

## Instrumentación de hexacóptero y pruebas del consumo eléctrico Hexacopter instrumentation and electrical consumption tests

M. Torres-Rivera <sup>a,\*</sup>, R. Sanchez-Nieto <sup>a</sup>, P. Gomez-Resendiz <sup>a</sup>, G. Ramirez-Villa <sup>a</sup>, A. Traslosheros-Michel <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Universidad Aeronáutica en Querétaro, 22154, Colón, Querétaro, México.

### Resumen

Los vehículos aéreos no tripulados (UAV) se caracterizan por ser fácilmente adaptables, teniendo infinidad de funciones, las cuales se han estado expandiendo desde el día de su creación debido a la modularidad que estos presentan y que les permite cambiar tarjetas controladoras de vuelo, telemetría e incluso placas de distribución de energía. Todos los sistemas mencionados anteriormente pueden ser implementados con módulos comerciales o pueden ser diseñados con la finalidad de analizar de forma más profunda su comportamiento y proponer mejoras desde la perspectiva electrónica. En este artículo se presentará el desarrollo de una tarjeta de distribución de energía en circuito impreso (PCB) para un hexacóptero, relacionando el diseño con algunas implicaciones para diferentes sistemas en el dron. Así mismo, se consideran normas y recomendaciones de diseño, que permitan integrar diversos elementos en un sistema embebido y que generen un primer acercamiento para analizar el consumo eléctrico del UAV.

**Palabras Clave:** PCB, Alta corriente, Calor, Distribución, Energía

### Abstract

Unmanned aerial vehicles (UAV) are characterized by being adaptable, having an infinity of functions, which have been expanding since the day of their creation because they are modular, and it is possible to change the flight controller cards, telemetry and power distribution systems. All the systems mentioned above can be implemented with commercial modules or can be designed in order to analyze their behavior and propose improvements from an electronic perspective. This article will prepare the development of a power distribution system on a printed circuit board (PCB) for a hexacopter, relating the design with some implications for different systems in the drone. Likewise, design standards and recommendations are considered, which allow the integration of various elements in an embedded system and which generate a first approximation to analyze the electrical consumption of the UAV.

**Keywords:** PCB, High current, Heat, Distribution, Energy

### 1. Introducción

Los UAVS (Unmanned Aerial Vehicle o vehículos aéreos no tripulados) se han popularizado debido a la gran gama de aplicaciones tanto civiles como militares y por el abaratamiento de las tecnologías necesarias para su implementación.

En un UAV el control de vuelo se efectúa mediante un piloto automático implementado en un sistema de procesamiento digital, que suele ser una tarjeta electrónica embebida. (Pico, 2012).

Los UAVS tienen incontables aplicaciones: desde acceso a zonas de riesgo, topografía, termografía, vigilancia forestal, rescate, seguridad y vigilancia, solo por mencionar algunas, es-

to ha propiciado diferentes propuestas de diseño que se pueden clasificar según su rango de operación, según su tamaño o según su configuración aerodinámica.

La principal ventaja que tiene un UAV con respecto a las demás aeronaves es que no requiere la actuación de pilotos, por lo cual son una buena opción para aplicaciones donde hay un alto riesgo o para lugares de difícil acceso. Sin embargo, esto también se puede tomar como una desventaja, pues en caso de algún fallo durante el vuelo, no existe ninguna persona a bordo que pueda pilotear la aeronave para evitar que sufra daños o su pérdida total.

Posiblemente el UAV más conocido en la actualidad es el dron, clasificado como un UAV de ala rotativa. (Valavanis and

\* Autor para correspondencia: moises.torres@unaq.mx

**Correo electrónico:** moises.torres@unaq.mx (Moisés Torres Rivera), 3914@soyunaq.mx (Rodrigo Yipzam Sánchez Nieto), 3490@soyunaq.mx (Pedro Antonio Gómez Reséndiz), goretti.ramirez@unaq.mx (Goretti Ramírez Villa), alberto.traslosheros@unaq.mx (Alberto Traslosheros Michel).

**Historial del manuscrito:** recibido el 15/04/2022, última versión-revisada recibida el 14/07/2022, aceptado el 15/08/2022, publicado el 30/11/2022. DOI:<https://doi.org/10.29057/icbi.v10iEspecial6.9022>



Kontitsis, 2007). El dron puede ser controlado, ya sea a distancia por un humano (control remoto), como por un medio autónomo (piloto automático). La mayoría de los drones actuales combinan estas 2 técnicas, el dron ya tiene rutas establecidas, pero también cuenta con la ayuda del humano para tareas un poco más difíciles como el despegue o aterrizaje en entornos complicados, o en cualquier otra zona del recorrido.

