 1.7, el vehículo dispone de 4 motores con sus respectivas hélices, se utiliza la velocidad de los motores para controlar la estabilidad y movimientos del vehículo.

Su mayor problema es el control ya que necesitan disponer procesadores potentes y sensores precisos para su estabilización, pero en los últimos tiempos estos aparatos han experimentado un auge debido a que la tecnología ha ido avanzando de forma que la carga computacional y la precisión han dejado de ser una barrera.

Figura 1.7 Estructura quadcopter

Del principio básico de funcionamiento de un quadcopter en forma de (X) se extrae la idea principal de control que proporciona una buena estabilidad, alta maniobrabilidad y robustez ante perturbaciones externas.

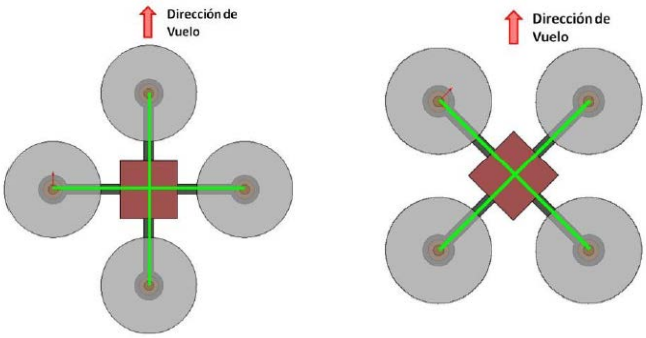


Figura 1.8 Configuración en cruz a la izquierda y configuración en (X) a la derecha

1.5 Objetivos

En este proyecto final de carrera se han implementado componentes electrónicos y dispositivos en una estructura mecánica. El objetivo principal es el desarrollo de una embarcación, haciendo uso de un micro-controlador y sensores adecuados, ya que tiene características sencillas para su diseño.

A continuación se exponen los objetivos que se han querido llevar a cabo en el proyecto:

Elección de materiales para construir un aparato de aproximadamente 1.5 Kg de peso y de un coste reducido.

Implementación en plataforma Arduino de un filtro que obtenga datos de orientación a partir de las mediciones de los sensores, acelerómetro y giroscopio.

Programación de un control PID que permita una regulación precisa del posicionamiento dinámico.

Control de velocidad de los motores brushless, mediante un micro-controlador.

Realización de pruebas de posicionamiento dinámico ante perturbaciones externas que verifiquen la validez del diseño.

La intencionalidad de este proyecto sería extrapolar la idea de TIPO de embarcación a tamaño real para ayudar al personal de mantenimiento de parques eólicos offshore en sus tareas con la máxima seguridad.

A la vez, la motivación de lograr unos objetivos personales siendo:

Aprender sobre vehículos Radio control (RC).

Ampliar conocimientos de electrónica.

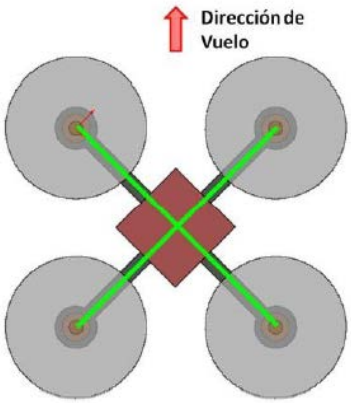
Practicar en el entorno Arduino.

2 Descripción funcional

2.1 Estructura:

En el caso del presente proyecto se distribuyen los motores de forma similar a la de un quadcopter en forma de (X).

La estructura de un quadcopter está formada por dos brazos se cruzan de forma ortogonal, en el extremo de los brazos se sitúan los motores y donde se cruzan, en el cuerpo central, se alojan los componentes electrónicos.



-La dirección de vuelo está situada a 45° de cada brazo.

-El movimiento sobre uno de los ejes afecta a los cuatro motores.

-Es menos intuitiva y más compleja de implementar que la configuración en cruz.

Figura 2.1 Configuración de motores

En el presente se disponen los cuatro motores en los laterales de las extremidades de sus cascos, orientados a 45º tipo aristas de una pirámide, dispuestos equidistantes entre ellos.El cuerpo central también abarca los componentes electrónicos, con ello se obtiene el centro de masas.

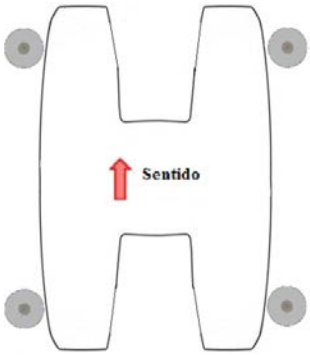


Figura 1.2 Embarcación con motores

Para esta estructura se utilizan:

-Tubo de PVC 50mm (5x400mm)

-Codos 87º PVC hembra-hembra 50mm (4uds) y codos 87º PVC hembra-macho 50mm (4uds)

-Codos 45º PVC hembra-hembra 50mm + tapon 50mm (2uds)

-Metacrilato 200x2100mm

-Bridas de PVC para tubo de 50mm (4+4uds)

-Cola para PVC

Cala de conexiones eléctricas IP55 mediadas 180x140mm

Figura 2.2 Material para la estructura flotante.

Debido a la gran potencia de los motores, se integra un flotador trasversal para evitar volcar.

2.2 Funcionamiento:

Una de las características más importantes para la posición dinámica es que el motor delantero-izquierdo y el motor trasero-derecho rotan en sentido anti-horario (10,11), los otros dos motores rotan en sentido horario (3,9) como observamos en la figura 2.3 Con ello, en posición estacionaria, los efectos giroscópicos y los momentos dinámicos tienden a cancelarse.

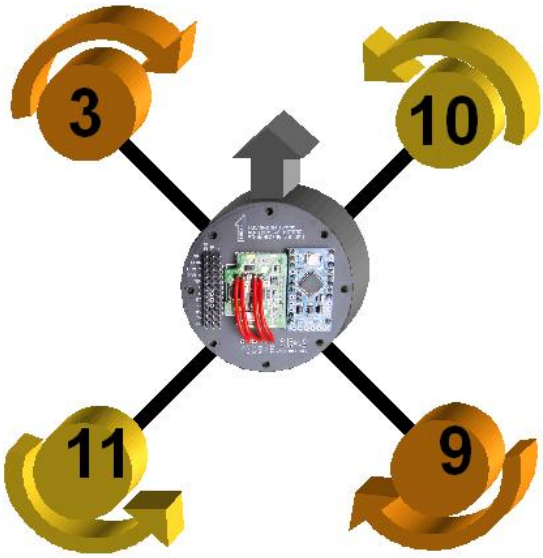


Figura 2.3 Funcionamiento rotores.

Como los cuatro motores producen el mismo empuje, las fuerzas producidas por los rotores generan momentos en direcciones contrarias que se contrarrestan llevando al sistema a una posición de equilibrio estático en el plano horizontal. Esta condición se cumple si la distancia desde el centro del fuselaje al eje de rotación de cada rotor es la misma entre brazos opuestos de la estructura:

$$\sum M_y = 0 \qquad \sum M_x = 0$$
$$-F_1(r) + F_3(r) = 0 \qquad F_2(r) - F_4(r) = 0$$
$$F_1 = F_3 \qquad F_2 = F_4$$

Fórmula 2 Equilibrio de momentos.

La embarcación, como vehículo acuático tiene 3 grados de libertad angulares, estos son roll, pitch y yaw. La combinación de estos tres movimientos mencionados hace posible maniobrar y conseguir el posicionamiento dinámico deseado.

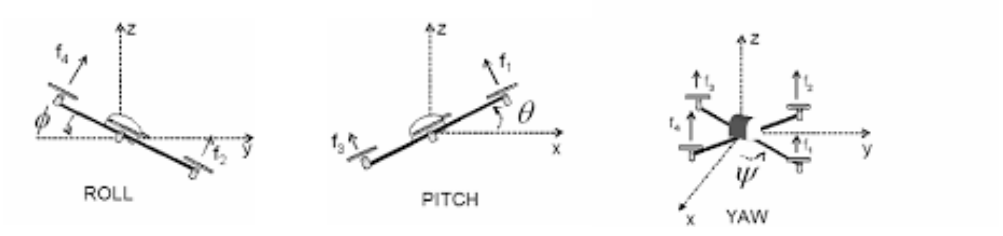


Figura 2.4 Grados de libertad

En función de la actuación de los motores conseguimos varios movimientos.

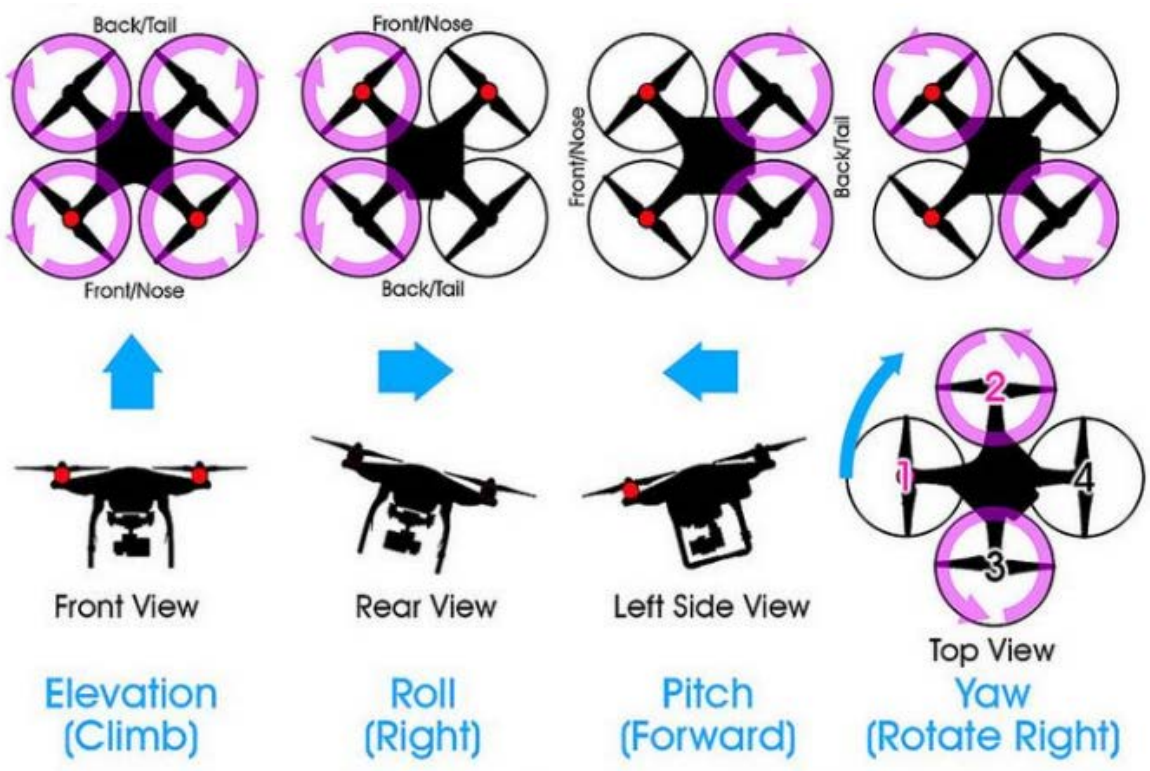


Figura 2.5 Movimiento de vehículo

Los motores sobre los que se indica la flecha con la dirección de movimiento representan los que aumentan su intensidad, sobre los que no hay indicación que representan los motores que disminuyen su intensidad.

Movimiento Vertical

Ascender, descender o mantener el vehículo estacionario variando simultáneamente la velocidad de los cuatro rotores.

Para elevar la embarcación aumentamos la velocidad de los motores hasta que la fuerza de sustentación generada por los 4 rotores sea mayor que la fuerza peso generada por la atracción gravitatoria.

Movimiento de tumbado (roll)

Este movimiento consiste en la rotación de la embarcación sobre el eje X, permitiendo que este pueda hacer movimientos laterales hacia derecha y hacia izquierda a lo largo del eje Y.

Para realizar un movimiento lateral hacia la derecha, los rotores 3 y 11 aumentan su velocidad, mientras los rotores 2 y 4 mantienen sus velocidades.

Para realizar un movimiento lateral hacia la izquierda, los rotores 10 y 9 aumentan su velocidad, mientras los rotores 3 y 11 mantienen sus velocidades.

Movimiento de inclinación (pitch)

Este movimiento consiste en la rotación del vehículo sobre el eje Y, permitiendo que pueda moverse hacia adelante y hacia atrás a lo largo del eje X.

Para moverse hacia adelante, los rotores 11 y 9 aumentan su velocidad, mientras los rotores 3 y 10 mantienen sus velocidades.

Para moverse hacia atrás, los rotores 3 y 10 aumentan su velocidad, mientras los rotores 11 y 9 mantienen sus velocidades.

Movimiento de giro (yaw)

Este movimiento se produce cuando el vehículo gira sobre su eje vertical Z.

Para girar hacia la derecha, los rotores 10 y 11 aumentan su velocidad, mientras los rotores 3 y 9 mantienen sus velocidades.

Para girar hacia la izquierda,los rotores 3 y 9 aumentan su velocidad, mientras los rotores 10 y 11 mantienen sus velocidades.

En ambos casos, se crea un giro contrario a las hélices que están rotando con mayor potencia.

