

Universidad Nacional de Educación a Distancia
Departamento de Ingeniería Informática

Evaluación de soluciones para la
optimización del uso de la energía en
vehículos aéreos no tripulados

Máster Universitario en Investigación en Ingeniería de
Software y Sistemas Informáticos

Modelado y Simulación de Robots. 31105151

Autor: David Ramos Calvo
Director: Juan José Escribano Rodenas
Curso: 2018-2019
Convocatoria: Junio

Máster Universitario en Investigación en Ingeniería de Software y
Sistemas Informáticos

Modelado y Simulación de Robots. 31105151

Título: Evaluación de soluciones para la optimización del uso de
la energía en vehículos aéreos no tripulados

Tipo de trabajo: Tipo B, trabajo específico propuesto por el
alumno

Autor: David Ramos Calvo

Director: Juan José Escribano Rodenas

DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA DEL TRABAJO CIENTÍFICO, PARA LA DEFENSA DEL TRABAJO FIN DE MASTER

Fecha: 25/06/2019

Quién suscribe:

Autor(a): DAVID RAMOS CALVO
D.N.I./N.I.E./Pasaporte.: 70904684P

Hace constar que es la autor(a) del trabajo:

Título completo del trabajo.

Evaluación de soluciones para la optimización del uso de la energía en vehículos aéreos no tripulados

En tal sentido, manifiesto la originalidad de la conceptualización del trabajo, interpretación de datos y la elaboración de las conclusiones, dejando establecido que aquellos aportes intelectuales de otros autores, se han referenciado debidamente en el texto de dicho trabajo.

DECLARACIÓN:

- ✓ Garantizo que el trabajo que remito es un documento original y no ha sido publicado, total ni parcialmente por otros autores, en soporte papel ni en formato digital.
- ✓ Certifico que he contribuido directamente al contenido intelectual de este manuscrito, a la génesis y análisis de sus datos, por lo cual estoy en condiciones de hacerme públicamente responsable de él.
- ✓ No he incurrido en fraude científico, plagio o vicios de autoría; en caso contrario, aceptaré las medidas disciplinarias sancionadoras que correspondan.

Fdo.



**Impreso TFDm05_AutorPbl. Autorización de publicación
y difusión del TFM para fines académicos**

Autorización

Autorizo/amos a la Universidad Nacional de Educación a Distancia a difundir y utilizar, con fines académicos, no comerciales y mencionando expresamente a sus autores, tanto la memoria de este Trabajo Fin de Máster, como el código, la documentación y/o el prototipo desarrollado.

Firma del/los Autor/es

RESUMEN

El presente trabajo pretende presentar un ejemplo teórico sobre lo que las metodologías *Digital Twins* y *Reduced Order Models* (de ahora en adelante denominado *ROM*) pueden hacer para mejorar la eficiencia energética a la hora de realizar vuelos autónomos.

La metodología *ROM* permite a los ingenieros realizar simulaciones simplificadas de los diferentes modelos de vehículos, lo cual supone un ahorro computacional y de tiempo elevado. Para realizar estas simplificaciones, se presentarán diferentes metodologías y algoritmos que permiten obtener dichos modelos.

Por otro lado, la metodología *Digital Twins* permite la simulación en tiempo real de los modelos de los vehículos, permitiendo a los usuarios adelantarse a posibles errores, mejorar la toma de decisión, etc.

Palabras clave: ROM, Reduced Order Models, Digital Twins, Dron, Ahorro energético, Multitrotor, Simulación.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE FIGURAS.....	3
ÍNDICE DE TABLAS.....	4
1. RESUMEN	5
2. INTRODUCCIÓN	6
2.1. CONTEXTO.....	6
2.2. PROPÓSITO DEL PROYECTO	10
2.3. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO	11
3. DESCRIPCIÓN Y ESTADO DEL ARTE DEL PROBLEMA	12
3.1. FUNCIONAMIENTO DE UN DRON [5].....	12
3.1.1. PARTES DE UN MULTIROTOR	13
3.1.2. CÓMO VUELA UN MULTIROTOR [12].....	17
3.2. ESTADO DEL ARTE DEL PROBLEMA.....	21
4. DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA SOLUCIÓN.....	23
4.1. REDUCED ORDER MODELS.....	23
4.2. DIGITAL TWINS.....	25
4.3. BATERÍAS.....	28
4.4. HÉLICES	35
4.5. CASO PRÁCTICO – ROM + DT	42
4.5.1. MODELO DEL VIENTO	47
4.5.2. MODELO DEL DRON	48
4.5.3. SIMULACIÓN.....	50
4.5.3.1. DURACIÓN MÁXIMA Y MÍNIMA DE LA BATERÍA	51
4.5.3.2. CONFIGURACIONES INVÁLIDAS.....	53

5.	EVALUACIÓN DE LA SOLUCIÓN REALIZADA	56
5.1.	SOLUCIONES POR COMPARAR.....	56
5.2.	CRITERIOS DE COMPARACIÓN	57
5.2.1.	IMPLEMENTACIÓN	57
5.2.1.1.	OPTIMIZACIÓN DEL PILOTAJE.....	57
5.2.1.2.	SUSTITUCIÓN DE BATERÍAS	59
5.2.1.3.	SELECCIÓN DE ROTORES.....	60
5.2.2.	FLEXIBILIDAD	62
5.2.2.1.	OPTIMIZACIÓN DEL PILOTAJE.....	62
5.2.2.2.	SUSTITUCIÓN DE BATERÍAS	63
5.2.2.3.	SELECCIÓN DE ROTORES.....	64
5.2.3.	IMPACTO	66
5.2.3.1.	OPTIMIZACIÓN DEL PILOTAJE.....	66
5.2.3.2.	SUSTITUCIÓN DE BATERÍAS	67
5.2.3.3.	SELECCIÓN DE ROTORES.....	69
5.3.	COMPARATIVA.....	71
6.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	73
	BIBLIOGRAFÍA	75
	LISTADO DE SIGLAS, ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1, Dron militar de reconocimiento [1].....	6
Figura 2, Dron autónomo para fumigación de cultivos [2]	7
Figura 3, Dron de reparto de productos de Amazon [3]	8
Figura 4, Tricopter [5]	13
Figura 5, Hexacopter [6]	13
Figura 6, Marco de quadcopter [7].....	14
Figura 7, Catálogo de motores para drones y sus usos [8]	16
Figura 8, Sentido de giro de los rotores de un dron [9]	18
Figura 9, Sumatorio de fuerzas en un dron en desplazamiento horizontal [10].....	19
Figura 10, Giro de dron sobre su propio eje vertical [11]	20
Figura 11, Model Order Reduction (verde) frente al planteamiento actual (azul) [12].	24
Figura 12, Caso de uso de ROM [13]	24
Figura 13, Digital twin de un proceso de fabricación [14]	26
Figura 14, Batería LiPo [15].....	28
Figura 15, Batería NiMH [16]	29
Figura 16, Batería NiCd [17].....	30
Figura 17, Etiquetado de baterías LiPo [18]	32
Figura 18, Giro de motores para estabilizar un dron, según el número de estos [20] ..	35
Figura 19, Tipos de ángulo de ataque (pitch) [21].....	37
Figura 20, Tamaños de hélices [21]	38
Figura 21, Hélices con diferente número de palas [20]	39
Figura 22, Materiales de las hélices [21]	40
Figura 23, Hélice cónica vs hélice Bullnose [20]	41
Figura 24, Gráfica de empuje vs Aceleración [22].....	45
Figura 25, Gráfica de Corriente de motor vs Aceleración [22].....	46
Figura 26, Coordenadas esféricas [23]	47
Figura 27, Yaw, Pitch y Roll [24]	48
Figura 28, Matriz de transformación [29]	48
Figura 29, Concepto de Digital Twin en un dron [23].....	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1, Usos típicos de baterías según el número de celdas y tensión nominal [19]...	33
Tabla 2, Constantes empleadas en el caso de uso	43
Tabla 3, Características dron - DJI Mavic 2 [25]	43
Tabla 4, Especificaciones motores Cobra CM-2217/20 [22]	44
Tabla 5, Especificaciones propulsores asociados a motores Cobra CM-2217/20 [22] ..	44
Tabla 6, Duración máxima y mínima de la batería	52
Tabla 7, Configuraciones inválidas	54
Tabla 8, Comparativa de soluciones	72
Tabla 9, Conclusiones de los criterios de evaluación	73

1. RESUMEN

El presente trabajo pretende presentar un ejemplo teórico sobre lo que las metodologías *Digital Twins* y *Reduced Order Models* (de ahora en adelante denominado *ROM*) pueden hacer para mejorar la eficiencia energética a la hora de realizar vuelos autónomos.

La metodología *ROM* permite a los ingenieros realizar simulaciones simplificadas de los diferentes modelos de vehículos, lo cual supone un ahorro computacional y de tiempo elevado. Para realizar estas simplificaciones, se presentarán diferentes metodologías y algoritmos que permiten obtener dichos modelos.

Por otro lado, la metodología *Digital Twins* permite la simulación en tiempo real de los modelos de los vehículos, permitiendo a los usuarios adelantarse a posibles errores, mejorar la toma de decisión, etc.

2. INTRODUCCIÓN

2.1. CONTEXTO

A lo largo de los últimos años, el uso de vehículos aéreos no tripulados, comúnmente conocidos como *drones*, ha experimentado un gran crecimiento. Sectores tan diversos como el militar, agrónomo o logístico han encontrado en este tipo de aparatos un aliado con el que realizar diversas tareas de forma más eficiente.

Algunos casos de uso conocidos son:

- *Vigilancia militar de áreas en conflicto*: Previo a la aparición de los vehículos aéreos no tripulados, este tipo de actividades se realizaban mediante el uso de helicópteros y satélites. En el primer caso, al tratarse de zonas en conflicto, supone un riesgo de vidas humanas. En ambos casos, el coste económico tanto de un helicóptero como de un satélite es muy superior al de cualquier dron. En la Figura 1 se puede ver una muestra de este tipo de drones.



Figura 1, Dron militar de reconocimiento [1]

- *Prospección de cultivos*: La mejora de las tecnologías de datos (Big Data, machine learning, etc.) permite hacer estudios de los campos de cultivo y aplicar técnicas que mejoren el rendimiento de los mismos y usar los recursos (agua, pesticidas, abonos, etc.) de una forma más eficiente. Para poder sacar provecho de estas nuevas tecnologías es necesario que tener una forma de captación de datos que

permita explotarla correctamente. Con tal fin, drones cargados de sensores, como el mostrado en la Figura 2, patrullan los campos de cultivo recogiendo todo tipo de información que, posteriormente, será digerida por los sistemas de Big Data.



Figura 2, Dron autónomo para fumigación de cultivos [2]

Las alternativas al uso de los drones son el empleo de avionetas o helicópteros, lo que requiere un coste muy superior y unos conocimientos de pilotaje complejos, o el uso de vehículos terrestres cargados de sensores, los cuales pueden dañar los cultivos al tener que pasar por encima.

- *Envío de paquetería:* En la industria logística siempre se están buscando métodos que permitan a los repartidores ahorrar tiempo y combustible; en definitiva, dinero. En EE. UU., algunas empresas diseñan rutas para que los transportistas sólo tengan que realizar giros a la derecha (debido a su sistema de semáforos, se ha demostrado que los giros a la derecha suponen una menor pérdida de tiempo).

Desde hace algún tiempo, empresas como *Amazon* se están planteando la posibilidad de emplear drones autónomos para realizar el reparto de productos dentro de las ciudades (ver Figura 3). De esta forma, tratan de conseguir un gran ahorro al eliminar los gastos inherentes a los vehículos terrestres de transporte

(combustible, conductor, etc.) y realizar rutas de transporte más eficientes al eliminar la componente tráfico.



Figura 3, Dron de reparto de productos de Amazon [3]

Este auge del uso de los vehículos aéreos no tripulados no se ha producido exclusivamente en el entorno profesional, sino que cada vez más empresas venden drones para el público en general, poniendo a su disposición desde pequeñas aeronaves a precios que rondan la decena de euros, hasta vehículos de mayor tamaño y complejidad. La popularización de los drones es tal, que disciplinas antes poco accesibles por su coste, como es la fotografía aérea, se han puesto al alcance de cualquier persona que disponga de uno de estos vehículos equipado con una cámara. También han aparecido nuevas disciplinas y profesiones como son los *pilotos de drones* que participan en los campeonatos de carreras de drones que se celebran alrededor del mundo al estilo de la *Fórmula 1*.

Todo este ecosistema desarrollado alrededor de los drones requiere que las tecnologías evolucionen a la par. Sin embargo, uno de los elementos fundamentales de todo vehículo autónomo, la fuente de alimentación se ha convertido en una de las grandes problemáticas en este campo. Los drones comerciales emplean, en su mayoría, baterías eléctricas que permiten a los pilotos realizar vuelos de duración media situada entre los 10 y los 20 minutos [4], convirtiéndose en uno de los principales factores

limitantes de esta tecnología y de sus aplicaciones, a la vez que se abre un gran campo de investigación en el que poder desarrollar todo tipo de soluciones.

Sin lugar a duda, en los próximos años se verán gran cantidad de soluciones mediante las que abordar dicha problemática:

- *Nuevas baterías:* El desarrollo de nuevas tecnologías que permitan la creación de nuevas baterías de mayor capacidad sin sacrificar tamaño ni peso permitirá aumentar, considerablemente, el tiempo de vuelo de los drones.
- *Mejora de algoritmos:* En el caso de los vehículos autónomos, la mejora de los algoritmos de toma de decisión para realizar los movimientos permitirá optimizar el uso de las baterías.
- *Nuevas fuentes de energía:* El desarrollo de nuevas fuentes de energía podrá permitir la sustitución de las baterías convencionales por otros elementos más eficientes.

2.2. PROPÓSITO DEL PROYECTO

El objetivo del presente proyecto es el de realizar un análisis del impacto que pueden tener el uso de las metodologías *digital twins* y los *modelos de orden reducido* en el tiempo de vuelo de un dron autónomo, comparándolo a su vez con otras soluciones existentes.

2.3. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

En el *capítulo 1*, se presenta un resumen del trabajo que se va a realizar.

En el presente *capítulo 2*, se muestra al lector la situación en la que está la tecnología en la que se centra el trabajo, los drones, así como la motivación del proyecto.

En el *capítulo 3*, dará a conocer al lector un poco más en detalle la situación en la que se encuentra el estudio de la eficiencia energética en los drones.

El *capítulo 4* muestra las soluciones que se plantea con más detalle, incluyendo un pequeño caso de uso.

En el *capítulo 5*, se evalúan las soluciones seleccionadas.

El *capítulo 6* presenta las conclusiones extraídas del trabajo, así como posibles futuras evoluciones del mismo.

3. DESCRIPCIÓN Y ESTADO DEL ARTE DEL PROBLEMA

Este trabajo se va a centrar, principalmente, en el estudio de la optimización del tiempo de vuelo de drones estándar de cuatro rotores, que serán referidos simplemente con el término drones, siendo, la mayoría de los casos, aplicables a aeronaves más grandes y con mayor número de rotores. Para ello, es necesario, en primer lugar, conocer cómo funciona un dron.

3.1. FUNCIONAMIENTO DE UN DRON [5]

A la hora de realizar un trabajo que trate sobre drones, es necesario, en primer lugar, entender cómo funciona un dron, es decir, por qué vuela, cómo se mueve, qué tipos hay y qué características tienen. En primer lugar, es necesario entender que los nombres que se usan comúnmente de manera indistinta (dron, multirotor, UAV...) en realidad se refieren a vehículos diferentes. En el presente trabajo se hará un uso indiferente de cada uno de los términos ya que no está centrado en uno de estos tipos en particular, sino que el objetivo debe ser válido para cualquiera de ellos. A continuación, se presenta una pequeña descripción más concreta de cada uno de estos tipos, para poder tener un conocimiento más claro a la hora de hablar de ellos:

- *Dron*: Si bien esta palabra es la más extendida para referirse a todo tipo de vehículos aéreos no tripulados, en realidad hace referencia un tipo muy específico de naves que vuelan a gran altura y que comúnmente son empleadas por el ejército (véase Figura 1). Comúnmente, estos drones son empleados para el ataque desde largas distancias, lanzamiento de misiles o misiones espía.
- *Multirotores*: El término multirotor es el nombre genérico que se le da a todo aquel vehículo aéreo, normalmente no tripulado y dirigido por radiocontrol, que dispone de 3 o más rotores verticales y que no sea un helicóptero. Según el número de rotores que tenga, recibirá nombres más específicos, normalmente en inglés, como pueden ser *tricopter*, *quadcopter*, *hexcopter*, etc.... Ejemplos de esto pueden verse la Figura 4 y

la Figura 5 Dado que hay muchas configuraciones de motores posibles, se engloban todos bajo el nombre de multirrotores.