Como cualquier UAV, el dron cuenta con sistemas embebidos que trabajan en conjunto como lo son, el sistema de comunicaciones, el sistema de procesamiento y control, los sensores (GPS, acelerómetros, giroscopios, magnetómetros, altímetro, cámaras, etc.), el sistema electrónico de potencia (convertidores, batería, motores, otros actuadores, etc.) y el sistema estructural.

En específico el sistema de distribución de energía es uno de los componentes principales en el desarrollo de drones ya que la eficiencia energética es fundamental en este tipo de vehículos eléctricos, por lo que se pretende analizar el consumo durante las etapas de vuelo.

## 2. Estructura del hexacóptero

Los componentes de hardware principales y necesarios para el vuelo de un hexacóptero son los siguientes:

- Frame o estructura del hexacóptero.
- Motores brushless.
- ESC (Electronic Speed Controller) para control de velocidad de los motores .
- Hélices o palas.
- Batería, generalmente del tipo LiPo (polímero de litio).
- Radio Control más de 4 canales.

Si se quiere tener un dron autónomo es necesario contar con un sistema de control y la instrumentación necesaria para el vuelo y el procesamiento de datos de los distintos sensores, así como la telemetría para monitoreo de señales, por lo que será necesario contar también con los siguientes dispositivos:

- Piloto automático. Sistema de control que permite al dron realizar las misiones y actividades de forma automática, además de gestionar los distintos sensores y componentes, en el desarrollo del trabajo se utiliza la placa Pix-Hawk.
- GPS (Global Positioning System). Sistema de localización satelital para conocer la ubicación del dron.
- Sistema de telemetría. Sistema de comunicación a la estación terrena mediante radiofrecuencia siguiendo algún protocolo de comunicación como el MAVlink.
- Módulo de fuente de alimentación. Regulador para alimentación a 5 V del piloto automático y envío de datos de voltaje y corriente.

## 3. Instrumentación y mejora del dron ZD850

Para el caso del presente trabajo se adquirió un frame comercial denominado ZD850, el cual está diseñado para seis motores (de ahí el nombre de hexacóptero). Las especificaciones del frame se muestran en la tabla 1.

Tabla 1: Especificaciones para frame del UAV.

Distancia entre ejes	850mm
Material	Fibra de carbono
Diámetro de brazo	20mm
Grosor de placa inferior/superior	3mm/1.5mm
Peso neto	1210grs

De acuerdo con las especificaciones de la tabla 2 de los motores brushless y las dimensiones del frame se optó por comprar una hélice 1555. A partir de la selección anterior y teniendo una batería LiPo 6S 40C a 5000mAh, se pudo estimar que el dron podría soportar una carga estimada total de 9840grs.

Tabla 2: Características para selección de hélices.

Voltaje V	Sin carga		Con carga			Tipo de carga Battery/prop
	Corriente A	Velocidad rpm	Corriente A	Empuje g	Potencia W	
18.5	0.4	6660	1.6	400	29.6	CF15x5.5 Prop
			4.4	800	81.4	
			9.0	1270	166.5	
			1.6	400	29.6	CF16x5.5 Prop
			4.2	800	77.7	
			9.7	1370	179.5	
			2.0	500	37.0	CF17x5.5 Prop
			5.4	1000	99.9	
			11.8	1600	218.3	
			2.1	500	38.9	CF18x5.5 Prop
			5.9	1000	109.2	
			14.4	1600	266.4	
22.2	0.4		1.9	500	42.2	CF15x5.5 Prop
			5.3	1000	117.7	
			11.5	1640	255.3	
			2.3	600	51.1	CF16x5.5 Prop
			6.7	1200	148.7	
			12.5	1740	277.5	
			2.2	600	48.8	CF17x5.5 Prop
			6.3	1200	139.9	
			14.4	1840	319.7	
			2.5	600	55.5	CF18x5.5 Prop
			7	1200	155.4	
			16.4	1760	364.1	



Figura 1: Dron ZD850

De los componentes básicos mencionados anteriormente también se instalaron los controladores de motores (ESC) de capacidad de 40 A y la batería 6S que se mencionó para alcanzar la carga estimada. Cabe resaltar que para la batería se tuvo que diseñar una estructura adicional y manufacturar por medio de impresión en 3D para que pueda ser soportada por el frame del UAV.

Los componentes mencionados anteriormente se integraron en la estructura como se muestra en la figura 1, sin embargo en el proceso se identificó la necesidad de profundizar en el diseño del sistema de distribución de energía desde la batería hacia los motores lo cual se logró con el desarrollo de la placa PCB que se analizará posteriormente y que será parte medular del presente trabajo.

