

Metodología de validación de autonomía de batería para un UAV táctico

| Fecha de recibido: 11 de noviembre 2022 | Fecha de aprobado: 28 de abril 2023 |

| Reception date: November 11, 2022 | Approval date: April 28, 2023 |

| Data de recebimento: 11 de novembro de 2022 | Data de aprovação: 28 de abril de 2023 |

David Leonardo Piñeros Guzmán

<https://orcid.org/0000-0002-8913-1335>
certi.pineros@ciac.gov.co

Ingeniero Aeronáutico

Investigador – Corporación de la Industria Aeronáutica Colombiana CIAC S.A., Colombia
Rol del investigador: teórico y escritura

Aeronautical Engineer

Researcher – Colombian Aeronautical Industry Corporation CIAC S.A., Colombia
Researcher's role: theoretical and writing

Engenheiro Aeronáutico

Pesquisador. Corporação da Indústria Aeronáutica Colombiana CIAC S.A., Colômbia
Função do pesquisador: teórica e escrita

Andrés Felipe Gómez Rivera

<https://orcid.org/0000-0003-3041-4485>
diseno.dipro@ciac.gov.co

Ingeniero Electrónico

Investigador – Corporación de la Industria Aeronáutica Colombiana CIAC S.A., Colombia
Rol del investigador: teórico y escritura

Electronics Engineer

Researcher – Colombian Aeronautical Industry Corporation CIAC S.A., Colombia
Researcher's role: theoretical and writing

Engenheiro eletrônico

Pesquisador – Corporação da Indústria Aeronáutica Colombiana CIAC S.A., Colômbia
Função do pesquisador: teórica e escrita

Cómo citar este artículo: Piñeros Guzmán, D. L. y Gómez Rivera, A. F. (2023). Metodología de validación de autonomía de batería para un UAV táctico. *Ciencia y Poder Aéreo*, 18(2), 20-34. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.791>



Metodología de validación de autonomía de batería para un UAV táctico

Battery Autonomy Validation Methodology for a Tactical UAV

Metodologia de validação da autonomia da bateria para um UAV tático

Resumen: A partir del conocimiento obtenido durante el desarrollo del proyecto “Diseño de un vehículo aéreo no tripulado (UAV) para operaciones de vigilancia”, desarrollado por la Corporación de la Industria Aeronáutica Colombiana, se elaboró el presente artículo investigativo. Se describe la comprobación de una metodología planteada con el fin de asegurar la correcta selección y posterior validación de una batería que cumpla los requerimientos de autonomía de un UAV de 5 kg. Siguiendo lo estipulado por esta metodología, se realizó un análisis del consumo eléctrico teórico (ELA, por sus siglas en inglés) del UAV, en las diferentes fases de la misión, y se establecieron así los requisitos operacionales y energéticos del sistema, lo cual se convirtió en un reto de diseño debido a la necesidad de encontrar una relación eficiente entre el peso y el tiempo de vuelo del UAV. A partir de la información recolectada, se procedió a seleccionar la batería del UAV, validándola tanto en tierra como en vuelo a través de pruebas operacionales y de descarga, simulando el perfil de consumo, con lo que se obtuvo como resultado el cumplimiento de los requisitos de autonomía, con un tiempo de vuelo mayor a 60 minutos y un 20% de seguridad. Se garantiza que el UAV realice su misión de forma segura y con el tiempo suficiente para realizar las maniobras de aterrizaje cuando se presente un consumo energético del 80%. Se demuestra que la metodología implementada garantizó la correcta selección y validación de la batería requerida por el UAV de 5 kg.

Palabras clave: autonomía; autopiloto; batería; capacidad; consumo de energía; log de vuelo.

Abstract: Based on the knowledge obtained during the development of the project “Design of an unmanned aerial vehicle (UAV) for surveillance operations”, developed by the Colombian Aeronautical Industry Corporation, this research article was prepared. It describes the verification of a methodology proposed in order to ensure the correct selection and subsequent validation of a battery that meets the autonomy requirements of a 5 kg UAV. Following the stipulations of this methodology, an analysis of the theoretical electrical consumption (ELA) of the UAV, in the different phases of the mission, was carried out and the operational and energy requirements of the system were established, which became a design challenge due to the need to find an efficient relationship between the weight and the flight time of the UAV. Based on the information collected, the UAV battery was selected and validated both on the ground and in flight through operational and discharge tests, simulating the consumption profile, resulting in the fulfillment of the autonomy requirements, with a flight time greater than 60 minutes and 20% safety. It is guaranteed that the UAV performs its mission safely and with enough time to perform landing maneuvers when energy consumption is 80%. It is demonstrated that the implemented methodology guaranteed the correct selection and validation of the battery required by the 5 kg UAV.

Keywords: Autonomy; autopilot; battery; capacity; energy consumption; flight log.

Resumo: Com base no conhecimento obtido durante o desenvolvimento do projeto “Design of an unmanned aerial vehicle (UAV) for surveillance operations” (“Projeto de um veículo aéreo não tripulado (UAV) para operações de vigilância”), desenvolvido pela Corporação da Indústria Aeronáutica da Colômbia, foi elaborado este artigo de pesquisa. Ele descreve a verificação de uma metodologia proposta para garantir a seleção correta e a validação subsequente de uma bateria que atenda aos requisitos de autonomia de um UAV de 5 kg. Seguindo as estipulações dessa metodologia, foi realizada uma análise do consumo elétrico teórico (ELA) do UAV, nas diferentes fases da missão, e foram estabelecidos os requisitos operacionais e de energia do sistema, o que se tornou um desafio de projeto devido à necessidade de encontrar uma relação eficiente entre o peso e o tempo de voo do UAV. Com base nas informações coletadas, a bateria do UAV foi selecionada e validada em solo e em voo por meio de testes operacionais e de descarga, simulando o perfil de consumo, resultando no cumprimento dos requisitos de autonomia, com tempo de voo superior a 60 minutos e 20% de segurança. É garantido que o UAV execute sua missão com segurança e com tempo suficiente para realizar as manobras de pouso quando o consumo de energia for de 80%. É demonstrado que a metodologia implementada garantiu a seleção e a validação corretas da bateria necessária para o UAV de 5 kg.

Palavras-chave: Autonomia; piloto automático; bateria; capacidade; consumo de energia; log de voo.

Introducción

En el proceso de diseño de un vehículo aéreo no tripulado (UAV-*unmanned aerial vehicle*), se presenta la autonomía como uno de los factores que más impacta en el mercado o en el consumidor de este tipo de sistemas (Costa *et al.*, 2019); esto, especialmente en misiones de fotogrametría, reconocimiento y vigilancia, debido a que repercute directamente en el alcance o radio de acción del UAV (Brehm, 2021). La autonomía también es clave cuando se desea realizar seguimiento de objetivos a 10 km desde el punto de despegue o la estación de control en tierra (GCS-*ground control system*), con velocidades entre 10 m/s y 20 m/s, involucrando una autonomía de 60 a 90 minutos que le permita despegar, llegar al punto de observación, realizar la toma de datos o reconocimiento del objetivo, regresar y aterrizar el UAV. Hay que tener en cuenta que esta autonomía será afectada por el techo de operación, las variaciones en la altura, la realización de giros alrededor de un punto fijo y las condiciones meteorológicas (componentes de viento de cola, en contra y a favor), disminuyendo o aumentando el tiempo de vuelo. De este modo, durante el diseño del sistema se deberán plantear diferentes soluciones ingenieriles que a través de análisis y pruebas le garanticen al operador la explotación segura del UAV.