Figura 4, Tricopter [6]



Figura 5, Hexacopter [7]

- *UAV*: UAV es el acrónimo inglés para *Unmanned Aerial Vehicle*, es decir, vehículo aéreo no tripulado. Tanto los drones como los multirrotores entran dentro de esta categoría, ya que no hay un piloto en la cabina.

3.1.1. PARTES DE UN MULTIROTOR

Si bien las soluciones planteadas a lo largo del trabajo son aplicables a todo tipo de vehículos, es en los multirrotores donde más se va a centrar el análisis, ya que son los que con más facilidad se pueden encontrar en el mercado y los que tienen unas características más estándar. Por lo general, los drones militares son diseñados con unas

características específicas, y para un uso determinado, por lo que no supone una gran ventaja analizarlos en el presente trabajo, que busca soluciones “universales”.

A continuación, se presentan los diferentes elementos que se pueden encontrar en cualquier multirrotor y que serán la base para que pueda volar y desplazarse según se le indique:

- **Marco:** El marco de un multirrotor tiene la misma función que el chasis en los coches, unificar todos los componentes que permiten el funcionamiento del mismo y aportar robustez al vehículo (ver Figura 6). Como se explicará más adelante, es muy importante que el peso del dron sea lo más bajo posible, sobre todo para el propósito del presente trabajo, que es la búsqueda de soluciones que reduzcan el consume energético de los drones y, por tanto, aumenten el tiempo de vuelo. Debido a la importancia que tiene el peso, los marcos de los drones suelen estar fabricados en plástico o fibra de carbono. De los extremos del marco, además, salen los brazos sobre los que se montarán los motores y las hélices, mientras que, en la parte central, por motivos de equilibrado de peso, se montan el resto de los componentes, como pueden ser la batería, el control de movimiento, la cámara, en caso de llevarla, etc....



Figura 6, Marco de quadcopter [8]

- **Motor:** Es necesario utilizar un motor por cada uno de los brazos que tenga el dron. Se trata de motores estándar de corriente continua. La elección del tipo de motor que se va a emplear dependerá de la potencia que se

requiera para volar y del uso que se le vaya a dar al dron. Para ello, en el mercado se puede encontrar una gran oferta, como la mostrada en la Figura 7. Si los motores van a ser instalados en drones que lleven cargas pesadas, entonces será recomendable utilizar motores que generen un gran par y bajas revoluciones. Si, por el contrario, se van a montar en un dron de carreras, que realice muchos cambios de dirección a gran velocidad, entonces será recomendable tener motores que alcancen altas revoluciones.

Como se verá más adelante, esto sólo será posible si la elección de las hélices y la batería es la correcta.

F60PROII KV2350
Definitely proximity flying and quick response

F60PROII KV2500
Best KV for racing and freestyle

F60PROII KV2700
Top end and juicy flying

34.6g
Ultra Light (incl. cable)

1.6kg+
Max. Thrust

240°C
High Temperature Resistant Silver Winding

1657g Max. Thrust	F60PROII KV2700 HQ5043 tri-blade F45A ESC	Throttle: 100% Current: 50.59A Power: 763.4W	Volt: 15.09v RPM: 31469RPM Power Ratio: 2.17g/W
	84°C after 100% throttle running 1 min. (Ambient Temp. 12.3°C)		
1564g Max. Thrust	F60PROII KV2500 DAL5050 tri-blade F45A ESC	Throttle: 100% Current: 51.66A Power: 783.56W	Volt: 15.17v RPM: 27260RPM Power Ratio: 2.00g/W
	95.6°C after 100% throttle running 1 min. (Ambient Temp. 12.3°C)		
1421g Max. Thrust	F60PROII KV2350 DAL5045 tri-blade F45A ESC	Throttle: 100% Current: 46.60A Power: 713.91W	Volt: 15.32v RPM: 26023RPM Power Ratio: 1.99g/W
	75.6°C after 100% throttle running 1 min. (Ambient Temp. 12.3°C)		

Figura 7, Catálogo de motores para drones y sus usos [9]

- **Hélices [10]:** En el apartado 4.4, se realizará un análisis exhaustivo de cómo son las hélices de los drones y el impacto que tiene cada una de sus características a la hora de realizar determinados tipos de vuelos. Por ahora, basta con saber que las características principales de las hélices son:
 - Tamaño
 - Número de palas

- Ángulo de ataque
- Material
- Forma de las puntas
- *Baterías* [11]: En el apartado 4.3, se analizarán los tipos de baterías disponibles en el mercado y sus propiedades, así como las características más beneficiosas para los drones. Las propiedades más importantes a evaluar son:
 - Tamaño
 - Peso
 - Capacidad
 - Voltaje
- *ESC*: Es el acrónimo inglés para *Electronic Speed Controller*, o controlador electrónico de velocidad. Es el encargado de suministrar la corriente a los motores para conseguir la velocidad y los movimientos requeridos en cada momento. Por ejemplo, si no se controlase la velocidad de cada motor por separado, el dron sólo podría volar arriba y abajo en la vertical. Es necesario usar un *ESC* por cada motor, y es recomendable que sea el mismo modelo para todos, con el fin de evitar ligeras diferencias.
- *Transmisor y Receptor*: Estos dispositivos electrónicos son los encargados de recibir y transmitir las señales a los puestos de mando. En el caso de que el dron sea controlado de forma remota, el receptor recibirá las señales enviadas por el mando.

3.1.2. CÓMO VUELA UN MULTIROTOR [12]

Una vez que se tienen claras las partes principales de los multirrotores, es más sencillo entender cómo vuelan y por qué. Para que sea más sencilla la explicación, estará centrada en los drones de 4 rotores. En este caso, el vehículo dispone de 4 brazos, con un motor en cada uno y con una hélice en cada motor. Cuando giran, cada uno de los

motores genera un par. Teniendo en cuenta la *Tercera Ley de Newton*, este par generará una reacción del mismo valor y sentido opuesto. Por tanto, si se tiene un motor girando, el brazo que sustenta dicho motor tratará de girar de la misma forma, pero en sentido opuesto. Por este motivo, los helicópteros tradicionales poseen un rotor de cola, que compensa el par de reacción generado por la hélice principal.

En los drones, en este caso, como hemos dicho, de 4 rotores, no se dispone de un rotor de cola que compense la reacción del par de rotación. Para compensarlo, se hacen girar los motores en sentidos opuestos de manera alterna, de forma que el momento resultante de los 4 rotores sea 0, tal y como se muestra en la Figura 8.

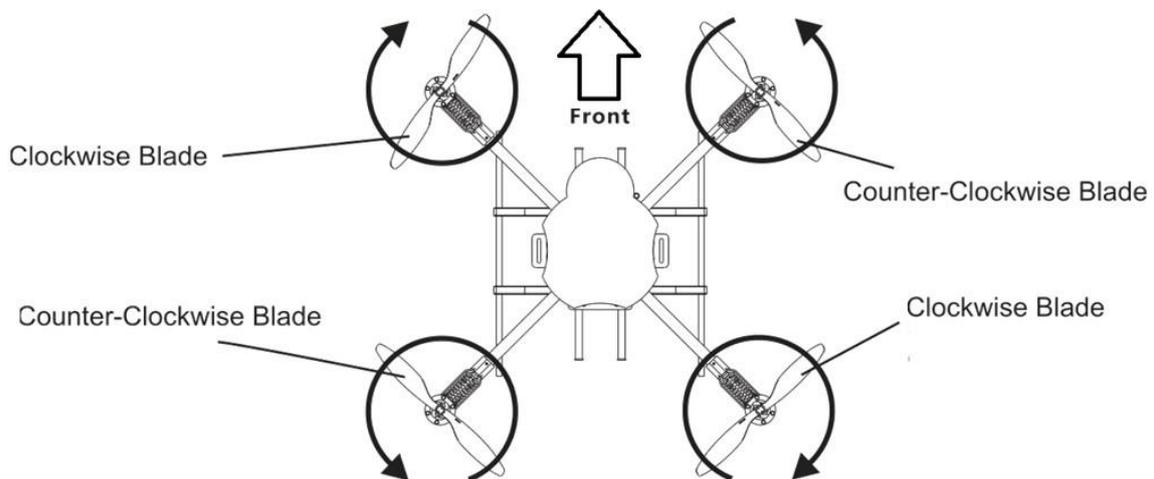


Figura 8, Sentido de giro de los rotores de un dron [13]

De esta forma, es sencillo ver que un dron es capaz de desplazarse de manera vertical fácilmente, ya que solo es necesario que el empuje generado por los motores sea mayor que el peso del vehículo. Por tanto, para que un dron realice desplazamientos verticales, solo es necesario aumentar o disminuir la potencia de todos los motores a la vez y en la misma medida.

Por otro lado, cuando se pilota un dron, también se quiere realizar desplazamientos en otras direcciones, sobre todo si se trata de un dron de carreras. En este caso, el funcionamiento es el mismo que se ha tenido en cuenta para el desplazamiento vertical. Todo movimiento de los drones vendrá determinado por la velocidad de giro de cada uno de los motores, es decir, el par resultante, y el empuje que generen.

Pongamos, por ejemplo, que se quiere que el dron vuele de manera controlada hacia delante. En este caso, al no querer que gire, será necesario que las modificaciones que se hagan no alteren de ninguna manera la suma nula de los pares resultantes de los motores. Para ello, lo que se hace es reducir en la misma cantidad, la potencia suministrada a los motores delanteros. De esta forma, como el empuje en la parte delantera es menor que en la trasera, el dron se inclinará ligeramente en la dirección en la que se quiere desplazar, como puede verse en la Figura 9. Esta inclinación hace que el vector desplazamiento, que hasta ese momento solo tenía una componente en el eje vertical, se desdoble en dos componentes, una vertical y otra horizontal. Es esta componente horizontal, y el módulo de la misma, la que hará que el dron se desplace en la dirección deseada.

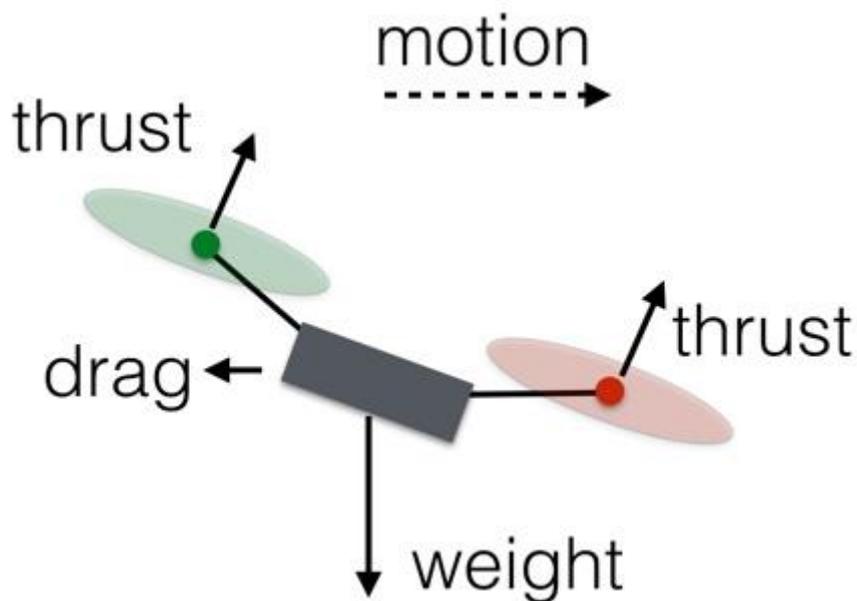


Figura 9, Sumatorio de fuerzas en un dron en desplazamiento horizontal [12]

De la misma manera que reducimos la potencia de los motores frontales o traseros para realizar desplazamientos horizontales, también puede ser necesario realizar giros. Estos giros sobre la vertical del dron se consiguen rompiendo el equilibrio existente en la suma de momentos de cada uno de los motores. Para ello, se seleccionarán los dos motores que estén girando en el mismo sentido (aquellos que giran en la dirección en la que se quiere girar el dron) y se reducirá su potencia, de manera que el par resultante del dron sea en la dirección deseada. Una muestra de esta operación está representada gráficamente en la Figura 10. Hay que recordar que lo que hace girar al dron en un

sentido u otro no es el sentido de giro de las hélices, sino el del par reacción, que es opuesto al que realiza el motor. Por esto, si se reduce el par que generan los motores que giran en el sentido en el que se quiere rotar el dron, los motores que giran en sentido opuesto y cuyo par reacción es en el sentido deseado, harán una aportación mayor al par resultante, obteniendo el giro deseado.



Figura 10, Giro de dron sobre su propio eje vertical [5]

3.2. ESTADO DEL ARTE DEL PROBLEMA

De media, los drones comerciales de que se encuentran a disposición del consumidor tienen un tiempo de vuelo de entre 10 y 20 minutos [14]. Esto es así principalmente por las características físicas de las aeronaves.

- En general se busca que un dron sea lo más ligero posible. Esto limita la batería a usar, ya que, en la mayoría de los casos, cuanto mayor sea la capacidad de la misma, mayor será su peso [15] y, por tanto, será necesario gastar más energía para moverlo.
- Los drones comerciales no suelen tener formas aerodinámicas, lo que penaliza el movimiento de los mismos haciendo que sea necesario consumir energía para vencer la resistencia del aire. Esto también penalizará más al dron en condiciones ambientales adversas.

Otros elementos que tienen impacto en la duración de la batería son todos aquellos dispositivos electrónicos portados por el dron que no sean imprescindibles para realizar sus funciones de vuelo:

- Cámaras
- Sensores
- Dispositivos de radiocontrol

Por último, hay que tener en cuenta también que la manera en la que un dron es pilotado influye de manera muy significativa en la duración de la batería. Por ejemplo, resulta normal que, con condiciones meteorológicas adversas, el pilotaje, ya sea manual o autónomo, sea más agresivo, puesto que las rachas de viento y la lluvia pueden requerirlo para mantener la estabilidad del dron [16]. Por otro lado, sin tener en cuenta las condiciones climáticas, la pericia del piloto o del programador responsable del recorrido que realizará de manera autónoma, impactará de manera directa en cómo el dron realizará los movimientos, siendo aquellos más suaves y estables los que consumirán menos energía.

En la actualidad, la mayoría de las soluciones que se plantean para incrementar los tiempos de vuelo de los drones pasan por modificar las condiciones físicas del mismo. Algunas de estas soluciones son:

- *Sustitución de baterías* [11]: Como ya se ha comentado anteriormente, la solución más sencilla mediante la que conseguir más tiempo de vuelo es dotando al dron de una batería de mayor capacidad.
- *Mejora de rotores* [17]: Adaptar el tipo de rotores usados, bien el motor en sí, bien las hélices, ayudará a que el consumo de batería sea menor y, por tanto, se alargue sustancialmente el tiempo de vuelo. Unas hélices de mayor tamaño darán al dron una mayor sustentación, lo que supondrá un menor esfuerzo para mantenerse en el aire.
- *Pilotaje conservador* [16]: Movimientos bruscos o grandes aceleraciones suponen un consumo muy elevado de energía y, por tanto, un menor tiempo de vuelo. Pilotar los drones de manera suave ayudará a alargar el tiempo de vuelo. Elegir correctamente el momento del vuelo, sin viento ni lluvia, favorecerá un pilotaje más conservador.

4. DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA SOLUCIÓN

La solución que se plantea en ese trabajo, y que será comparada posteriormente con otras existentes [16], consiste en el uso de modelos digitales para realizar simulaciones que permitan determinar, en todo momento, el vuelo óptimo según las condiciones meteorológicas del entorno. Para ello, se usarán los denominados *digital twins*, basados en *ROM*.

4.1. REDUCED ORDER MODELS

Los modelos de orden reducido (*ROM*) suponen una tecnología que permite transferir modelos complejos y con elevado detalle a otros dominios y fases del ciclo de vida. Permiten comprimir los modelos de simulación para poder obtener resultados en tiempo real [18].

A la hora de hablar de reducción de modelos, hay que tener en cuenta que, de lo que se trata, es de conseguir reducir un modelo matemático dado de un sistema o proceso por otro modelo mucho más pequeño (es decir, de un orden inferior) que describa de la misma forma, o lo más aproximadamente posible, ciertos aspectos de dicho sistema o proceso [19].

Esto plantea una serie de cuestiones:

- Elegir los esquemas de aproximación adecuados que permitan la definición de modelos de orden reducido que encajen con el elemento que se quiere simular.
- En ocasiones, es muy importante que los modelos de orden reducido preserven algunas propiedades de los sistemas originales, como pueden ser la estabilidad o la pasividad.
- Los modelos de orden reducido obtenidos deben poderse calcular de manera eficiente y ser numéricamente estables.
- Evaluación de la calidad de los modelos obtenidos
- La extracción de los datos del modelo original es necesaria para poder generar los modelos de orden reducido, como se evidencia en la Figura 11.

Los modelos de orden reducido presentan una serie de propósitos:

- Son útiles para evaluar escenarios “*What if*” de manera ágil.
- Optimización
- Cuantificación de la incertidumbre
- Simulación en tiempo real

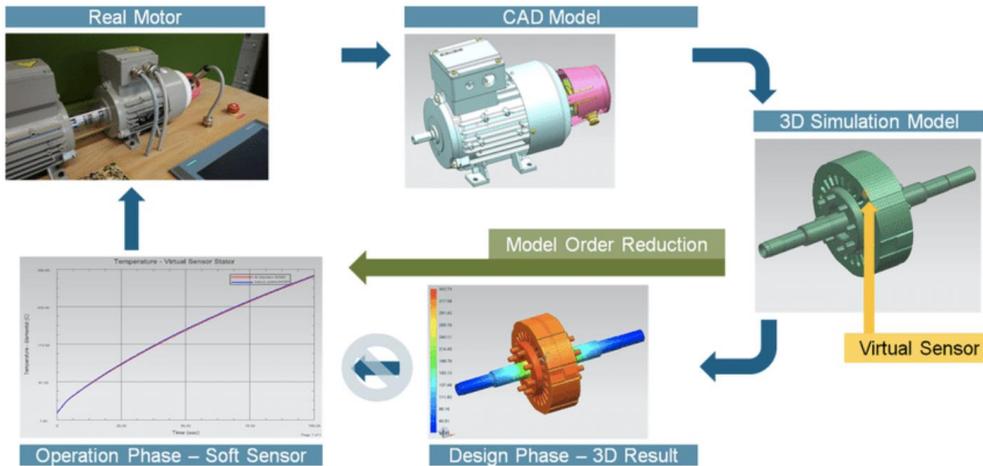


Figura 11, Model Order Reduction (verde) frente al planteamiento actual (azul) [20]

Un método utilizado comúnmente para realizar estas reducciones de orden de los modelos es el método de *subespacios de Krylov* ya que reduce el conjunto de ecuaciones del modelo a simular. Por ejemplo, se ha aplicado esta metodología a modelos 3D con un elevado número de dimensiones ($n = 3.5 \cdot 10^6$), obteniendo como resultado un modelo reducido de $m = 20$ dimensiones. De esta manera es posible realizar simulaciones a la par que la operación de los modelos está en marcha. La efectividad de este método se puede ver en la Figura 12.

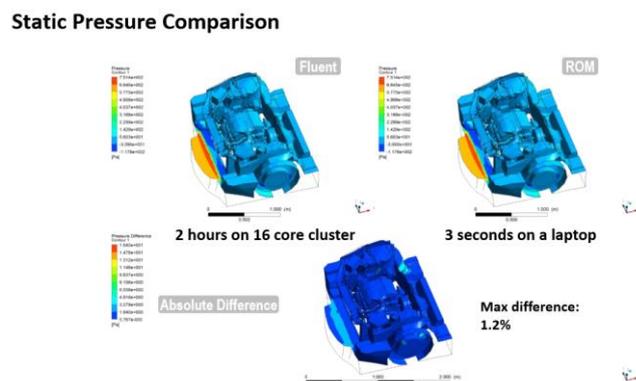


Figura 12, Caso de uso de ROM [21]

4.2. DIGITAL TWINS

Normalmente, la simulación ha sido usada para realizar labores de diseño y reingeniería de problemas. Sin embargo, una nueva tendencia en simulación denominada *digital twins* propone emplear modelos digitales para simular todo el ciclo de vida de los productos. De esta forma, las simulaciones ayudarán, no solo a los ingenieros en el diseño y las pruebas sino también a los usuarios y operadores a realizar un uso más eficiente de los dispositivos. Para que esto sea posible, los modelos deben poder ser simulados con un bajo coste computacional, ya que, en ocasiones, los resultados serán usados casi en tiempo real para tomar decisiones [22]. Debido a esto, surge la necesidad de emplear modelos de orden reducido (ROM) que permiten simular modelos optimizados según determinadas características de manera más eficiente.

Un *digital twin* (en ocasiones también conocido como *digital shadow*) es una réplica digital de un dispositivo real o un proceso. Esta tecnología aporta una representación digital del elemento físico. Para ello, se emplean datos procedentes de sensores que pueda haber instalados en los dispositivos [23] que se quieren representar digitalmente, información del uso pasado de la máquina o incluso de expertos en la materia.

Algunas industrias en las que la tecnología *digital twins* se está aplicando ya de manera satisfactoria son:

- *Fabricación*: En esta área es donde, probablemente, el despliegue de *digital twins* esté más avanzado, que en las fábricas se emplean para simular los procesos.
- *Automoción*: Cada vez más se están empleando *digital twins* en la industria automovilística ya que los vehículos van equipados con muchos sensores de telemetría. Sin embargo, esta tecnología debe evolucionar más a medida que los vehículos autónomos sean puestos en las carreteras y vayan recopilando datos.
- *Salud*: En la industria sanitaria se están empezando a crear *digital twins* de los pacientes que se atienden. Los datos recogidos por los sensores que se

colocan en los pacientes son recogidos para monitorizar y predecir el estado de salud de estos.

A continuación, en la Figura 13 se presenta un caso de uso de *Digital twins* en aplicado a un proceso de fabricación. En este caso, se tienen en cuenta 5 componentes, que permitirán implementar el modelo digital de manera satisfactoria:

- *Sensores*: Los sensores, instalados a lo largo de todo el proceso de fabricación, generan señales que permiten al modelo digital tener datos operacionales y de entorno pertenecientes al mundo real.
- *Datos*: Los datos obtenidos por los sensores del mundo real son agregados a los datos incluidos por la compañía, como el inventario de materiales, otros sistemas de la empresa, modelos de ingeniería...
- *Integradores*: Se trata de los elementos a través de los cuales la información fluye entre los dos “mundos”, el real y el digital.
- *Analítica*: Mediante técnicas de analítica de datos se analiza toda la información recibida con algoritmos de simulación y detección de rutinas, los cuales serán usados por el *digital twin* para generar nuevos puntos clave.
- *Actuadores*: Si se quiere realizar una acción en el mundo real, el *digital twin* realizará dicha acción por medio de los actuadores, sujeto a que la intervención humana ejecute el proceso.

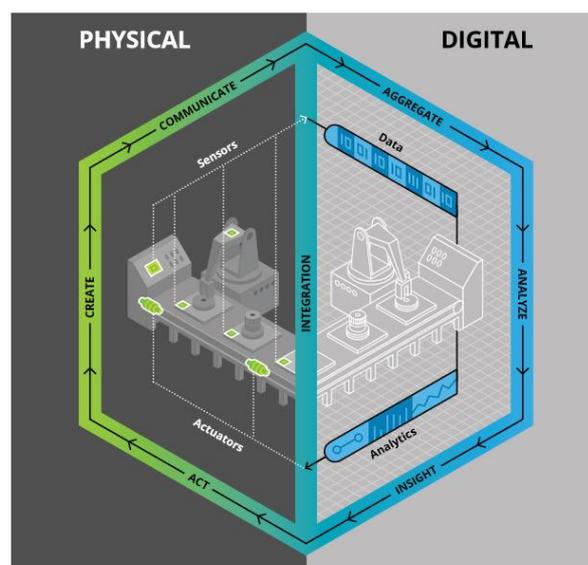


Figura 13, Digital twin de un proceso de fabricación [24]

En los casos en los que la aplicación de la tecnología *digital twins* requiera del uso de modelos de orden reducido [25], existen varias maneras en las que esta tecnología será aplicada, teniendo en cuenta la situación en la que se encuentre el modelo real:

- *Doble fase*: Esta forma de aplicar la metodología *digital twins* contiene una fase offline, en la que se hacen simulaciones del modelo para obtener las respuestas de este y almacenarlas en una tabla, y una fase online, en la que el dispositivo hace uso de los valores simulados para tomar decisiones en tiempo real.
- *Online*: De esta manera, el modelo reducido es cargado en el sistema, el cual realiza simulaciones en tiempo real que le permiten tomar decisiones.

4.3. BATERÍAS

Los drones comerciales que se estudian en el presente trabajo emplean motores eléctricos de corriente continua. La energía que alimenta dichos motores y que, por tanto, permite que un dron vuele, viene suministrada por las baterías que van cargadas en el vehículo.

Existen en el mercado varias tecnologías de fabricación de baterías, cada una de las cuales aportan una serie de características, por lo que es recomendable un tipo u otro según el uso que se vaya a hacer de ellas:

- *LiPo*: Baterías de litio y polímero. Estas baterías tienen un gran rendimiento en lo que se refiere a capacidad y tensión en relación al peso, aunque son baterías que requieren de unos cuidados específicos, ya que son algo delicadas. Por lo general, están compuestas por varias celdas idénticas montadas en paralelo, que aumentan la capacidad de la misma. Su funcionamiento se basa en el intercambio de electrones entre el material del electrodo negativo y el material del electrodo positivo mediante un medio conductor. Un ejemplo de estas baterías se puede encontrar en la Figura 14.



Figura 14, Batería LiPo [26]

- *NiMH*: Baterías de níquel-metal hidruro, como la mostrada en la Figura 15. Utilizan un ánodo de oxihidróxido de níquel y un cátodo de aleación de hidruro metálico. Tienen mayor capacidad de carga que las baterías NiCd y menor efecto memoria. Estas baterías tienen una tensión nominal de 1.2 V y una capacidad de entre 0.8 y 2.9 Ah.



Figura 15, Batería NiMH [27]

- *NiCd*: Baterías de níquel-cadmio (Figura 16). En la actualidad son poco utilizadas ya que tienen efecto memoria y que el cadmio es muy contaminante. Tienen una tensión nominal de 1.25 V y entre 1000 y 1500 ciclos de carga, superior a los que permiten las baterías NiMH, entre 500 y 2000.

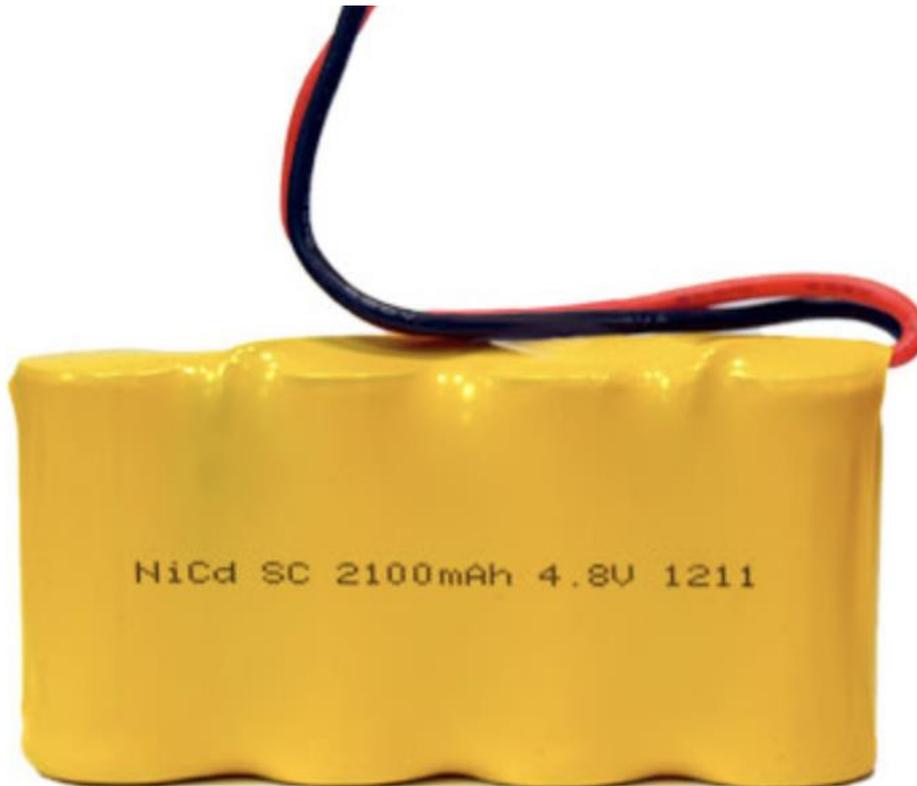


Figura 16, Batería NiCd [28]

En los últimos tiempos, las baterías LiPo se han impuesto como las preferidas por el mercado para los usos de la industria radio control y, por tanto, para el pilotaje de drones. A continuación, se presentan algunos pros y contras de cada uno de los tipos de baterías [29]:

- LiPo
 - Pros
 - Peso reducido
 - Se pueden fabricar en una amplia gama de formas y tamaños
 - Alta capacidad
 - Tasas de descarga muy altas
 - Contras
 - Vida útil corta comparada con otras tecnologías

- Existe riesgo de que se incendien si se manipulan incorrectamente
- Requieren cuidados especiales para la carga, descarga y almacenamiento
- NiMH
 - Pros
 - Vida útil mucho más larga que las LiPo
 - No hay riesgo de que se incendien
 - Cargas y mantenimientos sencillos
 - Contras
 - Pesadas
 - Tamaño limitado
 - Baja capacidad y eficiencia
 - Baja tasa de descarga

Las baterías LiPo se han establecido en el mercado y entre los usuarios de drones como las baterías más utilizadas principalmente por la ventaja, ya comentada, de su reducido peso y porque, al permitir unas tasas de descarga muy altas, son idóneas para realizar movimientos rápidos y acrobacias. Es necesario comprender una serie de características de las baterías, presentadas en el etiquetado, como el de la Figura 17, para poder, posteriormente, tomar decisiones sobre qué batería es la idónea para cada dron. Dichas características son:

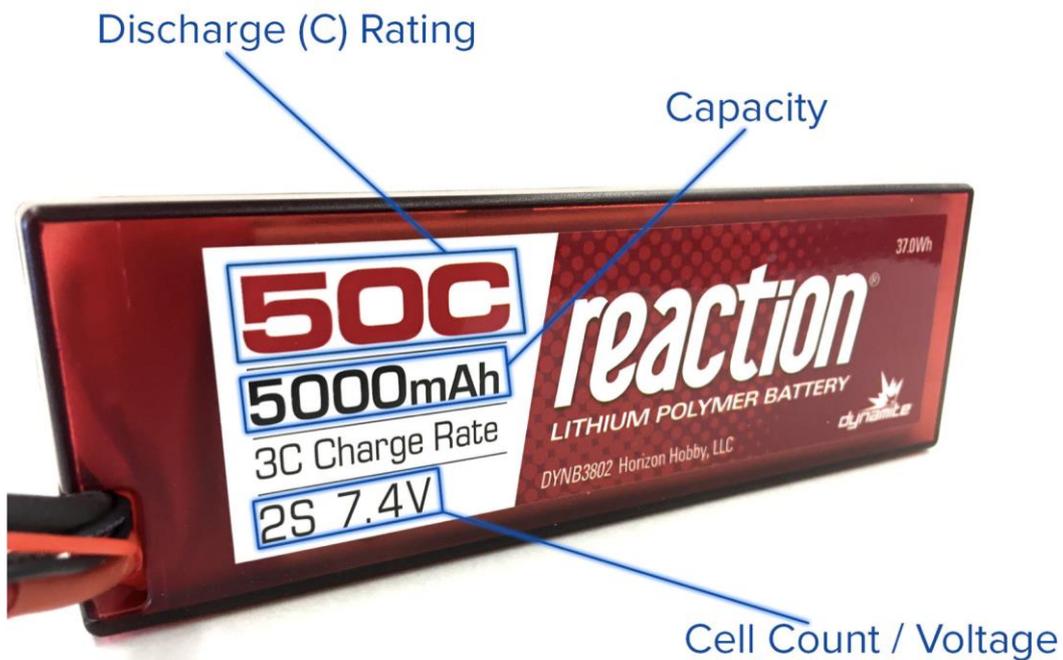


Figura 17, Etiquetado de baterías LiPo [11]

- **Índice de descarga:** Se trata de una medida que indica la rapidez con la que puede ser descargada la batería de forma segura. La máxima corriente de descarga de la batería puede ser calculada de la siguiente manera:

$$I_{max} = C_{Rating} \cdot Capacidad$$

Es un valor muy importante ya que, si la batería no tiene un valor C lo suficientemente alto, no suministrará la corriente requerida por los motores y, por tanto, el rendimiento del dron no será bueno. Por otro lado, tampoco es aconsejable emplear baterías con valores C mayores de lo necesario para el dron ya que no se obtendrá ningún beneficio adicional ya que la demanda de corriente por parte de los motores no será más alta y, además, se estará usando una batería de mayor tamaño, lo cual repercutirá de manera negativa sobre el rendimiento del dron por tener que cargar mayor peso.