#### 4. Análisis estructural

La teoría de dinámica de fluidos establece que, la tasa de flujo de masa (flujo de aire alrededor de la hélice) en la condición de movimiento de flotación se calcula en función del área de superficie (A) con presión de aire. Dicho esto, la fuerza de presión depende de la densidad del aire ( $\rho$ ) y la velocidad del aire ( $v_I$ ) como se establece en (1).

$$T = \rho A v_I v_0 \quad (1)$$

Los efectos de la hélice son un cambio de presión que genera un movimiento oscilatorio de empuje y arrastre, lo cual resulta en que la velocidad del aire sobre la hélice es aproximadamente dos veces la velocidad de incidencia del aire ( $v_o = 2v_I$ ;  $v_I = \frac{1}{2}v_o$ ). Dicha velocidad depende de la magnitud de la velocidad angular del rotor (rpm) y el espacio en el que la hélice viajará hacia adelante a través de un medio sólido en una revolución completa. Suponiendo los datos anteriores y el área de la hélice se tiene la ecuación (2).

$$T = \frac{\pi}{8} D^2 \rho v_o^2 \quad (2)$$

Lo anterior puede explicar que la magnitud del flujo de aire y el empuje producido se determina a partir del tamaño de la hélice y su velocidad angular. Respecto al frame del dron, la cantidad de empuje resultante se puede usar para calcular la rigidez del marco diseñado y el análisis estructural y de vibraciones.

El empuje máximo resultante obtenido analíticamente fue de 16.08 (N) o equivalente con 1640.56 (gramos-fuerza) para un rotor del dron.

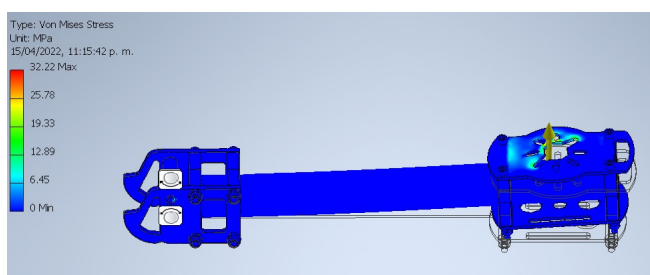


Figura 2: Análisis estructural

En la figura 2 se muestra el desplazamiento máximo que ocurrió en el rotor y en el centro del frame del ala. Como resultado el soporte tiene una buena rigidez con el tamaño del frame.

#### 5. Diseño de PCB para distribución eléctrica.

Para el desarrollo de un sistema electrónico es necesario definir una metodología que garantice el funcionamiento adecuado considerando los requerimientos correspondientes de la aplicación, en este caso los pasos generales para lograr el diseño del sistema fueron:

1. Definición de características y requerimientos
2. Selección de componentes
3. Diseño del circuito (implica cálculos y diagramas)
4. Simulación
5. Pruebas en protoboard
6. Diseño de PCB
7. Manufactura
8. Pruebas de funcionamiento
9. Validación del sistema

Durante el diseño del circuito se buscó simplificar el problema por lo cual el sistema que se requiere diseñar se centra en una placa PCB a partir de la cual se distribuya energía a todos los componentes del dron. Como se ha mencionado anteriormente todos los sistemas del dron son módulos comerciales que cumplen la función requerida sin necesidad de que el equipo de trabajo se involucre a profundidad en el diseño, por tal motivo, la opción típica sería adquirir una placa o módulo comercial e integrarla con los otros componentes en el dron.

Como primer acercamiento se implementó una placa de distribución de la marca lanitian como se muestra en la figura 3. Según el fabricante este módulo soporta hasta 200 A, las conexiones hacia los componentes se realizaron con coples tipo bullet macho y hembra, soldando cable calibre 12 AWG con soldadura de estaño para cada uno de los motores.

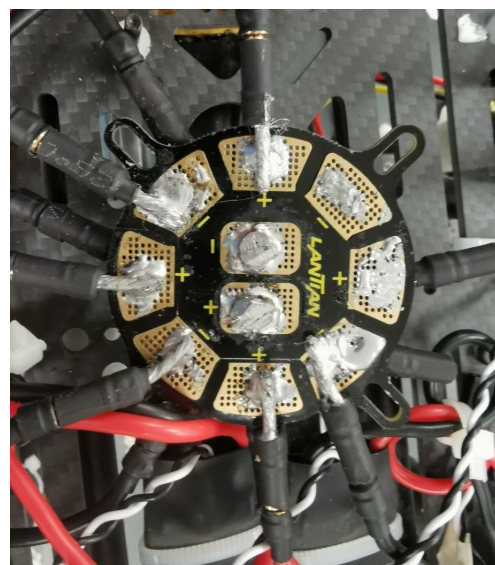


Figura 3: Placa de distribución comercial lanitian.