La autonomía está ligada directamente al peso de la aeronave (Thibbotuwawa, 2018), sobre todo a la fuente de energía. Las baterías son una de las soluciones más comunes para aeronaves con pesos máximos de despegue (MTOW-*maximum take-off weight*) de 5 kg (Fernández, 2021). Sin embargo, en el mercado actual se presenta mucha variedad de baterías (Dündar *et al.*, 2020), lo cual genera la necesidad de definir e implementar una metodología para identificar la batería ideal que responda a la necesidad de autonomía requerida por el UAV a diseñar, fabricar y comercializar. En este documento, se describe la implementación y comprobación de una metodología propuesta para asegurar el correcto análisis, selección y validación de una batería que cumpla los requerimientos de autonomía de un UAV tipo táctico con un peso máximo de 5 kg.

Metodología de validación

Entre las guías estándar implementadas para el diseño de aeronaves se encuentra el *Standard Guide for Aircraft Electrical Load and Power Source Capacity Analysis* (American Society for Testing and Materials [ASTM], 2013), documento en el que se presentan todas las directrices para realizar un análisis de cargas eléctricas, el cual permite dar cumplimiento a los requisitos de aeronavegabilidad dispuestos por la Administración Federal de Aviación (FAA-Federal Aviation Administration) para la certificación de tipo CT de aeronaves categoría normal y transporte. A partir de esta guía, se generó y se propuso una metodología de validación de baterías para aeronaves remotamente tripuladas de tipo táctico, compuesta por las siguientes fases:

- Análisis de consumo eléctrico teórico del UAV donde operará la batería.
- Identificación de los requisitos de la batería.
- Selección de la batería.
- Validación y verificación operacional de la batería en tierra.
- Validación y verificación operacional de la batería en vuelo.

Lo anterior se debe a que el estándar (ASTM, 2013) fue desarrollado para aeronaves tripuladas, con sistemas de propulsión basada en motores a reacción. Las baterías son recargadas durante el vuelo y se presenta un consumo eléctrico constante durante sus fases de operación, lo cual no corresponde al comportamiento detallado de un UAV, cuyo sistema de propulsión en la mayoría de los casos se basa en motores eléctricos alimentados por baterías, con un consumo eléctrico variable debido a las diferentes maniobras que realiza el UAV y a las condiciones meteorológicas en las que se encuentre operando.

Por lo tanto, se realizó la investigación descrita para comprobar que, a través de la implementación de la metodología de validación de baterías propuesta, se logra asegurar la correcta selección de este componente

cumpliendo los requerimientos de autonomía de un UAV de 5 kg MTOW.

UAV prototipo

Durante la investigación de comprobación de la metodología de validación de la batería, se empleó como prototipo un UAV con peso máximo de despegue de 5 kg, ala fija y plano alto, con capacidad de despliegue por medio de lanzamiento tipo “*hand launch*” y recuperación por medio de “*belly landing*”. Este UAV realiza misiones de vigilancia, inteligencia y reconocimiento (ISR-*intelligence, surveillance and reconnaissance*), con un alcance máximo de 15 km desde la GCS, limitado por la autonomía, relacionada directamente con la velocidad de la plataforma y la capacidad de la batería instalada. Durante este tipo de misiones, la plataforma presenta un alto consumo energético debido a variaciones en el techo de operación, la realización de órbitas sobre el punto de vigilancia, y los cambios en la intensidad y la dirección del viento.

Su diseño presenta una arquitectura de sistemas y equipos electrónicos que operan en corriente directa (DC), alimentados por una batería durante todas las fases de operación, siguiendo así el diagrama de sistemas tomado del estándar (Marques, 2015).

Este UAV tiene un motor eléctrico sin escobillas (*brushless*) que opera a 22,2 V DC y requiere una corriente de 2,3 a 46 amperios (A) con empujes de 500 a

4000 gramos fuerza (gf) y una potencia de 51 a 1021 vatios (W). Adicionalmente, como característica operacional, el UAV requiere un empuje máximo al despegue de 28 a 35 newton (N) y un empuje mínimo en crucero de 11 N.

Consumo eléctrico teórico plataformas del UAV

De acuerdo con las especificaciones técnicas de cada componente instalado en el UAV y siguiendo el estándar (ASTM, 2013), se calculó de forma teórica la carga eléctrica máxima de cada componente y la carga eléctrica presente durante una operación de despegue (empuje máximo) y crucero (empuje mínimo). Se tuvieron en cuenta los valores de empuje reportados en la carta de prueba del motor eléctrico, con el fin de determinar los consumos de energía eléctrica del UAV.

Tabla 1. Carga eléctrica máxima del UAV

Sistemas	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (W)
Propulsión	22,2 - 25,	56 800	1260,96
Aviónica	3,3 - 22,2	485	239,24
Terminal de datos	9 - 20	2666	24
Carga paga	5,5 - 26	583	7
Total	22,2	60 534	1531,2

Fuente: Piñeros (2022).

Figura 1. Sistemas del UAV
Fuente: Marques (2015).

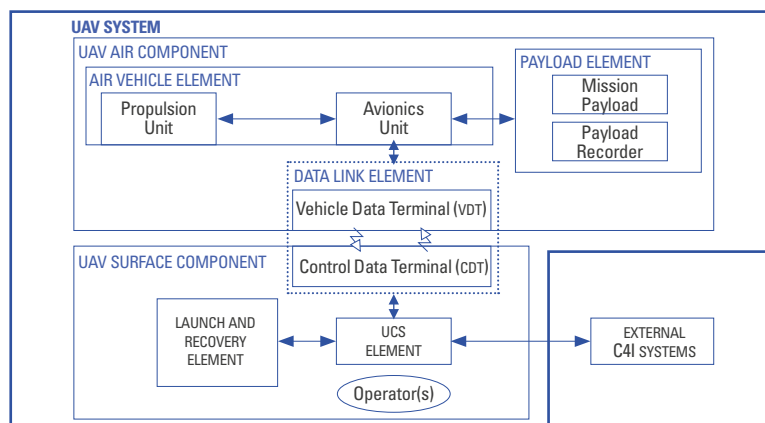


Tabla 2.
Cargas eléctricas operacionales del UAV

	Despegue			Crucero								
	Empuje del motor en gramos fuerza											
	4000	3569	3500	3000	2600	2300	2000	1750	1500	1250	1121	1000
Sistema	Carga eléctrica en operaciones normales en miliamperios (mA)											
Propulsión	46000	38545	37800	29300	23800	20000	16100	12700	10200	8000	7178	5900
Aviónica	485	485	485	485	485	485	485	485	485	485	485	485
Data link	2666	2666	2666	2666	2666	2666	2666	2666	2666	2666	2666	2666
Carga paga	583	583	583	583	583	583	583	583	583	583	583	583
Total	49734	42279	41534	33034	27534	23734	19834	16434	13934	11734	10912	9634

Fuente: Piñeros (2022).

