

# **Estudio de la relación entre el diámetro de las hélices, el consumo, el rendimiento y la velocidad del vuelo de un dron**

## **PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN**

¿Cómo influye el diámetro de las hélices en la  
velocidad, el consumo y rendimiento de los motores en  
la ascensión de un dron?

Asignatura: Física

Recuento de palabras: 3683

## Índice

Introducción.....	(pág 2)
Marco teórico.....	(pág 2-7)
Materiales.....	(pág 7)
Procedimiento.....	(pág 8-9)
Datos y cálculos.....	(pág 9-19)
Experimento 1.....	(pág 11-12)
Experimento 2.....	(pág 13-14)
Rendimiento.....	(pág 15-18)
Errores.....	(pág 18-19)
Conclusiones.....	(pág 19-23)
Bibliografía.....	(pág 23-24)

## Introducción

Con este experimento pretendo observar la relación entre el diámetro de las hélices del dron con la velocidad a la que éste se mueve, el consumo de batería, así como el rendimiento de ésta y la variación que se presenta con diferente densidad de aire

En primero lugar es necesario explicar la diferencia entre un cuadricóptero y un dron. Un cuadricóptero es una aeronave con cuatro brazos en cuyos extremos se encuentra un motor con una hélice encargados de impulsar el vuelo, un dron es un cuadricóptero con asistencia de vuelo, es decir, un software que controla sensores como un velocímetro, giroscopio, acelerómetro y brújula digital para que el vuelo sea estable y seguro. Esta pequeña diferencia es importante en mi monografía, ya que en mi estudio utilicé un dron y no un cuadricóptero.

## Marco teórico

Lo que genera el impulso del dron para el vuelo son cuatro motores alimentados por una batería. Cada motor tiene un ESC (Electronic Speed Controller), un controlador de revoluciones, para permitir regular la potencia generada por cada motor y así permitir movimientos en todas las direcciones. El método que tiene el dron para realizar movimientos en todas las direcciones consiste en dar mayor potencia a unos motores que a otros, como podemos observar en la imagen 1.

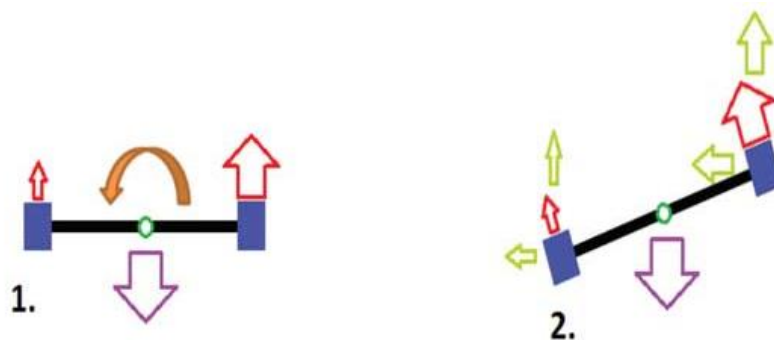


Imagen 1, representación de los vectores de movimiento del dron. Imagen tomada de <http://inforespuesto.com/wp-content/uploads/2017/06/explicacion-de-alabeo-y-cabeceo.jpg>

Es decir, si se quiere realizar un movimiento frontal, el dron debe dar mayor potencia a los dos motores traseros y para un movimiento trasero debe aumentar las revoluciones en los motores delanteros. Si se quiere ascender, debe impulsar todos los motores por igual y, al contrario, para descender, debe reducir todos al mismo tiempo. Para realizar un movimiento ladeado hacia la izquierda debe potenciar los motores derechos, y del mismo modo, para un movimiento ladeado a la derecha, los izquierdos.

La dirección de giro de los motores no es la misma en todos los casos, ya que, de ser así, la fuerza de reacción de la fuerza ejercida por los motores individualmente, es decir, el par motor, haría a la aeronave girar constantemente en dirección contraria a la rotación de los motores. Por este motivo, intercaladamente los motores giran en sentido horario y anti-horario, como vemos en la imagen 2.

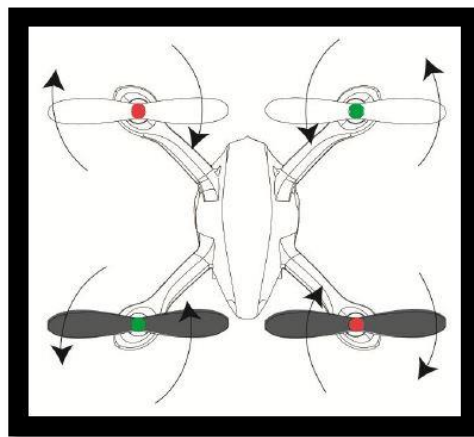


Imagen 2, representación del sentido de rotación de los motores.