Sin embargo, para disminuir costos de prototipos e incursionar en el diseño de los sistemas del dron se propuso el diseño de

esta placa de forma independiente, abordando consideraciones del diseño de la PCB principalmente.

Por un lado, podemos obtener infinidad de aplicaciones de circuitos que pueden ser integrados a placas PCB (placas de cobre) en las que se define como etapa de control (pistas en donde no pasan corrientes muy grandes) y por otro lado, la etapa de control, que es donde se busca conocer el comportamiento más aproximado a la realidad bajo ciertas condiciones controladas.

Al diseñar placas PCB se tiene que tener consideraciones para poder obtener un buen diseño y cumplimiento de los objetivos impuestos de ciertos circuitos; para el diseño propuesto se consideraron las siguientes características:

- Espesor del cobre.
- Calor producido.
- Valor de resistencia.
- Cálculos de ancho de pista.
- Longitud de las pistas. (Mantener cortas las pistas de alta corriente.)
- Capacidades tecnológicas del fabricante.
- Aislamiento térmico de los componentes.

Las consideraciones para el diseño de equipos electrónicos se encuentran acotadas en diferentes estándares como son las normas propuestas por el Institute for Printed Circuits (IPC), cuyos estándares aplican para casi todas las fases del ciclo de desarrollo de productos electrónicos. Estas normas rigen parámetros que consisten en mejorar los procesos existentes evitando así la existencia de problemas futuros (Adam, 2004), por lo anterior el diseño que se realizó está basado en las siguientes normas:

- Norma IPC 2221B para placas PCB.
- Norma IPC 620 para cableado.
- Norma IPC 610 para soldadura.

Las normas referidas nos ayudan a reducir problemas y/o mitigarlos, un ejemplo de esto es la norma IPC 2221 la cual brinda información que puede ser usada para calcular el ancho de las pistas, condiciones de temperatura etc.

La norma IPC 2221 relaciona la temperatura contra la corriente, sin embargo su rango máximo es de 35 A lo cual sale del rango presente en nuestra aplicación, pero se puede tomar como referencia ecuaciones que se describen en una subsección posterior (Adam, 2004).

### 5.1. Espesor del cobre.

Las corrientes eléctricas presentes en los dispositivos y placas encuentran resistencia al movimiento de los electrones lo cual provoca elevaciones de temperaturas. Un alto flujo de corriente en un área pequeña causará que la temperatura se eleve rápidamente, en contraste en un área más grande se presentará un aumento menos significativo. Dicho lo anterior, se debe tomar en cuenta parámetros como el espesor del cobre, el cual es medido en onzas sobre pie cuadrado.

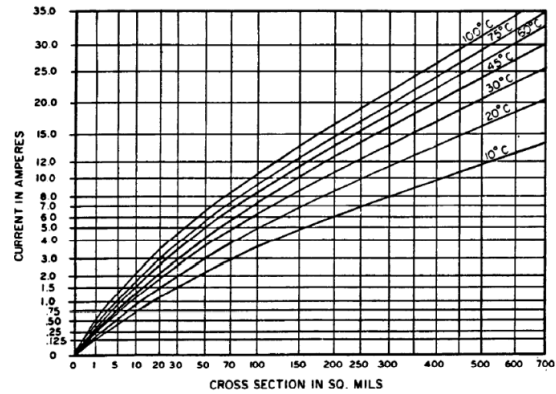


Figura 4: Gráfica corriente vs sección transversal (Adam, 2004).

Los circuitos que operan a más de 10 A deben de llegar a 3 a 4 oz por pie cuadrado. (Altium-Designer, 2022). Consecuentemente, si se aumentan las onzas en las pistas se debe aumentar el ancho de estas lo que afectaría el área disponible para el circuito, sin embargo, se puede optar por soluciones como tener capas internas en la que las pistas estén más grandes y así se puede disipar el calor uniformemente o simplemente agregar sistemas de disipación de potencia.

#### 5.1.1. Cálculos de ancho de pista.

Para la correcta determinación de tamaño de pista fue necesario hacer uso de las siguientes ecuaciones con constantes definidas en la norma IPC 2221.

$$A = \left( \frac{I}{k(\Delta T^b)} \right)^{\frac{1}{c}} [\text{mils}^2] \quad (3)$$

$$\text{Ancho} = \frac{A}{\text{Espesor} \cdot 1.378} [\text{mils}] \quad (4)$$

Donde  $I$  es la corriente máxima y  $\Delta T$  (temperatura máxima – temperatura ambiente). La norma mantiene parámetros definidos de constantes, sin embargo también se tomó en consideración los definidos por (Digi-key, 2021).