2.3 Diagrama de bloques

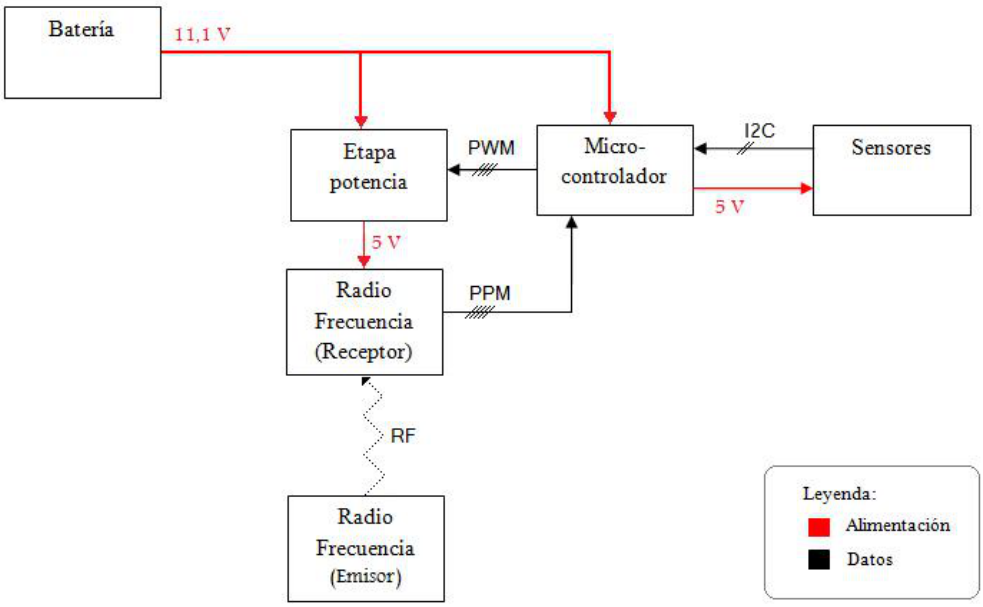


Figura 2.6 Diagrama de bloques

La embarcación se ha implementado según el diagrama de bloques de la figura 2.6

Para la alimentación del equipo se dispone de una batería de 11.1V que alimentará directamente la etapa de potencia y el micro-controlador, el receptor de radio frecuencia y los sensores tienen que alimentarse a 5V (TTL) y no pueden conectarse directamente a la batería.

En la etapa de potencia disponemos de unas salidas de 5V que nos permitan alimentar el receptor de RF, los sensores podrían utilizar la misma solución pero se ha optado por alimentarlos desde la placa del micro-controlador ya que su consumo es reducido y nos permite resetear la alimentación si detectamos que han sufrido un bloqueo.

En el micro-controlador se activaran 5 entradas digitales que recibirán información de los 5 canales PPM que se han configurados en la emisora RF.

El micro-controlador dispone de dos entradas analógicas que permiten recibir información de los sensores utilizando el protocolo I2C.

Cada una de las 4 salidas digitales PWM del micro-controlador se conectan a la respectiva etapa de potencia (ESC) para el control de los motores.

3 Circuito de potencia y alimentación

3.1 Etapa de potencia y alimentación

3.1.1 Baterías de polímero de litio (LiPo)

Son una variación de las baterías de iones de litio (Li-ion), sus características son muy similares, pero permiten una mayor densidad de energía, así como una tasa de descarga bastante superior.

Cada celda tiene un voltaje nominal de 3,7 V, voltaje máximo 4,2 V y mínimo 3,0 V. Este último debe respetarse rigurosamente ya que la pila se daña irreparablemente a voltajes menores a 3 voltios.

Se establece la siguiente nomenclatura XSYP que significa X celdas en serie, e Y en paralelo. Por ejemplo; 3s2p son 2 baterías en paralelo, cada una con 3 celdas en serie.

Ventajas de las baterías de polímero de litio:

- Mayor densidad de carga, por tanto tamaño reducido.
- Buena tasa de descarga, bastante superior a las de iones de litio.

Desventajas de las baterías de LiPo:

- Quedan casi inutilizadas si se descargan por debajo del mínimo de 3 voltios.
- Necesitan un cargador especial, la carga de cada celda se realiza de forma independiente.

Para este proyecto se necesitan unas baterías con un peso reducido y con capacidad de suministrar elevadas potencias, por lo que este tipo de baterías se adaptan perfectamente a nuestras necesidades.

Especificaciones:
Capacidad mínima**: 2200mAh**
Configuración: **3S1P/ 11.1v/ 3celdas**
Constante descarga: **25C**
Pico de descarga (10sec):**50C**
Peso: **169g**
Tamaño: **22x35x104mm**
Conector carga: **JST-XH**
Conector descarga: **XT60**

Figura 3.1. Batería LiPo utilizada en el proyecto

En la figura 3.1 observamos las características de la batería utilizada:

La capacidad de la batería indica que es capaz de suministrar **2,2 A.** durante una hora, antes de agotarse.

Tiene una configuración 3S1P, está formada por 3 células LiPo de 3.7 voltios en serie, suministrando 3 x 3.7 = **11.1V.**

La batería puede descargarse a 25C, puede suministrar 25 veces su capacidad, o sea 2.2A x 25 = **55A**, obviamente en estas condiciones tardará 1/25 de hora = 2.5 minutos en descargarse.

Durante 10 segundos podría soportar un pico de descarga de 50C, suministrando **110A.**

Consumo máximo de la embarcación (cuatro motores de 14A) es 14 A x 4 = **56 A,** que puede suministrar la batería de una forma ajustada.

La duración de la batería dependerá del consumo medio del aparato, con un consumo medio de 22 A podríamos utilizar la embarcación 1/10 de hora = 6 minutos.

Al escoger una batería con mayor capacidad para tener más autonomía, incrementaremos el peso del conjunto haciendo que aumente el consumo medio y no necesariamente ganaremos más minutos de posicionamiento dinámico ya que todo depende del estado del mar.

3.1.2 Electric Speed Control (ESC)

El término ESC del inglés (Electric Speed Control) o Controlador de Velocidad Electrónico, es el encargado de suministrar la señal trifásica necesaria para que los motores Brushless puedan girar.

El objetivo de este dispositivo es regular la potencia suministrada al motor, en función de una señal de control PWM.

Para el proyecto usaremos ESC ya fabricados y diseñados para este tipo de aplicaciones. Son los usados en aeromodelismo y vehículos RC.

Especificaciones:
Corriente nominal**: 25 A**
Corriente pico: **35 A**
Modo BEC: **Lineal**
BEC: **5V /2A**
Celdas LiPo: **2/ 4**
Tamaño: **24x45x11mm**
Peso: **22g**
Conector descarga: **XT60**

Figura 3.2. Electric speed Control utilizado en el proyecto

Admite una corriente de trabajo máxima de 25A, 35A de pico, que no sobrepasaremos (cada motor consume como máximo 14,5 A) para no poner en peligro la integridad del dispositivo.

Cada ESC tiene una salida BEC que proporciona 5V/2A, que nos permitirá alimentar otros dispositivos como el receptor emisora de radio y alguno más que en un futuro se pueda incluir.

El ESC puede ser alimentado por baterías LiPo de 2 a 4 células, en nuestro caso utilizaremos una batería de 3 células.

El control de estos dispositivos se realiza mediante una señal PWM (Modulación por ancho de pulsos) generada en la unidad de control (en este caso Arduino), la señal PWM tendrá una duración del estado alto entre 1ms. (motor parado) y 2 ms. (máxima velocidad).

3.1.3 Motor Brushless

Son motores de corriente continua que carecen de colector y escobillas. Estos motores son muy superiores a los motores DC con escobillas en dos aspectos: relación potencia-peso y eficiencia. Esto implica que la cantidad de energía eléctrica que se transforma en energía mecánica es mucho mayor.

Figura 3.3. Motor brushless outrunner

En vez de funcionar en DC, funcionan con una señal trifásica que aunque idealmente debería de tener una forma sinusoidal, en la práctica son pulsos haciendo que la señal sea una continua.

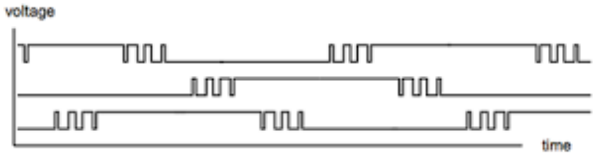


Figura 3.4 Señal de motor brushless

Dentro de la familia de los brushless, existen dos tipos diferentes, Inrunner y Outrunner.

En los motores Outrunner, los imanes están situados en el exterior de la estructura, por tanto se puede ver como gira la parte exterior del motor, giran mucho más despacio y el par es mucho mayor que los Inrunner. La mayor ventaja es el hecho de que no es necesaria una caja de cambios, lo que los hace más silenciosos. Son ligeramente menos eficientes que los Inrunner, pero es tan pequeña la diferencia que no debiera de ser un factor determinante a la hora de hacer la elección.

En los motores Inrunner, los imanes están en el interior de la estructura, y por tanto lo único que gira es el eje, son más eficientes pero necesitan de un elemento adicional entre el motor y la hélice. La parte negativa de los motores Inrunner es que estas partes adicionales suelen dar problemas.

El modelo elegido es, FC 28-22 Brushless Outrunner 1200kv, tal y como muestra la figura 3.5.

Especificaciones:
Peso**: 39 g**
Eje: **35 mm**
Longitud: **46 mm**
Diámetro: **28 mm**
Hélices sugeridas: **9/10 inch**
Voltage: **11.1V (3S)**
Kv: **1200 RPM/ V**
RPM**: 6100**
Corriente MAX**: 14.5 A**
Empuje**: 745 g**

Figura 3.5 Motor utilizado

Kv, es la característica principal de un motor brushless, significa la cantidad de vueltas (RPM) que gira motor por cada voltio de continua aplicado. Es decir que si a nuestro motor de 1200 Kv le aplicamos 11,1v girará a un máximo de 13320 RPM.

Para este proyecto se seleciona un motor con Kv bajo, de orden de 1000. Ya que la finalidad es el posicionamiento dinámico y no la velocidad, así que no se necesitan altas r.p.m. las cuales solo nos aportarían vibraciones innecesarias.

Se ha decidido utilizar motores brushless por ser más ligeros y eficientes que los DC clásicos, y dentro de los brushless, el Outrunner ya que se adapta mejor a las necesidades de la embarcación,ya que bajo el agua se refrigeran mejor y a menor velocidad (KV), mayor par motor.

En la documentación vemos que en una prueba del fabricante con hélices de 10x4.7 SF un motor proporciona un empuje de 745g en vacío. En nuestro caso se equipa con hélices D35×P1.4 obtenemos una fuerza de 500g, (*muestra experimental*) teniendo 4 unidades a 45º, se obtiene un empuje de 2000x Seno 45º = 1701g capaz de levantar la embarcación por lo que no se debería tener problemas ante perturbación externas considerables

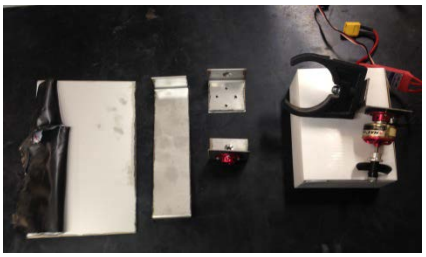


Figura 3.6 Soporte de motor a partir de chapa de acero inox de 1mm de grosor

3.2 Hélices

Las hélices son unos dispositivos mecánicos constituidos por un número variable de aspas (dos en nuestro caso), que giran sobre el eje del motor y crean una fuerza propulsora.

Utilizaremos hélices de plástico reforzado con grafito de dos aspas, para circular lento y con más fuerza, son más flexibles, tienen palas más anchas y soportan menos RPM que las de 3.

Utilizaremos dos tipos de hélices, dos con un perfil normal para los dos motores que giran en sentido anti horario y dos con el perfil invertido para los motores que giran en sentido horario.

Figura 3.7 Hélices HOBCH-P435D35×P1.4d4mm utilizadas en el proyecto

Figura 3.8 Portahélices para motores eléctricos de aeromodelismo y radiocontrol. Medidas: d5mm

Se mecaniza el interior de la hélice a 5,5mm para acoplarla en el portahélices.

4 Bloques de control.

4.1 Control batería

Descargar una celda de la batería LiPo por debajo de 3V la inutiliza, es muy importante que esto no ocurra y para ello se ha diseñado un circuito que detecta cuando la batería tiene una tensión inferior a 10.5 V (3.5 por celda), en ese instante hace sonar un zumbador de aviso y enciende un led rojo para informar que debemos parar de forma inmediata el ejercicio.

Hay una segunda protección, ya que si hacemos caso omiso de estos avisos los ESC están programados para dejar de absorber, de forma gradual, corriente de la batería cuando esta llegue a un valor inferior a 9.45 V (3.15 por celda) y paran los motores.

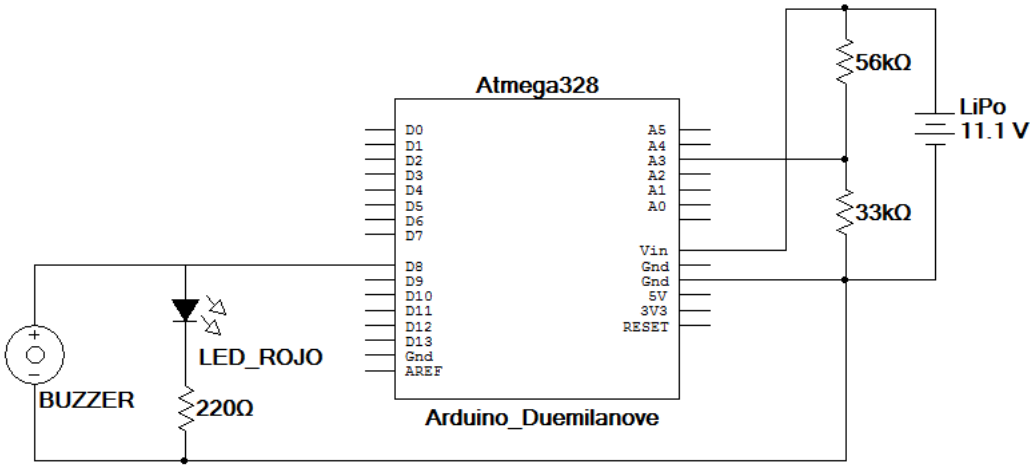


Figura 4.1 Circuito alarma de batería baja

El circuito implementado es el de la figura 4.1, utiliza una entrada analógica (A3) de la placa Arduino para medir a través de un divisor de tensión la carga de la batería.

Esta entrada analógica codifica con una resolución de 10 bits un valor de tensión de entrada entre 0 y 5V, obteniendo lecturas de 0 a 1023.

