

RESUMEN MÓDULO IV ROBÓTICA AÉREA:

ÍNDICE DE CONTENIDOS:

TEMA 1: SISTEMA AHRS CON ARDUINO

1.1 FLUJO DE TRABAJO DE ARDUINO

- 1.1.1 ¿QUÉ ES ARDUINO?**
- 1.1.2 ARDUINO VS RASPBERRY PI**
- 1.1.3 CONCEPTOS BÁSICOS DE UN SKETCH DE ARDUINO**
- 1.1.4 PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DEL SKETCH**
- 1.1.5 FLUJO DE TRABAJO DEL ARDUINO IDE**

1.2 ARDUINO MEGA 2560

- 1.2.1 PINES DIGITALES**
- 1.2.2 PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN**
- 1.2.3 PINES DIGITALES COMO PUERTOS SERIE UART**
- 1.2.4 PINES DIGITALES COMO PUERTOS SERIE SPI**
- 1.2.5 PINES DIGITALES COMO PUERTOS SERIE I2C**
- 1.2.6 MEMORIA Y ENTRADAS ANALÓGICAS**

1.3 SENSOR MARC GY-85 Y LIBRERÍA FREEIMU

- 1.3.1 SENSOR MARC GY-85**
- 1.3.2 IMU-ARDUINO-COMPUTADOR**
- 1.3.3 LIBRERÍA FREEIMU**

TEMA 2: SISTEMA DE CUADRICÓPTERO

2.1 ELEMENTOS DE UN UAS

2.2 CONFIGURACIÓN

2.3 TAMAÑO

2.4 MATERIAL

2.5 TREN DE ATERRIZAJE

2.6 TORQUE, FUERZA Y MOMENTO RESULTANTE

2.7 HOVER

2.8 MOVIMIENTOS

2.9 AUTOPILOT

2.10 SISTEMA DE PROPULSIÓN Y POTENCIA

2.11 PARÁMETROS DE LA HÉLICE

2.12 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS MOTORES BDLC

2.13 PARÁMETROS DEL MOTOR

2.14 PARÁMETROS DEL ESC

2.15 BATERÍA

2.16 EVOLUCIÓN DEL RENDIMIENTO

2.17 ENLACE DE DATOS

2.18 ESTACIÓN DE CONTROL

TEMAS 1: SISTEMA AHRs CON ARDUINO

1.1 FLUJO DE TRABAJO DE ARDUINO

1.1.1 ¿QUÉ ES ARDUINO?

Arduino: Plataforma de creación de prototipos de código abierto basada en hardware y software fácil de usar. La **placa Arduino** puede leer entradas, que luego se convierten en salidas para actuar en consecuencia.

Sketch: Contiene las instrucciones que serán enviadas al microcontrolador en la placa.

Un **sketch de Arduino** está escrito en el lenguaje de programación de Arduino (lenguaje derivado de C y C++). El **lenguaje de programación** también se llama Arduino API.

El **software Arduino** es un entorno de desarrollo integrado para compilar y subir el sketch en el microcontrolador.

Ventajas: Económico, multiplataforma, entorno de programación sencillo, código abierto.

1.1.2 ARDUINO VS RASPBERRY PI

Arduino: Placa base del microcontrolador (ordenador sencillo que establece comunicación entre CPU y memoria y proporciona algunas conexiones periféricas), es capaz de realizar tareas simples, como medir datos del sensor de lectura, LED de control de brillo, control de actuadores simples como motores y servos, etc. Sólo puede ejecutar un programa a la vez (manera repetitiva y fácil de usar).

Raspberry Pi: Computadora General con sistema operativo capaz de ejecutar tareas más complejas. Puede ejecutar múltiples programas y relativamente es más difícil de usar.

1.1.3 CONCEPTOS BÁSICOS DE UN SKETCH DE ARDUINO

En el proyecto Arduino, un programa se denomina **sketch**. Tiene la extensión .ino, y siempre se almacena en una carpeta con el mismo nombre.

El requisito mínimo absoluto de un sketch de Arduino es el uso de **dos funciones**:

void setup(): Se ejecuta sólo una vez cuando el Arduino está encendido. Aquí definimos cosas como el modo de un pin (entrada o salida), la velocidad en baudios de comunicación serie o la inicialización de una biblioteca.

void loop(): Se ejecuta una y otra vez.

El **"nulo"** indica que no se devuelve nada tras la ejecución.

Las funciones anteriores siempre son necesarias en un sketch de Arduino, aunque también pueden añadirse más funciones aparte de estas dos.

Bibliotecas Arduino: Extensión del estándar Arduino API, y consta de miles de bibliotecas, tanto oficiales como aportadas por la comunidad. Para usar una biblioteca, debes incluirla en la parte superior del código.

#include <library.h>: Incluye archivos de encabezado para la biblioteca estándar Arduino. El compilador busca el código fuente en la carpeta de la biblioteca en el directorio del software de Arduino.

#include "library.h": Incluye archivos de encabezado definidos. El compilador busca el código fuente en el directorio del proyecto o en la carpeta de la biblioteca en el directorio del cuaderno de sketches de Arduino.

1.1.4 PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DEL SKETCH

El boceto de Arduino pasa por varios procesos para cargarse exitosamente al Arduino mediante el software Arduino.

Preprocesamiento: El software Arduino primero realiza algunas transformaciones menores para convertir el sketch en un programa C/C++.

Compilación: Se ubican las dependencias del croquis. Luego, el código se pasa a un compilador C/C++ que convierte el código legible por humanos en instrucciones legibles por máquina (archivos .o).

Luego, el código se combina con las librerías estándar de Arduino. El resultado es un único archivo hexadecimal de Intel que contiene los bytes específicos que deben escribirse en la memoria del programa del microcontrolador en la placa Arduino.