Si las pistas se encuentran en capa inferior y superior de la PCB, se toman los siguientes valores: Capa interna de la IPC-2221:

- $k = 0.024$ .
- $b = 0.44$ .
- $c = 0.725$

Capa externa IPC-2221:

- $k = 0.048$ .
- $b = 0.44$ .
- $c = 0.725$ .

Donde las constantes presentan un ajuste a la curva presente en la IPC-2221.

Para los requerimientos de diseño se tienen los resultados de las ecuaciones (5) y (6).



$$A = \left( \frac{40}{0.048 \cdot (70 - 18)^{0.44}} \right)^{\frac{1}{0.725}} = 971.13 \text{ [mils}^2\text{]} \quad (5)$$

$$\text{Ancho} = \frac{971.13 \text{ mils}^2}{2 \text{ oz} \cdot 1.378 \frac{\text{mils}}{\text{oz}}} = 352.3693 \text{ [mils]} = 8.9 \text{ mm} \quad (6)$$

### 5.2. Aislamiento térmico de los componentes.

El calor en las placas PCB es un factor que no se debe de tomar a la ligera debido a que algunas veces no puede ser disipado de manera eficiente al no contar con los elementos necesarios para hacerlo. Sin embargo, se puede optar por distribuir los componentes alejándolos de áreas de potencia de esta manera es más fácil disipar el calor.

El calor debe ser alejado de los componentes y distribuido en la parte inferior y superior de la placa, lo cual se logra con vías termales (Wang et al., 2009), este elemento es simplemente una placa metálica idealmente colocado en un punto denominado como punto de no fallo, alejado de componentes críticos y con un área libre de elementos.

### 5.3. Valor de resistencia.

Otro punto a considerar es la resistencia en un área de las pistas, la cual es posible obtener mediante la siguiente fórmula.

$$R = \rho \cdot \frac{L}{U \cdot W} \cdot [1 + \alpha \cdot (temp - 18)] \quad (7)$$

Donde  $L$ ,  $W$  y  $U$  representa alto, ancho y largo en la PCB,  $\rho$  representa la resistividad del material, y  $\alpha$  es un coeficiente de temperatura.

### 5.4. Longitud de las pistas.

Es posible perder energía a lo largo de la pista lo cual puede ser un efecto muy pequeño en cuanto a la resistencia, pero, al tener elementos de potencia, podría tener un mayor impacto perdiendo potencia, aumentando la temperatura y perdiendo conductividad. Mientras más cortas sean las pistas menor es la pérdida de energía en la PCB. (Kim et al., 2004).

### 5.5. Capacidades tecnológicas del fabricante.

Como se ha hablado en esta sección el diseño puede ser el más adecuado en cuanto a usar multicapas en la PCB, sin embargo, se tiene la limitación del fabricante y las capacidades de manufactura.

Dentro de las capacidades de manufactura se cuenta con una máquina de desgaste denominada LPKF ProtoMat, dicha máquina es la que se encarga de realizar un recorrido definido por un software de control que realiza las pistas y trazos necesarios para fabricar la placa PCB la cual cuenta con una velocidad de traslación de  $150 \text{ mm/s}$  y una velocidad angular del motor de  $40000$  a  $100000 \text{ rpm}$  capaz de producir placas de alta calidad con una resolución de  $0.25 \mu\text{m}$  (AG, 2012).

Por el momento se cuenta con dicho dispositivo pero se plantea una línea de ensamblaje completa integrando los procesos de metalizado y pick & place, lo que resulta en que el proceso de soldadura y ensamblaje fue hecho a mano.

### 5.6. Diseño final

La placa prototipo se realizó en Altium Designer 2020 (licencia estudiantil), se realizó el proceso común para generar los “fabrication output” la cual nos proporciona archivos llamados gerber que son utilizados por máquinas de control numérico (CNC), como la LPKF (Laser y Electronics AG).

En la placa se realizó una pista de montaje superficial en la que se creó un nuevo elemento que altium lo considera como un pad de una resistencia de montaje superficial al cual, se modificó su footprint, formando un cuadrado y con una separación de  $5.334 \text{ mm}$  entre cada pista, como se observa en la figura 5.

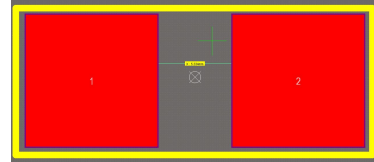


Figura 5: Resistencia de montaje superficial.

Las dimensiones de tornillo a tornillo (interiores) son Alto:  $55.118 \text{ mm}$ , Ancho:  $82.423 \text{ mm}$ , mientras que las dimensiones exteriores son Alto:  $78.486 \text{ mm}$ , Ancho:  $103.505 \text{ mm}$ , como se puede apreciar en la figura 6.