Cuando la batería LiPo tiene su máxima carga (12.6 V.), el divisor de tensión entregará a la placa Arduino 4.67V. (12,6*33/(33+56)) y esta medirá un valor de 955 (4.67*1023/5).

Cuando la batería LiPo llegue a la tensión de alarma (10,5 V.), el divisor de tensión entregará a la placa Arduino 3.89V. (10.5*33/(33+56)) y esta medirá un valor de 795 (3.89*1023/5).

En la versión final del programa de Arduino se tienen en cuenta las ocho últimas lecturas y se aplica la fórmula siguiente para conseguir que conseguir Vbat sea aproximadamente la tensión de la batería LiPo * 10 y no un valor aleatorio:

Vbat = suma de ocho ultimas lecturas/60

De forma que cuando el valor Vbat se inferior a 105 (10.5V.) se activa la salida digital D8, donde tenemos conectado el LED y el zumbador piezoeléctrico, en ese instante cada celda de la batería si esta estuviese equilibrada estaría cargada a 3.5V.

4.2 Controles motores

Para controlar la velocidad de los motores necesitamos que la placa Arduino entregue a los ESC una señal PWM con un ancho de pulso que varíe entre 1ms (mínima velocidad) y 2 ms (máxima velocidad).

La modulación por ancho de pulsos (también conocida como PWM, siglas en inglés de pulse-width modulation) de una señal o fuente de energía es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo (duty cycle) de una señal periódica (una cuadrada, en nuestro caso), ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga.

El ciclo de trabajo de una señal periódica es el ancho relativo de su parte positiva en relación con el período, expresado matemáticamente:

$$D = \frac{\tau}{T}$$

D es el ciclo de trabajo

τ es el tiempo en que la función es positiva (ancho del pulso)

T es el período de la función

Fórmula 4.1 Ciclo de trabajo

La PWM puede ser implementada en la placa Arduino de diferentes maneras, se han realizado pruebas con los dos métodos descritos a continuación, todos funcionan de forma optima y no se observan diferencias entre ellos.

En la embarcación se ha implementado el primer método “Instrucción Analog Write”, en las pruebas no se han observado diferencia entre ellas, pero es más simple y sencilla de programar al utilizar únicamente una instrucción incluida en el lenguaje Arduino.

También se ha descartado la utilización de la librería servo.h ya que trabaja con interrupciones y pueden entrar en conflicto con las interrupciones que utilizamos para la lectura de la señal PPM procedente del receptor de RC.

4.2.1 Instrucción analogWrite

El lenguaje de programación de Arduino posee la instrucción analogWrite(pin, dutyCycle), donde dutyCycle es un valor entre 0 y 255, y pin es uno de los PWM pins (3, 5, 6, 9, 10, or 11).

Está función se implementa dentro de la placa Arduino como un PWM con una frecuencia fija (mediante un factor de pre-escalado de 64), la frecuencia de la señal PWM será de aproximadamente 490 Hz y no será posible modificarla porque el valor de pre-escalado está fijo.

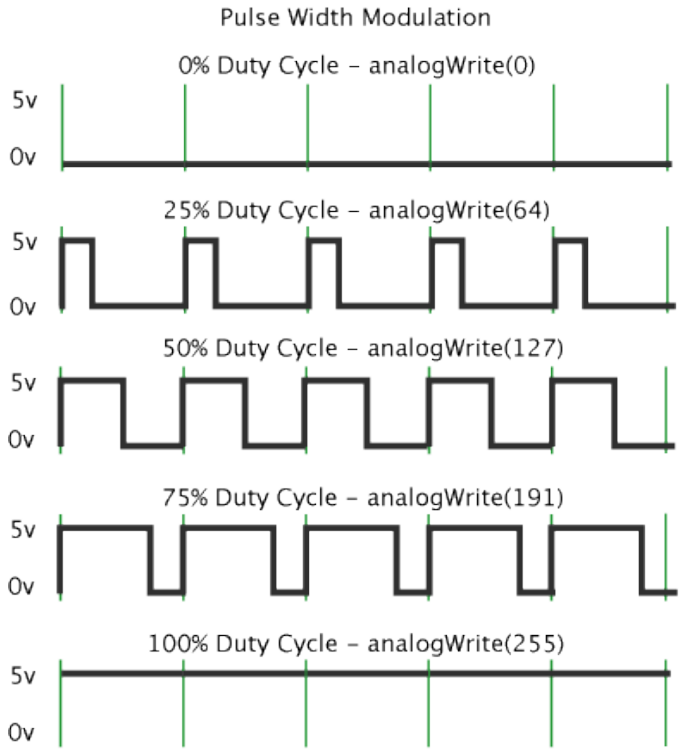


Figura 4.2 Señal PWM generada con Instrucción AnalogWrite

Para conseguir una señal PWM con un ancho de pulso que varíe entre 1 (mínima velocidad) y 2 ms (máxima velocidad), variaremos en la instrucción analogWrite el valor de dutyCycle entre 125 y 250, o lo que es igual trabajaremos con valores de duty cycle entre 125*100/255=49% y 250*100/255=98% .

4.2.2 Librería servo.h

La libreria servo.h permite a una placa Arduino controlar servo motores RC (hobby), generando pulsos entre 1 y 2 ms. de duración. Los servos estándar permiten que el eje se sitúe en varios ángulos, por lo general entre 0 y 180 grados.

La librería dispone de unas funciones que nos permitirán generar la señal PWM indicando la anchura del pulso en milisegundos (valores entre 1000 y 2000) o indicando el ángulo que debe situarse el eje del servo (valores entre 0 y 180).

La frecuencia de la señal PWM es fija y de aproximadamente 50 Hz., debido a que los servos sólo trabajan a esta frecuencia.

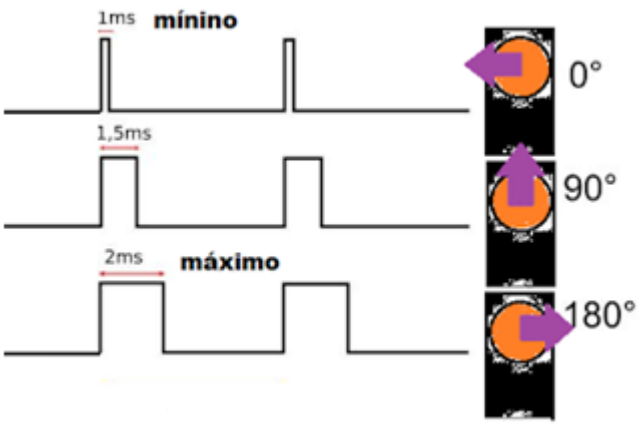


Figura 4.3 Señal PWM generada con librería servo.h

A pesar de que esta librería está pensada para mover servos, si en lugar de servo se conecta un ESC y un motor brushless se pueden controlar sin problema alguno.

4.3 Sensores

4.3.1 Giroscopio

El **giroscopio** es un dispositivo electrónico que se utiliza para medir la orientación en el espacio de algún aparato o vehículo, un giroscopio detecta el giro sobre un eje y nos proporcionan información acerca de la velocidad angular de dicho movimiento.

Cuando la embarcación está en reposo (sin perturbaciones) las lecturas de velocidad angular en cada uno de los ejes han de ser cero, por esta razón escogemos el momento previo al arranque para ajustar el offset de las medidas del giroscopio y obtener una lectura inicial cero.

Como giroscopio, utilizaremos el integrado que lleva la expansión Wii motion +, esta pequeña tarjeta recoge datos analógicos de los tres giroscopios y con un módulos ADC de 14 bits (13+signo) los digitaliza para transmitirlos por un bus I2C. Se alimenta de 5V y consume 10mA.

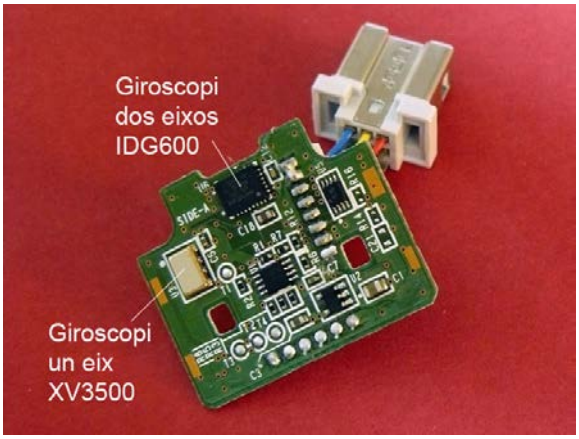


Figura 4.4 Giroscopio Wii motion +

Obtendremos lecturas digitales en un rango de ± 8192 en dos posibles escalas (fast y slow), si la lectura se recibe con el bit de slow activo el valor recibido se ha de dividirse por 5 para un correcto funcionamiento.

De forma empírica podemos comprobar que dividiendo el valor obtenido anteriormente por 4 obtenemos una lectura de velocidad angular en grados/segundo y dividiéndolo por 200 la obtendríamos en radianes/segundo.

4.3.2 Acelerómetro

El acelerómetro es un instrumento electrónico que medirá todo tipo de aceleraciones sobre cada uno de los ejes.

Se utiliza para medir la aceleración gravitatoria, cuando la embarcación está en reposo (sin perturbaciones) las lecturas de aceleración han de ser cero en los ejes x e y, pero el eje z debe indicar la aceleración de la gravedad, por esta razón escogemos un momento que tengamos la embarcación completamente nivelada para ajustar los offset de las medidas del acelerómetro y obtener una lectura inicial ajustada.

Figura 4.5 Calibración a nivel

Como acelerómetro usaremos el integrado que contiene el mando nunchuck de la Wii, es un acelerómetro de tres ejes, con un módulo ADC de 9 bits que dará una salida del rango de 0 a 511.

Figura 4.6 Acelerómetro nunchuck

La aceleración de la gravedad (g) dará una lectura inicial de 200, por lo que podremos medir aceleraciones de hasta 2.5g en cada eje.

4.3.3 Lectura de sensores

Para su manejo y estabilidad la embarcación dispone de dos tipos de sensores diferentes:

-Acelerómetro: Es el dispositivo que mide todo tipo de aceleraciones, pero nos interesaran asociadas a la gravedad terrestre.

-Giroscopios: Es un dispositivo que mide velocidades angulares, nos informara si cuadricóptero se ha estabilizado o está sujeto a algún tipo de movimiento angular.

Conectaremos ambos sensores en modo pass-through, el nunchuck se conectará a la placa wii motion + y esta al Arduino, de este modo los dos actuarán como un único sensor.

Utilizando el protocolo I2C (ver anexo 1) a una velocidad de 100 kbits/s, lo que implica que cada bit se transmite en 1s/100k = 10µs, los sensores se comunicaran con la unidad de control y le informaran de los datos de velocidad angular y aceleración medidos en cada instante.

Enviando a la dirección 0x53 (esclavo) los bytes 0xF0 y 0x55 se inicia la wii motion + (giroscopio), posteriormente enviando a la misma dirección 0x53 los bytes 0xFE y 0x05 se activa el nunchuck (acelerómetro) en modo pass-throuht, tras el inicio la dirección del esclavo cambia a la 0x52.

Para recibir datos enviaremos un byte cero a la dirección 0x52 y seguidamente solicitaremos una petición de lectura de seis bytes, podremos solicitar una transferencia cada 3 milisegundos (tiempo mínimo entre transferencias) y recibiremos una de la wii motion +, una de nunchuck y así sucesivamente.

	Bit							
Byte	7	6	5	4	3	2	1	0
0	Yaw Down Speed<7:0>							
1	Roll Left Speed<7:0>							
2	Pitch Left Speed<7:0>							
3	Yaw Down Speed<13:8>						Yaw slow mode	Pitch slow mode
4	Roll Left Speed<13:8>						Roll slow mode	Extension connected
5	Pitch Left Speed<13:8>						1	0

Figura 4.7 Información de velocidad angular enviada por Wii motion +

	Bit							
Byte	**7**	**6**	**5**	**4**	**3**	**2**	**1**	**0**
0	SX<7:0>							
1	SY<7:0>							
2	AX<9:2>							
3	AY<9:2>							
4	AZ<9:3>							Extension connected
5	AZ<2:1>		AY<1>	AX<1>	BC	BZ	0	0

Figura 4.8 Información de aceleración enviada por nunchuck

4.4 Unidad de medición inercial (IMU)

La IMU es el componente principal de los sistemas de navegación inercial usados en aviones, naves espaciales, buques y misiles guiados entre otros.

Los datos recogidos por los sensores son procesados en la IMU y permiten al control conocer la orientación del aparato.

Para estabilizar la embarcación no es necesario conocer su posición exacta sino que se debe conocer la orientación (ángulos) y las velocidades de giro; estos datos los debe calcular la IMU basándose en los datos que proporcionan acelerómetro y giroscopio.

4.4.1 Filtros complementarios

La forma más obvia es utilizar el acelerómetro para medir el ángulo y el giroscopio para medir la velocidad angular como muestra la figura 4.9

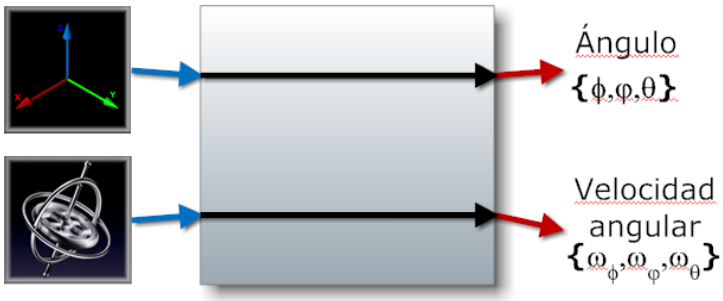


Figura 4.9 Filtro complementario (1)

La ventaja de esto es que no existe procesado ninguno y se obtienen las muestras sin retardo. El inconveniente principal es que el acelerómetro es muy sensible todas las aceleraciones lineales (vibraciones y desplazamientos lineales) por lo que los parámetros de salida serán muy ruidosos y con errores durante los desplazamientos.