Algunas baterías cuentan con dos valores C, el valor normal, explicado anteriormente y un valor de ráfaga (*burst*). Este segundo valor de ráfaga

solo puede ser aplicado durante un corto periodo de tiempo (alrededor de 10 segundos).

- *Capacidad:* Representa la potencia que puede almacenar la batería. La unidad de medida es *mAh*, e indica la corriente que puede suministrar dicha batería durante una hora antes de descargarse completamente.
- *Número de celdas:* Como su propio nombre indica, señala el número de celdas de las que está compuesta la batería. Esto impacta directamente en la tensión nominal de la batería ya que, dependiendo de si están conectadas en serie o en paralelo, se tendrá una tensión nominal determinada. En el ejemplo de la Figura 17, la batería está compuesta de 2 celdas conectadas en serie. Las celdas *LiPo* tienen una tensión nominal, normalmente, de 3.7 V, lo cual le da a la batería la tensión nominal mostrada, 7.4 V.
- *Tensión:* La tensión de la batería está íntimamente relacionada con la velocidad a la que giran los motores. A continuación, se presenta, en la Tabla 1, el número de celdas de las baterías, su tensión nominal y el uso típico de las mismas:

Number of LIPO Cells	Nominal Battery Voltage	Common Quadcopter Applications
1S	3.7V	Indoor micro brushed (e.g. Tiny Whoops)
2S	7.4V	30-70mm micro brushless
3S	11.1V	100-220mm brushless
4S	14.8V	220mm brushless race/freestyle
5S	18.5V	220mm+ brushless race/freestyle/ quadcopters
6S	22.2V	220mm+ brushless

Tabla 1, Usos típicos de baterías según el número de celdas y tensión nominal [15]

- *Resistencia interna:* La resistencia interna de las baterías no viene especificada en el etiquetado ya que no es constante. La resistencia interna de las baterías cambia a lo largo del tiempo y también puede verse influida por la temperatura. Se puede considerar como una medida de la dificultad que tiene la batería para entregar potencia a los elementos eléctricos que tiene conectados, en el caso del dron, los motores y el control de velocidad. Debido a esto, es una medida muy útil para determinar la calidad de las baterías. Cuanto mayor sea el valor de la resistencia interna, más energía será malgastada en forma de calor y, por tanto, peor será la calidad de la batería.

Cada una de las celdas de una batería tiene su propia resistencia interna, siendo la resistencia de la batería la suma de todas ellas.

Como se ha comentado con anterioridad, la resistencia interna de las baterías aumenta con el tiempo, debido al uso de la misma. Esto impacta directamente sobre el rendimiento del dron ya que, a mayor resistencia, mayor es la tensión que se pierde:

$$V = I \cdot R$$

En el punto en el que se explica la tensión de las baterías se hace referencia a su relación con la velocidad de giro de los motores y, por tanto, con la eficiencia del dron. De esta forma, queda demostrado que, a medida que aumenta la resistencia interna de la batería, el rendimiento decae, y de ahí la importancia que tiene esta característica de las baterías.

Para medir la resistencia interna de las baterías es necesario emplear herramientas específicas.

4.4. HÉLICES

El objetivo de las hélices de los drones es conseguir el empuje y el momento necesarios que le permitan volar y maniobrar [30]. Para que un dron se mantenga en el aire, es necesario que el empuje que generan las hélices sea igual al peso de la aeronave. Generalmente, las hélices generan mayor empuje a medida que giran a mayor velocidad, aunque también se ve influido por la dinámica del dron. Por ejemplo, algunas hélices generan mucho más empuje en estado estacionario, mientras que otras tienen mejor rendimiento a gran velocidad.

El segundo objetivo comentado que se debe lograr con las hélices es el momento. Para que un dron se mantenga estable, es necesario que los motores giren en sentidos opuestos, como puede verse en la Figura 18, de manera que el momento resultante sea 0. De otra forma, el vehículo giraría sobre su eje de manera incontrolada. Modificando la velocidad de giro de algunos motores es como se consigue que un dron realice el movimiento de guiñada (*yaw*), es decir, el giro de la aeronave en el eje z. A continuación, se presenta el giro de los motores para mantener estable un dron según el número de motores que tenga:

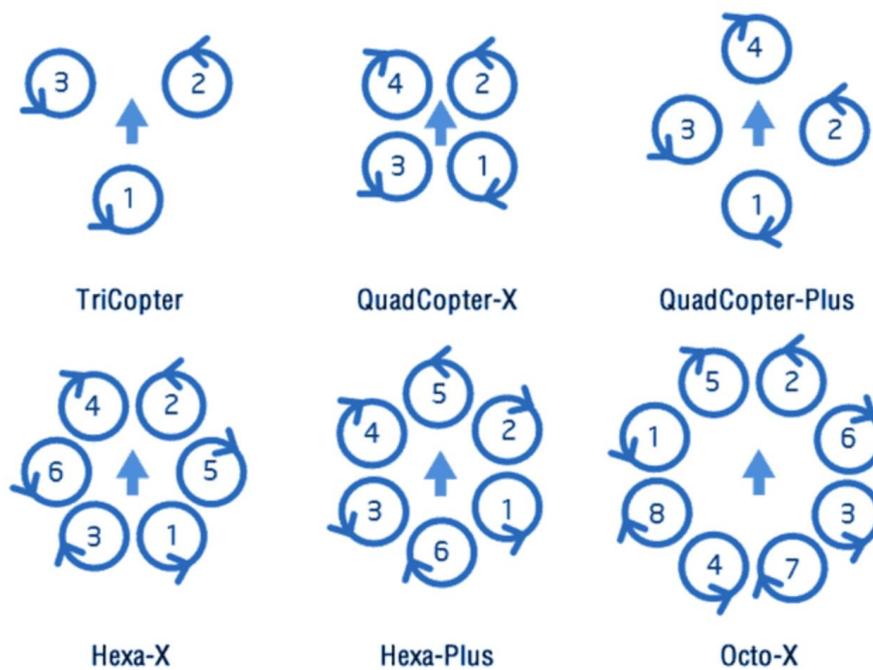


Figura 18, Giro de motores para estabilizar un dron, según el número de estos [10]

Para decidir cuáles son las hélices idóneas para una aeronave determinada, es necesario tener en cuenta una serie de características de las mismas, que serán detalladas a continuación:

- *Ángulo de ataque (Pitch)*: También se conoce como el paso de la hélice. Se trata del ángulo de inclinación que tienen las palas de la hélice respecto a la horizontal (ver Figura 19 para mayor detalle). Se puede definir como la distancia que una hélice puede ser avanzaría en un mundo ideal (sin rozamiento, pérdidas, etc.) a lo largo de un giro completo de la misma.
 - Un ángulo de ataque pequeño, es decir, una hélice con las palas casi horizontales generará poco empuje, por lo que será necesario que el motor gire a mucha velocidad para conseguirlo. Por otro lado, el momento generado por los motores que emplean hélices de este tipo también es bajo.

Estas hélices, principalmente, se emplean en drones que tienen motores pequeños, ya que no suele haber mucho problema en que giren a altas velocidades, consiguiendo el empuje deseado, pero no pueden producir momentos muy elevados.

También es recomendable el uso de hélices con pequeños ángulos de ataque para realizar pilotajes en zonas estrechas, o cuando sea necesario realizar gran cantidad de cambios de dirección, ya que la respuesta será mejor.

- Un ángulo de ataque grande generará un empuje tanto mayor cuanto mayor sea dicho ángulo de ataque (cuidado, hay que tener en cuenta que a partir de cierto ángulo el empuje se reduce hasta hacerse 0 en una hélice con las palas completamente verticales). No es necesario que los motores giren a gran velocidad para conseguir el empuje necesario, pero el momento generado será también más grande, por lo que, por lo general, se usarán con motores de mayor potencia.

Se recomienda su uso para realizar vuelos en espacios abiertos que no requieran cambios de dirección bruscos.



Figura 19, Tipos de ángulo de ataque (pitch) [17]

- **Tamaño:** Se conoce como tamaño de hélice a la distancia desde un extremo a otro de la misma. Por lo general, el tamaño de la hélice a emplear viene definido por el tamaño del dron sobre el que va a ser montada. Cuanto mayor sea el tamaño de la hélice, mayor será el empuje que puede generar para unas revoluciones determinadas. Sin embargo, también será mayor el momento que debe generar el motor para conseguir dichas revoluciones, por lo que el consumo energético se verá impactado.

El empleo de unas hélices de mayor tamaño no quiere decir que el dron vaya a volar a mayor velocidad, ya que esto viene determinado, principalmente, por el ángulo de ataque de las palas de las hélices, tal y como se ha visto en el punto anterior.

Hay que tener en cuenta que el tamaño máximo de las hélices no debe exceder la mitad de la longitud de lado más pequeño del dron, es decir, en el caso de que el dron sea cuadrado, el tamaño máximo de la hélice debería ser $L/2$, donde L es el lado del dron. En el caso de que sea rectangular, el tamaño máximo deberá ser $l/2$, donde l es la longitud del lado más corto.

No es recomendable solapar las hélices, ya que el flujo de aire provocado por la hélice superior afectará al rendimiento de la hélice inferior. Por otro lado, tampoco es recomendable que las hélices estén demasiado juntas ya

que los vórtices que se producen en los extremos de estas afectarán también al empuje producido.

Las hélices más largas aumentan el empuje generado. A cambio, es necesario consumir más energía a la hora de hacerlas girar.

En el mercado, se puede encontrar una gran variedad de hélices de distinto tamaño. Una muestra de las mismas puede verse en la Figura 20.



Figura 20, Tamaños de hélices [17]

- **Número de palas:** El número de palas que tienen las hélices es inversamente proporcional a la eficiencia a la hora de generar el empuje. En el caso de los drones, lo más eficiente es emplear hélices de dos palas. Las hélices de mayor número de palas (3, 4, 5...) generan un empuje mayor, a costa de la eficiencia. En la Figura 21 se presenta una muestra de cómo son las hélices con diferente número de palas.

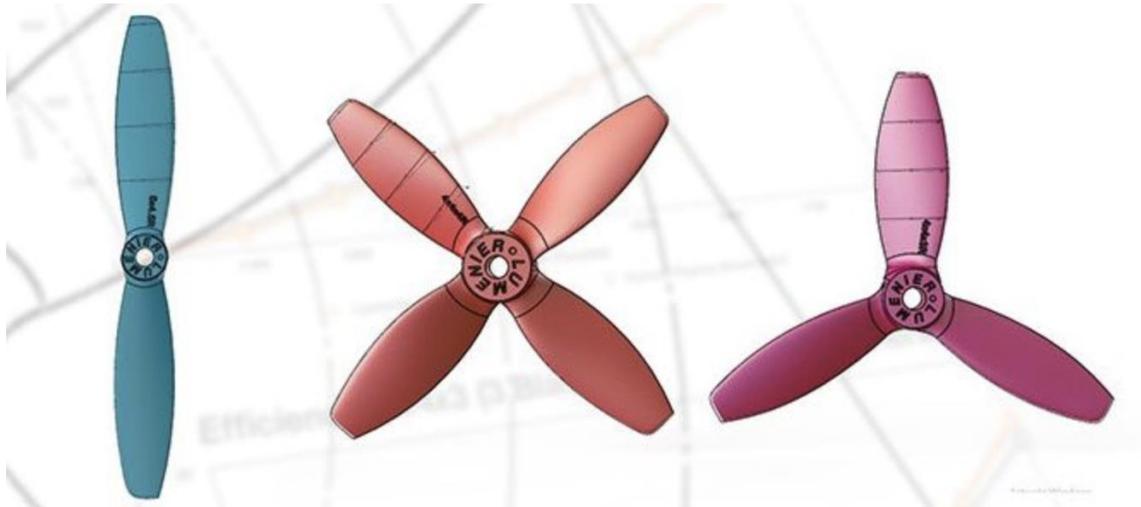


Figura 21, Hélices con diferente número de palas [10]

Aumentar el número de palas en las hélices es un buen sustituto del aumento de tamaño de las mismas en aquellas situaciones en las que se tienen restricciones de espacio.

Hay que tener en cuenta que, al igual que sucede con las hélices más pequeñas, tener hélices con menos palas ayuda a que la respuesta a los cambios de dirección sea más rápida y eficiente, de ahí que, por ejemplo, en los drones de carreras, sean usadas hélices de dos palas, ya que el peso de dichos drones es muy bajo y, por tanto, no se requiere un gran empuje para hacerlos volar, mientras que se gana en velocidad de reacción.

En la mayoría de los casos de uso estándar, se utilizan hélices de tres palas, ya que son las que tienen un mejor balance entre empuje y eficiencia.

- **Material:** El material empleado para fabricar las hélices impacta, principalmente, en el peso de las mismas y su durabilidad. En los inicios, se fabricaban en fibra de vidrio recubierta de plástico, ya que son muy ligeras. El problema que presentan estas hélices es que son muy frágiles, por lo que, frente a impactos, se rompen fácilmente.

Otro de los materiales que se emplean para la fabricación de las hélices es el *policarbonato* o *PC*, que también es un material bastante ligero y resiste mejor los golpes ya que se dobla en lugar de partirse (Figura 22).