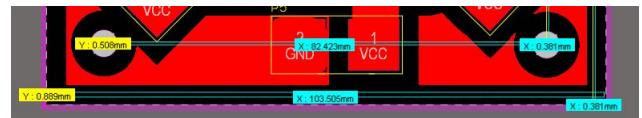


Figura 6: Placa PCB medidas ancho

Con base en los cálculos de ancho de pista y área se establecieron las reglas de ruteo mostradas en la tabla 3, con lo cual se tiene el diseño final del PCB que se observa en la figura 7.

Tabla 3: Valores utilizados en las reglas de diseño

Regla	Valor
Minimum Clearance	2.7 mm
Min Width	8.4mm
Preferred Width	8.5 mm
Max Width	8.6 mm

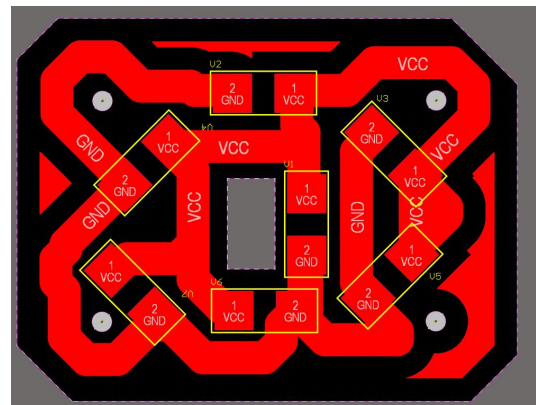


Figura 7: Placa PCB.

### 5.7. Manufactura

Para poder fabricar placas PCB existen diversos métodos, entre los más conocidos esta por medio de ataque químico y por CNC (Ocampo and de Jesús Deras, 2014).

Fijando el uso de máquina de desgaste, ésta tendrá un compuesto de sustrato no conductor el cual contiene un revestimiento de cobre en su superficie, en virtud de lo cual es necesario desgastar excedentes mediante un fresado pero como se mencionó en secciones anteriores se utilizó una LPKF (Laser y Electronics AG).

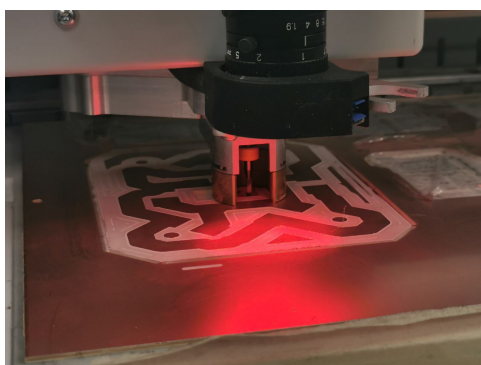


Figura 8: Fabricación de placa PCB.

Para que la máquina pudiera procesar la orden se necesita que en altium se generen archivos llamados como Gerber files los cuales contiene las instrucciones con la que se trabajan además de ingresar el archivo de los llamados “drills” que fabrican los huecos donde se pueden insertar los componentes o espacios donde se colocaran los tonillos.

### 5.8. Integración de placa PCB

Previo a las pruebas de consumo en la integración del dron, fue necesaria la realización de algunas pruebas sobre la placa PCB, las cuales fueron:

- Inspección visual con microscopio
- Prueba en circuito (verificación de cortocircuitos, circuitos abiertos, resistencia, capacitancia y otros parámetros.)
- Prueba funcional (alimentar el circuito electrónicamente y medir el efecto producido)

Una vez que se determinó el cumplimiento de los requerimientos se procedió a realizar las conexiones necesarias a la batería y los controladores de velocidad de los motores. Para las conexiones de los ESC se utilizó un cable de calibre 12 AWG, en cuanto a la conexión de la batería al centro de distribución se utilizó cable calibre 8 AWG.

Las conexiones se realizaron por medio de conectores tipo bullet de 3mm, respetando la polaridad de las conexiones entre GND y VCC.

Posterior a la soldadura de los componentes se volvieron a realizar pruebas de inspección y funcionales sin el arranque de los motores. La placa integrada con las conexiones soldadas se puede observar en la figura 9.