Para minimizar el efecto del ruido es conveniente filtrar (con un filtro paso bajo) la señal del acelerómetro, tal y como vemos en la figura 4.10

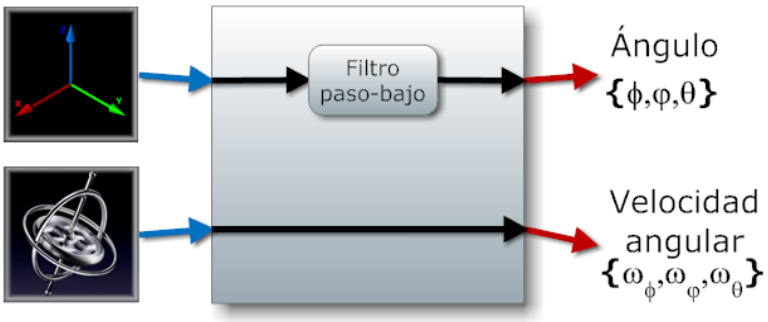


Figura 4.10 Filtro complementario (2)

La ventaja de este sistema es que es muy fácil de programar y el filtro elimina los ruidos y las aceleraciones lineales. Sin embargo esto produce un retardo en la percepción del ángulo, lo cual puede provocar problemas en la estabilización.

Pero podríamos añadir tal y como vemos en la figura 4.11 los datos recogidos por el giroscopio para eliminar el retardo:

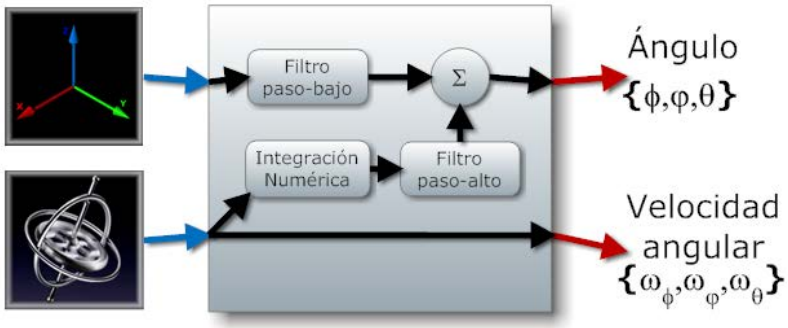


Figura 4.11 Filtro complementario (3)

No se pueden utilizar los datos del giroscopio directamente (integrados en el tiempo para pasar de velocidad angular a ángulo) dado que este tiene una deriva temporal que los inutiliza, sin embargo, a corto plazo sirven para eliminar el retardo producido por el filtro aplicado al acelerómetro.

La idea es usar la medición obtenida por el giroscopio para tiempos cortos y realizar la corrección de su deriva con la medición realizada por el acelerómetro en tiempos largos, debido a que esta última medición tiende a ser la aceleración de la gravedad para períodos largos En código se traduce en la siguiente ecuación:

$$Angle = \alpha \cdot (Angle + gyro \cdot dt) + (1 - \alpha) \cdot acc$$

Fórmula 4.2. Filtro complementario.

El valor de la velocidad angular se obtiene directamente de los datos que proporciona el giroscopio y los ángulos de inclinación se obienen aplicando el cálculo anterior a los datos del giroscopio y acelerómetro.

Esta es la técnica que aplicaremos, se llama **Filtros complementarios**, y tiene múltiples ventajas:

- Reduce el ruido y la deriva producido por los sensores
- Reduce el retardo en la estimación del ángulo
- No implica un coste excesivo en tiempo de proceso

4.4.2 Calculo del ángulo de inclinación

Los datos de la fuerza gravitacional de cada eje {Gx,Gy,Gz} y un simple cálculo matemático nos permiten calcular los ángulos de inclinación de la embarcación tan (AXZ) = Gx / Gz => AXZ = atan2 (Gx, Gz) => Agulo Roll tan (AYZ) = Gy / Gz => AYZ = atan2 (Gy, Gz) => Angulo Pitch

El ángulo de yaw no se podrá calcular con los datos de la fuerza de gravedad, se corregirá a partir de los datos del giroscopio.

Se observa que para el cálculo del ángulo de inclinación se necesita conocer la fuerza gravitacional de cada eje en cada momento, y se podría pensar que los datos del acelerómetro son suficientes para este cálculo, pero en estos datos no son confiables. El acelerómetro mide la fuerza de inercia, una fuerza puede ser causada por la gravitación, pero también puede ser causada por la aceleración (movimiento) del dispositivo. La realidad nos indica que un acelerómetro mecánicamente estable es muy sensible a las vibraciones y el ruido mecánico en general, por lo que la mayoría de los sistemas IMU utilizan un giroscopio para suavizar cualquier error de acelerómetro. El giroscopio no está libre de ruido, pero al medir la rotación es menos sensible a los movimientos mecánicos lineales, el tipo de ruido que sufre de acelerómetro. Los giroscopios tienen otro tipo de problemas, como por ejemplo la deriva, pero haciendo un promedio de los datos que provienen del acelerómetro y del giroscopio se pueden obtener una relativa mejor estimación de la inclinación del dispositivo, se necesita obtener un vector estimado de fuerza gravitacional G_{est} = {G_{estx}, G_{esty}, G_{estz}} a partir de los datos de acelerómetro y giroscopio.

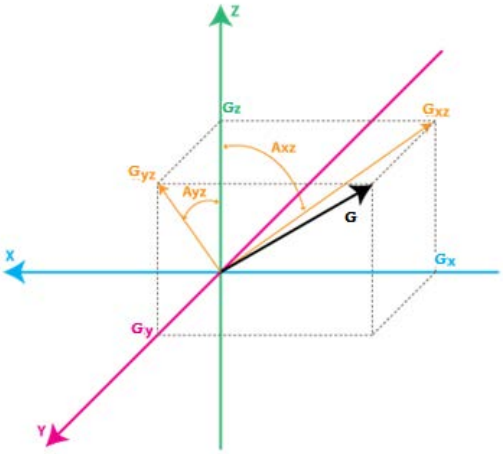


Figura 4.11 Proyección del vector G en tres dimensiones

Haremos una primera estimación del vector G_{est} a partir de los datos del giroscopio, $G_{est\ 1}$.

En 3 dimensiones la cosa se complica ya que al girar uno de los ejes la rotación en los otros dos se ve afectada, las rotaciones no son independientes ni conmutativas por lo que deberemos aplicar la matriz de rotación.

Utilizando los ángulos de Euler en la matriz de rotación se tiene la siguiente expresión:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi & \sin\phi\sin\theta\cos\psi - \cos\phi\sin\psi & \cos\phi\sin\theta\cos\psi + \sin\phi\sin\psi \\ \cos\theta\sin\psi & \sin\phi\sin\theta\sin\psi + \cos\phi\cos\psi & \cos\phi\sin\theta\sin\psi - \sin\phi\cos\psi \\ -\sin\theta & \sin\phi\cos\theta & \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix}$$

Fórmula 4.3 Matriz de rotación.

En nuestro caso como los ángulos que puede girar el cuadricóptero en 3ms. (tiempo entre medidas) son pequeños podemos aproximar los senos por su arco, los cosenos a 1 y suponer velocidad angular constante, quedando la matriz de rotación simplificada:

$$R(dt) = \begin{pmatrix} 1 & -d\,\Theta z & d\,\Theta_y \\ d\,\Theta z & 1 & -d\,\Theta_x \\ -d\,\Theta_y & d\,\Theta_x & 1 \end{pmatrix}$$

$$\Theta_z = \omega_z \cdot dt \qquad \Theta_y = \omega_y \cdot dt \qquad \Theta_x = \omega_x \cdot dt$$

Fórmula 4.4 Aproximación matriz de rotación.

Donde ω_x, ω_y y ω_z, son los datos obtenidos del giroscopio y dt el tiempo transcurrido entre dos lecturas, suponiendo que en ese instante la velocidad angular es contante

Con la lectura del giroscopio (ω_x, ω_y y ω_z) y la estimación del instante anterior $G_{est}(n-1)$, calculamos una primera estimación $G_{est1}(n)$ para el instante n multiplicando matrices.

Gest1(n) = Gest(n-1)* R(dt)

La estimación del giroscopio $G_{est\ 1}$= {G_{est1x},G_{est1y},G_{est1z}}y los datos del acelerómetro G = {G_x, G_y, G_z} se aplican en un filtro complementario para encontrar los valores estimados finales.

$G_{est}(n)$ = (G(n)+ Gest1(n) * wGyro) / (1 + wGyro)

Solo queda calcular los ángulos:

Angulo Roll = atan2 (G_{estx}, G_{estz}) // Angulo pitch = atan2 (G_{esty}, G_{estz})

4.5 Módulo de Radio frecuencia

Usaremos la radiofrecuencia para el control y el manejo del sistema a distancia, mediante una emisora típica de radiocontrol (RC).

Para controlar la embarcación necesitamos disponer de un mínimo de 5 canales, uno para controlar el giro sobre cada eje (roll, pitch, yaw), un cuarto canal para el movimiento vertical (gas) y el último canal nos permitirá armar y desarmar los motores para seguridad del piloto al manipular el aparato.

Figura 4.13 Emisora RC de 9 canales utilizada en el proyecto

Hemos decidido utilizar la emisora de 9 canales RC Turnigy 9X 2.4G 9 channel, que muestra la figura 4.13

Dispone de un emisor y un receptor, la comunicación entre ellos se realiza en la banda de 2.4 Ghz utilizando tecnología DSS (distribución dinámica de espectro) para evitar interferencias con otras emisoras próximas.

Utilizaremos modulación PPM (Modulación por Posición de Pulso), es la más extendida y se caracteriza porque la señal emitida es analógica, pudiendo emplear receptores y emisoras de distintas marcas ya que la compatibilidad es 100%.

La emisora también dispone de modulación PCM (Modulación por Pulso Codificados), en este caso la señal emitida es digital y más inmune a interferencias, pero no la utilizaremos al ser más compleja de procesar por el micro-controlador.

El emisor se encarga de transmitir al receptor (situado en la embarcación) las órdenes dadas por el piloto moviendo los sticks o interruptores de mando y el receptor las envía a la placa Arduino para que las procese y convierta en consigna de velocidad para cada motor.

4.5.1 Lectura Emisora

Utilizaremos una emisora RC en la que habilitamos 5 canales PPM, conectaremos a los pines D2, D4, D5, D6 y D7 de la placa Arduino al receptor de la emisora.

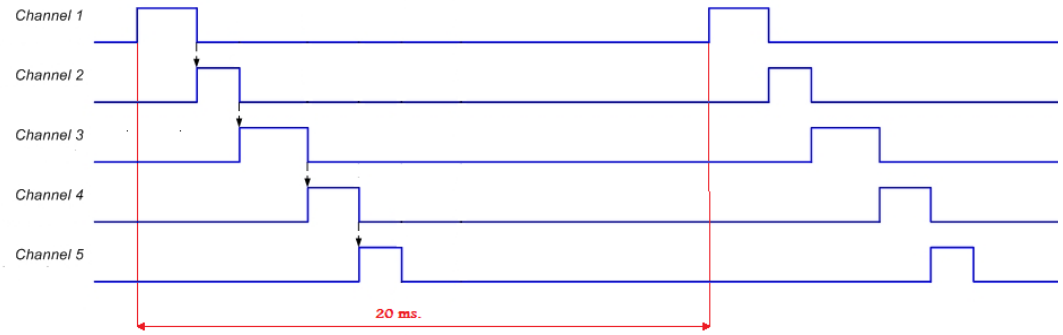


Figura 4.14 señal PPM emisora RC

La emisora envía cada 20ms. (50 Hz.) un pulso por cada canal con una duración que puede variar entre 1ms. (minimo) y 2 ms. (máximo), cuando termina de enviar la información de un canal comienza la del siguiente y así hasta enviar la información de todos los canales.

El término empleado para esta señal PWM en emisoras de radio suele ser **PPM** ("pulse position modulation") al considerar como tal la posición del flanco descendente del pulso.

El análisis de la señal PPM puede ser implementada en la placa Arduino de diferentes formas, se han realizado unas primeras pruebas con un solo canal utilizando la instrucción pulseIn(), pero finalmente se han utilizado interrupciones de tipo PCINT (se activan ante un cambio de valor), se leerá el valor de la señal en bajo nivel (actuando directamente sobre el registro PORT) en el momento que se activa la interrupción.

4.5.2 Registro PORT

Los registros de PORT permiten manipular los pines de la placa Arduino en bajo nivel y de manera más rápida, tenemos tres puertos:

B (pines digitales del 8 al 13)

C (entradas analógicas)

D (pines digitales del 0 al 7)

Cada puerto es controlado por tres registros:

El registro DDR, determina si el pin es una entrada o una salida.

El registro PORT controla si el pin está en nivel alto o en nivel bajo.

El registro PIN permite leer el estado de un pin que se ha configurado como entrada.

El PORTD mapea los pines digitales del 0 al 7 y sus registros son:

DDRD - Registro de configuración del puerto D - lectura/escritura.

PORTD - Registro de datos del puerto D - lectura/escritura.

PIND - Registro de pines de entrada - solo lectura.

4.5.3 Interrupciones PCINTx

Esta interrupción se dispara cada vez que se detecta un cambio de nivel lógico 1 a 0 o viceversa en cualquiera de los pines de los puertos habilitados.

Hay que habilitar el bit que identifica el puerto donde se encuentran los pines que generarán las interrupciones, estos bits están ubicados en el registro PCICR (Pin Change Interrupt Control Register).