Carga: El archivo hexadecimal se carga en la placa Arduino a través de USB o mediante conexión en serie.

1.1.5 FLUJO DE TRABAJO DEL ARDUINO IDE

Instala la placa: Instala el paquete adecuado para la placa. Sin el paquete, no puede usarse la placa. La instalación se realiza directamente en el IDE, y es una operación rápida y fácil.

Crea un nuevo sketch: Un sketch es un archivo de programa principal. Aquí se escribe el conjunto de instrucciones que va a ejecutarse en el microcontrolador.

Compilar sketch: El código que escribimos no es exactamente como se ve cuando se sube al Arduino (compilar el código significa que lo verificamos en busca de errores y lo convertimos en un archivo binario). Si algo falla, se mostrará en la consola de errores.

Cargar sketch: Una vez que la compilación sea exitosa, el código se puede subir a la placa. En este paso, se conecta la placa a la computadora físicamente, y se selecciona el puerto serie correcto.

Serial Monitor: Esta herramienta permite visualizar los datos enviados desde la placa al ordenador. También permite enviar datos desde el ordenador a la placa. Se puede utilizar como herramienta de depuración.

1.2 ARDUINO MEGA 2560

Características: Microcontrolador de 8 bits ATmega2560 de Atmel, reloj del dispositivo de 16 MHz, voltaje de entrada recomendado de 7 V a 12 V (conector de alimentación CC, PIN VIN, USB), tensión de funcionamiento de 5 V, fuente de alimentación regulada de 5 V y 3.3 V para componentes externos, corriente máxima (40 mA por pin y 200 mA para toda la placa), corriente recomendada (20 mA por pin), 54 pines de E/S digitales, 16 pines de entrada analógica.

1.2.1 PINES DIGITALES

Pines digitales: pin0 - pin53, **entrada** (HIGH, > 3 V; LOW, < 3 V), **salida** (HIGH, 5 V; LOW, 0 V).

Interrupciones Externas: Una señal de interrupción alerta al procesador que un evento necesita atención. El procesador detiene lo que se estaba haciendo, ejecuta un pequeño fragmento de código llamado Rutina de Servicio de Interrupción (ISR), y luego regresa nuevamente a lo que estaba haciendo antes.

Otros pines: pin2 (INT0), pin3 (INT1), pin21 (INT2), pin20 (INT3), pin19 (INT4), pin28 (INT5).

Modo de señal de interrupción: RISING (flanco ascendente), FALLING (flanco descendente), CHANGE, LOW.

Modulación de Ancho de Pulso (PWM): Técnica para simular un voltaje analógico promedio conmutando la señal digital entre encendido y apagado para crear una onda cuadrada.

Si se repite este patrón de encendido y apagado lo suficientemente rápido con un LED, se tendría como si la señal fuera un voltaje promedio constante que controla el brillo del LED.

El **ciclo de trabajo** es la fracción de un período en el que la señal digital es HIGH (pin2 - pin13, pin44 - pin46, con frecuencia de 500 Hz y un período de 2 ms por ciclo).

Ciclo de trabajo de 8 bits: Una llamada a analogWrite() está en una escala entre 0 y $255 = 2^8 - 1$, tal que analogWrite(255) solicita un ciclo de trabajo del 100% y analogWrite(127) solicita un ciclo de trabajo del 50%.

1.2.2 PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN

Protocolo de comunicación: Sistema de reglas y convenciones que permite dos o más entidades de un sistema de comunicación para transmitir información.

Comunicación serie: Los bits se envían secuencialmente por transmisor (TX), siendo los datos recibidos y ensamblándose un bit a la vez por el receptor (RX). De TX a RX se realiza la transmisión de datos en un solo cable.

Comunicación paralela: Varios bits de un paquete de datos se transmiten secuencialmente enviando cada bit a través de un solo cable.

Como analogía con las carreteras, una interfaz paralela es una megautopista de 8 carriles, mientras que una interfaz serial es un camino rural de dos carriles.

En el mismo período de tiempo, la megacarretera potencialmente atraerá a más personas a sus destinos, pero esa carretera de dos carriles cumple su propósito y cuesta menos.

La **comunicación paralela** es rápida, sencilla y relativamente fácil de implementar, pero requiere muchas más líneas de entrada y salida.

En **Arduino**, se adopta la **comunicación en serie** ya que las líneas de entrada y salida son pocas y precisas.

1.2.3 PINES DIGITALES COMO PUERTOS SERIE UART

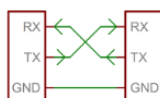
Receptor-Transmisor Asíncrono Universal (UART): Envía bits de datos uno por uno, generalmente desde el menos significativo al más significativo, y enmarcado por bits de inicio y parada. Por defecto, Arduino usa 8N1 (8 bits, sin paridad, 1 bit de parada) protocolos serie.



Asíncrono: No hay señal de reloj para sincronizar la transmisión de datos entre el transmisor y el receptor. Por esta razón, tanto el transmisor como el receptor necesitan tener la misma tasa de velocidad en baudios, que especifica qué tan rápido se envían los datos a través de una línea serie, generalmente expresada en unidades de bits por segundo (bps). Las velocidades de baudios estándar comunes son 1200, 2400, 4800, 9600, 19200, 38400, 57600 y 115200 bps.

El bus UART consta de sólo dos cables: Uno para enviar datos y otro para recibir.

Por lo tanto, cada dispositivo debe tener dos pines seriales: El receptor RX y el transmisor TX. Hay que tener en cuenta que esas etiquetas RX y TX son con respecto al dispositivo mismo. Entonces, el RX de un dispositivo debe ir al TX del otro, y viceversa.