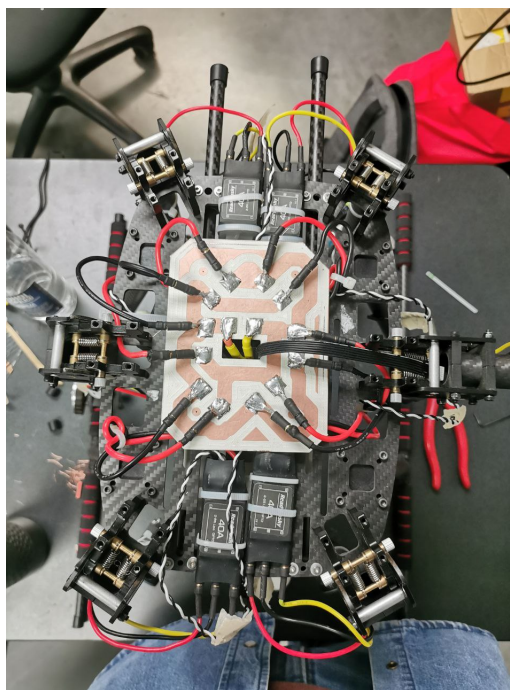


Figura 9: Integración de placa PCB.

## 6. Hexacóptero instrumentado

Una vez realizadas las pruebas de funcionamiento de la placa diseñada y se verificó la adecuada distribución energética, fue momento de conectar los sistemas básicos del UAV que incluyen: el piloto automático con sensores de odometría (giroscopio, acelerómetro, magnetómetro), sistemas de telemetría para comunicación a estación terrena y el módulo de potencia que será esencial para la obtención de datos de la batería durante el vuelo.

La configuración del piloto automático se realizó con ayuda del software Mission Planner que permite modificar parámetros del sistema Ardupilot embebido en la tarjeta PixHawk (piloto automático).

Las acciones necesarias para la configuración fue la calibración de todos los sensores y establecimiento de comunicación con el GPS externo, sincronización de los motores brushless, configuración de control RC, configuración de modos de vuelo y sistemas de seguridad. Una vez integrado todos los sistemas se tiene el dron instrumentado como se observa en la figura 10.



Figura 10: Dron ZD850 integrado.

Cabe resaltar que fue necesario la realización de múltiples pruebas sin hélices para asegurarnos del correcto funcionamiento de todos los sistemas, principalmente los de seguridad ya que, al ser un dispositivo de seguridad crítica es necesario verificar que todo funcione y se consideren los casos de fallo antes de las pruebas en vuelo.

## 7. Pruebas de consumo eléctrico

Finalmente ya con la integración completa se procedieron a realizar las pruebas de consumo sobre la placa diseñada, dentro de las cuales se encuentran:

- Arranque de motores a velocidad media durante un tiempo determinado
- Arranque suave de motores (incremento paulatino de velocidad en los motores)
- Generación de picos de máxima potencia en motores
- Descarga paulatina de batería (motores a velocidad media durante un tiempo prolongado)

Cabe resaltar que todas las pruebas anteriores fueron realizadas con control manual mediante el sistema de radio control y en un ambiente controlado con medidas de seguridad.

Toda la información obtenida se guardó en una memoria microSD integrada en el piloto automático para su análisis offline. Los datos de voltajes, corrientes, señales de radio control, odometría y demás sensores pueden ser accesibles para su análisis, de ahí la importancia de los sistemas de instrumentación y los componentes explicados con anterioridad.

La figura 11 muestra una sección de la prueba de descarga de batería, en rojo se puede apreciar la señal PWM (duty cycle en  $\mu\text{s}$ ) del canal del radio control asociado al throttle (empuje) o potencia de los motores, mientras que la señal azul es el voltaje de la batería. Como se observa en la figura se dejó una señal continua de velocidad en los motores mientras se aprecia la lenta disminución de voltaje en la batería.

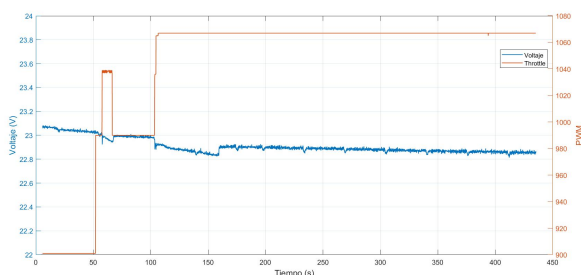


Figura 11: Datos de voltaje en la batería

Los datos asociados con la descarga de batería permiten comprobar el tiempo de autonomía del UAV, es decir, el tiempo en que se podrá mantener el vehículo en un vuelo funcional. Al respecto durante la prueba se mantuvo una respuesta constante de los motores independientemente de la descarga de la batería, lo cual indica que esa descarga no afectará al control de vuelo.

Actualmente estos datos nos indican que se podrán hacer pruebas con la autonomía que garantiza la batería seleccionada (14 minutos).

Por otro lado, estos datos permiten identificar prácticas que el piloto pueda tomar durante el vuelo de acuerdo al consumo de energía en las diferentes maniobras del UAV.