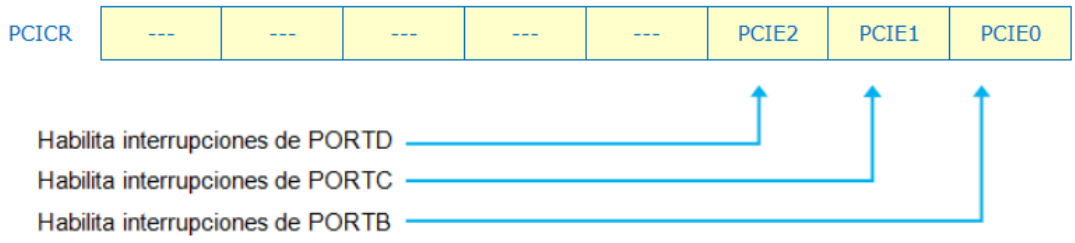


Figura 4.15 Registro PCICR

Luego se deben habilitar los bits enable que identifican individualmente los pines de los puertos, estos bits se encuentran en los registros de máscara PCMSK (Pin Change Mask Register).

Registro de máscara	Puerto
PCMSK0	PORTB
PCMSK1	PORTC
PCMSK2	PORTD
---	---

Figura 4.16 Registros PCMSKx

Cada bit del registro de máscara PCMSK corresponde a su respectivo pin de PORT. Por ejemplo, si habilitamos los bits 4 y 7 de PCMSK2, estaremos habilitando las interrupciones de los pines 4 y 7 de PORTD.

Una vez producido el cambio de nivel en uno o varios de los pines habilitados para interrupción, se activará el flag respectivo PCIF (Pin Change Interrupt Flag) del registro PCIFR y luego se llamará a la función de interrupción ISR. Así como hay un bit enable para cada puerto, en este nivel también hay un bit de flag correspondiente.

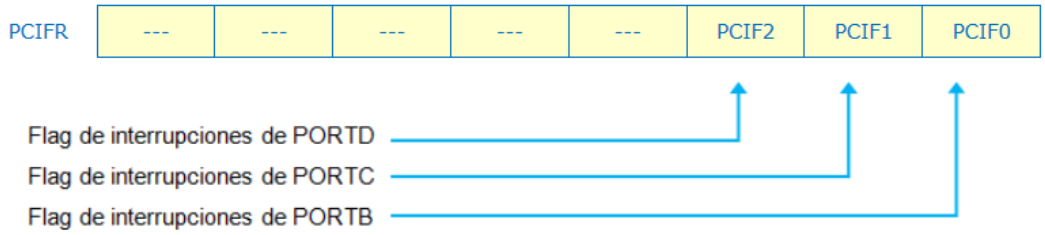


Figura 4.17 Registro PCIFR

El flag PCIF será limpiado por el hardware al ejecutarse el gestor de interrupción ISR, debemos tener en cuenta que hay un Vector de Interrupción [de Cambio de Pin] por cada puerto de AVR, llamados PCINT0_vect, PCINT1_vect y PCINT2_vect . La activación del flag PCIFx conducirá a la ejecución de la función ISR identificada por el vector PCINTx_vect.

4.6 Control PID

El algoritmo PID (Proporcional, Integral, Derivativo), es un conocido algoritmo de control por realimentación para sistemas lineales. La finalidad de este algoritmo es calcular la desviación o error entre un valor medido y el que se quiere obtener o referencia para aplicar una acción correctora que ajuste el proceso.

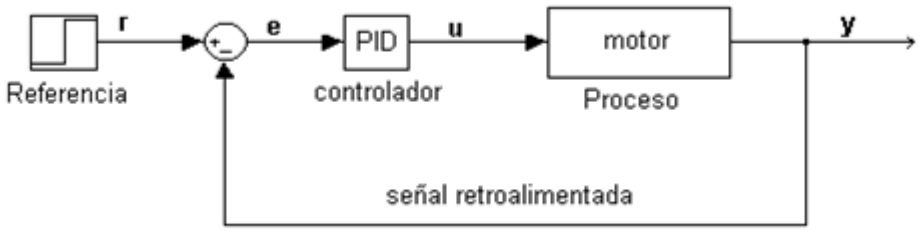


Figura 4.18 Esquema de un control PID (1)

Hay que controlar cada uno de los tres ejes de rotación por separado, por lo que el controlador final se compondrá de tres controladores PID independientes, uno por cada eje.

La ley de control PID viene dada por la siguiente ecuación:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau)\, d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

Fórmula 4.5 Algoritmo PID.

Dicho algoritmo cuenta con una entrada y una salida. La entrada e(t) es el error obtenido, la diferencia entre el ángulo de referencia y el ángulo actual. La salida u(t) es la potencia que necesitaremos aplicar al motor para corregir la desviación del error que hemos obtenido.

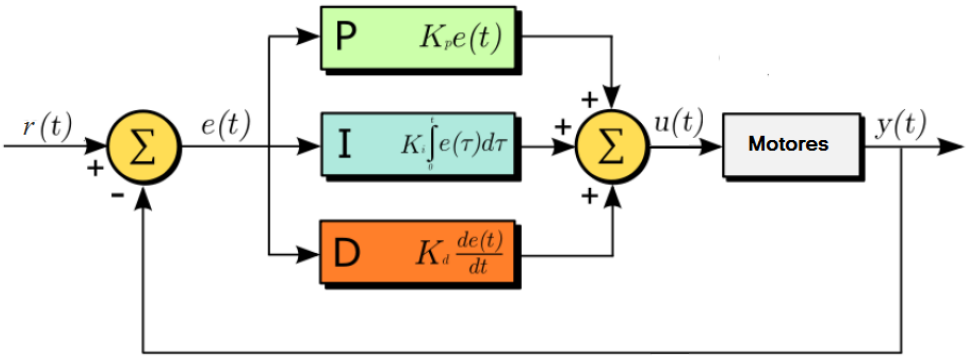


Figura 4.19 Esquema de un control PID (2)

La salida u(t) se genera sumando los tres términos componen el algoritmo, Proporcional, Integral y Derivativo.

- Proporcional, se obtiene de multiplicar el error de entrada por la constante Kp. Esta parte es la que se define como acción-reacción pues no considera el tiempo, un Kp demasiado grande llevaría al sistema a ser inestable, uno demasiado pequeño tiene como consecuencia un error grande.

- Integral, Se obtiene de multiplicar la integral del error por la constante *Ki*. Esta parte del algoritmo se calcula sumando los errores que hemos ido obteniendo, con la finalidad de compensar el error hasta cancelarlo.

- Derivativo, se obtiene de multiplicar la derivada del error por la constante denominada *Kd*. La finalidad es mantener el error al minino corrigiéndolo proporcionalmente con la misma velocidad que se produce.

Los valores de los parámetros Kp, Ki y Kd hay que ajustarlos para obtener una acción correctora precisa, si realizamos un ajuste manual hay que tener en cuenta:

Kp – Aplica una fuerza correctiva proporcional a la desviación, un Kp alto hará más sólido y estable el cuadricóptero hasta que el Kp sea tan alto que empieza a oscilar y se pierda el control, un Kp bajo provocara deriva haciendo muy inestable el aparato.

Ki – Aplica una fuerza correctiva proporcional a la desviación acumulada, un Ki alto aumenta la capacidad de mantener la posición inicial y de reducir la deriva, pero también aumenta el retraso a volver a la posición inicial, disminuyendo el valor de Ki mejorará la reacción a los cambios, pero aumentará la deriva.

Kd – Aplica una fuerza correctiva proporcional al incremento de desviación, un valor alto de Kd (es negativo, más próximo a cero) hará que la embarcación recupere muy rápido su posición inicial, pero si Kd es muy alto empieza a oscilar, bajar el valor de Kd hace más lento el recuperar la posición inicial.

4.7 Micro-controlador

El micro-controlador usado será Arduino que es una plataforma libre, fácil de programar y económica, básicamente es una placa de circuito impreso que contiene un micro-controlador de la marca “ATMEL” con suficientes entradas y salidas (E/S) tanto digitales como analógicas para llevar a cabo el proyecto.

La plataforma Arduino al ser un sistema “Open Source” ha permitido que muchas personas se interesen en utilizarla para proyectos y luego compartirlos en internet.

Al disponer de una, se ha utilizado la placa Arduino Duemilanove con un microcontrolador ATmega328, con 14 E/S digitales (6 PWM) y 6 entradas analógicas cada una de ellas proporciona una resolución de 10bits (1024 valores), aunque con una placa Arduino Nano hubiese sido suficiente para completar este proyecto.

Este sistema se puede alimentar mediante el cable USB o una entrada externa sin estabilizar entre 7 V y 12 V para un rendimiento óptimo. Es útil para alimentar algún módulo de bajo consumo ya que la placa Arduino dispone de salidas de alimentación a 5 y 3.3 V.

El ATmega328 tiene 32KB de memoria flash para almacenar código (2KB son usados para el arranque del sistema (bootloader), 2 KB de memoria SRAM y 1KB de EEPROM que podemos utilizar para leer o escribir datos de nuestra configuración.

En la placa Arduino recibiremos información de los sensores (I2C) y de la emisora de la radio frecuencia (PPM) que procesaremos para controlar la velocidad de cada uno de los motores brushless (PWM).

Figura 4.20 Placa Arduino Duemilanove

4.7.1 Memoria EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only))

El micro-controlador de la placa Arduino **Duemilanove** tiene 1KB de memoria EEPROM (no volátil), cuyos valores se mantienen cuando la placa está apagada (como un pequeño disco duro).

Utilizaremos esta memoria para almacenar los coeficientes PID, ajustes de acelerómetro, etc., pudiendo modificar estos valores sin tener que recompilar de nuevo todo el programa.

Para acceder a la memoria EEPROM se utiliza una de las librerías AVR que vienen con el software Arduino.

```
#include <avr/eeprom.h>
```

Si incluimos la librería estarán disponibles entre otras las dos funciones necesarias para 'escribir a' y 'leer desde' la memoria EEPROM:

Para leer un bloque de datos de la eeprom existe la función:

```
void  eeprom_read_block (void *__dst, const void *__src, size_t __n)
```

Esta función recibe como parámetro un puntero que contiene la dirección destino, otro que contiene la dirección fuente y un entero que contiene la cantidad de datos a leer.

Para escribir un bloque de datos a la eeprom existe la funcion:

```
void    eeprom_write_block (const void *__src, void *__dst, size_t __n)
```

Esta función recibe como parámetro un puntero que contiene la dirección destino, otro que contiene la dirección fuente y un entero que contiene la cantidad de datos a escribir.

5 Ensayos

5.1 Prueba características motor brushless

En el primer ensaño sirvió para realizar pruebas sobre motores brushless, para ello se ha utilizado el montaje que muestra la figura 5.1

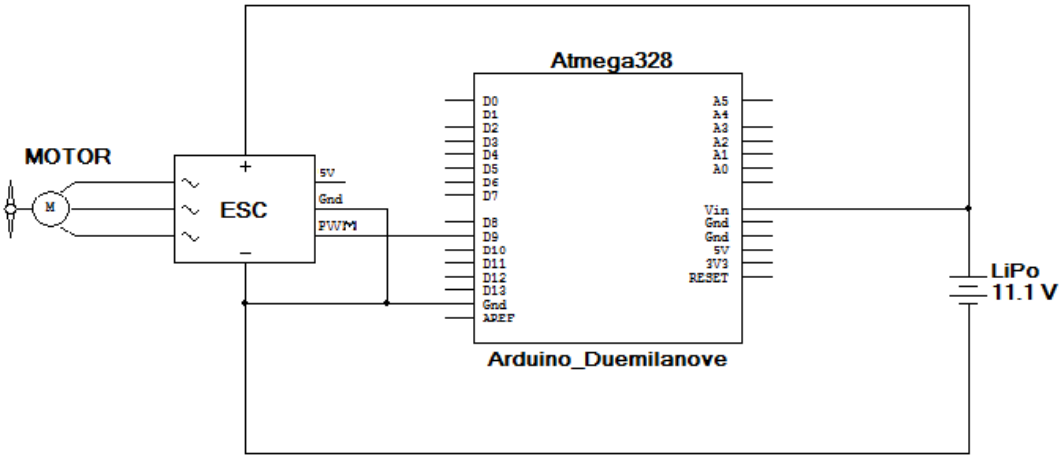


Figura 5.1 Circuito prueba motor brushless

Verificamos que era posible controlar la velocidad de un motor desde el teclado del PC variando el ancho de pulso de una señal PWM generada por distintos procedimientos, función analogWrite, y librería servo.h.

También se verificaron los datos de empuje y consumo facilitados por el fabricante para el motor FC 28-22 Brushless Outrunner 1200kv en función del ancho de pulso PWM, obteniendo los resultados que muestra la figura 5.2 y 5.3.

Vemos que el consumo y el empuje están directamente relacionados, si necesitamos aumentar el empuje, el consumo del motor aumentará en la misma proporción.

El consumo máximo medido de 13,5 amperios no llega a los 14,5 que indica el fabricante como valor máximo posiblemente debido a tolerancias del motor y que el estado de carga de la batería durante la prueba no era el máximo.