Mega2560 tiene 4 conjuntos de puertos serie: **Serial** (0 (RX) y 1(TX)), **Serial1** (19 (RX) y 18(TX)), **Serial2** (17 (RX), 16 (TX)) y **Serial3** (15 (RX), 14 (TX)).

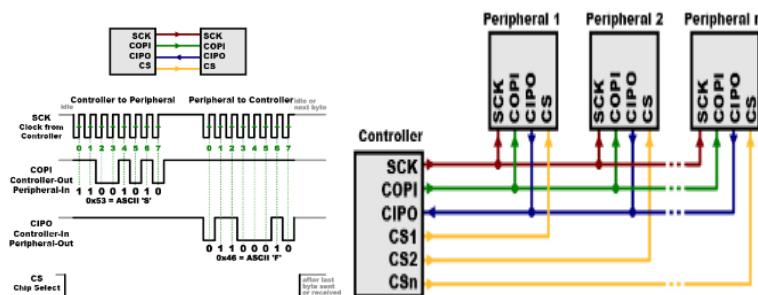
UART: Protocolo de comunicación utilizado para comunicarse entre la computadora y la placa Arduino a través del cable USB. El puerto USB está conectado al pin0 y pin1 del conjunto de puertos serie Serial. La **API de Arduino** proporciona la biblioteca Serial para la implementación de UART (por ejemplo, Serial1.begin, Serial.print, Serial3.read, Serial2.write).

1.2.4 PINES DIGITALES COMO PUERTOS SERIE SPI

Interfaz periférica serie: Protocolo de datos en serie síncrono utilizado por un dispositivo controlador para comunicarse con uno o más dispositivos periféricos.

Es un **bus de datos síncrono**, lo que significa que tiene una línea SCK (reloj serie) separada que mantiene los datos de transmisión y recepción en perfecta sincronización.

El **reloj** es una señal oscilante que le indica al receptor exactamente cuándo muestrear los bits en la línea de datos. Cuando el receptor detecta el flanco ascendente o descendente, leerá inmediatamente el siguiente bit de línea de datos.



La mayoría de los chips SPI utilizan el **primer orden de datos MSB**.

En SPI, el dispositivo que genera el reloj se llama **controlador**, y el otro dispositivo se llama **periférico**.

Los datos se envían desde el controlador a un periférico en la **COPI** (Controller Out Peripheral In o MOSI).

Los datos se envían desde un periférico al controlador en la línea **CIPO** (Controller In Peripheral Out o MISO).

El controlador puede usar la **línea CS** (Chip Select o SS para Slave Select) para activar (LOW) y desactivar (HIGH) un dispositivo periférico.

Al utilizar la **línea CS**, se pueden conectar varios periféricos a un controlador. En general, cada periférico necesitará una **línea CS independiente**. Para hablar con un periférico en particular, el controlador hará que la línea CS de ese periférico sea baja y mantendrá el resto de las líneas CS altas.

Mega2560 tiene 1 conjunto de puertos SPI: **SCK** (pin52 o ICSP-3), **CIPO** (pin50 o ICSP-1), **COPI** (pin51 o ICSP-4), **CS** (pin53).

Arduino API proporciona la biblioteca SPI para la implementación de SPI (por ejemplo, SPI.transfer, SPI.beginTransaction).

1.2.5 PINES DIGITALES COMO PUERTOS SERIE I2C

Circuito Inter-Integrado (I2C): Protocolo que tiene sólo dos líneas (una línea de reloj serie SCL que la placa controladora pulsa a un intervalo regular y una línea de datos serie SDA a través de la cual se transmiten datos entre el controlador y el periférico).

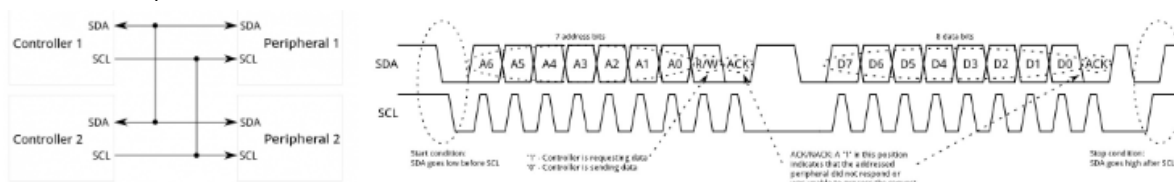
El **protocolo I2C** permite la comunicación entre múltiples periféricos y múltiples controladores.

Cada dispositivo tiene una dirección única.

En la **trama de dirección**, un bit de lectura/escritura indica si éste es una operación de lectura o escritura. Por lo que tanto el controlador como los dispositivos periféricos pueden tomar turnos para comunicarse a través de una sola línea de datos.

Mega2560 tiene 1 conjunto de puertos I2C: SCL (pin21) y **SDA** (pin20).

La **API de Arduino** proporciona la **biblioteca Wire** para la implementación de I2C (por ejemplo, Wire.begin, Wire.read, Wire.write).



1.2.6 MEMORIA Y ENTRADAS ANALÓGICAS

Arduino Mega2560 contiene **16 pines de entrada analógica (pin A0 - pin A15)** que están conectados a **convertidores analógico-digitales de 10 bits (ADC)**. Estos convertidores asignan **voltajes de entrada entre 0 V y 5 V** a **valores enteros entre 0 y $1023 = 2^{10} - 1$** , siendo la **resolución $5 \text{ V} / 1023 \approx 4,9 \text{ mV}$** .

Arduino Mega2560 tiene **tres tipos de memoria:**

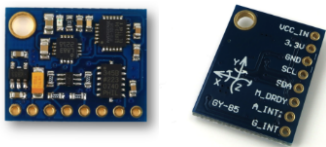
Memoria estática de acceso aleatorio (SRAM) de 8 kB: Se utiliza para crear y manipular variables. Tiene una memoria volátil porque los datos se pierden cuando se corta la energía.