Imagen tomada de <https://www.juguetronica.com/blog/wp-content/uploads/2015/04/helices-01-1.jpg>

Otra opción sería que los dos motores delanteros girasen en un sentido y los otros dos en el contrario. Sí que es cierto que se lograría el mismo efecto de estabilidad, sin embargo, no podría girar sobre sí mismo en el eje vertical. Ya que, para rotar de este modo el dron necesita aumentar las revoluciones por minuto en los motores que giran en el mismo sentido para así, aumentar la fuerza de reacción haciendo girar a la aeronave. Por ejemplo, si aumenta las revoluciones en los motores que giran en sentido horario, se aumentará la

fuerza en sentido anti-horario, haciendo girar al dron en este sentido. Este movimiento no sería posible si los motores traseros girasen en un sentido y los delanteros en el otro.

Los drones, al igual que los helicópteros vuelan gracias al movimiento de unas hélices. Realmente es la misma base que el vuelo de un avión. Las hélices están inclinadas hacia la dirección que debe girar, es decir, según la dirección a la que esté destinado girar en ese motor se debe colocar una hélice u otra. Están inclinadas para mover más cantidad de aire. Existen dos teorías para explicar la aerodinámica, y no se sabe con seguridad cuál de las dos influye más;

Teorema de Bernoulli: se supone un fluido laminar e incompresible (el aire), en él se aplica la ecuación de continuidad  $Q = \frac{V}{t} = \frac{A \cdot v \cdot t}{t}$ , se sabe que el caudal es constante a lo largo del recorrido. Por tanto  $A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2$  de este modo se demuestra que si disminuye el área del tubo que recorre, aumenta la velocidad, ya que la misma cantidad de fluido que pasa por un lado, tiene que pasar por el otro para mantener constante el caudal. Gracias al efecto Venturi, se sabe que, al aumentar la velocidad de un fluido disminuye la presión en el mismo. Esto se aplica al aire y a las hélices. Al hacer girar las hélices se corta el flujo de aire, haciendo que una parte vaya por debajo de la hélice y la otra por encima. La cantidad de aire que hay justo antes de llegar a la hélice debe ser la misma que hay al final de dicha hélice. Al estar inclinadas, el aire que recorre la parte superior, debe recorrer mayor espacio, por lo que, para que llegue al mismo tiempo que la otra parte de aire, debe aumentar la velocidad. Al hacer esto, disminuye la presión en la parte superior y aumenta en la parte inferior. Para intentar igualar las presiones, se produce un empuje de abajo hacia arriba, permitiendo ascender al cuerpo. Esto se refleja en la imagen 3, aunque representa el ala de un avión, el principio físico es el mismo.

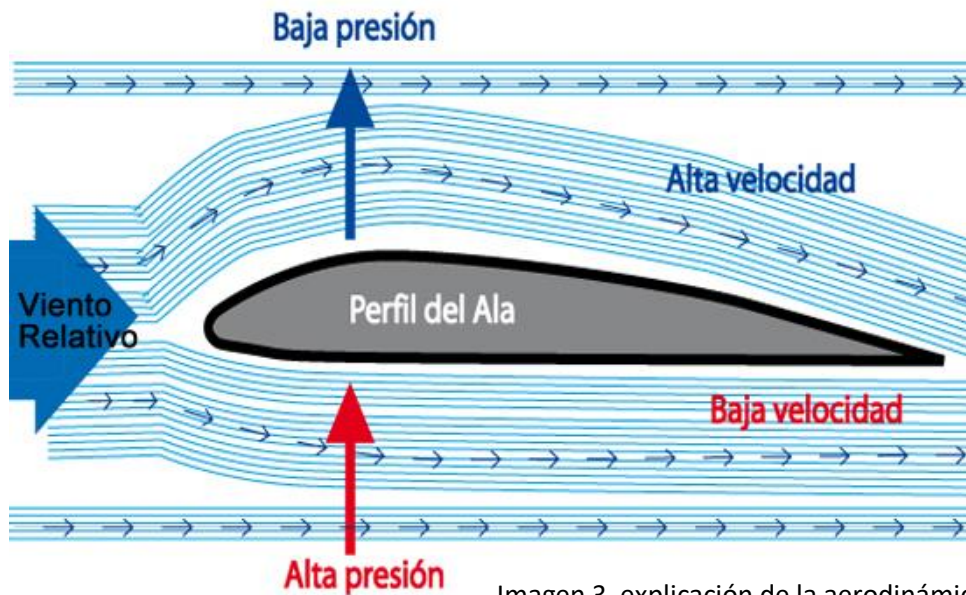


Imagen 3, explicación de la aerodinámica según el teorema de Bernoulli. Imagen tomada de <http://inforepuesto.com/wp-content/uploads/2017/06/teorema-de-bernoulli3.jpg>