Asumiendo que el UAV consume de forma constante 60 minutos, y teniendo en cuenta las cargas eléctricas expuestas en la tabla 2, se puede determinar que el componente que consume la mayor cantidad de energía eléctrica es el motor. Si evaluamos la carga eléctrica durante el máximo empuje de la plataforma de 35 N (3569 gf), el UAV teóricamente presentaría 42276 mA de carga máxima; y para el empuje mínimo en crucero de 11 N (1121,688 gf), el UAV presentaría 10909,6 mA de forma teórica. Sin embargo, el valor de carga eléctrica total de un vuelo de 60 minutos está sujeto a evaluación mediante pruebas, debido a que durante la operación de un UAV se presentan picos de máxima carga eléctrica y tiempos en que la carga se reduce al mínimo.

Análisis de consumo para el empuje mínimo y máximo del UAV

De acuerdo con las características operacionales del UAV, se puede observar que la fase de mayor consumo energético se presenta durante el despegue, debido a la necesidad de empuje de 28 N (2855,2 gf) a 35 N (3569 gf). De este modo, se determinó la realización de pruebas de medición de corriente del motor cuando se encuentre generando dicho empuje.

Para esta prueba, se empleó una batería Li-Po Tattu de 22,2 V, con una capacidad de 8000 miliamperios

por hora (mAh) y una tasa de descarga máxima de 200 A, garantizando que el motor obtendría la energía suficiente para lograr el empuje máximo de 35 N.

Tabla 3.
Características batería Tattu 8000 mAh

Tipo	Lipo
Voltaje nominal	22,2 V
Voltaje máximo	25,5 V
Capacidad nominal	8000 mAh
Potencia	177,6 Wh
Peso	1160 g (±20)
Tasa de descarga	25 C

Fuente: Piñeros (2022).



Figura 2. Prueba de motor

Fuente: Piñeros (2022).

Tabla 4.
Resultados prueba empuje máximo de motor

Corriente (A)	Empuje (gf)	Potencia (W)
27	3000	675
34,4	3500	860
40	3662	953,4
43	4000	1075

Fuente: Piñeros (2022).

Como se observa en la tabla 4, se registra una corriente de 27 a 34,4 A para el empuje de 28 a 35 N requerido en la fase de despegue del UAV.

Análisis de los registros (log) de los vuelos del UAV

Con el fin de validar los datos teóricos de corrientes máximas y operacionales del UAV, calculados antes, se procedió a realizar una campaña de ensayos en vuelo

con el UAV, empleando la batería Tattu de 8000 mAh. Esta campaña comprendió cinco vuelos de prueba realizados en el municipio de Flandes, en el departamento del Tolima. Usando la capacidad del UAV de guardar los registros de vuelo (log de telemetría), se generaron gráficas de altura, consumo, velocidad y ángulos de *pitch*, teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

- BAT.Volt: Voltaje de la batería.
- BAT.Curr: Corriente consumida de la batería durante el vuelo.
- BAT.CurrTot: Corriente utilizada total de la batería.
- RCIN C3: curva de mandos del piloto.
- POS.RealHomeAlt: Altura.
- ARSP.Airspeed: Velocidad.

En la figura 3, se presenta la gráfica del log de telemetría del primer vuelo realizado con el UAV, donde se presentan los parámetros mencionados antes, esta gráfica fue generada a través de página web UAV Log Viewer (ArduPilot, 2021a).

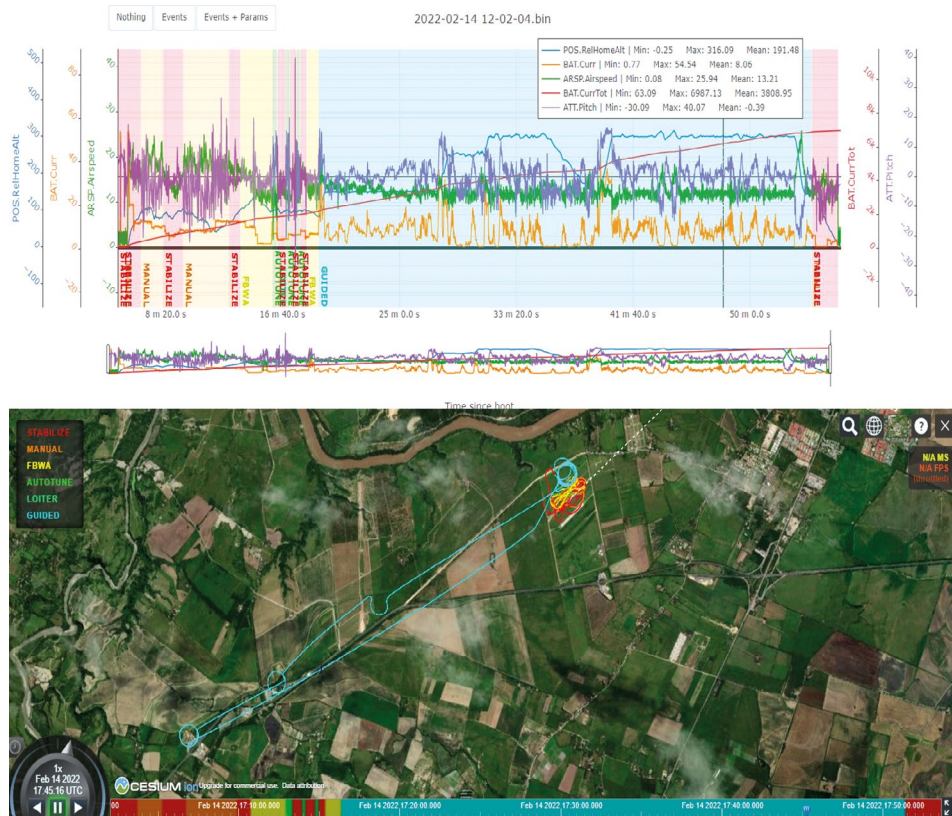


Figura 3. Gráfica primer vuelo del UAV
Fuente: Piñeros (2022)
en ArduPilot (2021a).