Memoria Flash de 256 kB: Se utiliza principalmente para almacenar sketches de Arduino. Es memoria no volátil porque los datos no se borran cuando se corta la energía, de modo que las instrucciones para el microcontrolador se ejecuten tan pronto como la placa esté alimentada.

La **memoria de sólo lectura programable y borrable eléctricamente de 4 kB (EEPROM)** no es volátil y los usuarios pueden leer y escribir estos bytes.

1.3 SENSOR MARC GY-85 Y LIBRERÍA FREEIMU

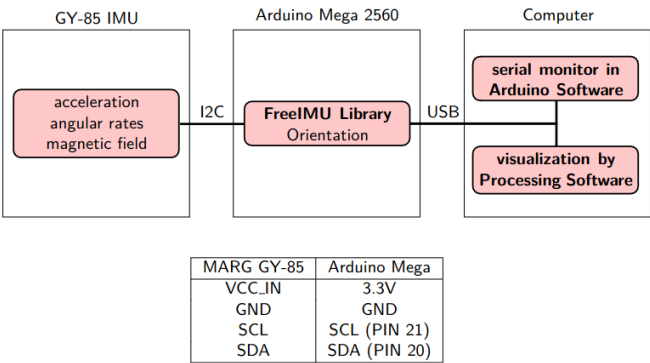
1.3.1 SENSOR MARC GY-85



- 9 DOF IMU (MARG)
- MEMS

Sensor	MEMS	Precision
Accelerometer	ADXL345	13-bit
Gyroscope	ITG3205	16-bit
Magnetometer	HMC5883L	12-bit

1.3.2 IMU-ARDUINO-COMPUTADOR



1.3.3 LIBRERÍA FREEIMU

Biblioteca FreeIMU: Proyecto de código abierto que tiene como objetivo desarrollar bibliotecas para utilizar un IMU basado en la plataforma Arduino para realizar detecciones de orientación. Esta biblioteca contiene **cuatro partes**: Scripts de Python para calibración, bibliotecas para sketches de Arduino, y procesamiento de bocetos para visualización.

TEMAS: SISTEMA DE CUADRICÓPTERO

2.1 ELEMENTOS DE UN UAS

Fundación Dronecode: Alberga proyectos de drones estándar y de código abierto. Es una fundación sin fines de lucro bajo el Linux Foundation, además de proporcionar gobernanza, infraestructuras y servicios de código abierto para proyectos de software y hardware.

Piloto automático PX4: Software de control de vuelo con licencia BSD para drones y otros UAS.

MAVlink: Protocolo de comunicación ligero para sistemas y componentes UAV.

Proyecto MAVSDK: Biblioteca MAVlink que cumple con los estándares de API para lenguajes de programación de uso común como C++, Swift y Python (es la forma más fácil de integrarse con drones sobre MAVlink).

QGroundControl: Presenta características completas y totalmente personalizables, además de una estación de control para drones en MAVlink. Este proyecto basado en QT ofrece soporte multiplataforma para iOS, Android y también para soporte de escritorio Linux, MacOS y Windows.

2.2 CONFIGURACIÓN

Configuración convencional: Los brazos se cruzan en el centro, con las hélices distribuidas simétricamente en el extremo de los brazos, donde el espacio en medio del fuselaje se puede utilizar para colocar el piloto automático y otros equipos periféricos.

Configuración X: Más popular que la configuración + debido a una mayor maniobrabilidad por más motores involucrados en el control de cabeceo y balanceo, y debido a una menor oclusión del campo de visión delantero.

Hélices co-eje (Y6, X8): Utilizadas para aumentar el número de hélices y la capacidad de carga, por lo que se montan dos hélices al final del brazo sin aumentar el tamaño del multicoptero. Sin embargo, debido a la interferencia del flujo de aire, esta forma puede reducir la eficiencia de la hélice, por lo que se requiere optimización.

2.3 TAMAÑO

Tamaño diagonal: Diámetro del círculo circunstante determinado por los ejes del motor, generalmente dado en mm (distancia de los ejes motores en la línea diagonal), lo que restringe el tamaño de la hélice rp, que determina el empuje máximo y la capacidad de carga útil.

Para un **multicoptero con n brazos**, para que sea más compacto sin perder mucha eficiencia por la interferencia aerodinámica, la regla general $r_{max} = 1,05rp \sim 1,2rp$ se puede utilizar para dejar espacio entre las hélices.

Tamaño de la diagonal: $\sin(\pi/n) = r_{max}/R \Rightarrow R = r_{max} / \sin(\pi/n)$

2.4 MATERIAL

	Carbon fiber	Fiberglass	Polycarbonate	Acrylic	Aluminium	Balsa
Density (lb/cuin)	0.05	0.07	0.05	0.04	0.1	0.0027–0.0081
Young's modulus (Msi)	9.3	2.7	0.75	0.38	10.3	0.16–0.9
Tensile strength (Ksi)	120	15–50	8–16	8–11	15–75	1–4.6
Cost (10:cheapest)	1	6	9	9	7	10
Producibility (10:simplest)	3	7	6	7	7	10

Los **materiales de fibra** tienen pequeña densidad, alta rigidez y alta resistencia, pero son costosos y difíciles de procesar, y se aplican ampliamente a multicopteros comerciales que necesitan transportar carga útil pesada.

2.5 TREN DE ATERRIZAJE

Características: Apoya todo el multicoptero y mantiene el equilibrio de niveles, mantiene las hélices alejadas del suelo a una distancia segura, y consume y absorbe energía de impacto durante el aterrizaje.