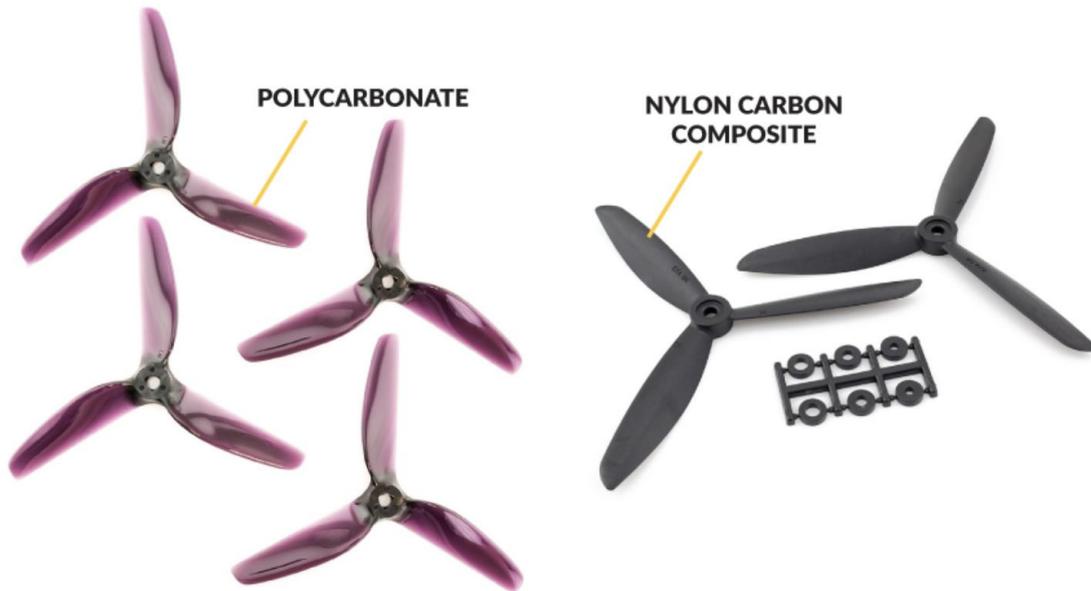


Figura 22, Materiales de las hélices [17]

- *Peso*: Siempre se busca que el peso de las hélices sea lo menor posible, para poder tener un mejor rendimiento de vuelo. Las hélices más ligeras tienen un menor momento de inercia y, por tanto, el motor debe aplicar un par menor para obtener las mismas revoluciones (RPM). La distribución del peso de las hélices afecta a las vibraciones que generan. Si el balanceado no es bueno, se producirán gran cantidad de vibraciones que afectarán de manera significativa al rendimiento del dron.
- *Extremos de hélice*: Actualmente, en el mercado, se pueden encontrar hélices con los extremos de dos tipos (ver Figura 23):
 - *Hélices Bullnose*
 - *Hélices cónicas*

Las hélices *Bullnose* tienen una mayor superficie, por lo que generan un mayor empuje. A cambio se le está añadiendo peso, por lo que aumentará el momento de inercia y por tanto el motor deberá generar un par mayor para moverlas. Esto hace que este tipo de hélices provoquen un consumo más elevado de energía en las aeronaves que las llevan. Estas hélices

suelen ser usadas en los drones de carreras, ya que permiten tener un mayor empuje en un menor tamaño.

Por otro lado, las hélices cónicas crean menos vórtices en las puntas, que impactan en el rendimiento, pero a cambio se pierde empuje. Estas hélices son mejores para realizar movimientos lentos donde la estabilidad es lo principal, como por ejemplo en la fotografía aérea.



Figura 23, Hélice cónica vs hélice Bullnose [10]

4.5. CASO PRÁCTICO – ROM + DT

Con el fin de mostrar las posibilidades que ofrece la aplicación de la metodología Digital Twins al cálculo de la trayectoria de un dron, se ha procedido a la realización de un caso práctico [31]. En este caso, se ha empleado como modelo de dron un paralelepípedo de las mismas dimensiones que el dron comercial DJI Mavic 2. Además, se han realizado las siguientes simplificaciones:

- Se desprecia el rozamiento con el aire. En el movimiento horizontal de la aeronave, la sustentación se conseguirá igualando la fuerza de los rotores al peso del dron más la fuerza de empuje del viento.
- No se tienen en cuenta los momentos generados por los rotores para el cálculo del consumo de batería
- El análisis se realiza para desplazamientos horizontales, tratando de mantener siempre el dron la misma altura. No se ha tenido en cuenta la energía requerida para alcanzar determinada altura.
- El dron siempre realizará los movimientos en el mismo orden, giro alrededor del eje x (Roll), giro alrededor del eje y (Pitch) y giro alrededor del eje z (Yaw)
- La fuerza realizada por los rotores es siempre paralela al eje z del dron
- En los casos estudiados, se asemejarán las curvas de los rotores como rectas
- Se considera la presión que el viento ejerce sobre el dron como [32]

$$P = \frac{(Cd \cdot Ro \cdot V^2)}{2}$$

donde:

- P = Presión del viento (N/m^2)

- ρ_0 = Densidad del aire seco
- V = velocidad del viento (m/s)
- C_d = Coeficiente aerodinámico de resistencia al avance

Constantes	
ρ_0 (Kg/m ³)	1.223
C_d	1.170
g (m/s ²)	9.810
O_z /Kg	0.028

Tabla 2, Constantes empleadas en el caso de uso

Teniendo en cuenta los valores constantes de la Tabla 2, se presentan, en la Tabla 3, las características del dron elegido:

Características dron - DJI Mavic 2	
Largo (cm)	32.2
Ancho (cm)	24.2
Alto (cm)	8.4
Peso (g)	905
Incl. Máx (°)	35
Altura máx (m)	6000
Tipo bat	LiPo4S
Capacidad bat (mAh)	3850
Voltaje (V)	15.4
Energía (Wh)	59.29
Área superior (cm ²)	779.24
Área lateral (cm ²)	203.28
Área frontal (cm ²)	270.48

Tabla 3, Características dron - DJI Mavic 2 [33]

Al no conocer las especificaciones de los rotores empleados en el dron *DJI Mavic 2*, se ha optado por seleccionar otros rotores comerciales, empleados en la fabricación de drones. En este caso, como motor, se ha optado por *Cobra CM-2217/20*, cuyas especificaciones se detallan en la Tabla 4:

Cobra CM-2217/20 Motor Specifications	
Stator Diameter	22.0 mm (0.866 in)
Stator Thickness	17.0 mm (0.669 in)
Number of Stator Slots	12
Number of Magnet Poles	14
Motor Wind	20 Turn Delta
Motor Kv Value	950 RPM per Volt
No Load Current (I _o)	0.53 Amps @ 12 Volts
Motor Resistance (R _m) per Phase	0.188 Ohms
Motor Resistance (R _m) Phase to Phase	0.125 Ohms
Maximum Continuous Current	20 Amps
Max Continuous Power (3-cell Li-Po)	220 Watts
Max Continuous Power (4-cell Li-Po)	300 Watts
Motor Weight	76 grams (2.68 oz.)
Outside Diameter	27.7 mm (1.091 in.)
Motor Shaft Diameter	3.17 mm (0.125 in.)
Prop Shaft Diameter	5.00 mm (0.197 in.)
Motor Body Length	33.0 mm (1.299 in.)
Overall Shaft Length	35.1 mm (1.382 in.)
Motor Timing	5-10 degrees
PWM Frequency	8 KHz

Tabla 4, Especificaciones motores Cobra CM-2217/20 [34]

Para los propulsores, de nuevo basándonos en la Tabla 5, proporcionada por el fabricante, se ha escogido el modelo *GemFan 9x4'7-MR*.

Cobra CM-2217/20 Motor Propeller Data											
Magnets 14-Pole	Motor Wind 20-Turn Delta	Motor Kv 950 RPM/Volt	No-Load Current I _o = 0.53 Amps @ 12v	Motor Resistance R _m = 0.188 Ohms	I Max 20 Amps	P Max (3S) 220 W					
Stator 12-Slot	Outside Diameter 27.0 mm, 1.063 in.	Body Length 33.0 mm, 1.299 in.	Total Shaft Length 35.1 mm, 1.382 in.	Shaft Diameter 3.17 mm, 0.125 in.	Motor Weight 76 gm, 2.68 oz						
Test Data From Sample Motor	Input I _o Value	10.0 V 0.49 A	12.0 V 0.53 A	14.0V 0.58 A	16.0V 0.63 A	Measured Kv value 890 RPM/Volt @ 10v	Measured Rm Value 0.188 Ohms				
Prop Manf.	Prop Size	Li-Po Cells	Input Voltage	Motor Amps	Input Watts	Prop RPM	Pitch Speed in MPH	Thrust Grams	Thrust Ounces	Thrust Eff. Grams/W	
APC	10x4.5-MR	3	11.1	11.83	131.3	7,536	32.1	875	30.86	6.66	
APC	11x4.5-MR	3	11.1	14.00	155.4	7,107	30.3	1012	35.70	6.51	
APC	12x4.5-MR	3	11.1	16.98	188.5	6,507	27.7	1168	41.20	6.20	
APC	14x5.5-MR	3	11.1	22.02	244.4	5,324	27.7	1322	46.63	5.41	
GemFan	8x4.5-MR	3	11.1	8.81	97.8	8,147	34.7	633	22.33	6.47	
GemFan	9x4.7-MR	3	11.1	9.96	110.6	7,926	35.3	731	25.79	6.61	
GemFan	10x4.5-MR	3	11.1	13.84	153.6	7,174	30.6	935	32.98	6.09	
GemFan	11x4.7-MR	3	11.1	16.54	183.6	6,619	29.5	1098	38.73	5.98	
GemFan	12x4.5-MR	3	11.1	19.02	211.1	6,085	25.9	1099	38.77	5.21	
GemFan	10x4-MR-W	3	11.1	12.28	136.3	7,448	28.2	855	30.16	6.27	
GemFan	11x4-MR-W	3	11.1	13.11	145.5	7,307	27.7	963	33.97	6.62	
GemFan	12x4-MR-W	3	11.1	16.17	179.5	6,671	25.3	1115	39.33	6.21	
GemFan	13x4.5-MR-W	3	11.1	18.61	206.6	6,120	26.1	1225	43.21	5.93	
GemFan	14x4.5-MR-W	3	11.1	20.41	226.6	5,725	24.4	1297	45.75	5.72	
Prop Manf.	Prop Size	Li-Po Cells	Input Voltage	Motor Amps	Input Watts	Prop RPM	Pitch Speed in MPH	Thrust Grams	Thrust Ounces	Thrust Eff. Grams/W	
APC	10x4.5-MR	4	14.8	17.98	266.1	9,185	39.1	1341	47.30	5.04	
APC	11x4.5-MR	4	14.8	20.42	302.2	8,504	36.2	1506	53.12	4.98	
GemFan	8x4.5-MR	4	14.8	13.48	199.5	10,170	43.3	997	35.17	5.00	
GemFan	9x4.7-MR	4	14.8	14.94	221.1	9,847	43.8	1160	40.92	5.25	
GemFan	10x4.5-MR	4	14.8	20.22	299.3	8,603	36.7	1389	49.00	4.64	
GemFan	10x4-MR-W	4	14.8	18.23	269.8	9,180	34.8	1323	46.67	4.90	
GemFan	11x4-MR-W	4	14.8	19.17	283.7	8,876	33.6	1426	50.30	5.03	

Tabla 5, Especificaciones propulsores asociados a motores Cobra CM-2217/20 [34]

Cuyas curvas de empuje y corriente de motor se muestran en la Figura 24 y Figura

25:

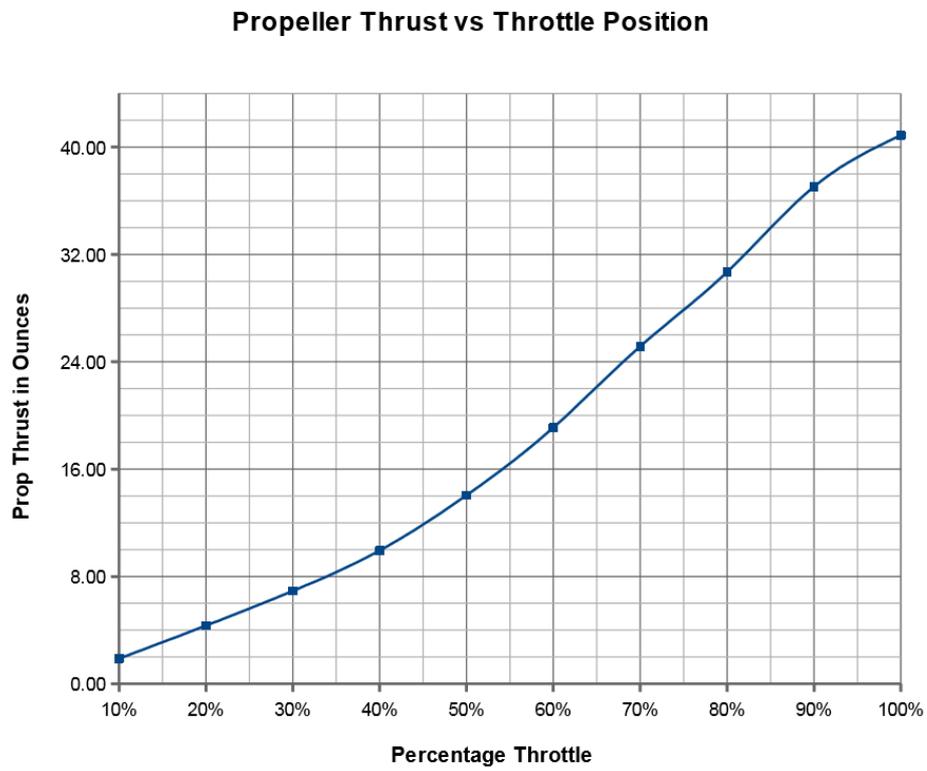


Figura 24, Gráfica de empuje vs Aceleración [34]

Motor Current vs Throttle Position

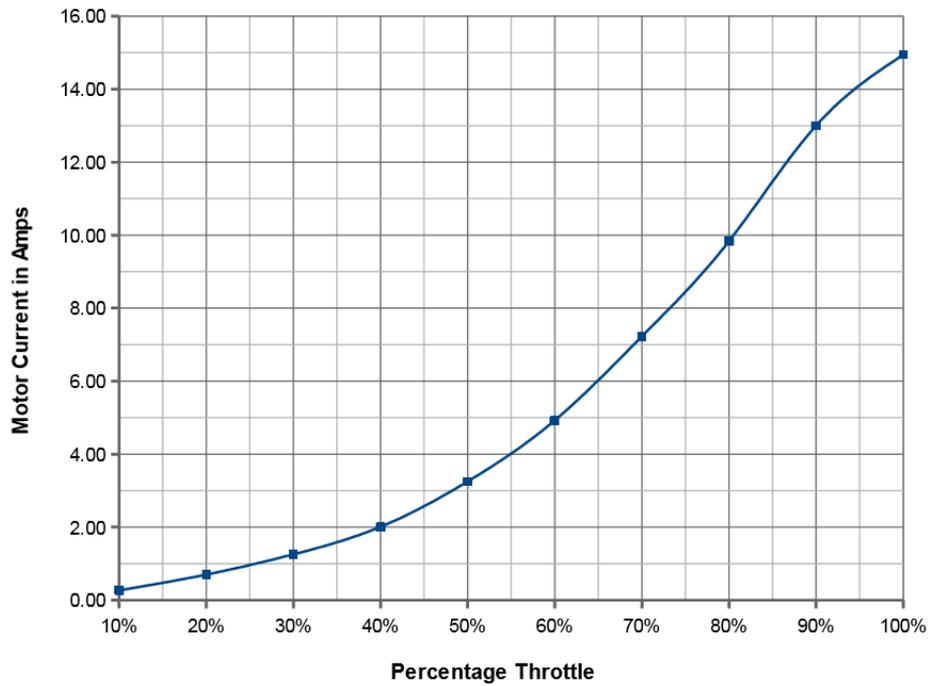


Figura 25, Gráfica de Corriente de motor vs Aceleración [34]

Una vez se tiene definido la aeronave que se va a simular, solo queda realizar la simulación propiamente dicha. En este caso, hay que tener en cuenta dos elementos en la simulación, el viento y el dron.