A partir de la figura 3, se analizaron los datos de telemetría de la aeronave y se encontraron las siguientes apreciaciones:

- En las fases de vuelo estabilizado (*stabilized*) y manual se efectuó la calibración de parámetros del piloto automático (PID-proporcional, integral, derivativo) y esto implicó 30% del tiempo de vuelo.
- El 70% restante del vuelo estuvo compuesto por las fases de vuelo guiado, ascenso y automático.
- Durante el vuelo, se presentaron periodos de no utilización (corrientes de 1 A); giro de 1 minuto manteniendo la altitud con una corriente de 1 A, debido al favorecimiento por condición meteorológica (térmicas).
- Se observan picos de corriente con duraciones de 3 a 15 segundos, debido a cambios de altura, aumentos en la velocidad y presencia de vientos en contra.
- La fase de descenso presenta el menor consumo, pero con una mayor duración cuando se compara con la fase de ascenso.

- La corriente promedio del UAV se encuentra en el rango de 6620 a 8700 mAh para las fases de estabilización, crucero y descenso.
- Se presentó una velocidad promedio de 13,21 m/s y una velocidad máxima de 25,94 m/s.

Sin embargo, los demás vuelos de prueba presentaron diferencias bastante marcadas en los tiempos de vuelos realizados. Por lo tanto, en la tabla 5 se presenta el resumen de datos obtenidos en la campaña de ensayos en vuelo.

En la tabla 5, se observa que se realizaron vuelos manuales y automáticos en los que no intervino el piloto, y el autopiloto pudo regular todos los parámetros operacionales de la aeronave incluyendo el consumo y la potencia de motor, haciendo más eficiente el consumo de energía eléctrica de la batería.

Adicionalmente, en la tabla 6 se presenta un resumen de valores promedio de corriente, tiempo y consumo de los vuelos de prueba, generando así el gráfico de perfil operacional y consumo del UAV.

Tabla 5.
Consumos de batería vuelos de prueba

		Unidades	Primer vuelo	Segundo vuelo	Tercer vuelo	Cuarto vuelo	Quinto vuelo
	Duración del vuelo	Minutos	52	57	56	43	51
Encendido de motor	Consumo de batería presentado al finalizar la fase.	mAh	108	98	104	100	108
Ascenso		mAh	261	375	280	380	703
Estabilizado (calibración PID)		mAh	2154	888,35	2523,89	4182,01	1105,45
Crucero (<i>loiter</i> , guiado, auto y RTL)		mAh	6987,13	6646,5	7837,85	5737,11	6940,86
Descenso y aterrizaje		mAh	6987,13	6646,5	7837,85	5737,11	6940,86

Fuente: Piñeros (2022).

Tabla 6.
Valores promedio de consumo de los vuelos de prueba

Fases de vuelo	Valores promedio de corriente (mA)	Tiempos promedio (minutos)	Consumos de baterías promedio (mAh)
Pico de prenda de motor	53618	0,024	103,6
Ascenso	21626	0,48	296,2
Calibración PID	8278	11,806	1770,94
Crucero (guiado, RTL, figuras triangulares, rectangulares)	7495	37,33	4333,06
Descenso y aterrizaje	3102	2,568	326,09
Total		52,208	6829,89

Fuente: Piñeros (2022).

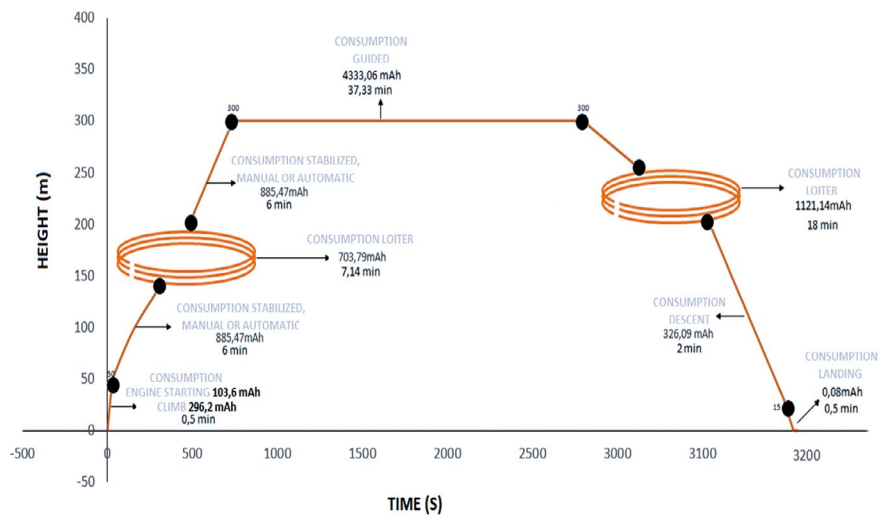


Figura 4. Perfil de consumo eléctrico promedio de los vuelos de Flandes

Fuente: Piñeros (2022).

En la figura 4, las fases de vuelo de *loiter* se sitúan de acuerdo con las alturas de realización del *loiter*, lo cual implica que se sitúen dentro de la fase de calibración de parámetros PID y de descenso.

Selección de batería

De acuerdo con los consumos eléctricos calculados y el comportamiento de consumo eléctrico obtenido a partir del análisis de los *log* de vuelos de prueba, se establecieron los siguientes requisitos para la selección de la batería que cumpla con la autonomía requerida para la operación del UAV.

- Suministrar la energía requerida por el UAV en sus diferentes fases y modos de operación.
- Tener una capacidad de descarga continua que garantice el suministro de energía necesario para mantener el mínimo empuje en crucero requerido por la operación del UAV.
- Tener una capacidad de descarga continua máxima igual o superior que garantice el suministro de energía necesario para mantener el máximo empuje requerido por el UAV.
- Tener dimensiones iguales o inferiores a (± 5) 51 x 168 x 65 mm, debido al espacio interno del UAV disponible.

- Operar con un voltaje nominal de 22,2 V, debido a que el equipo distribuidor de energía eléctrica de las plataformas opera con ese voltaje.
- Operar con un voltaje máximo de 25,2 V.
- Garantizar una autonomía de 60 minutos con 20% de seguridad.
- Fabricada con celdas recargables.
- Debe tener un conector XT60.

En vista de lo explicado en la sección anterior, en la tabla 7 se enlistan las baterías que se analizaron, según la disponibilidad en el mercado y el cumplimiento de los requerimientos ya expuestos.

Se observa en la tabla 7 que las baterías que cumplen con algunos de los requerimientos son de tipo Lipo (tabla 7) o Li-Ion (iones de litio), debido a que suministran una mayor densidad de energía y capacidad de descarga con un bajo peso en comparación con baterías de NiCd (níquel-cadmio) o NiMH (níquel-hidruro metálico).

Así mismo, se puede apreciar que las baterías de 14 000 a 16 000 mAh tienen rangos de peso superiores a 1560 g, con dimensiones mayores a 190 mm de largo, superando el peso y las dimensiones restablecidas. Por lo tanto, se decidió descartar este tipo de baterías y se determinó que la batería de 12 500 mAh de la marca Foxtech presenta las mejores prestaciones en relación con las demás baterías del rango de 12 000 a 12 500 mAh.