Efecto suelo debilitado: La corriente descendente golpea el suelo y genera algo de efecto perturbador durante el despegue y el aterrizaje.

2.6 TORQUE, FUERZA Y MOMENTO RESULTANTE

En cada punto de montaje del motor, la hélice y el motor aplican un empuje F_i y un par de reacción M_i en el vehículo.

Motores 1 y 2: Giran en sentido antihorario (CCW) con un par de reacción negativo ($M_i < 0$).

Motores 3 y 4: Giran en el sentido de las agujas del reloj (CW) con un par de reacción positivo ($M_i > 0$).

El borde de ataque más grueso viaja en la dirección del sentido de giro.

Marco fijo al cuerpo: x_b (dirección de avance), y_b (está hacia la izquierda mientras se mira adelante), z_b (perpendicular al plano de los rotores mirando hacia arriba).

Sistema equivalente de fuerza resultante y par resultante aplicado en el CG: $F_{eq} = \sum F_i$; $M_{eq} = \sum M_i + \sum R_i \times F_i$.

La fuerza resultante (sustentación) sobre el vehículo CG desde el motor/hélice 3: $F_3 = F_{3kb}$

El par resultante sobre el CG del vehículo desde el motor/hélice 3: $Q_3 = M_{3kb} + R_3 \times F_{3kb}$, que está compuesto por el momento de guiñada positivo respecto a z_b , el momento de tono negativo respecto a y_b , y el momento de balanceo positivo respecto de x_b .

2.7 HOVER

La fuerza resultante está equilibrada con el peso: $F_{eq} = \sum F_i = W$

El par resultante es cero: $M_{eq} = \sum M_i + \sum R_i \times F_i = 0$

2.8 MOVIMIENTOS

Movimiento ascendente: Se logra aumentando toda la velocidad del motor.

Movimiento descendente: Se logra disminuyendo toda la velocidad del motor.

Fuerzas resultantes: La fuerza resultante es más que el peso ($F_{eq} > W$), el par resultante es cero ($M_{eq} = 0$).

Aunque el par de reacción todavía se anula entre sí, el par resultante es un momento de paso positivo.

El empuje resultante tiene una componente de avance.

Para equilibrar con el peso, los cuatro motores deberían girar más rápido equitativamente.

En comparación con una pelea flotante, se logra un movimiento de guiñada positivo, disminuyendo la velocidad de los motores 1 y 2, mientras aumenta la velocidad de los motores 3 y 4, donde la fuerza resultante está equilibrada con el peso.

Los momentos de cabeceo y balanceo en el CG ocurren debido a la cancelación de los motores 1 y 2, algo que también ocurre en los motores 3 y 4.

Debido a la diferencia en los pares de reacción, el momento resultante se convierte en un momento de guiñada positivo.



2.9 AUTOPILOT

Sistema de piloto automático de UAS: Constan de una serie de componentes principales integrados en el propio dispositivo (por ejemplo, aceleración, giroscopio y magnetómetro), así como algunos sensores y dispositivos externos, además de un procesador/microcontrolador en el corazón del piloto automático.

Características: Lee entradas como valores de sensores y entradas de comandos, realiza cálculos para determinar los controles necesarios y emitir estos comandos para desviar las superficies de control de vuelo o controlar los motores.

Pixhawk 4: Piloto automático diseñado y fabricado en colaboración con Holybro y el equipo de PX4. Se basa en el diseño de hardware abierto FMUv5 del proyecto Pixhawk y ejecuta PX4 en el sistema operativo en tiempo real NuttX.

Ejemplos: Procesador FMU principal (32 bits, 216 MHz, memoria flash de 2 MB, RAM de 512 KB), procesador IO (32 bits, 24 MHz, SRAM de 8 KB), sensores integrados (Accel/Gyro ICM-20689 y BMI055, barómetro MS5611), GPS (receptor ublox Neo-M8N GPS/GLONASS, magnetómetro integrado IST8310).

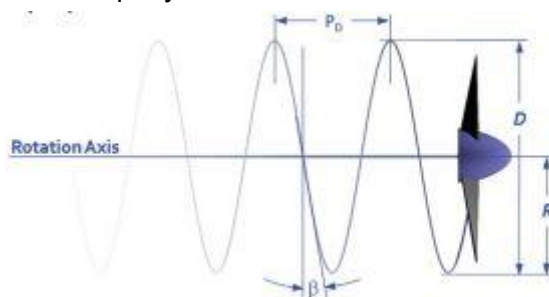
2.10 SISTEMA DE PROPULSIÓN Y POTENCIA

Componentes: Hélices, motores, ESC, y una batería; éstos tienen que ser compatibles entre sí para funcionar correctamente, aunque su incompatibilidad puede provocar fallos. Por ejemplo, una maniobra agresiva puede resultar en que la corriente exceda el límite de seguridad del umbral del ESC y luego detiene los motores.

2.11 PARÁMETROS DE LA HÉLICE

Tipo de hélice: Se describe mediante un número de cuatro dígitos (10x45), donde los dos primeros dígitos representan el diámetro de la hélice, y los dos últimos dígitos representan el paso de la hélice, ambos en pulgadas.

Cuerda: Distancia entre los bordes de ataque y salida de la hélice.



Momento de inercia: Cantidad que describe la tendencia de un cuerpo a resistir aceleraciones angulares. Un menor momento de inercia de la hélice puede mejorar la velocidad del motor, que es importante para el efecto de control y el rendimiento.

Normalmente, el número de palas puede ser dos, tres o cuatro. Algunos experimentos muestran que aumentar el número de palas da como resultado más empuje, pero menor eficiencia.