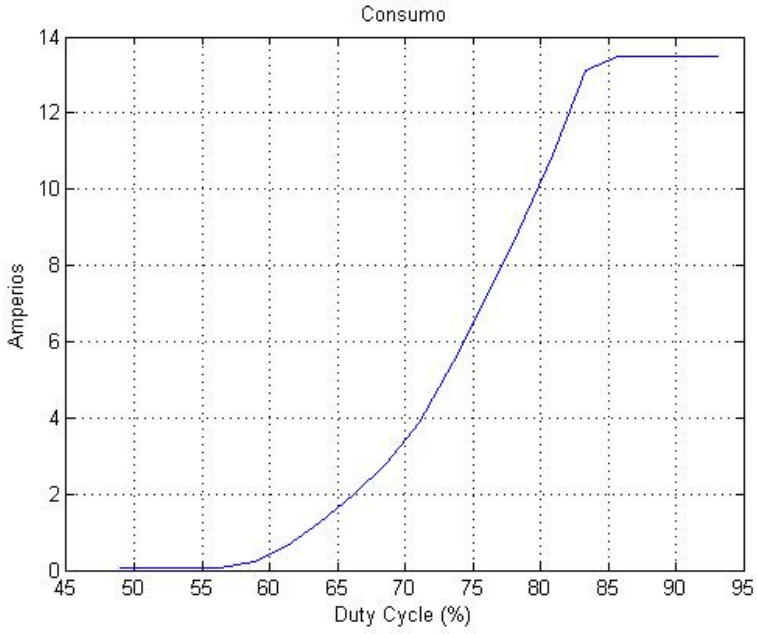


Figura 5.2 Gráfico consumo motor FC 28-22 Brushless Outrunner 1200kv

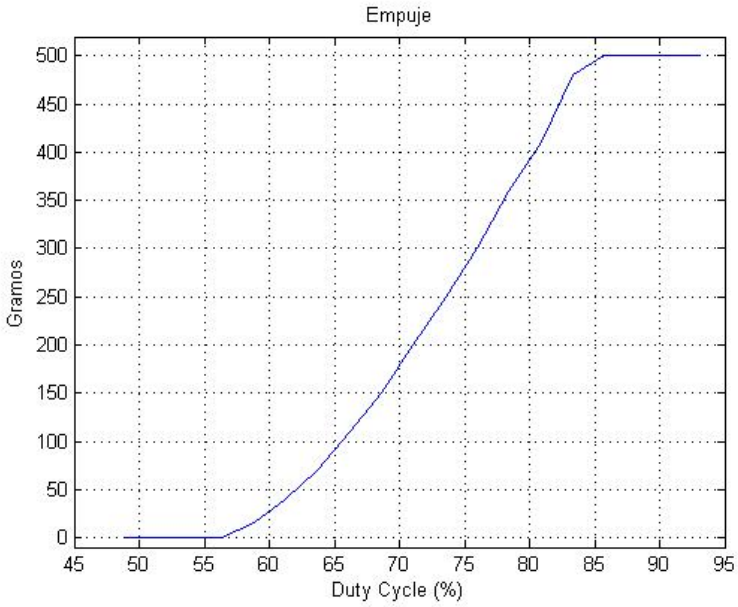


Figura 5.3 Gráfico empuje motor FC 28-22 Brushless Outrunner 1200kv

El empuje de 500g. es inferior a los algo más de 700 que indica el fabricante para el conjunto motor y hélice utilizada, posiblemente la diferencia se debe a que la medida se hizo con un montaje y una bascula casera que no permitió obtener la precisión requerida.

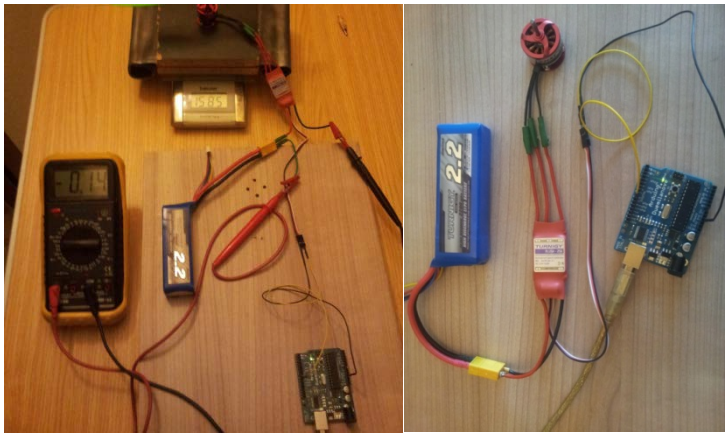


Figura 5.4 Prueba empuje y consumo del motor

La figura 5.4 muestra el montaje que se realizó en esta primera prueba, se medió el consumo de la batería LiPo con un amperímetro y para medir el empuje del motor se utilizó una báscula.

Con el motor parado la báscula registra el peso del conjunto motor, hélice y una lámina de plomo donde estaba anclado el motor.

Con el motor en marcha el peso medido en la báscula disminuye debido a la fuerza de empuje de las hélices. El empuje se calcula como la diferencia entre peso inicial y el peso que la báscula indica durante la prueba.

5.2 Prueba calibración sensores

En la figura 5.5 vemos el montaje utilizado en este ensayo para verificar la información enviada por los sensores a la placa Arduino, se van realizando movimientos a todo el montaje sobre cada uno de los ejes y se verifican los datos recibidos de velocidad angular y aceleración corresponden con los esperados.

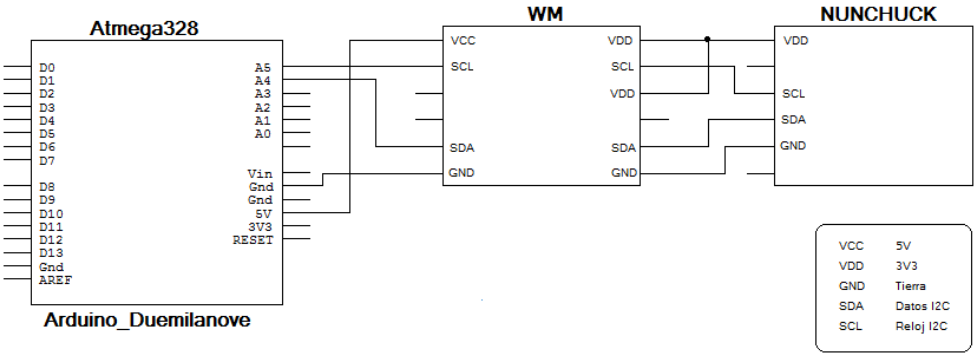


Figura 5.5. Circuito prueba sensores

Se verifica que los ángulos de pitch y roll que entrega la IMU coinciden con la orientación real de la embarcación.

Para conocer la medida del ángulo fue necesario instalar un trasportador de ángulos en el plano horizontal de una mesa y solo utilizar la caja con la electrónica como muestra la figura 5.6 .

Se mide el ángulo de inclinación y se comprueba que coincide con el que estimaba la IMU.

Figura 5.6 Prueba ángulo

Se fuerzan variaciones de ±50º, en la figura 5.7 vemos una captura que se realizó con un monitor gráfico de la plataforma Arduino , la caja de la embarcación partía del reposo (0º), se inclina hasta

alcanzar 50º, luego se busca la máxima inclinación en sentido contrario y finalmente volvió a la posición de reposo.

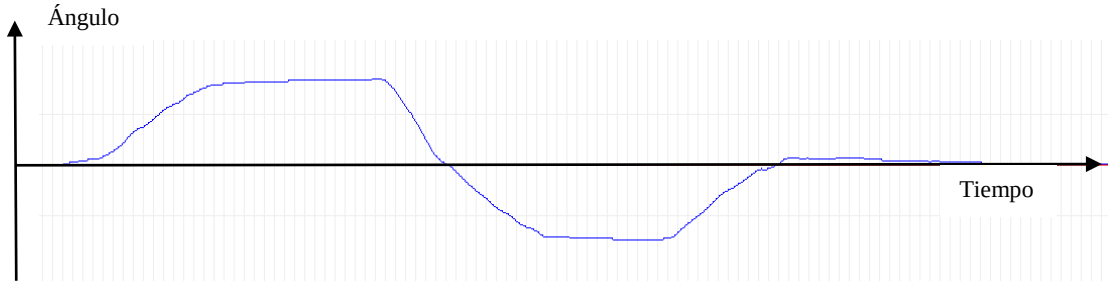


Figura 5.7. Gráfica prueba calibración de sensores

5.3 Prueba características emisora RC.

En un tercer ensayo se intentó controlar la velocidad del motor mediante el stick de gas de la emisora en lugar de hacerlo desde el teclado del PC, tuvimos que añadir al montaje de la figura 5.1 el de la figura 5.8 .

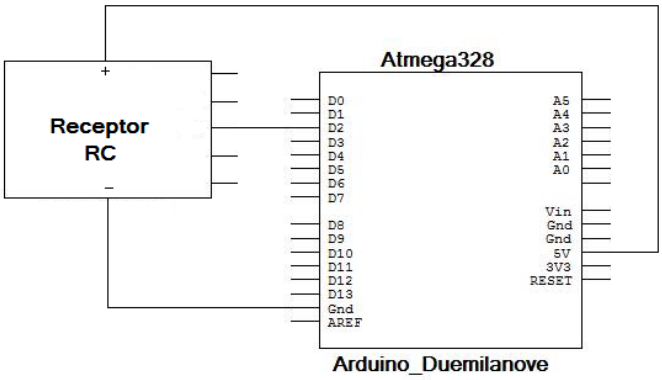


Figura 5.8 circuito prueba canal 3 emisora

Verificamos en el receptor los pines de cada canal y medimos los valores de duración del pulso de la señal PPM que entrega la emisora con la función puseIn() de Arduino, obteniendo 1040 microsegundos con el stick al mínimo y 1860 al máximo.

5.4 Prueba calibración PID

Ajustamos los valores de las constantes del algoritmo PID sobre el eje de pitch y aplicamos este ajuste sobre los tres ejes.

Para realizar el ajuste se ha tenido que suspender la embarcación mediante una cuerdas, de forma que solo tuviera libertad de movimiento en el eje que queríamos ajustar, como observamos en la figura 5.9.

Para empezar el ajuste PID, en primer lugar se aumentó la constante proporcional (Kp), dejando Ki y Kd a valor cero, hasta encontrar el valor lo más alto posible que permita hacer maniobras sobre el eje de libertad sin que entrara en oscilación. Finalmente se ajusta por la misma mecánica la constante derivativa.

Figura 5.9. Prueba PID

Hemos fijado la embarcación a partir de una varilla collada al centro del marco y se aplica agua directa mediante una manguera para forzar un inclinación de aproximadamente 30 grados.

Se aprovecha el montaje anterior, para visualizar de forma gráfica como se estabiliza la embarcación. Para ello hemos utilizado un monitor gráfico de la plataforma Arduino.

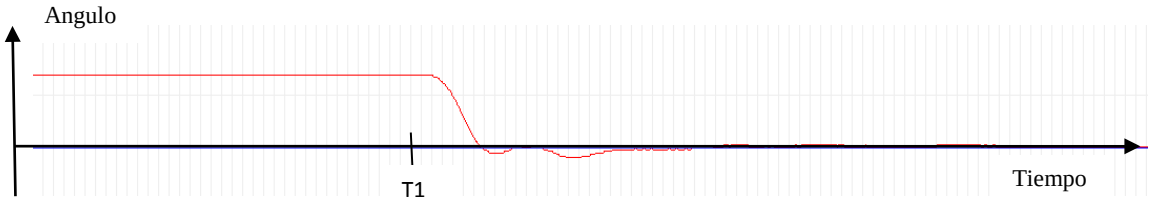


Figura 5.10 Estabilización embarcación

En la figura 5.10 vemos una primera donde la embarcación está inclinada 30º en reposo, y en el instante T1 damos gas y se estabiliza.

Observamos que hay alguna pequeña oscilación antes de llegar al reposo (0º), por tener las constantes PID ligeramente desajustadas.

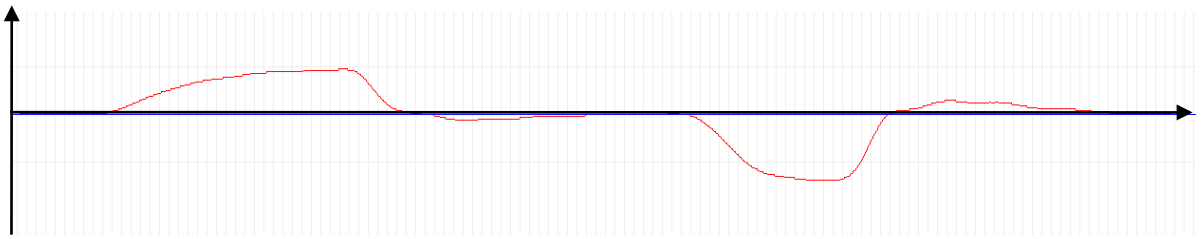


Figura 5.11 Movimiento embarcación

En una segunda captura figura 5.11, partiendo de la embarcación en posición totalmente horizontal, se ha hecho girar hacia la derecha en el instante T1, se vuelvo a la posición de reposo (0º) y seguidamente se fuerza un giro en el instante T2 hacía el otro lado.

Observamos unas pequeñas oscilaciones antes que la embarcación se recupere.

5.5 Calibración ESC

Se han ajustado los cuatro controles de velocidad electrónicos (ESC) tal y como indica el manual del anexo B, para sincronizar los cuatro motores, consiguiendo que el arranque sea el mismo para todos y no arranque un motor antes que otro.

Para ajustarlo tenemos que grabar en los ESC los valores máximo y mínimo de señal PWM que entrega el canal de gas de la emisora.

6 Software.

El programa está estructurado en módulos como muestra la figura 6.1, el modulo principal Quad1 es el que controla cuando debe ejecutarse cada módulo (línea gris), la información viaja entre módulos tal y como indican las líneas rojas.

Se han utilizado las librerías wire.h para el control del bus I2C y la avr/eeprom.h para el control de la memoria eeprom.

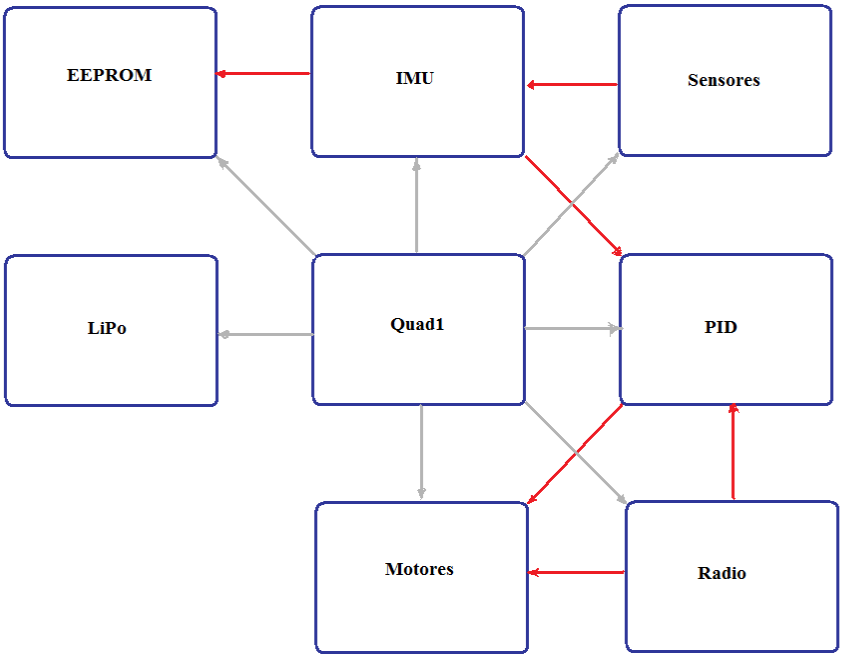


Figura 6.1 Módulos programa Arduino

Quad1: Es el modulo principal, contiene la definición de las variables y los procedimientos setup() y loop() existentes en todo programa Arduino.