Tabla 7.
Baterías presentes en el mercado

Parámetros	Tipo	Voltaje (V)	Capacidad (mAh)	Configuración de celdas	Tipo de conector	Conector balanceador de celdas	Tasa de descarga continua	Vatios hora (Wh)	Peso (g)	Dimensiones (Alt, Lon, Anc) (mm)
Tattu 16000 mAh	Lipo	22,2	16 000	6S1P	XT90-S	JST-XHR-7P	30C	355,2	1988	65 x 192 x 76
Tattu 16000 mAh	Lipo	22,2	16 000	6S1P	DJI	JST-XHR	15C	355,2	1856	60,5 x 191 x 76,5
Tattu 14000 mAh	Lipo	22,2	14 000	6S1P	DJI	JST-XHR	25C	310,2	1560	55 x 235 x 68
Tattu 12500 mAh	Lipo	22,2	12 500	6S1P	DJI	JST-XHR	25C	275	1720	35,6 x 180 x 70
Foxttech 12500 mAh	Li-Ion	22,2	12 500	6S4P	XT-60	JST-XHR	3C	278	1199	160 x 70 x 50
Tattu 12000 mAh	Lipo	22,2	12 500	6S1P	EC5	JST-XHR-7P	30C	266,4	1670	65 x 190 x 71
Tattu 12000 mAh	Lipo	22,2	12 500	6S1P	EC5	JST-XHR-7P	15C	266,4	1470	61 x 184 x 71
ZYE 12000 mAh	Li-Ion	23,4	12000	6S1P	XT90-S	JST-XHR	8C	280,8	1230	54 x 141 x 70

Fuente: Piñeros (2022), con datos tomados de Foxttech (2022) y Tattu (2022).



Figura 5. Batería Foxttech de 12500 mAh

Fuente: Piñeros (2022).

Tabla 8.
Características batería Foxttech 12500 mAh

Tipo	Lipo
Voltaje nominal	22,2 V
Voltaje máximo	25,5 V
Capacidad nominal	12500 mAh
Configuración	6S4P
Potencia	278 W/h
Peso	1199 g
Tasa de descarga	3C (37 500 mAh)
Conector	XT-60
Resistencia interna por celda	< 40 mΩ
Dimensiones	16 x 7 x 5 (cm)

Fuente: Piñeros (2022), con datos tomados de Foxttech (2022).

Adicionalmente, en las tablas 9 y 10 se presentan los valores de potencia con la batería Foxttech de 12500 mAh.

Tabla 9.
Potencia máxima de la batería Foxttech de 12500 mAh

Voltaje inicial (Vo)	Corriente nominal	Corriente máx.	Potencia máx. en Vo
25 V	12,5 A	3C = 37,5 A	937,5 W > 905,73 W

Fuente: Piñeros (2022).

Tabla 10.
Potencia nominal calculada de la batería Foxttech de 12500 mAh

Tipo de batería	Voltaje nominal	Corriente máx.	Potencia nominal
6S4P	22,2 A	3C = 37,5 A	832,5 W

Fuente: Piñeros (2022).

Teniendo en cuenta los valores promedio de corriente, tiempo y consumo de los vuelos de prueba, se calculó el tiempo de vuelo teórico del UAV con la batería Foxttech de 12500 mAh.

Tabla 11.
Estimación de autonomía con la batería Foxttech

Parámetros	Unidades	Valores
Capacidad batería Foxttech	mAh	12500
Autonomía del UAV con la batería Foxttech sin factor de seguridad	Minutos	94,67
Consumos de energía eléctrica del UAV con la batería Foxttech y un factor de seguridad del 20 %	mAh	10000
Autonomía del UAV con la batería Foxttech y un factor de seguridad del 20 %	Minutos	75,73

Fuente: Piñeros (2022).

Debido a que la potencia máxima continua que puede suministrar la batería Foxtech es de 37,5 A, los picos de corriente del motor deben ser limitados a este valor máximo de corriente, con lo cual se afectan las fases de vuelo de despegue, ascenso y crucero.

Por lo anterior, se decidió realizar pruebas de descarga en tierra y operacionales en vuelo que demostraran que la batería tenía la capacidad de suministrar la corriente máxima requerida por el motor durante la fase de despegue.

Validación en tierra de la batería Foxtech de 12500 mAh

Con el objetivo de validar el correcto funcionamiento de la batería Foxtech en el UAV y verificar los cálculos teóricos de consumo y autonomía, se realizaron tres pruebas en tierra con los resultados a continuación.

Prueba de empuje mínimo y máximo

Prueba número 1: Prueba consumo de motor

Durante esta prueba, se operó el motor, el controlador del motor, la hélice y la batería Foxtech para un empuje mínimo de operación de crucero de 11 N (1121,688 gf) y un empuje máximo para el despegue del UAV de 35 N (3569 gf), con los resultados descritos en las tablas 12 y 13.

Tabla 12. Datos obtenidos de la prueba de empuje de 11 N (1121,688 gf)

Parámetro	Valores registrados
Empuje (gf)	1143
Corriente (A)	8,13
Voltaje (V)	23,52
RPM	7707
Potencia (W)	197,5

Fuente: Piñeros (2022).

Tabla 13. Datos obtenidos de la prueba de empuje de 35 N (3569 gf)

Parámetro	Valores registrados
Empuje (gf)	3055
Corriente (A)	33,61
Voltaje (V)	20,87
RPM	11770
Potencia (W)	701,4

Fuente: Piñeros (2022).

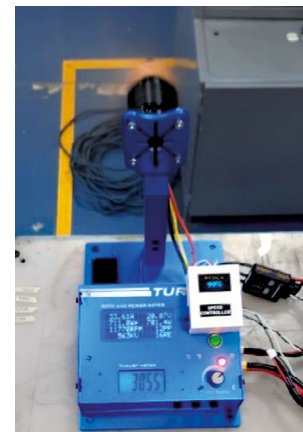


Figura 6. Registro prueba de empuje de 35 N (3569 gf), realizada durante 2 minutos

Fuente: Piñeros (2022).

Como se puede observar, la batería suministra la suficiente energía para garantizar una operación de empuje mínimo en crucero. Sin embargo, el empuje máximo presentado durante la prueba no llegó al empuje máximo requerido de 3569 gf, estando 514 gf por debajo del valor. Teniendo en cuenta que en el manual de operación del UAV el empuje máximo, “*max thrust*”, requerido se encuentra en el rango de 28 N (2855 gf) a 35 N (3569 gf), se demostró que el empuje registrado durante la prueba cumplió con el requerido por el UAV en las fases de vuelo de despegue y ascenso.

Prueba de descarga de batería

Para la prueba de descarga de la batería, se realizó un montaje con el fin de registrar las variables de potencia,

voltaje y corriente, replicando los consumos de aviónica y motor durante un vuelo.

En una computadora, se ejecutó un script de Python que extrajo los datos de potencia de un *log* de vuelo de la plataforma, con el objetivo de enviarlos secuencialmente en tiempo real a través de un puerto serie a un microcontrolador Atmega328P para la generación de una señal PWM. Esta última fue codificada a PPM con un codificador externo y se adecuó para su conexión a un autopiloto CubePilot, conectado al controlador del motor y a las entradas de lectura de voltaje y corriente.