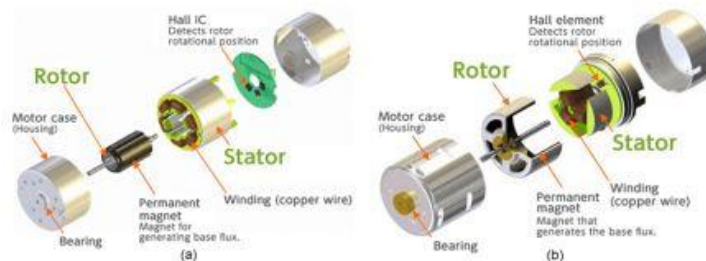
Hay una velocidad de rotación segura, más allá de la cual las hélices pueden deformarse, provocando una reducción de la eficiencia.

Empuje específico: Parámetro que describe la eficiencia de la transformación de energía, normalmente utilizando g/W en lugar de N/W.

Empuje específico de la hélice [N/W] = Empuje [N] / Par [Nm] × Velocidad de rotación de la hélice [rad/s]

Materiales de las hélices: **Fibra de carbono** (más ligeras y resistentes, menos vibración y ruido, mejor para motores con un KV alto), plástico y madera. Sin embargo, las de fibra de carbono son más caras y peligrosas.

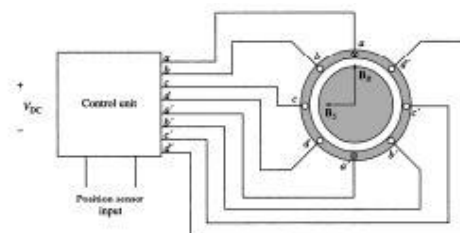
2.12 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS MOTORES BDLC



Motores de CC: Se utilizan para fuentes de alimentación de CC sin conmutadores ni escobillas.

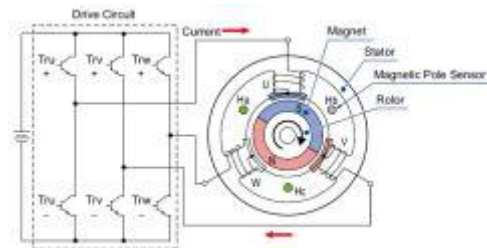
Desventajas: Los motores rápidos de CC con escobillas producen chispas excesivas y desgastan las escobillas.

Componentes: Rotor magnético permanente; estator con tres, cuatro o más devanado de fase (bobinado del motor); sensor de posición del rotor; circuito electrónico para controlar las fases del devanado del rotor.



Funcionamiento: Se energiza una bobina del estator a la vez con una CC a un voltaje constante, lo que tiende a alinear el rotor, creando un campo magnético BR con BS, dando lugar a una CCW que genera un par para girar el rotor hacia la izquierda. Si esta bobina permanece energizada todo el tiempo, el rotor girará hasta que los dos campos magnéticos se alineen hasta detenerse.

La clave para el funcionamiento de un motor BLDC es el sensor de posición para detectar cuando el rotor está casi alineado con el campo magnético del estator. En ese momento, el circuito de control electrónico apagará la bobina actual y encenderá la siguiente bobina, para hacer girar el motor continuamente.



Los motores BLDC con configuración en estrella tienen tres cables que salen de ellos, donde el punto neutro está conectado internamente y los otros extremos de las tres fases están conectados al circuito de accionamiento.

BLDC trifásico bipolar: Cada bobina magnética de los imanes del rotor tiene un ángulo de polo de 180°. En el estator, el trifásico (U, V, W) las bobinas están espaciadas 120° aparte. Los sensores de posición magnéticos (Ha, Hb, Hc) son desplazados de las bobinas por 60° (detectan el polo norte de los imanes del rotor).

En este caso, Ha y Hc detectan el polo norte, donde los transistores Tru+ y Trv- están encendidos mientras una corriente fluye desde la bobina de fase U a la bobina de fase V.

La **fase-V** se convierte en un polo norte que atrae al polo sur y repele al polo norte de los imanes del rotor.

La **fase-U** se convierte en un polo sur que repele al sur polo y atrae el polo norte de los imanes del rotor. De este modo, el rotor gira en el sentido de las agujas del reloj.

Ventajas: Alta eficiencia; larga vida y alta confiabilidad; potencial de reducción; poco mantenimiento; menos ruido electrónico de RF; puede utilizar velocidades muy altas; rango de alta velocidad sin limitación mecánica.

Desventajas: Siempre requiere un ESC, cuyo coste hay que tener en cuenta.

2.13 PARÁMETROS DEL MOTOR

Generalmente, el tamaño de un motor está representado por el tamaño del estator con un número de cuatro dígitos (2212) donde los **dos primeros dígitos** indican el diámetro del estator, mientras que los **dos últimos dígitos** indican la altura del estator, ambas en mm. Un motor ancho y alto tiene alta potencia, lo que es más adecuado para multicopteros grandes.

Valor KV: Es el número de RPM que el motor gira cuando se aplica un voltaje sin carga conectada al motor, en rev min-1/V.

Hay una corriente o potencia máxima que el motor puede soportar. Por ejemplo, un motor “25 A/30 s” puede funcionar de forma segura con la corriente continua máxima de 25 A para no más de 30 s.

En la prueba sin carga, después de aplicar una tensión nominal, la corriente que consume el motor es definida como corriente sin carga. La energía que se consume se debe en parte a pérdidas causadas por histéresis, corrientes parásitas en el núcleo de hierro y pérdidas mecánicas encontradas en los rodamientos.

Hay resistencia en todos los devanados del motor. Es muy pequeño pero no se puede ignorar porque la corriente que fluye a través de la resistencia es tremendamente grande y a veces alcanza decenas de amperios. La existencia de la resistencia genera calor durante el funcionamiento del motor, lo que puede sobrecalentarlo y reducir su eficiencia.