4.5.1. MODELO DEL VIENTO

El viento será definido en coordenadas esféricas, como las presentadas en la Figura 26:

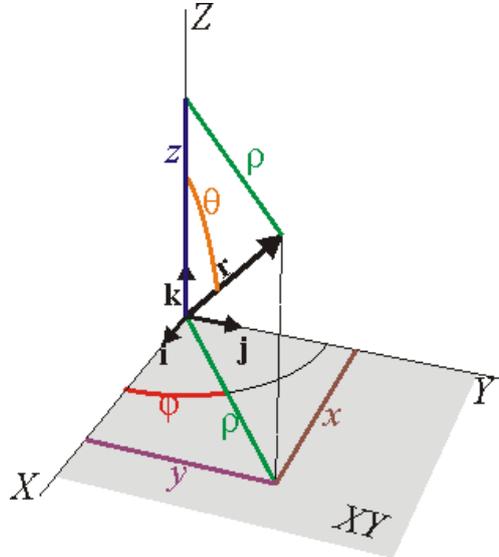


Figura 26, Coordenadas esféricas [35]

Donde $r = Fv$ es el módulo de la Fuerza del Viento.

Teniendo esto en cuenta, las proyecciones cartesianas del viento quedarán calculadas de la siguiente manera:

$$Fx_v = Fv \cdot \text{sen}\alpha \cdot \text{cos}\beta$$

$$Fy_v = Fv \cdot \text{sen}\alpha \cdot \text{sen}\beta$$

$$Fz_v = Fv \cdot \text{cos}\alpha$$

Donde Fx_v es la componente de la fuerza del viento en el eje x, Fy_v es la componente de la fuerza del viento en el eje y, y Fz_v es la componente de la fuerza del viento en el eje z.

4.5.2. MODELO DEL DRON

Para el dron se definen tres movimientos, *Yaw* (guiñada), *Pitch* (cabeceo) y *Roll* (alabeo), presentados en la Figura 27. La posición de dicho dron se podrá calcular en todo momento gracias a la matriz de giro definida según las simplificaciones especificadas al inicio del documento.

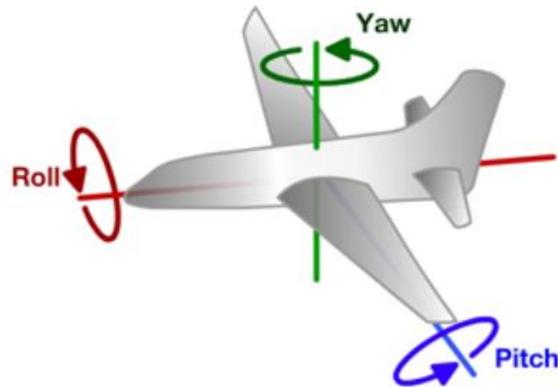


Figura 27, Yaw, Pitch y Roll [36]

La matriz de transformación del dron queda definida como se ve en la Figura 28:

$$R(\alpha, \beta, \gamma) = R_z(\alpha) R_y(\beta) R_x(\gamma) = \begin{pmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ \sin \alpha \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma \end{pmatrix}.$$

Figura 28, Matriz de transformación [37]

Con esta definición, se puede ver que el eje z del dron queda definido, en coordenadas globales, según la tercera fila de la matriz. Es decir, en todo momento:

$$\bar{F}_d = Fd \cdot (-\sin \beta \bar{i} + \cos \beta \sin \gamma \bar{j} + \cos \beta \cos \gamma \bar{k})$$

Teniendo en cuenta las simplificaciones realizadas, el valor de la componente en el eje z absoluto que realiza el dron siempre es conocido, ya que, al mantener la altura, siempre será igual a la suma del peso de la aeronave más la fuerza del viento en esa dirección. De esta manera, se pueden definir las otras dos componentes en función de la primera:

$$Fz_d = Fd \cdot \cos \beta \cos \gamma \rightarrow Fd = \frac{Fz_d}{\cos \beta \cos \gamma}$$

$$Fx_d = \frac{Fz_d \cdot \operatorname{tg} \beta}{\cos \gamma}$$

$$Fy_d = Fz_d \cdot \operatorname{tg} \gamma$$

Donde Fx_d es la componente de la fuerza del dron en el eje x, Fy_d es la componente de la fuerza del dron en el eje y, Fz_d es la componente de la fuerza del dron en el eje z.

4.5.3. SIMULACIÓN

La simulación del dron se ha realizado con los siguientes valores:

- V (m/s) = 0.25, 4, 8
- θ = 0, -10
- φ = -10, 0, 10
- α = -20, -5, 0, 5, 20
- β = -20, -5, 0, 5, 20
- γ = 5, 10, 25, 35

En la franja de utilización, las gráficas de los rotores quedan definidas como las siguientes rectas:

Propeller Thrust vs Throttle Position

- $y = 0.364x - 4.376$

Motor Current vs Throttle Position

- $y = 0.1x - 1.9$

4.5.3.1. DURACIÓN MÁXIMA Y MÍNIMA DE LA BATERÍA

A continuación, en la Tabla 6, se muestran las posiciones que el dron debería adoptar según diversas condiciones del viento, para tener un consumo máximo o mínimo de batería.

Resumen																
Viento			Condiciones del dron para tiempo máximo de vuelo					Condiciones del dron para tiempo mínimo de vuelo								
V (m/s)	Theta (°)	Phi (°)	T vuelo (min)	Alpha (°)	Gamma (°)	Betta (°)	Aceleración (m/s ²)	Comentario		T vuelo (min)	Alpha (°)	Gamma (°)	Betta (°)	Aceleración (m/s ²)	Comentario	
0.25	90	170	38.32	0	0	5	0.856882433			26.79	-5	-20	35	7.306819020	Se seleccionan estos ángulos porque son los que reducen el empuje en el eje y	
0.25	90	180	38.32	0	0	5	0.856861123			26.79	-5	-20	35	7.306771871		
0.25	90	180	38.32	0	0	5	0.856861123			26.79	5	20	35	7.306771871		
0.25	90	190	38.32	0	0	5	0.856882433			26.79	5	20	35	7.30681902	Se seleccionan estos ángulos porque son los que reducen el empuje en el eje y	
0.25	100	170	38.32	0	0	5	0.856953941			26.79	20	-20	35	7.306974747	Se seleccionan estos ángulos porque son los que reducen el empuje en el eje y	
0.25	100	180	38.32	0	0	5	0.856932955			26.79	20	-20	35	7.306922271		
0.25	100	180	38.32	0	0	5	0.856932955			26.79	-20	20	35	7.306922271		
0.25	100	190	38.32	0	0	5	0.856953941			26.79	-20	20	35	7.306974747	Se seleccionan estos ángulos porque son los que reducen el empuje en el eje y	
4	90	170	38.32	0	0	5	0.504636623			26.18	20	-20	35	6.567314289	Se seleccionan estos ángulos porque son los que reducen el empuje en el eje y	
4	90	180	38.32	0	0	5	0.499181354			26.79	-5	-20	35	6.515378012		
4	90	180	38.32	0	0	5	0.499181354			26.79	5	20	35	6.515378012		
4	90	190	38.32	0	0	5	0.504636623			26.79	5	20	35	6.527448212	Se seleccionan estos ángulos porque son los que reducen el empuje en el eje y	
4	100	170	37.50	0	0	5	0.522942712			26.18	20	-20	35	6.567314289	Se seleccionan estos ángulos porque son los que reducen el empuje en el eje y	
4	100	180	37.50	0	0	5	0.517570320			26.18	-20	20	35	6.553880571		
4	100	180	37.50	0	0	5	0.517570320			26.18	20	-20	35	6.553880571		
4	100	190	37.50	0	0	5	0.522942712			26.18	-20	20	35	6.567314289	Se seleccionan estos ángulos porque son los que reducen el empuje en el eje y	
8	90	170	37.69	0	0	10	0.045584618	Con un ángulo Betta más pequeño, los rotores no generan la fuerza suficiente para vencer la fuerza del viento en la dirección de desplazamiento		26.79	-5	-20	35	4.180166721	Se seleccionan estos ángulos porque son los que reducen el empuje en el eje y	
8	90	180	37.69	0	0	10	0.019603380	Con un ángulo Betta más pequeño, los rotores no generan la fuerza suficiente para vencer la fuerza del viento en la dirección de desplazamiento		26.79	-5	-20	35	4.131885921		
8	90	180	37.69	0	0	10	0.019603380	Con un ángulo Betta más pequeño, los rotores no generan la fuerza suficiente para vencer la fuerza del viento en la dirección de desplazamiento		26.79	5	20	35	4.131885921		
8	90	190	37.69	0	0	10	0.045584618	Con un ángulo Betta más pequeño, los rotores no generan la fuerza suficiente para vencer la fuerza del viento en la dirección de desplazamiento		26.79	5	20	35	4.180166721	Se seleccionan estos ángulos porque son los que reducen el empuje en el eje y	
8	100	170	34.60	0	0	10	0.177331802	Con un ángulo Betta más pequeño, los rotores no generan la fuerza suficiente para vencer la fuerza del viento en la dirección de desplazamiento		24.51	20	-20	35	4.339631026	Se seleccionan estos ángulos porque son los que reducen el empuje en el eje y	
8	100	180	34.60	0	0	10	0.151745277	Con un ángulo Betta más pequeño, los rotores no generan la fuerza suficiente para vencer la fuerza del viento en la dirección de desplazamiento		24.51	-20	20	35	4.285896156		
8	100	180	34.60	0	0	10	0.151745277	Con un ángulo Betta más pequeño, los rotores no generan la fuerza suficiente para vencer la fuerza del viento en la dirección de desplazamiento		24.51	20	-20	35	4.285896156		
8	100	190	34.60	0	0	10	0.177331802	Con un ángulo Betta más pequeño, los rotores no generan la fuerza suficiente para vencer la fuerza del viento en la dirección de desplazamiento		24.51	-20	20	35	4.339631026	Se seleccionan estos ángulos porque son los que reducen el empuje en el eje y	

Tabla 6, Duración máxima y mínima de la batería

4.5.3.2. CONFIGURACIONES INVÁLIDAS

A continuación, en la Tabla 7, se muestran las configuraciones que el dron no puede adoptar, ya que los rotores no generarían fuerza suficiente y, por tanto, no sería capaz de avanzar.

Configuraciones no válidas			
Vv	Alpha (°)	Gamma (°)	Betta (°)
8	-20	-20	5
8	-20	-5	5
8	-20	0	5
8	-20	5	5
8	-20	20	5
8	-20	-20	10
8	-20	-5	10
8	-20	0	10
8	-20	5	10
8	-20	20	10
8	-5	-20	5
8	-5	-5	5
8	-5	0	5
8	-5	5	5
8	-5	20	5
8	-5	-20	10
8	-5	-5	10
8	-5	0	10
8	-5	5	10
8	-5	20	10
8	0	-20	5
8	0	-5	5
8	0	0	5
8	0	5	5
8	0	20	5
8	0	-20	10
8	0	20	10
8	5	-20	5
8	5	-5	5
8	5	0	5
8	5	5	5
8	5	20	5
8	5	-20	10
8	5	-5	10
8	5	0	10
8	5	5	10
8	5	20	10
8	20	-20	5
8	20	-5	5
8	20	0	5
8	20	5	5
8	20	20	5
8	20	-20	10
8	20	-5	10
8	20	0	10
8	20	5	10
8	20	20	10
8	0	-5	10
8	0	5	10

Tabla 7, Configuraciones inválidas

Toda esta información, será cargada en la memoria del dron y será utilizada en tiempo real para decidir cuál es la posición óptima con la que abordar un trayecto, según las condiciones de viento existentes y las necesidades del trayecto, permitiendo ahorrar batería cuando sea necesario, y optimizar el desplazamiento para que la inversión de dicha energía sea en realizar la fuerza en la dirección deseada, evitando desplazamientos indeseados provocados por la acción del viento.

5. EVALUACIÓN DE LA SOLUCIÓN REALIZADA

Para poder entender cómo de útil son las diferentes soluciones que se plantean es necesario realizar una comparativa de las mismas. Estas comparativa se realizará en base a una serie de criterios, los cuales se expondrán a lo largo de los siguientes puntos.

5.1. SOLUCIONES POR COMPARAR

Se compararán tres soluciones:

- *Optimización de pilotaje:* Consiste en el uso de metodologías de simulación que permitan tomar decisiones para que el vuelo autónomo del dron sea lo más eficiente posible.
- *Sustitución de baterías:* Consiste en la sustitución de las baterías estándar de los drones por otras de mayor capacidad.
- *Selección de rotores:* Consiste en la selección de las hélices que optimicen el empuje del dron.

5.2. CRITERIOS DE COMPARACIÓN

A continuación, se presentan los criterios que se van a seguir para realizar la comparación y posterior evaluación de las soluciones planteadas.

Todos los análisis realizados estarán basados en el estudio realizado por el autor del trabajo a lo largo del desarrollo del mismo, y que se pueden conocer en los epígrafes anteriores a este.

5.2.1. IMPLEMENTACIÓN

Cada una de las soluciones planteadas requiere de un análisis específico que determine la mejor manera de llevarlas a cabo. Este análisis es muy importante ya que determinará la efectividad de la solución. En el estudio que se realizará a continuación para cada una de las soluciones, se tendrá en cuenta no solo la complejidad técnica que tiene la implementación de la solución propiamente dicha, sino también la complejidad que tiene llegar a la solución óptima en cada uno de los casos.

5.2.1.1. OPTIMIZACIÓN DEL PILOTAJE

Para conseguir que un dron vuele de forma autónoma de la manera más eficientemente posible, teniendo en cuenta lo que se ha presentado en este trabajo, es necesario, principalmente, tener en cuenta la tecnología *digital twins*, combinada con los modelos de orden reducido (esto puede verse, de manera resumida, en la Figura 29). Si bien esto puede resultar simple en primera instancia, es necesario tener en cuenta que, tras esta tecnología, hay una amplia gama de estudios y simulaciones que requieren grandes conocimientos en muchos campos.

- *Modelado*: Para que la solución planteada pueda estar basada en el uso y simulación en tiempo real de modelos de orden reducido, es necesario, previamente, crear modelos matemáticos y modelos estadísticos que reflejen de manera fidedigna las especificaciones y comportamientos de la aeronave.

- *Aeronáutica:* Dado que se trata de un vehículo aéreo, el modelado del mismo requerirá de amplios conocimientos aeronáuticos para poder obtener unos resultados fieles a la realidad.
- *Matemática avanzada:* Si bien los modelos tanto matemáticos, estadísticos o 3D que se puedan generar, permiten la simulación del dron, es la obtención de los modelos reducidos lo que permite que dicho vehículo pueda ser simulado en tiempo real. La generación de estos modelos puede ser realizada empleando métodos matemáticos o bien software avanzado que permite la obtención de los mismos.
- *Estadística:* Una vez que se obtienen, en tiempo real, los resultados de las simulaciones, es necesario realizar un análisis estadístico que permita tomar la mejor decisión en cada uno de los momentos.
- *Experiencia:* Los *digital twins* son tanto más fieles a la realidad cuantos más datos reciben. Estos datos, además de los transmitidos por los sensores, también deben provenir de otras fuentes como puedan ser registros históricos, conocimientos de expertos en la materia o cualquier otra fuente de información que pueda ayudar a simular en tiempo real y predecir los posibles comportamientos del vehículo en las diferentes situaciones que se pueda encontrar.