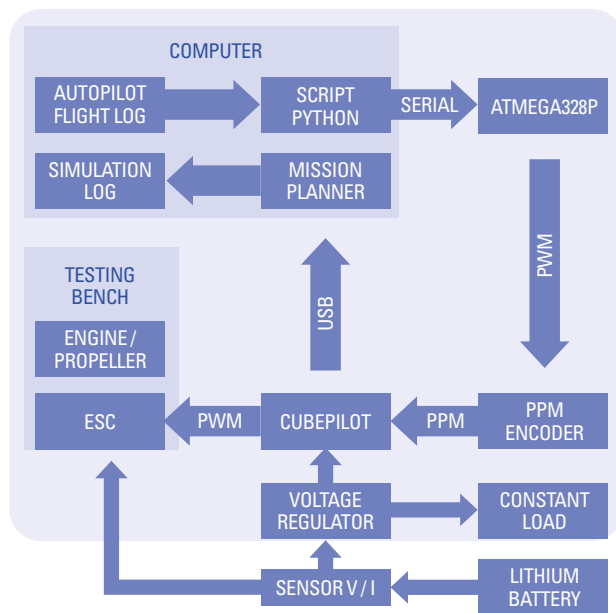


Figura 7. Arquitectura del montaje de pruebas de consumo
Fuente: Gómez (2022).

Adicionalmente, se empleó el *software* de programación, planificación de misiones y control en tierra del UAV denominado Mission Planner (ArduPilot, 2021b), con la capacidad de registrar y almacenar en el computador todos los datos de telemetría del autopiloto.

Prueba número 2: Simulación primer vuelo de prueba del UAV

Teniendo el montaje corroborado, se inició la prueba de simulación del primer vuelo del UAV, con el fin de ejecutar una prueba de descarga de la batería simulando una operación en vuelo de 100 minutos, llevando al límite la batería Foxtech de 12 500 mAh.

Para esta prueba, se emplearon tres ventiladores que simularon el consumo de la aviónica del UAV, conectados 5 minutos después de haber iniciado la prueba.

Observaciones de la prueba

- A los 5 minutos, se conectan tres ventiladores que representan un consumo total de aviónica y comunicaciones de 1,75 A en promedio.
- Debido a que el primer vuelo de la plataforma duró en promedio 56 minutos, durante la prueba se repitió el perfil de vuelo de crucero, corriendo los datos adquiridos del *log*.
- Cuando se presentó el consumo de 9000 mAh, se evidenció un voltaje de 19,99 V en la batería (Foxtech de 12 500 mAh).

Tabla 14.
Valores registrados durante la prueba de simulación del primer vuelo de prueba del UAV

Valores promedio tomados del Mission Planner y del banco de motor Turnigy											
Parámetro	Minuto 2	Minuto 10	Minuto 20	Minuto 30	Minuto 40	Minuto 50	Minuto 60	Minuto 70	Minuto 80	Minuto 90	Minuto 100
Empuje (gr)	1010	600	610	3	413	350	400	620	533	1006	680
Corriente (A)	8,6	6	5,08	1,67	3	3,32	7,71	6,3	6,58	6,44	5,03
Voltaje (V)	23,08	23,2	22,5	22,92	22,2	21,85	20,75	20,84	20,55	20,08	19,79
RPM	6726	5800	7500	0	3100	4234	6550	5952	5578	6903	6750
Potencia (W)	130	89	92	0	95	48,5	97,8	85	93,4	98,5	78
Consumo (mAh)	280	1300	2500	3448	4493	5396	6425	7457	8288	9189	10105,4

Fuente: Piñeros (2022).

- Cuando se presentó el consumo de 9500 mAh, se evidenció un voltaje de 19,5 V en la batería (Fox-tech de 12 500 mAh).
- Al finalizar la prueba, se conectó la batería al cargador de baterías que registró un porcentaje de carga de 7,8 %.

Gráfica de consumo eléctrico generado a partir del log de la prueba

Al finalizar la prueba, se procedió a descargar el log registrado por el piloto automático conectado en el montaje del ensayo. Con la ayuda de la página web UAV Log Viewer (ArduPilot, 2021a), se generó la figura 8, donde se graficó el consumo eléctrico de la prueba que fue de máximo 10 171,76 mAh.

Así mismo, se comparó la figura 8 con el log del primer vuelo de prueba del UAV, demostrando que se simuló el mismo comportamiento de consumo.

Sin embargo, los picos de corriente mayores a 32 A presentados en el vuelo de prueba fueron ajustados a máximo 32 A, esto pudo haber ocurrido debido a que el primer vuelo del UAV fue realizado con la batería Tattu de 8000 mAh, con una tasa de descarga máxima de 25 veces su capacidad.

Aun así, se logró corroborar que la capacidad máxima que puede suministrar la batería de 12500 mAh es de 32 A, con un empuje en promedio de 3055 gf, encontrándose en el rango de empuje máximo requerido por el UAV.

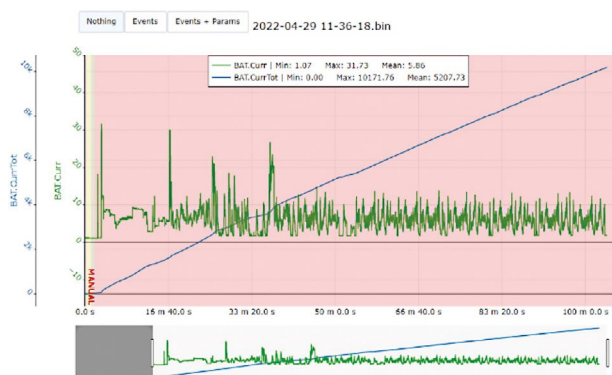


Figura 8. Gráfica log prueba simulación primer vuelo del UAV
Fuente: Piñeros (2022), en ArduPilot (2021a).

Prueba número 3: Perfil de consumo durante un vuelo de 68 minutos

Teniendo identificado el perfil de consumos promedio de energía eléctrica del UAV, que se determinó a partir del análisis de los consumos presentados en los vuelos de prueba, se procedió a realizar el montaje para la prueba de perfil de consumo que simula un tiempo de vuelo de 68 minutos, con el propósito de verificar que la batería de 12 500 mAh satisfacía las necesidades de energía eléctrica para una operación en vuelo mayor a 60 minutos.

Para esta prueba, también se emplearon tres ventiladores con el fin de simular el consumo de la aviónica de la plataforma. La prueba duró un total de 70 minutos, debido a que se contempló el tiempo que toma el operador en verificar el estado del UAV y proceder a realizar el apagado de todos sus sistemas cuando ha finalizado el vuelo.