Eficiencia del motor: Eficiencia del motor = Potencia mecánica[W] / Potencia eléctrica[W] = Par [Nm] × Velocidad de rotación de la hélice [rad/s] / Voltaje de entrada[V] × Corriente efectiva[A], donde la eficiencia del motor no es una constante, y generalmente varía con el acelerador y la hélice de entrada como carga.

Para la misma hélice, la eficiencia del motor puede reducirse con el acelerador debido a una mayor pérdida de calor y otras pérdidas con una corriente mayor.

El rendimiento general del sistema de propulsión depende en gran medida de una combinación adecuada de madre y hélice.

Empuje específico general: Empuje específico general [g/W] = Empuje [g] / Energía eléctrica [vatios] = Empuje específico de la hélice × Eficiencia del motor

El empuje específico general cambia con las condiciones de trabajo. Los fabricantes de motores normalmente proporcionan estos datos en una tabla para ayudar a los diseñadores a seleccionar el motor-hélice que cumpla con sus requisitos.

Motor model	Voltage (V)	Propeller Model	Throttle	Current (A)	Power (W)	Thrust (g)	Speed (RPM)	Efficiency (g/W)	Torque (Nm)	Temperature °C
T-MOTOR MNS212 KV340	24	T-MOTOR 15x5CF	50%	3.3	79	745	3821	9.44	0.142	38
			55%	4.2	99.8	910	4220	9.11	0.172	
			60%	5.2	123.6	1075	4576	8.7	0.198	
			65%	6.3	150.7	1254	4925	8.32	0.222	
			75%	9.1	217.2	1681	5663	7.74	0.31	
			85%	12.2	292.1	2115	6315	7.24	0.382	
			100%	17.8	426.7	2746	7167	6.44	0.498	
		T-MOTOR 18x6.1CF	50%	5.7	137.5	1318	3596	9.58	0.29	74
			55%	7.4	178.1	1612	3958	9.05	0.344	
			60%	9.3	222	1901	4310	8.56	0.411	
			65%	11.6	278.2	2259	4622	8.12	0.472	
			75%	16.5	395.5	2835	5226	7.17	0.605	
			85%	22.1	531.1	3477	5751	6.55	0.737	
			100%	31	744.7	4355	6358	5.85	0.918	

2.14 PARÁMETROS DEL ESC

ESC (funcionalidad básica): Controla la velocidad de los motores basada en la señal PWM que envían los pilotos automáticos. El BLDC ESC actúa como un inversor que transforma una entrada de alimentación de CC integrada en una alimentación de CA trifásica que se puede aplicar a motores BLDC.

El parámetro más importante para los ESC es la **corriente continua máxima**. Los ESC normalmente están etiquetados como Hobbywing XRotor 15A, lo que indica que la corriente continua máxima es de 15 A. Se debe dejar un margen de seguridad (~20%) que hay que tener en cuenta a la hora de elegir los ESC.

Corriente máxima: Corriente máxima instantánea que el ESC puede soportar.

El **rango de voltaje** que permite que un ESC funcione correctamente está indicado por el tipo de batería compatible (3-4S LiPo en la tabla de especificaciones significa que el rango de voltaje de este ESC es de 11,1 V a 14,8 V, correspondiente al voltaje de una batería LiPo con 3-4 celdas).

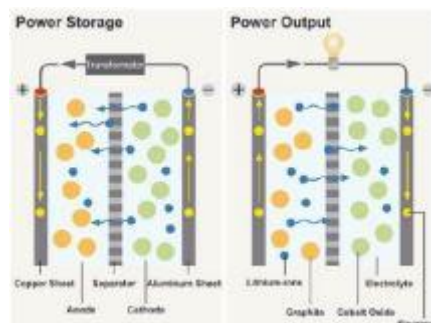
Todos los ESC tienen una resistencia que resulta en la disipación de calor.

Para un multicoptero, se requiere un ajuste rápido para controlar la velocidad de la hélice y una alta frecuencia de actualización deseable para los ESC. Por ejemplo, el Hobbywing XRotor 15A ESC admite una frecuencia de señal de hasta 500 Hz desde los controladores de vuelo.

2.15 BATERÍA

Batería: Dispositivo electroquímico que almacena energía química y la convierte en energía eléctrica mediante un par de reacciones redox (reducción-oxidación). Consta de ánodos y electrodos catódicos separados por un líquido o un electrolito sólido.

Batería de polímero de iones de litio: Similar a la batería de iones de litio, excepto que el electrolito se reemplaza por un polímero sólido, y se utilizan comúnmente debido a su buen rendimiento y precio.



Ánodo (-): Carbono desordenado, grafito (carbono ordenado), reacción de oxidación (el número de oxidación del reductor aumenta ($C1/6 \rightarrow C6$) y se pierden electrones en el circuito externo $LiC6 \rightarrow Li^+ + e^- + C6$).

Cátodo (+): Óxido de litio y cobalto ($LiCoO_2$), óxido de litio y níquel ($LiNiO_2$), etc, reacción de reducción (el número de oxidación del oxidante disminuye ($Co^{4+} \rightarrow Co^{3+}$) y se ganan electrones del circuito externo $CoO_2 + Li^+ + e^- \rightarrow LiCoO_2$).

Electrolito: Transporta los iones cargados (Li^+).

A diferencia de las baterías, las pilas de combustible pueden generar electricidad sin alterar los electrodos ni los materiales electrolíticos, pero no tienen capacidad de almacenamiento de energía eléctrica y requieren suministro continuo de reactivos y retirada de productos de reacción.

Un problema que a menudo preocupa a los pequeños multicopteros actuales es el tiempo de resistencia, que depende en gran medida de la capacidad de las baterías.