La figura 12 son los datos de corriente comparados con la señal de empuje enviada por el radiocontrol la cual es una señal con cierta pendiente para llevar a los motores lentamente a una velocidad media, en la gráfica puede apreciarse el consumo de corriente y su comportamiento ante los incrementos de potencia en motores.

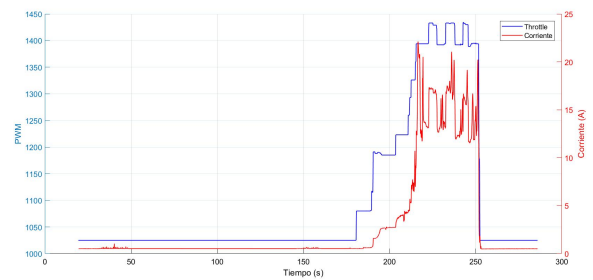


Figura 12: Datos de corriente en la batería

En este caso los datos obtenidos permitirán hacer un análisis del consumo y la eficiencia de los sistemas con los que cuenta el dron, así como de situaciones que podrían implicar desgaste en los componentes o llevarlos cerca de su límite de consumo de potencia, lo cual implicaría calentamiento en los dispositivos. Las gráficas mostradas no muestran esa situación pero se planea realizar pruebas en vuelo, en las cuales se podrían presentar adversidades en el ambiente, a partir de esto determinar si los límites de consumo de los componentes no llevan al calentamiento de algún sistema o implican algún fallo eléctrico.

## 8. Conclusiones

Como se pudo apreciar a lo largo del trabajo, se pudieron realizar distintas pruebas de vuelo y análisis del consumo de energía utilizando los distintos recursos como sensores, el piloto automático y la integración del hexacóptero completamente instrumentado. Mediante el diseño de la placa de distribución de energía y siguiendo reglas en el diseño es también posible evitar efectos no deseados que impactarían directamente en la eficiencia energética.

El análisis estructural realizado sirve también como preámbulo a la consideración de vibraciones presentes en el dron durante las distintas pruebas en tierra y en vuelo que impactan directamente sobre la placa PCB y a los esfuerzos a los que se someterá.

Una comparativa más detallada entre el diseño presentado y los circuitos comerciales aportaría información valiosa sobre el camino que habrá que seguir en el diseño de este tipo de circuitos de distribución de potencia ya que como se mencionó principalmente las limitaciones de manufactura limitan la posible mejoría en eficiencia de energía en la PCB presentada.

Como continuación de lo analizado se podrían establecer un conjunto de estrategias y un análisis profundo sobre la energía y carga y descarga de este tipo de sistemas, lo cual implica un diseño de pruebas complementario y que aporte con más información y datos a lo ya obtenido, además de que se pueden establecer los consumos realizados con distintas condiciones de modos de vuelo y climatológicas.

## Referencias

- Adam, J. (2004). New correlations between electrical current and temperature rise in pcb traces. In *Twentieth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (IEEE Cat. No. 04CH37545)*, pages 292–299. IEEE.
- AG, L. L. . E. (2012). Características del producto. In *LPKF ProtoMat S instrucciones de uso.*, pages 9–10. IEEE.
- Altium-Designer (2022). Corrientes altas y temperaturas más altas: Consejos de diseño de pcb para la gestión del calor. <https://resources.altium.com/es/p/high-currents-and-higher-temperatures-pcb-design-tips-heat-management>.
- Digi-key (2021). Calculo de ancho de pistas. <https://www.digikey.com.mx/es/resources/conversion-calculators/conversion-calculator-pcb-trace-width>.
- Kim, Y.-J., Yoon, H.-S., Lee, S., Moon, G., Kim, J., and Wee, J.-K. (2004). An efficient path-based equivalent circuit model for design, synthesis, and optimization of power distribution networks in multilayer printed circuit boards. *IEEE transactions on Advanced Packaging*, 27(1):97–106.
- Ocampo, J. R. and de Jesús Deras, I. (2014). Aplicación integrada para construcción de pcbs mediante tecnología cnc y ajuste automático a la superficie. *Innovare: Revista de ciencia y tecnología*, 3(1):27–41.
- Pico, V. (2012). Diseño e implementación de un sistema de control para un cuadricóptero. *México, Distrito Federal*, pages 17–29.
- Valavanis, K. P. and Kontitsis, M. (2007). A historical perspective on unmanned aerial vehicles. In *Advances in Unmanned Aerial Vehicles*, pages 15–46. Springer.
- Wang, Y., De Haan, S., and Ferreira, J. (2009). Thermal design guideline of pcb traces under dc and ac current. In *2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pages 1240–1246. IEEE.