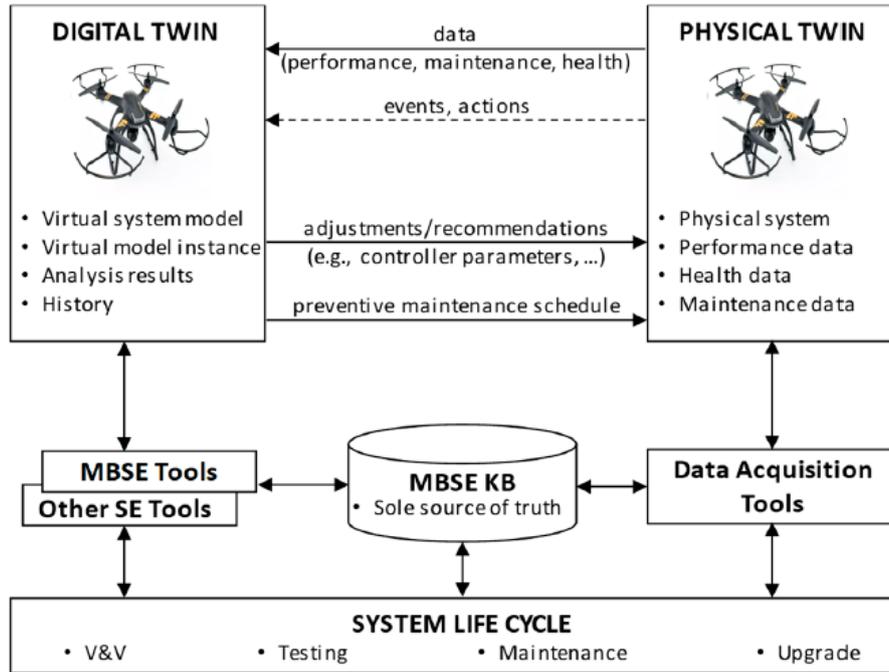


Figura 29, Concepto de Digital Twin en un dron [38]

5.2.1.2. SUSTITUCIÓN DE BATERÍAS

Como se ha visto en epígrafes anteriores, la elección de la batería correcta puede suponer varios puntos de ventaja a la hora de mantener el dron en vuelo, mientras que una selección arbitraria puede llegar a ser contraproducente y hacer que el tiempo de vuelo del dron se vea reducido drásticamente.

Toda batería supone lastrar al dron con un peso que, por defecto, no tiene. Si bien, con la tecnología actual no es posible que un dron eléctrico funcione sin baterías, hay que tener en cuenta que se trata, exclusivamente, de la fuente de energía que alimenta los motores y sensores del vehículo. En el caso de que en un futuro sea posible dotar a los drones bien con otro tipo de energía o bien mediante otro método, las baterías dejarán de tener sentido en los vehículos. Teniendo en cuenta esto, se puede concluir que toda batería, por defecto, va a suponer una pérdida de eficiencia en mayor o menor medida para cualquier dron. Por tanto, es muy importante tener en cuenta algunos conocimientos que permitan seleccionar la batería que pueda compensar, de la mejor manera posible, la mencionada pérdida de rendimiento.

- *Baterías:* Es necesario tener un amplio conocimiento de las diferentes baterías que existen en el mercado y de cada una de las características de las mismas.
- *Física:* Es necesario tener unos conocimientos moderados acerca del funcionamiento eléctrico de los motores que hacen que el dron vuele y se desplace, así como de la relación entre el peso total del dron y la potencia necesaria para realizar los desplazamientos requeridos.

Antes de elegir la batería idónea que debe ser instalada en un dron, también hay que analizar el hecho de que no siempre la batería de mayor capacidad va a ser la que otorgue al usuario un mayor tiempo de vuelo. Por otro lado, hay que tener en cuenta el tamaño del dron, ya que las dimensiones de la batería no podrán exceder el espacio que el dron tenga en el chasis reservado para ella. En el caso de poner una batería de mayor tamaño, se podrá desplazar el centro de gravedad del vehículo, provocando una descompensación en la potencia que deben consumir los motores para mantener el dron estable y, por tanto, se estaría reduciendo el tiempo de vuelo.

En resumen, es muy importante, de cara a implantar esta solución, entender bien la relación entre todos los factores implicados y comprender que una mayor capacidad de batería no supone necesariamente un mayor tiempo de vuelo ya que a mayor capacidad, mayor peso y, por tanto, puede que sea necesario consumir una potencia mayor de la deseada para lograr el objetivo que se busca.

5.2.1.3. SELECCIÓN DE ROTORES

Si bien no se ve a primera vista que los rotores o hélices de los drones tengan un impacto directo en el consumo energético del vehículo a la hora de realizar vuelos, es muy necesario analizar detenidamente las diferentes características que estos presentan y cómo influyen cada una de estas en el uso de la potencia eléctrica que hacen los motores.

En primer lugar, antes de investigar más sobre qué tipo de hélice es la idónea, es necesario tener claro el uso que se va a hacer del dron y qué tipo de movimientos

requerirá dicho uso. Por ejemplo, un dron de carreras requerirá hacer cambios de dirección bruscos y otros movimientos rápidos, mientras que un dron destinado a la fotografía aérea necesitará realizar movimientos lentos y estables.

Llegados a este punto, será necesario analizar los siguientes factores de las hélices, que han sido definidos en el epígrafe 4.4:

- Ángulo de ataque
- Tamaño
- Número de palas
- Material
- Forma de los extremos
- Peso

5.2.2. FLEXIBILIDAD

El presente criterio pretende responder a la pregunta “¿cuándo me conviene aplicar una solución determinada?”. Se considera una solución flexible a aquella que otorga una ventaja frente al estándar en el mayor número de situaciones posibles, independientemente de si la ventaja obtenida es grande o pequeña. Para ello, la solución aplicada debe ser constante, es decir, no se tendrán en cuenta diferentes variaciones de la misma solución para cada una de las aplicaciones.

Por ejemplo, si se estuviera evaluando la flexibilidad que tiene como solución el cambio de neumáticos en un coche no valdría considerar que los neumáticos de clavos aportan una ventaja en condiciones de nieve y hielo, mientras que los neumáticos lisos aportan ventajas en condiciones secas. En este caso, sería necesario evaluar si la elección de un tipo de neumático u otro, de clavos o lisos, es adaptable a todas las situaciones de manera beneficiosa. Para el caso de los neumáticos, se podría decir que no es una opción muy flexible ya que el uso de cada tipo es específico para una situación concreta.

5.2.2.1. OPTIMIZACIÓN DEL PILOTAJE

A la hora de evaluar la solución de optimización del pilotaje desde el punto de vista de la flexibilidad, es necesario tener en cuenta que para que dicha solución sea aplicada, el dron debe disponer de un sistema que permita programarlo para que realice vuelos autónomos. En caso contrario esta solución no será aplicable.

Otra de las consideraciones necesarias a tener en cuenta para evaluar esta solución es que la forma en la que el dron vuela de forma autónoma no forma parte de lo que se está evaluando, es decir, esta solución plantea la comparativa entre un dron en vuelo autónomo en condiciones meteorológicas tanto calmadas como adversas y ese mismo dron, en ambos casos, aplicando la solución planteada.

Teniendo en cuenta lo anteriormente presentado, y suponiendo que sobre el dron elegido se puede aplicar la solución de *optimización del pilotaje*, se pueden plantear la adaptación de dicha solución en diferentes situaciones:

- *Condiciones climáticas ideales*: En el caso de realizar vuelos en situación de condiciones climáticas ideales, es decir, sin viento y con temperaturas moderadas, optimizar el vuelo autónomo del dron mediante la tecnología *digital twin* no supondrá una ventaja, ya que el vuelo estándar será el que consuma la menor cantidad de energía posible.
- *Condiciones climáticas adversas*: En el caso de realizar vuelos en situación de condiciones climáticas adversas, es decir, con viento y lluvia, puede resultar muy interesante la optimización del patrón de vuelo del dron mediante *digital twins*, ya que se podrán realizar simulaciones en tiempo real de la situación del dron y del consumo energético del mismo para poder optimizar el vuelo.

Los dos casos anteriormente presentados son válidos tanto si el dron es utilizado para realizar carreras, con cambios de dirección y velocidad bruscos, como si es empleado en condiciones más estables, como puede ser la fotografía aérea. En ambos casos, la simulación del vuelo mediante *digital twins*, aportará una ventaja.

5.2.2.2. SUSTITUCIÓN DE BATERÍAS

A la hora de realizar la sustitución de las baterías de un dron, dos son los aspectos fundamentales a tener en cuenta, de cara al impacto, tanto positivo como negativo, que pueda tener sobre el vuelo del dron:

- *Peso*: Definitivamente, el peso de las baterías será la característica que más penalice el consumo energético del dron. A mayor peso, mayor será el empuje que deberán conseguir los motores para que la aeronave se mantenga en el aire. Otro factor a tener en cuenta es que, al aumentar el peso global del dron, aumentará la dificultad a la hora de realizar cambios de dirección rápidos.
- *Tamaño*: Si bien el tamaño de la batería en sí mismo no supone un impacto en la maniobrabilidad del dron, hay que tener en cuenta que sí es una restricción a la hora de elegir la batería adecuada, ya que deberá adaptarse

al tamaño del chasis del vehículo, lo cual impactará de manera directa a la capacidad máxima de la batería que se pueda colocar.

Teniendo en cuenta las dos características presentadas anteriormente, y siendo necesario un estudio basado en las propiedades de las baterías presentadas en el epígrafe 4.3, se puede considerar que la solución propuesta de sustituir las baterías aporta, por lo general, beneficio a la hora de ampliar el tiempo de vuelo máximo de un dron.

5.2.2.3. SELECCIÓN DE ROTORES

En epígrafes anteriores se han tratado las diversas características que hay que tener en cuenta a la hora de elegir las hélices correctas para un dron. A la hora de evaluar cómo de flexible es esta solución, se pueden destacar las siguientes características:

- Ángulo de ataque
- Número de palas
- Tamaño

Estas tres características serán las que más en cuenta habrá que tener a la hora de realizar la elección, ya que son las que más influyen en la eficiencia de vuelo del dron.

En ángulo de ataque permitirá generar mayor o menor empuje al dron, para un mismo número de revoluciones de los motores, en detrimento de la movilidad del vehículo y del consumo energético.

El número de palas que conformen la hélice también tendrá un impacto directo en el empuje realizado y en la eficiencia de vuelo, tal y como se presentó en el epígrafe 4.4.

En cuanto al tamaño de las hélices, el factor principal es la longitud de las misas, si bien el peso también impactará de manera negativa en el consumo energético, tal y como se ha presentado en el caso de las baterías, los materiales de los que se fabrican las hélices hacen que este impacto sea muy bajo. La longitud de las hélices deberá permitir que puedan ser montadas sobre el chasis del dron, teniendo en cuenta que no es aconsejable que las hélices se solapen, ya que el rendimiento de la hélice inferior se vería reducido drásticamente. Tampoco es recomendable que los vértices de las hélices

estén muy juntos, ya que los vórtices que se pueden generar en los extremos impactarán de manera negativa en el rendimiento de las mismas.

Hay que aclarar que, cuando se habla de impacto en el rendimiento o eficiencia del vuelo del dron, se está hablando de que, para conseguir el mismo vuelo, en cuanto a velocidad, giros, etc., será necesario un mayor consumo energético, ya que una mayor parte de esta energía consumida se perderá en calor u otros elementos diferentes al empuje de los rotores, que es el objetivo principal.

Si bien no hay una regla fija sobre cuál es la hélice idónea para cada caso, se suele plantear que aquellas configuraciones que genera menor empuje son mejores para aplicaciones que requieran alta capacidad de reacción del dron (carreras, giros...) mientras que aquellas que generan un mayor empuje (para un mismo número de revoluciones) serán mejores para las aplicaciones que requieran unos desplazamientos más estables.

5.2.3. IMPACTO

El impacto que tiene la aplicación de cada una de las soluciones sobre el consumo energético dependerá en gran medida de la situación en la que se encuentre el dron en el momento en que se aplique dicha solución. Es decir, volviendo al ejemplo de los diferentes tipos de neumáticos en los coches, no tendrá el mismo impacto el uso de ruedas lisas en condiciones calurosas que en condiciones de lluvia. Este contraste se hace más evidente si se comparase el impacto que tiene el uso de diferentes tipos de neumáticas en diferentes condiciones de carretera.

Por esto, la evaluación del impacto que tienen las soluciones sobre el consumo energético de los drones no será hecha de manera analítica, usando datos específicos, sino que se emplearán informaciones extraídas de diferentes casos de uso, con lo que se podrá obtener una idea de la horquilla de valores en los que puede variar el impacto.

Cabe destacar también que el impacto no tiene por qué ser exclusivamente positivo, por lo que se tendrán en cuenta, en los casos en los que aplique, las situaciones en las que la implantación de una solución sea desfavorable para el pilotaje.

5.2.3.1. OPTIMIZACIÓN DEL PILOTAJE

Para poder evaluar el impacto que tiene la solución de optimización del pilotaje sobre el consumo energético de un dron, se emplearán los resultados obtenidos en el caso de uso presentado en 4.5.

Según los resultados presentados en la Tabla 6, el tiempo de vuelo del dron simulado con un modelo de orden reducido oscilaría entre 24.51 y 38.32 minutos, dependiendo de las condiciones de viento presentes en el momento del vuelo. A la vista de estos resultados, teniendo en cuenta que el tiempo medio de vuelo de un dron, en condiciones neutras y sin aplicar la solución planteada es de alrededor de 20 minutos, se pueden extraer varias conclusiones:

- Por lo general, y sin tener otros modelos simulados, parece que la solución planteada tiene un impacto positivo en el consumo energético del dron y, por tanto, alargará el tiempo de vuelo del mismo.

- Los resultados obtenidos muestran que se puede llegar casi a duplicar el tiempo de vuelo, la horquilla de tiempos obtenida está entre un 22% más y un 91% más de tiempo. Sin duda estos resultados son muy optimistas y sería necesario realizar más simulaciones con modelos más precisos para conocer el impacto de manera más acertada.

Por otro lado, hay que tener en cuenta los resultados mostrados en la Tabla 7. Esto muestra algunas configuraciones de vuelo con las que el dron no sería capaz de avanzar y que, por tanto, no serían válidas. Si bien la solución planteada sirve para evitar el uso de dichas configuraciones, será preciso asegurar que el control autónomo del dron es capaz de discriminarlas para evitar que el impacto de la solución sea negativo.

5.2.3.2. SUSTITUCIÓN DE BATERÍAS

Como ya se ha comentado en varios puntos a lo largo del trabajo, es muy importante realizar un estudio previo acerca de las baterías que van a ser utilizadas, ya que estas deben cumplir una serie de requisitos, como pueden ser el tamaño, el peso o la tensión. Es muy importante tener en cuenta estos factores a la hora de aplicar la solución *sustitución de baterías* para conseguir un mayor tiempo de vuelo ya que, en el caso de no hacerlo correctamente, se puede llegar al punto de reducir dicho tiempo.

De cara a estudiar el impacto que la solución planteada tiene sobre el tiempo de vuelo del dron, hay que tener en cuenta que, para el caso específico de la sustitución de baterías, se van a tener a la vez impactos positivos y negativos. Será la suma de ambos impactos la que determine el signo del global. Es necesario entender cómo afecta cada una de las propiedades de las baterías al tiempo de vuelo para poder sacar conclusiones:

- *Capacidad*: La capacidad de la batería es la propiedad que da un impacto positivo al tiempo de vuelo del dron. Si solo se tiene en cuenta esta propiedad, se podría decir que, a mayor capacidad de la batería instalada, mayor será el tiempo de vuelo. Sin embargo, hay que tener en cuenta que un aumento en la capacidad supondrá un aumento en el tamaño y el peso de la misma.

- *Peso*: Si bien la capacidad es la propiedad que indicará el tiempo que el dron podrá estar volando, con el peso de la batería se podrá calcular el aumento del empuje que será necesario realizar para que el dron se mantenga en el aire. Este aumento del empuje necesariamente significará un aumento en el consumo energético por parte de los rotores, por lo que se puede considerar que el peso es una de las características que impactan de manera negativa.
- *Tamaño*: Si bien el tamaño de la batería no impacta de manera positiva ni negativa al tiempo de vuelo del dron, hay que tener en cuenta que es una característica ligada a las dos anteriores, es decir, una batería de mayor tamaño seguramente tenga una mayor capacidad, pero también tendrá un peso mayor. Además, hay que tener en cuenta que el tamaño de la batería no puede exceder unas medidas determinadas, impuestas por el tamaño del chasis del dron sobre el que irá montado ya que, si no, podrá ejercer un impacto negativo sobre el dron a la hora de realizar diferentes movimientos.