El procedimiento setup(), solo se llama una vez y se encargara de inicializar los pines utilizados en la placa arduino por motores, emisora RC, sensores, etc. y leerá datos de eeprom.

El procedimiento loop() se repetirá de una forma cíclica y será el encargado de leer información de los sensores (IMU), calcular el error en cada eje mediante y algoritmo PID y para realizar el control de los motores.

El bucle principal de este procedimiento se repetirá aproximadamente cada 6 ms, tiempo que se requiere para obtener datos de los sensores, además cada 20ms. (50Hz) se obtendrá información de los canales de la emisora RC, comprobara el estado de la batería y estado de armado de motores.

EEPROM: Utilizando la librería avr/eeprom.h este módulo nos permite almacenar en memoria los ajustes acelerómetro cuando se realiza una calibración.

La calibración del acelerómetro debe realizarse con el aparato totalmente horizontal, el tenerla guardada nos permite arrancar el aparato en un terreno inclinado al utilizar una calibración anterior guardada en la memoria eeprom.

Sensores: Utilizando la librería wire.h, incluida en el software de Arduino mediante protocolo I2C podemos comunicarnos con los sensores y recoger información de aceleracion y velocidad angular.

En este módulo se realizan las lecturas de datos y calibración de los sensores, giroscopio y acelerómetro.

El valor de calibración se calcula promediando 400 lecturas de velocidad angular con el cuadricóptero inmóvil en el caso del giroscopio y 400 lecturas de aceleración con el cuadricóptero inmóvil y horizontal en el caso del acelerómetro.

La calibración del giroscopio se realiza al arrancar el aparato y la calibración del acelerómetro se realiza bajo demanda por petición de la emisora RC y los datos obtenidos se guardan en la memoria eeprom.

IMU: Este módulo cada 3 ms solicita información de los sensores, de forma alterna recibe la información de giroscopio y la del acelerómetro de forma que son necesarios seis segundos para recibir toda la información.

Utilizando la información que proporcionan los sensores aplicando a estos datos un filtro complementario se estima la posición en el espacio del aparato del aparato.

Lo que hace el filtro complementario es estimar el vector gravedad en cada eje dando un peso a los datos que provienen del acelerómetro y otro a los que provienen del giroscopio.

$$G_{estimada} = (G_{acelerometro} + G_{giroscopio} * wGyro) / (1 + wGyro)$$

Los valores del acelerómetro se aplican directamente tras filtrarlos paso bajo mientras que los datos del giroscopio son datos de velocidad angular y hay convertirlos en aceleración aplicando la matriz de rotación.

Radio: Este módulo extrae la información de la señal PPM entregada por el receptor de RC.

Para conocer el tiempo que se mantiene en estado alto el pulso de cada canal utilizamos la interrupción PCINTx que se dispara cada vez que se detecta un cambio de nivel lógico 1 a 0 o viceversa en cualquiera de los pines de los puertos habilitados.

Anotando cuando se producen los cambios de estado del pulso PPM podemos determinar la anchura del pulso PPM.

PID: Con los datos de la IMU (valor medido) y la emisora RC (valor de referencia) y utilizando un algoritmo PID se calcula la desviación o error del sistema en cada uno de sus ejes de rotación.

La desviación que debemos corregir se obtiene de aplicar el algoritmo PID en cada eje:

Corrección PID = Kp * error + Ki integral error + Kp derivada error.

En nuestro caso el error será la diferencia entre el ángulo medido y el de referencia, la integral del error será la suma de todos los errores y la derivada del error la diferencia entre dos medidas de velocidad angular del giroscopio.

Motores: Este módulo calcula el valor de la señal PWM que aplicaremos a cada motor en función del valor de gas aplicado en la emisora y el corrección PID que debemos aplicar en cada eje para estabilizar el aparato.

LiPo: Este módulo activa una alarma cuando la batería ha alcanzado un nivel mínimo de 10,5 V. para evitar que se pueda inutilizar por una descarga excesiva.

7 Presupuesto.

Componentes	Unidad	Precio Unitario €	Precio Total €
Conectores + Cableado	1	5€	5€
Componentes (leds + zumbador)	1	5€	5€
Conectores alimentación XT60	4	1.50	6€
Estructura	1	30€	30€
		Sub Total	**46€**
Unidad Potencia			
Batería LiPo	1	23.50€	23.50€
Control de velocidad (ESC)	4	12.40€	49.60€
Motor Brushless	4	15.43€	61.72€
Hélices	2pack de 2	3€	6€
		Sub Total	**95.82€**
Unidad Control			
Arduino Duemilanove	1	20€	20€
Wii Motion plus	1	17.70€	17.70€
Wii Nunchuck	1	16.63€	16.63€
Emisora	1	41.84€	41.84€
		Sub Total	**96.17€**
		TOTAL MATERIAL	**237.99€**
Horas Ingeniero	400h	5€/h	**2000€**
		TOTAL PROYECTO	**2237.99€**

8 Planificación.

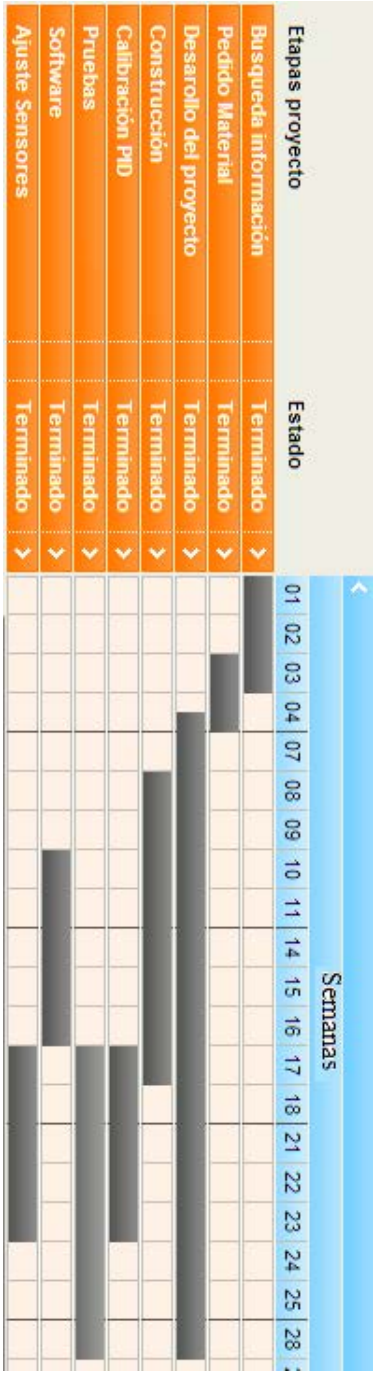


Figura 8.1 Planificación

9 Bibliografía y referencias.

[1]. Información plataforma Arduino:

http://arduino.cc/es/

[2]. Información RC, motores, baterías, emisoras:

http://www.e-radiocontrol.com.ar/

[3]. Información protocolo I2C:

http://www.cursomicros.com/avr/bus-i2c/protocolo-bus-i2c.html

[4]. Información sensores Wii:

http://wiibrew.org/wiki/Wiimote/Extension_Controllers

[5]. Información IMU:

http://www.starlino.com/imu_guide.html

[6]. Información interrupciones PCINTx:

http://www.cursomicros.com/avr/interrupciones/interrupciones-pcint0-pcint1-pcint2-pcint3.html

[7]. Proyectos open source en castellano.

https://sites.google.com/site/mikuadricoptero/home/

http://cuadricopterodiyarduino.blogspot.com.es/

[8]. Proyectos open source en inglés.

https://code.google.com/p/aeroquad/

http://www.multiwii.com/

10 Conclusiones.

Se ha cumplido con éxito el objetivo de construir una embarcación que mantenga el vuelo estable, aunque quedan pendientes de mejorar en algunos aspectos de estabilización, ya que el aparato tiene unas derivas que de momento se van corrigiendo con la habilidad del piloto. Probar nuevos algoritmos de control PID creo pueden ayudar a mejorar la estabilización del aparato.

Los objetivos personales también se han cumplido satisfactoriamente, pues he podido ampliar mis conocimientos sobre el entorno Arduino y adquirir nuevos sobre sensores y electrónica utilizada en equipos de RC.

Durante el proceso de ajuste de la embarcación he podido comprobar que el cálculo de los valores de PID óptimos requieren realizar infinidad de pruebas, aunque no lo tuve en cuenta en un principio sería interesante crear un interface gráfico en PC (cable) o móvil (bluetooth) que agilice estos ajustes.

Los sensores utilizados están extraídos de mandos de la videoconsola Wii, no son comerciales y a pesar de ello ha funcionado bastante bien. Cambiarlos por sensores comerciales o utilizar otro tipo de sensores como barómetro (altura), magnetómetro (brújula), o GPS mejorarían las prestaciones del proyecto.

La autonomía del vehículo no es muy elevada aproximadamente veinte minutos, habría que buscar la forma de aumentarla, reduciendo peso, buscando motores más eficientes, probar baterías con otras características o simplemente colocar dos en paralelo, etc.

La estructura pensada en un principio con tubo de 110mm estaba fuera de medida para el tipo de motores que pudimos comprar.

Se tubo bastantes inconveniente como es la impermeabilización del cableado de los motores puesto que sólo con funda retráctil entro agua y tuvimos que substituir un motor y su ESC, lo que provocó algún retardo en la planificación del proyecto finalmente pusimos Epoxi y se realizó la prueba con éxito.

11 Anexos.

A ESQUEMA ELECTRICO FINAL

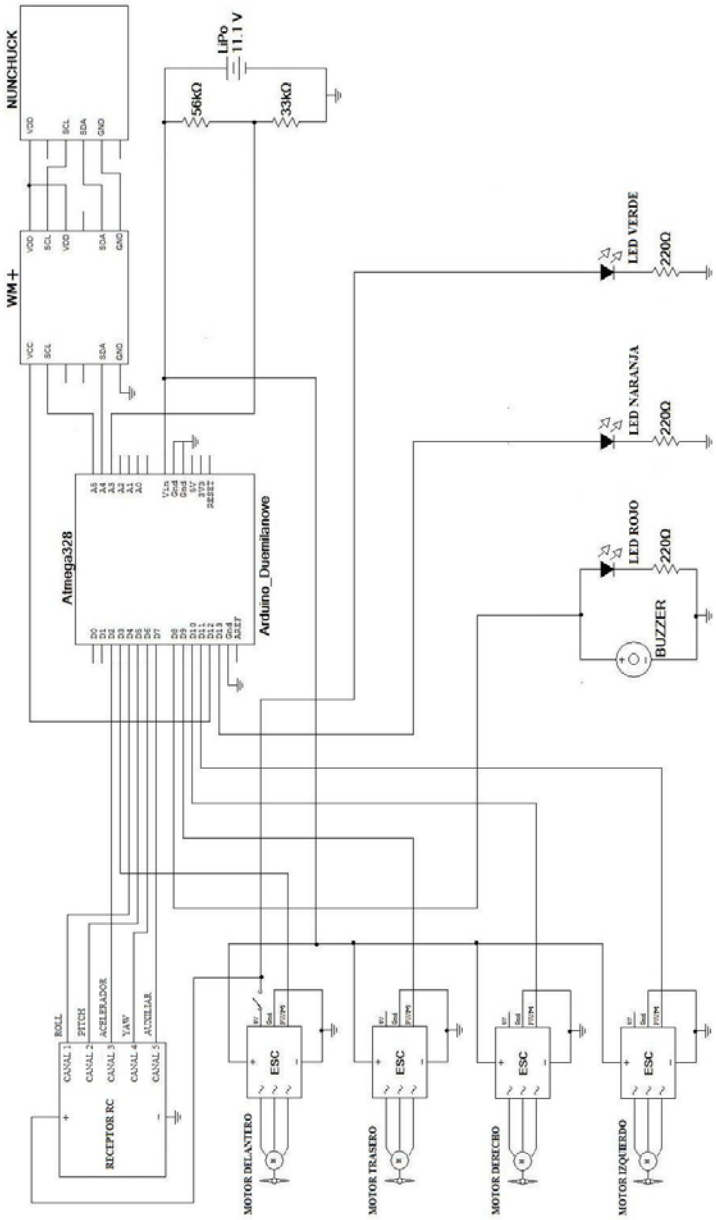


Figura A Esquema final

B MANUAL CONTROL DE VELOCIDAD ELECTRONICO (ESC)

TURNIGY Manual for Brushless Motor Speed Controller

Thank you for purchasing our Electronic Speed Controller (ESC). High power systems for RC model can be very dangerous; we strongly suggest you read this manual carefully. We have no control over the correct use, installation, application, or maintenance of our products, no liability shall be assumed nor accepted for any damages, losses or costs resulting from the use of the product. Any claims arising from the operating, failure or malfunctioning etc. will be denied. We assume no liability for personal injury, property damage or consequential loss resulting from our product or our workmanship. As far as is legally permitted, the obligation to compensation is limited to the invoice amount of the affected product.