Capacidad de batería: Carga eléctrica que puede entregarse a temperatura ambiente hasta alcanzar un voltaje de corte de aproximadamente 2/3 del voltaje de carga completa.

El **índice de capacidad** normalmente se da en miliamperios-hora (mAh). Por ejemplo, la descarga de una batería de 5000 mAh durará una hora con la corriente de 5 A cuando el voltaje de una sola celda se reduce de 4,2 V a 3 V.

El **voltaje nominal** de una sola celda de la batería LiPo es de 3,7 V. Cuando está completamente cargada, el voltaje puede alcanzar los 4,2 V. El voltaje restante se reduce gradualmente con la descarga de la batería. La mayoría de los estudios muestran que, en un cierto rango, el voltaje restante está en una relación lineal con la capacidad restante de la batería. Sin embargo, en la última etapa del alta, el voltaje puede caer bruscamente, lo que puede provocar una rápida pérdida de empuje del multicoptero. Por lo tanto, para garantizar el funcionamiento del multicoptero, es necesario establecer un umbral de tensión seguro para la batería.

La batería NUNCA debe descargarse por completo, de lo contrario puede tener un daño irreversible.

Hay conexiones en serie (obtienen un voltaje más alto sin cambiar la capacidad) y en paralelo (obtienen una capacidad mayor sin cambiar el voltaje) de las celdas de la batería.

Clasificación C: Mide la tasa máxima de descarga de una batería. Para una batería con clasificación C de n, la batería se descargará completamente después de 1/n horas a su corriente máxima.

Tasa de descarga [C] = Corriente de descarga [mA] / Capacidad [mAh]

Mayor clasificación C, descarga más rápida, mayor corriente de descarga.

Para una batería con 1600 mAh y **clasificación de 10 C**, la corriente de descarga máxima es $1600 \text{ mAh} \times 10C = 16 \text{ A}$. El tiempo de ejecución para una descarga continua segura a 16 A es $60 \text{ min} \times 0,1 = 6 \text{ min}$.

Para una batería con 1600 mAh y **clasificación de 0,1 C**, la corriente de descarga máxima es $1600 \text{ mAh} \times 0,1C = 0,16 \text{ A}$. El tiempo de ejecución para una descarga continua segura a 16 A es $60 \text{ min} \times 10 = 600 \text{ min}$.

La resistencia de una batería puede aumentar debido a una sobrecarga, una descarga excesiva, una corriente de descarga alta durante un período prolongado o un sobrecalentamiento. A medida que aumenta la resistencia, la eficiencia de la batería disminuye y la estabilidad térmica se reduce ya que más energía de carga se convierte en calor.

Densidad de energía volumétrica: Energía nominal de la batería por unidad de volumen ($W \text{ h L}^{-1}$).

Densidad de energía gravimétrica: Energía nominal de la batería por unidad de masa ($Wh\ kg^{-1}$), también conocida como energía específica, por lo que son deseables baterías con mayor densidad de energía.

Mitigación de riesgo para baterías LiPo: Coloca la batería dentro del fuselaje para minimizar las posibilidades de un choque de alto impacto, fijación segura de la batería, rellena el área de la batería o usa una bolsa de seguridad LiPo para ayudar a contener el fuego, nunca cargues baterías LiPo con ellas montadas en un UAV (riesgo de incendio que destruye el todo el UAV), carga siempre una batería LiPo en una bolsa de seguridad, nunca dejes desatendida una batería LiPo en carga.

Una **celda LiPo** está diseñada para funcionar dentro de un rango de voltaje seguro, de 3 V a 4,2 V. Una descarga por debajo de 3 V podría causar una pérdida irreversible de rendimiento e incluso daños a la batería. Usar un timbre para monitorear el estado de la batería y enviar una alarma cuando el voltaje cae demasiado bajo.

} 2.16 EVOLUCIÓN DEL RENDIMIENTO

Drive Calculator: Herramienta gratuita para el análisis del sistema de potencia del motor BLDC y la selección de la hélice o del motor. Tiene una gran base de datos y muchos motores, hélices, ESC y baterías. Existen combinaciones para obtener una estimación de la corriente máxima, eficiencia, velocidad de hélice, etc, y está disponible para Windows, MAC y Linux.

En esta herramienta podrás seleccionar los modelos de batería, motores, hélice y ESC.

Los resultados del análisis de aceleración máxima pueden ofrecer la corriente con la hélice seleccionada como carga para el motor, las gráficas de eficiencia versus actual y el empuje y velocidad estáticos de la hélice seleccionada.

Basado en modelos físicos y matemáticos, **xcopterCalc** es capaz de simular las características de vuelo de un multicoptero. Después de configurar el entorno, el marco y el rotor configuración, batería, ESC, hélice y motor, la calculadora proporciona una estimación de la performance de vuelo y las características del sistema de propulsión.

} 2.17 ENLACE DE DATOS

Control por radio RC (2.4 GHz): **Transmisor RC** (transmite comandos desde pilotos remotos al receptor correspondiente), **receptor RC** (recibe los comandos desde el transmisor), **codificador PPM** (traduce las señales PWM a PPM que pueden ser aceptadas por el piloto automático Pixhawk).

Radio Telemetría (915 MHz en EE.UU. y 443 MHz en Europa): Transmisión de datos bidireccional que conecta el GCS y el vehículo. Permite a la UA enviar en tiempo real datos a la estación base, describiendo los parámetros de vuelo (velocidad, rumbo), así como el área bajo vigilancia (video en vivo desde aire).

} 2.18 ESTACIÓN DE CONTROL

Transmisor de radiocontrol: Transmitir los comandos del piloto al autopiloto y la carga útil.

Portátil/Tablet: Planificar y controlar la misión con software.