Por todo esto, se puede considerar que el tamaño de la batería generará, por lo general, un impacto nulo de cara a evaluar el tiempo de vuelo de un dron, o, en el caso de no estar bien elegida, un impacto negativo.

En conclusión, se puede decir que, si se tienen en cuenta todos los aspectos presentados en el trabajo, la sustitución de las baterías de un dron puede ser una técnica positiva en términos de tiempo de vuelo. El impacto de la solución dependerá del tipo de batería empleada y de su capacidad, pero en todos los casos aumentará dicho tiempo, aunque no sea mucho.

5.2.3.3. SELECCIÓN DE ROTORES

Al igual que se ha hecho a la hora de evaluar el impacto de la sustitución de baterías sobre el tiempo de vuelo de un dron, es necesario realizar una evaluación exhaustiva de cada uno de los tipos de hélices del mercado para determinar cómo impacta cada una de ellas en el incremento del tiempo de vuelo y, en última instancia, si ese impacto global es positivo o negativo. Hay que tener en cuenta, además, que esta solución no sólo impacta en el tiempo de vuelo máximo sino, además, en el tipo de pilotaje que se podrá hacer (ya se vio en el apartado 5.2.2 que esta solución no es muy flexible ya que cada una de las hélices aportará beneficio en casos específicos, mientras que tendrá un impacto negativo en otros casos). A la hora de hacer la evaluación del impacto, sólo se tendrán en cuenta aquellas configuraciones que sean positivas.

Las características a tener en cuenta a la hora de evaluar el impacto de unas hélices u otras en el tiempo de vuelo de un dron serán:

- *Tamaño:* El tamaño de las hélices tiene un impacto directo en el empuje que generarán los rotores. A mayor tamaño, mayor será el empuje, sin embargo, esto impacta directamente en el par que deben ejercer los motores para girar a la misma velocidad.
- *Ángulo de ataque:* Al igual que el tamaño de las hélices el ángulo de ataque determinará el empuje que realizan las hélices para un número de revoluciones determinado.
- *Número de palas:* El aumento del número de palas que forman la hélice aportarán también más empuje. En general se deberá trabajar con las tres propiedades (tamaño, ángulo de ataque y número de palas) para poder conseguir la combinación más adecuada para cada caso.
- *Peso:* El peso de las hélices es muy bajo, por lo que el impacto sobre el consumo energético y, por tanto, el tiempo de vuelo del dron es despreciable.

Es bastante complejo realizar un análisis del impacto que un tipo de hélices u otras tendrán en el consumo energético de un dron en vuelo, ya que su principal área de

impacto será el tipo de vuelo que realice el dron. Una vez evaluado el tipo de vuelo que se va a realizar y seleccionadas las hélices adecuadas, no se detectará una mejora sustancial, por lo que se puede concluir que el impacto es bajo o nulo, pero nunca negativo, siempre y cuando las hélices hayan sido elegidas de manera correcta para el tipo de vuelo que se vaya a realizar.

5.3. COMPARATIVA

En la Tabla 8, se presenta un resumen de la comparativa realizada entre las soluciones. en función de los criterios planteados.

Solución / Criterio	IMPLEMENTACIÓN	FLEXIBILIDAD	IMPACTO
Optimización del pilotaje	La implementación de esta solución es altamente compleja ya que requiere de grandes conocimientos de ingeniería y aerodinámica para que las simulaciones sean lo más precisas posible. Además de esto, los equipos necesarios para realizar las simulaciones deben ser de gran potencia. Por otro lado, también es necesario tener conocimientos sobre el software de control del dron, ya que será donde haya que realizar el control del mismo, basado en las simulaciones previas.	Se trata de una opción de gran flexibilidad, ya que las simulaciones permiten obtener el estado óptimo para cualquier situación.	Según los análisis realizados en el caso práctico (ver epígrafe 4.3.3.1) se puede apreciar una variación de la duración de la batería de 12 minutos, entre el tiempo máximo y el mínimo, lo cual supone casi un 50% más que el tiempo mínimo. Teniendo en cuenta estos datos, se puede considerar que la solución planteada tiene un alto impacto en el ahorro energético.
Sustitución de baterías	La implantación de esta solución requiere la realización de algunos cálculos no muy complejos. En internet existen gran cantidad de tutoriales donde enseñan a cómo tomar la mejor decisión a la hora de sustituir las baterías de un dron, así como referencias a tiendas donde conseguir los productos necesarios. Su implementación tiene cierto grado de complejidad ya que supone manipular el sistema eléctrico del dron, lo cual, mal realizado, puede suponer la destrucción del mismo.	Es una solución válida para cualquier situación. Siempre que emplees una batería de mayor capacidad, el tiempo de vuelo aumentará. Sin embargo, hay que tener en cuenta que no siempre la batería de mayor capacidad podrá ser la óptima, ya que, a medida que aumenta la capacidad, aumenta el tamaño de la misma, por lo que aumentará el consumo energético del dron al moverse. Siempre y cuando la batería esté proporcionada al tamaño del dron y a sus rotores, será una solución que mejorará el tiempo de vuelo en todas las situaciones.	El impacto de la solución dependerá de la batería que se utilice.
Selección de rotores	La implantación de esta solución es bastante sencilla, ya que solo requiere de la selección de un tipo de hélice determinada. La elección deberá depender del uso que se quiera dar al dron y del tipo de motor que se tenga.	Se trata de una opción poco flexible. Dependiendo del número de palas de la hélice y del ángulo de ataque, optimizará el consumo para determinados tipos de movimientos, penalizando otros. Por ejemplo, hélices de pequeño tamaño mejorarán el rendimiento para movimientos rápidos, como carreras o acrobacias, mientras que hélices grandes mejorarán el rendimiento al ser usadas en tareas más estáticas, como puede ser la grabación de video.	El impacto en el consumo energético de la solución planteada es bajo

Tabla 8, Comparativa de soluciones

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

A continuación, basándose en la evaluación previa, realizada en 5.2 y 5.3, se presenta la Tabla 9 en la que el autor concluye de manera numérica, la idoneidad de cada una de las soluciones frente a cada uno de los criterios. Hay que tener en cuenta que estas valoraciones están basadas en los datos que se han podido recopilar a lo largo del trabajo y cómo el autor ha percibido que las soluciones planteadas pueden ayudar a la problemática presentada, el bajo tiempo de vuelo de los drones comerciales.

El significado de cada uno de los valores presentes en la siguiente tabla busca aportar al evaluador una visión rápida y sencilla de lo que el presente trabajo ha querido reflejar, a saber, qué opciones tiene un usuario para poder aumentar de manera sustancial el tiempo de vuelo de un dron. Los valores usados en la tabla y su significado son los siguientes:

- 0 – No cumple con el criterio especificado
- 1 – Cumple bien con el criterio especificado
- 2 – Cumple de manera óptima con el criterio especificado

Solución / Criterio	IMPLEMENTACIÓN	FLEXIBILIDAD	IMPACTO
Optimización del pilotaje	0	2	2
Sustitución de baterías	1	1	1
Selección de rotores	2	0	0

Tabla 9, Conclusiones de los criterios de evaluación

Como conclusión, se puede asegurar que, pese a su dificultad de implantación, la solución basada en *digital twins* puede ayudar en gran medida a la mejora de la eficiencia energética, lo que, entre otras cosas, supone un gran ahorro económico ya que se podrán espaciar los tiempos de carga. Además, la solución planteada asegura que el dron volará siempre en las condiciones óptimas, de manera que, en caso de llevar una carga, esta irá lo más estable posible.

Si bien es cierto que se trata de la opción que mayor impacto tiene sobre el tiempo de vuelo, también es la opción más difícil de implantar. Para aquellos usuarios que no dispongan de los medios o el conocimiento necesario que requiere la implantación de

un sistema software que optimice el vuelo autónomo de un dron, se recomienda la aplicación de la solución *sustitución de batería*, ya que no requiere unas consideraciones previas muy complejas, y aporta buenos resultados de manera general.

Por último, se ha visto a lo largo del trabajo que, si bien las hélices que se usen en los drones tienen un alto impacto en el vuelo del mismo, este impacto sobre todo será negativo, es decir, una mala configuración de hélices te perjudicará en gran manera, pero una configuración óptima permitirá que el vuelo sea más fluido, aunque no se verá reflejado en gran medida en el consumo energético.

De cara a continuar con el presente trabajo, sería interesante realizar simulaciones más completas con modelos realistas de drones y de los entornos de vuelo, de manera que se tengan modelos de bajo coste computacional que aporten resultados lo más similares posibles a la realidad. Para esto, también será bueno construir modelos de laboratorio sobre los que realizar el proceso de pilotaje con *digital twins*.

Otra solución que sería interesante abordar es la planteada en [39], en la que se valora la posibilidad de emplear plataformas móviles, repartidas por las zonas de navegación de los drones, y que permitan realizar cargas rápidas a estos a lo largo de su recorrido.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] RT, «RT Actualidad,» 29 April 2015. [En línea]. Available: <https://actualidad.rt.com/actualidad/173369-buscar-google-hackear-dron-militar>.
- [2] Agrodrones, «Siete modelos de drones fumigadores que debes conocer,» [En línea]. Available: <https://agrodrones.wordpress.com/2017/08/07/siete-modelos-de-drones-fumigadores-que-debes-conocer/>.
- [3] C. Otero, «Botech,» 03 July 2018. [En línea]. Available: https://as.com/meristation/2018/07/03/botech/1530652713_911737.html.
- [4] J. F., «Dronethusiast,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.dronethusiast.com/best-drones-with-longest-flight-times/>.
- [5] J. Rising, «Flight Evolved,» 2017. [En línea]. Available: <http://flight-evolved.com/buyers-guide/how-drones-work/>.
- [6] RCExplorer, «RCExplorer,» [En línea]. Available: <https://rcexplorer.se/wp-content/uploads/2015/08/MiniTrii1.jpg>.
- [7] FPV, «FPV,» [En línea]. Available: <https://fpv.tv/wp-content/uploads/2014/12/TALI-H500-Walkera-FPV-Hexacopter-no1.jpg>.
- [8] Helipal, «STORM Drone 4 GPS Flying Platform (Naked Frame),» Helipal, [En línea]. Available: <http://www.helipal.com/storm-drone-4-gps-flying-platform-naked-frame.html>.
- [9] T-motor, «Geekbuying,» [En línea]. Available: <https://es.geekbuying.com/item/T-motor-F60-Pro-II-2700KV-3-4S-Brushless-Motor-Grey-398075.html>.
- [10] DroneOmega, «Quadcopter Propeller Basics for Drone Pilots,» [En línea]. Available: <https://www.droneomega.com/quadcopter-propeller/>.
- [11] DroneOmega, «The Advanced Quadcopter Battery Guide,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.droneomega.com/quadcopter-battery-guide/>.
- [12] R. Allain, «How Do Drones Fly? Physics, of Course!,» Wired, 19 May 2018. [En línea]. Available: <https://www.wired.com/2017/05/the-physics-of-drones/>.

- [13] D. P. Amogh, «Why does my quadcopter push air upwards instead of downwards?,» Quora, [En línea]. Available: <https://www.quora.com/Why-does-my-quadcopter-push-air-upwards-instead-of-downwards>.
- [14] K. Martinez, «DroneThusiast,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.dronethusiast.com/best-drones-with-longest-flight-times/>.
- [15] GetFPC, «All About Multicopter Drone Batteries,» 8 February 2018. [En línea]. Available: <https://www.getfpv.com/learn/new-to-fpv/all-about-multicopter-fpv-drone-battery/>.
- [16] S. Herrick, «Botlink,» 1 February 2018. [En línea]. Available: <https://botlink.com/blog/2018/6/4/9-tips-to-improve-drone-flight-time>.
- [17] getfpv, «All about Multicopter Drone FPV Propellers,» [En línea]. Available: <https://www.getfpv.com/learn/new-to-fpv/all-about-multicopter-fpv-drone-propellers/>.
- [18] B. Peherstorfer y K. Willcox, «Dynamic Data-Driven Reduced-Order Models,» Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- [19] W. Schilders y H. Van der Vorst, «Model Order Reduction: Theory, Research Aspects and Applications,» 2008.
- [20] D. Hartmann, U. Wever y M. Herz, «Model Order Reduction - A key technology for Digital Twins,» Siemens AG, Corporate Technology, Munich, Germany, 2017.
- [21] Ansys, Inc, «Reduced-Order Modelling. How and Why - An Overview,» Ansys, Inc, 2017.
- [22] J. Moyano Cano, «Quadrotor UAV for wind profile characterization,» Universidad Carlos III de Madrid, Madrid.
- [23] M. Lecerf y K. Willcox, «Methodology for Dynamic Data-Driven Online Flight Capability Estimation,» Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- [24] A. Parrott y L. Warshaw, «Industri 4.0 and the digital twin,» Deloitte University Press, 2017.

- [25] L. Mainini y K. Willcox, «A surrogate modeling approach to support real-time structural assessment and decision-making,» Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- [26] Core Electronics, «Core Electronics,» [En línea]. Available: <https://core-electronics.com.au/polymer-lithium-ion-battery-1000mah-38458.html>. [Último acceso: 2019].
- [27] Indiamart, «Indiamart,» [En línea]. Available: <https://www.indiamart.com/proddetail/nimh-battery-9261374097.html>. [Último acceso: 2019].
- [28] Mega Bateries, «Mega Bateries,» [En línea]. Available: https://www.megabatteries.com/item_details2.asp?id=17876.
- [29] B. Schneider, «Roger's Hobby Center,» 20 December 2018. [En línea]. Available: <https://rogershobbycenter.com/lipoguide>.
- [30] M. Rees, «Unmanned Systems Technology,» 12 December 2017. [En línea]. Available: <https://www.unmannedsystemstechnology.com/2017/12/selecting-drone-propeller-blades-considerations/>.
- [31] P. Jaiswal, «Towards Data Science,» 30 October 2018. [En línea]. Available: <https://towardsdatascience.com/demystifying-drone-dynamics-ee98b1ba882f>.
- [32] Full Mecánica, «Full Mecánica,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.fullmecanica.com/definiciones/f/1214-fuerza-del-viento-presion-del-viento>.
- [33] DJI, «Mavic 2 Especificaciones,» DJI, [En línea]. Available: <https://www.dji.com/es/mavic-2/info#specs>.
- [34] Innov8tive Design, «Cobra CM-2217/20 Multirotor Motor, Kv=950,» Innov8tive Design, [En línea]. Available: <http://innov8tivedesigns.com/cobra-cm-2217-20-brushless-motor-kv-950>.
- [35] Universidad de Sevilla, «Relación entre los distintos sistemas de coordenadas,» [En línea]. Available: http://laplace.us.es/wiki/index.php/Relación_entre_los_distintos_sistemas_de_coordenadas.

- [36] Touring Machine Company, «Pitch, Roll, and Yaw,» Touring Machine Company, [En línea]. Available: <https://www.touringmachine.com/Articles/aircraft/6/>.
- [37] S. M. Lavalle, «Planning Algorithms,» Cambridge University Press, 2006. [En línea]. Available: <http://planning.cs.uiuc.edu/node102.html>.
- [38] A. M. Madni, C. C. Madni y S. D. Lucero, «Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering,» MDPI, Basel, Switzerland, 2019.
- [39] B. Galkin y L. A. DaSilva, «UAVs as Mobile Infrastructure: Addressing Battery Lifetime,» Trinity College, Dublin, Ireland, 2018.

LISTADO DE SIGLAS, ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

- **Cd**: Coeficiente aerodinámico de resistencia al avance
- **DT**: Digital Twin
- **Fd**: Fuerza del dron
- **Fv**: Fuerza del viento
- **LiPo**: Batería de Litio y Polímero
- **NiCd**: Batería de Níquel-Cadmio
- **NiMH**: Batería de Níquel-Metal Hidruro
- **P**: Presión del viento
- **Ro**: Densidad del aire seco
- **ROM**: Reduced Order Model, Modelo de orden Reducido
- **V**: Velocidad del viento