Features:

- Extreme low output resistance, super current endurance.
- Multiple protection features: Low voltage cut-off protection / over-heat protection / throttle signal loss protection.
- 3 start modes: Normal / Soft / Super-Soft, compatible with fixed-wing aircraft and helicopter.
- Throttle range can be configured to be compatible with all transmitters currently available on market.
- Smooth, linear and precise throttle response.
- Separate voltage regulator IC for microprocessor (except Plush-6A and Plush-10A) with good anti-jamming capability.
- Supported motor speed (Maximum): 210000 RPM (2 poles), 70000 RPM (6 poles), 35000 RPM (12 poles).
- The pocket-sized **Program Card** can be purchased separately for easily programming the ESC at flying field.
- With a program card, user can activate the music playing function of the ESC, and totally there are 15 songs can be selected.

Specifications:

PLUSH Series										
Class	Model	Cont. Current	Burst Current (>10s)	BEC Mode	BEC Output	Battery Cell		User Programmable	Weight	Size
						Li-ion Li-poly	NiMH NiCd			L*W*H
6A	PLUSH-6A	6A	8A	Linear	5V/0.8A	2	5-6	Available	6g	32*12*4.5
10A	PLUSH-10A	10A	12A	Linear	5V/2A	2-4	5-12	Available	9g	38*18*6
12A	PLUSH-12EA	12A	15A	Linear	5V/2A	2-4	5-12	Available	10g	38*18*7
18A	PLUSH-18A	18A	22A	Linear	5V/2A	2-4	5-12	Available	21g	55*25*6
25A	PLUSH-25A	25A	35A	Linear	5V/2A	2-4	5-12	Available	25g	55*25*9
30A	PLUSH-30A	30A	40A	Linear	5V/2A	2-4	5-12	Available	25g	55*25*9
40A	PLUSH-40A	40A	55A	Switch	5V/3A	2-6	5-18	Available	39g	60*24*15
	PLUSH-40A-OPTO	40A	55A	N/A	N/A	2-6	5-18	Available	35g	60*28*12
60A	PLUSH-60A	60A	80A	Switch	5V/3A	2-6	5-18	Available	63g	83*31*16
	PLUSH-60A-OPTO	60A	80A	N/A	N/A	2-6	5-18	Available	60g	83*31*14
80A	PLUSH-80A	80A	100A	Switch	5V/3A	2-6	5-18	Available	72g	83*31*16
	PLUSH-80A-OPTO	80A	100A	N/A	N/A	2-6	5-18	Available	69g	83*31*14

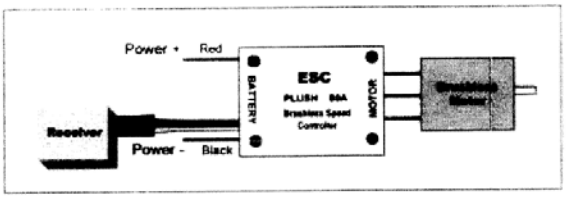
BASIC Series										
Class	Model	Cont. Current	Burst Current (>10s)	BEC Mode	BEC Output	Battery Cell		User Programmable	Weight	Size
						Li-ion Li-poly	NiMH NiCd			L*W*H
18A	BASIC-18A	18A	22A	Linear	5V/2A	2-4	5-12	Available	21g	55*25*6
25A	BASIC-25A	25A	35A	Linear	5V/2A	2-4	5-12	Available	25g	55*25*9

BEC Output Capability	Linear Mode BEC(5V/2A)				Switch Mode BEC(5V/3A)	
	2S Li-Poly	3S Li-Poly	4S Li-Poly	5S Li-Poly	2S — 4S Li-Poly	5S Li-Poly
Standard micro servos(Max.)	5	4	3	2	5	4

Note1: BEC means the "Battery Elimination Circuit". It is a DC-DC voltage regulator to supply the receiver and other equipments from the main battery pack. With the build-in BEC, the receiver needn't to be supplied with an additional battery pack.

IMPORTANT! The ESC named "xxx-xxx-OPTO" hasn't a built-in BEC, so an UBEC (Ultimate-BEC) or an individual battery pack should be used to power the receiver. And an individual battery pack is needed to power the program card when setting the programmable value of ESC, please read the user manual of program card for reference.

Wiring Diagram:



TURNIGY Manual for Brushless Motor Speed Controller

Programmable Items:

1. **Brake Setting**: Enabled / Disabled, default is Disabled
2. **Battery Type**: Li-xx(Li-ion or Lipo) / Ni-xx(NiMH or NiCd), default is Li-xx.
3. **Low Voltage Protection Mode(Cut-Off Mode)**: Soft Cut-Off (Gradually reduce the output power) or Cut-Off (Immediately stop the output power). Default is Soft Cut-Off.
4. **Low Voltage Protection Threshold(Cut-Off Threshold)**: Low / Medium / High, default is Medium.
   1) For lithium batteries, the number of battery cells is calculated automatically. Low / medium / high cutoff voltage for each cell is: 2.85V/3.15V/3.3V. For example: For a 3 cells lithium pack, when "Medium" cutoff threshold is set, the cut-off voltage will be:3.15*3=9.45V.
   2) For nickel batteries, low / medium / high cutoff voltages are 0%/50%/65% of the startup voltage (i.e. the initial voltage of battery pack), and 0% means the low voltage cut-off function is disabled. For example: For a 10 cells NiMH battery, fully charged voltage is 1.44*10=14.4V, when "Medium" cut-off threshold is set, the cut-off voltage will be:14.4*50%=7.2V。
5. **Startup Mode**: Normal /Soft /Super-Soft, (300ms / 6s / 12s), default is Normal.
   Normal is preferred for fixed-wing aircraft. Soft or Super-soft are preferred for helicopters. The initial acceleration of the Soft and Super-Soft modes are slower in comparison, usually taking 6 seconds for Soft startup or 12 seconds for Super-Soft startup from initial throttle advance to full throttle. If the throttle is closed (throttle stick moved to bottom) and opened again (throttle stick moved to top) within 3 seconds of the initial startup, the restart-up will be temporarily changed to normal mode to get rid of the chances of a crash caused by slow throttle response. This special design is suitable for aerobatic flight when quick throttle response is needed.
6. **Timing**: Low / Medium / High,(3.75° /15° /26.25°),default is Low. *Note2*
   Usually, low timing or medium timing is suitable for most motors. In order to get higher speed and bigger output power, please choose **High** timing.
   Note2: After changing the timing setting, please test your RC model on ground before taking off!

Begin To Use Your New ESC

Note3: In the following instructions, we use the words of "Top position" and "Bottom position" to describe the location of the throttle stick.

Top Position: *The throttle value is 100% at this position.*

Bottom Position: *The throttle value is 0% at this position.*

Please start up the ESC in the following sequence:

1. Move throttle stick to the bottom position and then switch on the transmitter.
2. Connect battery pack to the ESC, the ESC begins self-test process, a special tone " ♪23" is emitted, which means the voltage of the battery pack is in normal range, and then N "beep" tones will be emitted, means the number of lithium battery cells. Finally a long "beep------" tone will be emitted, which means self-test is OK, the aircraft/helicopter is ready to go flying.
   - If nothing is happened, please check the battery pack and all the connections;
   - If a special tone " ♪56712" is emitted after 2 beep tones ("beep-beep-"), means the ESC has entered the program mode, it is because the throttle channel of your transmitter is reversed, please set it correctly;
   - If the very rapid "beep-beep-, beep-beep-" tones is emitted, means the input voltage is too low or too high, please check your battery's voltage.
3. **"VERY IMPORTANT!"** Because different transmitter has different throttle range, we strongly suggest calibrating throttle range before flying. Please read the instruction on page 3------"Throttle Range Setting"

Alert Tone

1. Input voltage is abnormal: The ESC begins to check the voltage when the battery pack is connected, if the voltage is not in the acceptable range, such an alert tone will be emitted: "beep-beep-, beep-beep-,beep-beep-" (Every "beep-beep-" has a time interval of about 1 second.)
2. Throttle signal is abnormal: When the ESC can't detect the normal throttle signal, such an alert tone will be emitted: "beep-, beep-, beep-". (Every "beep-" has a time interval of about 2 seconds)
3. Throttle stick is not in the bottom position: When the throttle stick is not in bottom (lowest) position, a very rapid alert tone will be emitted: "beep-, beep-, beep-". (Every "beep-" has a time interval of about 0.25 second.)

Protection Function

1. Start up failure protection: If the motor fails to start within 2 seconds of throttle application, the ESC will cut-off the output power. In this case, the throttle stick **MUST** be moved to the bottom again to restart the motor. (Such a situation happens in the following cases: The connection between ESC and motor is not reliable, the propeller or the motor is blocked, the gearbox is damaged, etc.)
2. Over-heat protection: When the temperature of the ESC is over 110 Celsius degrees, the ESC will reduce the output power.
3. Throttle signal loss protection: The ESC will reduce the output power if throttle signal is lost for 1 second, further loss for 2 seconds will cause its output to be cut-off completely.

Program example

Setting "Start Mode" to "Super-Soft", i.e. value #3 in the programmable item #5

1. Enter Program Mode Switch on transmitter, move throttle stick to top position, connect battery pack to ESC, wait for 2 seconds, "beep-beep" tone should be emitted. Then wait for another 5 seconds, special tone like " ♪56712" should be emitted, which means program mode is entered.
2. Select Programmable Items Now you'll hear 8 tones in a loop. When a long "beep------" tone is emitted, move throttle stick to bottom to enter the "Start Mode"
3. Set Item Value (Programmable Value) "Beep-", wait for 3 seconds; "Beep-beep-", wait for another 3 seconds; then you'll hear "beep-beep-beep", move throttle stick to top position, then a special tone " ♪1515" is emitted, now you have set the "Start Mode" item to the value of "Super-Soft"
4. Exit Program Mode After the special tone " ♪1515", move throttle stick to bottom within 2 seconds.

TURNIGY Manual for Brushless Motor Speed Controller

Trouble Shooting

Trouble	Possible Reason	Action
After power on, motor can't work, no sound is emitted	The connection between battery pack and ESC is not OK	Check the power connection. Replace the connector.
After power on, motor can't work, such an alert tone is emitted: "beep-beep-, beep-beep-,beep-beep-" (Every "beep-beep-" has a time interval about 1 second)	Input voltage is abnormal, too high or too low	Check the voltage of battery pack
After power on, motor can't work, such an alert tone is emitted: "beep-, beep-, beep- "(Every "beep-" has a time interval about 2 seconds)	Throttle signal is abnormal	Check the receiver and transmitter Check the cable of throttle channel
After power on, motor can't work, such a alert tone is emitted: "beep-, beep-, beep-" (Every "beep-" has a time interval about 0.25 second)	Throttle stick is not in bottom(lowest) position	Move the throttle stick to bottom
After power on, motor can't work, a special tone "♪ 5671 2" is emitted after 2 beep tone (beep-beep-)	The direction of throttle channel is reversed, so the ESC has entered the program mode	Set the direction of throttle channel correctly
The motor runs in opposite direction	The connection between ESC and the motor need to be changed.	Swap any two wire connections between ESC and motor
The motor stop running while in working state	Throttle signal is lost	Check the receiver and transmitter Check the cable of throttle channel
	ESC has entered Low Voltage Protection mode	Land RC model as soon as possible, and then replace the battery pack
	Some Connections are not reliable	Check all the connections: battery pack connection, throttle signal cable, motor connections, etc.

Normal startup procedure:

Move throttle stick to bottom and then switch on transmitter.	Connect battery pack to ESC, special tone like "♪ 123" means power supply is OK	Several "beep-" tones should be emitted, presenting the number of lithium battery cells	When self-test is finished, a long "beep-----"tone should be emitted	Move throttle stick upwards to go flying

Throttle range setting: (Throttle range should be reset when a new transmitter is being used)

Switch on transmitter, move throttle stick to top	Connect battery pack to ESC, and wait for about 2 seconds	"Beep-Beep-" tone should be emitted, means throttle range highest point has been correctly confirmed	Move throttle stick to the bottom, several "beep-" tones should be emitted, presenting the number of battery cells	A long "Beep-" tone should be emitted, means throttle range lowest point has been correctly confirmed

TURNIGY Manual for Brushless Motor Speed Controller

Program ESC with transmitter (4 Steps):

1. Enter program mode
2. Select programmable items
3. Set item value (Programmable value)
4. Exit program mode

1. Enter program mode

1) Switch on transmitter, move throttle stick to top position, connect the battery pack to ESC
2) Wait for 2 seconds, the motor should emit special tone like "beep-beep-"
3) Wait for another 5 seconds, special tone like "♪ 5671 2" should be emitted, which means program mode is entered

2. Select programmable items:

After entering program mode, you can hear 8 tones in a loop in the following sequence. If you move the throttle stick to bottom within 3 seconds after one kind of tones, then this item will be selected.

1.	"beep"	brake	(1 short tone)
2.	"beep-beep-"	battery type	(2 short tone)
3.	"beep-beep-beep-"	cutoff mode	(3 short tone)
4.	"beep-beep-beep-beep-"	cutoff threshold	(4 short tone)
5.	"beep-----"	startup mode	(1 long tone)
6.	"beep-----beep-"	timing	(1 long 1 short)
7.	"beep-----beep-beep-"	set all to default	(1 long 2 short)
8.	"beep-----beep-----"	exit	(2 long tone)

Remark: 1 long "beep-----" = 5 short "beep-"

3. Set item value (Programmable value):

You will hear several tones in loop. Set the value matching to a tone by moving throttle stick to top when you hear the tone, then a special tone "isis" emits, means the value is set and saved. (Keeping the throttle stick at top position, you will go back to step 2 and select other items; Moving the stick to bottom within 2 seconds, you will exit the program mode directly)

Tones / Items	"beep-" 1 short tone	"beep-beep-" 2 short tones	"beep-beep-beep" 3 short tones
Brake	Off	On	
Battery type	Li-ion / Li-poly	NiMh / Nicd	
Cutoff mode	Reduce power	Shut down	
Cutoff threshold	Low	Medium	High
Startup mode	Normal	Soft	Super soft
Timing	Low	Medium	High

4. Exit program mode

There are 2 ways to exit program mode:

1. In step 3, after special tone "isis", move throttle stick to bottom within 2 seconds.
2. In step 2, after tone "beep-----beep-----"(ie. The item #8), move throttle stick to bottom within 3 seconds.