Al comparar los datos del perfil de consumo estimado para una autonomía de 68 minutos con los resultados de la prueba número 3 (tabla 16), se puede ver que los consumos presentados en la simulación de las fases de vuelo con mayor error fueron las de despegue, ascenso y aterrizaje. Esto se debe a que el consumo en estas fases de vuelo varía dependiendo de cómo se programe el ascenso y el descenso de la plataforma. En la mayoría de las misiones, se busca realizar estas fases de vuelo a través de círculos o de forma escalonada con el fin de disminuir el consumo.

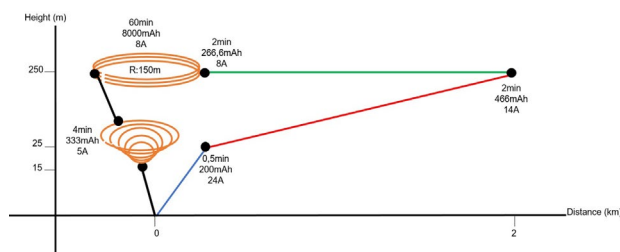


Figura 9. Perfil de consumo eléctrico estimado para una autonomía de vuelo de 68 minutos
Fuente: Piñeros (2022).

Tabla 15.

Valores registrados durante la ejecución de la prueba número 3

Parámetro	Valores promedio tomados del Mission Planner y el banco de motor Turnigy											
	Minuto 0,5	Minuto 2,5	Minuto 4,5	Minuto 10	Minuto 20	Minuto 30	Minuto 40	Minuto 50	Minuto 60	Minuto 64,5	Minuto 68,5	Minuto 70
Empuje (gr)	2800	1560	858	859	845	883	900	842	806	455	467	459
Corriente (A)	24	14,3	7,71	7,8	7,52	8,16	8,39	8,2	7,95	5,12	5,19	5,17
Voltaje (V)	25,2	22,48	23,36	23	22,44	21,82	21,2	20,81	20,37	20,51	20,47	20,42
RPM	9850	8580	6720	6731	6632	6754	6743	6511	6370	5019	5022	5012
Potencia (W)	456	258	135	136,1	126,2	132,2	134,8	121,1	116,7	62,9	63,6	61,2
Consumo (mAh)	236	716	980	1724	2976	4303	5700	6910	8274	8868	9189	9349

Fuente: Piñeros (2022).

Sin embargo, para el caso del consumo total y el presentado en las fases de crucero, incluyendo el *loiter*, se encuentran errores porcentuales menores a 2%, lo cual permite determinar que el perfil de consumo estimado para una autonomía de 68 minutos representa un perfil de consumo ideal aplicable al UAV.

Tabla 16.

Comparación de datos de consumo estimados versus los registrados durante la prueba número 3

	Ascenso 25m	Ascenso 250m	Crucero	Loiter	Descenso	Total
Datos figura 9 (mAh)	216	400	260	8000	300	9176
Datos tabla 15 (mAh)	236	480	264	7888	321	9189
Diferencia (mAh)	20	80	4	112	21	13
Porcentaje de error (%)	8,4	16,7	1,5	-1,4	6,5	0,14

Fuente: Piñeros (2022).

Gráfica de consumo eléctrico generado a partir del log de la prueba

Al finalizar la prueba número 3, se procedió a descargar el log registrado por el piloto automático conectado en el montaje de la prueba; y con la ayuda de la página web UAV Log Viewer (ArduPilot, 2021a), se generó la gráfica de consumo eléctrico obtenido. Se encontró un consumo máximo de 9392 mAh y variaciones de corriente que identifican los cambios de fase durante el vuelo.

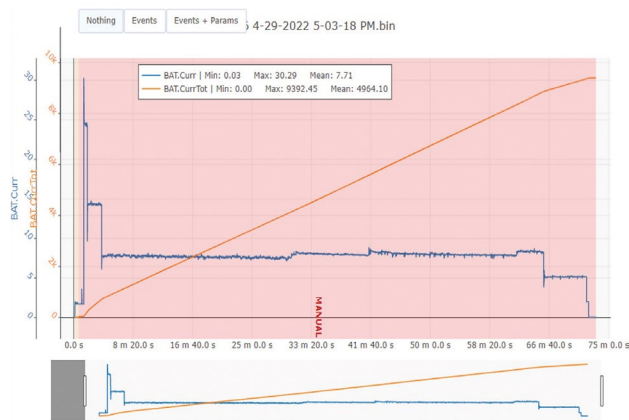


Figura 10. Gráfica log prueba número 3 (Perfil de consumo eléctrico estimado para una autonomía de vuelo de 68 minutos)

Fuente: Piñeros (2022), en ArduPilot (2021a).

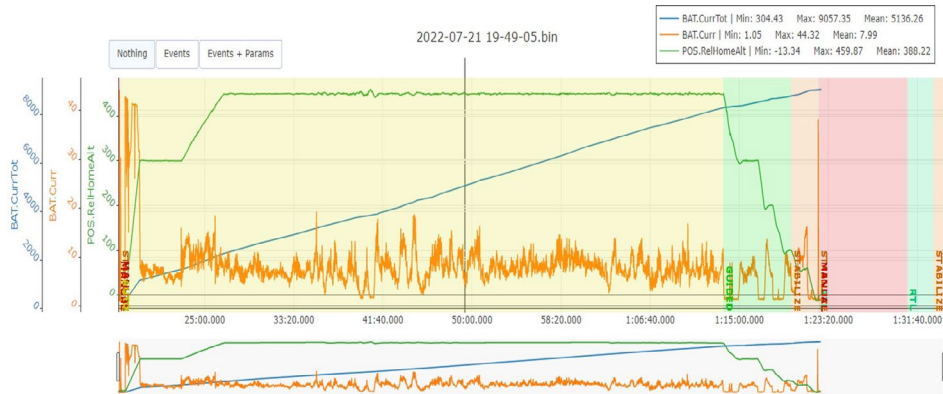
Validación en vuelo de la batería Foxtech de 12500 mAh

Como fase final de validación, se procedió a realizar una prueba en vuelo del UAV con batería Foxtech de 12500 mAh instalada, con el fin de validar en vuelo el consumo y la autonomía. En la figura 11, se presentan los resultados de la prueba.

En la figura 11, se observa que el UAV logró superar la autonomía de 90 minutos. Se comprobó que la batería suministra la energía eléctrica suficiente para una autonomía de 60 minutos con 20% de seguridad y un consumo máximo de 9057.35 mAh, siendo este menor al obtenido durante la fase de pruebas en tierra (Prueba

Figura 11. Gráfica log prueba autonomía mayor a 90 minutos

Fuente: Piñeros (2022), en ArduPilot (2021a).



número 2: simulación primer vuelo de prueba del UAV – 100 minutos). Este valor se encuentra dentro del rango del consumo eléctrico total calculado para el UAV.

Conclusiones

Durante el desarrollo de la investigación, se realizó el análisis de cargas eléctricas con el objetivo de definir la cantidad de energía requerida para la operación del UAV de 5 kg empleado como prototipo. Mediante pruebas en banco, se midió la cantidad de carga eléctrica requerida en las fases de mayor consumo energético del UAV (despegue y ascenso), a fin de establecer los requerimientos que debe cumplir la batería para garantizar la autonomía y correcta operación del UAV.

A partir de los requerimientos de la batería, se consiguió seleccionar la opción más adecuada disponible en el mercado actual, en este caso la batería Foxtech de 12 500 mAh. Después de adquirirla, se efectuaron las fases de validación operacional en tierra, simulando los perfiles de consumo eléctrico registrados durante los vuelos de prueba del UAV, con una duración promedio de 50 minutos y donde se empleó una batería de 8000 mAh.

A través de los resultados de las pruebas en tierra, se logró demostrar que la batería Foxtech de 12 500 mAh garantiza una autonomía de vuelo del UAV mayor a 60 minutos con 20 % de factor de seguridad. Así mismo, para un perfil de vuelo de 68 minutos, se pudo comprobar que el consumo promedio es de 9176 mAh, lo cual refleja un perfil ideal del UAV. Sin embargo, se

determina que este perfil de consumo ideal está sujeto a los tipos de operación, las condiciones meteorológicas del lugar donde se realizará el vuelo y la experticia del operador del UAV.

Como validación final, se efectuó una prueba en vuelo con el UAV de 5 kg y se superó la autonomía de 90 minutos, comprobando que la batería Foxtech de 12 500 mAh suministra la energía eléctrica suficiente para una autonomía de 60 minutos con 20 % de seguridad y un consumo máximo de 9057.35 mAh.

Al comparar los resultados de las pruebas en tierra con la prueba en vuelo, se concluye que durante las pruebas en tierra se presentaron consumos eléctricos mayores a los obtenidos en las pruebas en vuelo, esto ocurrió debido a las condiciones atmosféricas que tuvieron lugar en la locación de los ensayos.

De acuerdo con las conclusiones anteriores, durante el desarrollo de la investigación se aplicó la metodología propuesta para la validación de una batería de UAV, teniendo en cuenta la autonomía requerida, a fin de comprobar que esta metodología garantiza la correcta selección de la batería, y su verificación, validación e integración en la plataforma para contemplar la necesidad energética de la aeronave.

Referencias

- Abeywickrama, H. V., Jayawickrama, B. A., He, Y. y Dutkiewicz, E. (2018). *Empirical Power Consumption Model for UAVs* [ponencia]. IEEE 88th Vehicular Technology Conference

- (VTC-Fall). Chicago, Estados Unidos. Agosto 27-30 de 2018. <https://doi.org/10.1109/VTCFall.2018.8690666>
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2013). *Standard Guide for Aircraft Electrical Load and Power Source Capacity Analysis*. <https://www.astm.org/f2490-05e01.html>
- ArduPilot. (2021a). *UAV Log Viewer*. <https://plot.ardupilot.org/#/>
- ArduPilot. (2021b). *Mission Planner Home*. <https://ardupilot.org/planner/>
- Costa, E. F., Souza, D. A., Pinto, V. P., Araújo, M. S., Peixoto, A. M. y Da Costa, E. P. (2019). *Prediction of Lithium-Ion Battery Capacity in UAVs* [ponencia]. 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), 1865-1869. <https://doi.org/10.1109/CoDIT.2019.8820714>
- Dündar, Ö., Bilici, M. y Ünler, T. (2020). Design and Performance Analyses of a Fixed Wing Battery VTOL UAV. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 23(5), 1182-1193. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.02.002>
- Fernández Delgado, T. (2021). *Estudio para la implementación de sistemas de celdas de combustible en vehículos aéreos no tripulados* (tesis de grado, Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar). Repositorio institucional CUDE. <http://calderon.cud.uvigo.es/handle/123456789/421>
- Foxtech. (2022). *Foxtech 6S 12500 mAh Li-ion Battery*. <https://www.foxtechfpv.com/foxtech-6s-12500mah-li-ion-battery.html>
- Iglesias, R., Lago, A., Nogueiras, A., Martínez-Peñalver, C., Marcos, J., Quintans, C., Moure, M. J. y Valdés, M. D. (2012). *Modelado y simulación de una batería de ion-litio comercial multicelda*. <http://quintans.webs.uvigo.es/documentos/2012-SAAEI-0464-gf-000126.pdf>
- Larin, V., Solomentsev, O., Zaliskyi, M., Shcherban, A., Averianova, Y., Ostroumov, I., Kuzmenko, N., Sushchenko, O. y Bezkorovainyi, Y. (2022). *Prediction of the Final Discharge of the UAV Battery Based on Fuzzy Logic Estimation of Information and Influencing Parameters* [ponencia]. IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). Cracovia, Ucrania. Octubre 3-7 de 2022. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916490>
- Lee, D., Zhou, J. y Lin, W. T. (2015). *Autonomous Battery Swapping System for Quadcopter* [ponencia]. International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). Denver, Estados Unidos. Junio 9-12 de 2015. <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2015.7152282>
- Marques, M. (2015). *STANAG 4586 — Standard Interfaces of UAV Control System (UCS) for NATO UAV Interoperability*. <https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Educational%20Notes/STO-EN-SCI-271/EN-SCI-271-03.pdf>
- Quintero, V., Che, O., Ching, E., Auciello, O. y De Obladía, E. (2021). Baterías de Ion Litio: características y aplicaciones. *Revista de I+D Tecnológico*, 17(1). <http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/339/3392002003/3392002003.pdf>
- Shengnan, L., Qiao, L., Ningyun, L. y Bin, J. (2014). *Real-Time Estimation of Cruise Duration for Electric-Powered Micro-UAVs* [ponencia]. The 26th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Changsha, China. Mayo 31 - junio 2 de 2014. <https://doi.org/10.1109/CCDC.2014.6853091>
- Tattu. (2022). *Tattu Gens Battery*. https://genstattu.com/search.php?search_query=battery
- Thibbotuwawa, A. N. (2018). Energy Consumption in Unmanned Aerial Vehicles: A Review of Energy Consumption Models and Their Relation to the UAV Routing. *Information Systems Architecture and Technology: Proceedings of 39th International Conference on Information Systems Architecture and Technology – ISAT 2018* (J. Świątek, L. Borzemski y Z. Wilimowska, eds.). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99996-8_16
- Wei, K., Wu, J., Ma, W. y Li, H. (2019). State of Charge Prediction for UAVs Based on Support Vector Machine. *The Journal of Engineering*, (23). <https://doi.org/10.1049/joe.2018.9201>
- Yan, H., Yang, S.-H., Chen, Y. y Fahmy, S. A. (2021). Optimum Battery Weight for Maximizing Available Energy in UAV-Enabled Wireless Communications. *IEEE Wireless Communications Letters*, 10(7), 1410-1413. <https://doi.org/10.1109/LWC.2021.3069078>
- Zobaa, A. F. y Leuchter, J. (2016). *Batteries Investigations of Small Unmanned Aircraft Vehicles* [ponencia]. 8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD). Glasgow, Reino Unido. Abril 19-21 de 2016. <https://doi.org/10.1049/cp.2016.0306>