3º ley de Newton: si un cuerpo A ejerce una fuerza sobre otro cuerpo B, éste ejerce otra fuerza sobre el cuerpo A de mismo módulo, misma dirección y sentido opuesto. Cuando las hélices giran, las partículas del aire chocan con la hélice y debido a su inclinación, estas partículas se lanzan hacia abajo, generando una fuerza de reacción en el ala hacia arriba, haciendo que el objeto se eleve, como se aprecia en la imagen 4.

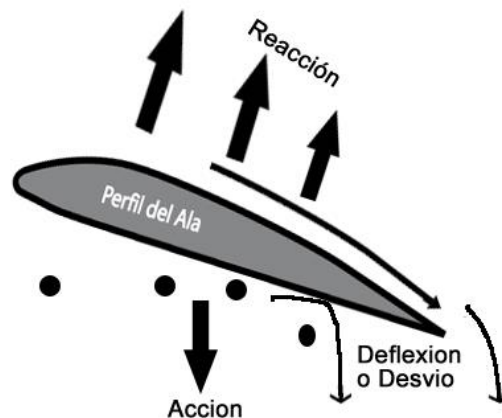


Imagen 4, explicación de la aerodinámica según la 3ª ley de Newton. Imagen tomada de <http://inforepuesto.com/wp-content/uploads/2017/06/teorema-de-bernoulli4.jpg>

Es cierto que el vector de la fuerza de reacción no es paralelo a la dirección de ascensión del dron, pero, para conseguirlo, la inclinación del ala debería ser paralela a la dirección de giro del motor. Pero, en tal caso, las partículas del aire no chocarían con la superficie del ala, por lo que no producirían esa fuerza de reacción. Además, la componente X de la fuerza de reacción se opone a la dirección del movimiento del ala, por eso el ángulo de inclinación no es muy pronunciado, para minimizar la componente X de la fuerza, pero, tampoco puede ser muy bajo ya que entonces, las partículas chocarán generando una componente Y (es la que produce la ascensión) menor.

En ambas teorías, es influyente el área del ala, por eso, al reducir el diámetro, al reducir el radio de la hélice, se reduce el área de la misma. Cuanto mayor sea el área, mayor cantidad de aire moverá, por tanto, mayor diferencia de presión o mayor número de partículas chocarán, por tanto, mayor empuje. Pero, al tener que mover mayor masa de aire, hace falta mayor energía producida por el motor, y la única manera que tiene un motor de generar mayor trabajo es aumentando las revoluciones por minuto, es decir, su velocidad angular, y para ello, debe tener mayor alimentación de electricidad, por tanto, un mayor consumo.

La densidad del medio es un factor a tener en cuenta en el vuelo ya que la densidad de un fluido se define como la masa del fluido por unidad de volumen. Por tanto, si el fluido es más denso, es necesaria mayor fuerza para mover esa masa con las mismas aspas, ya que es necesario mayor trabajo al tener que mover un mayor número de partículas. Asimismo, al mover mayor masa de aire, se genera un mayor impulso sobre el cuerpo, de tal modo que, con cada revolución, se genera una fuerza mayor de ascenso

El rendimiento es la relación existente entre el trabajo útil desarrollado por los motores y el trabajo teórico, es decir,  $\eta = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{teórica}}} \cdot 100$ . La  $E_{\text{útil}}$  es la energía que precisa

el dron para ascender 200m, es decir,  $E_{\text{útil}} = m \cdot g \cdot h$ , siendo  $m$  la masa del dron,  $g$  la aceleración de la gravedad que tomamos como  $9.8 \text{ m/s}^2$  y  $h$  es la altura a la que asciende la aeronave, 200m. Sin embargo, la  $E_{\text{teórica}}$  se conoce gracias al consumo de batería que se ha empleado durante la ascensión. Sabemos que  $W = P \cdot t$ ;  $P = V \cdot I$ ;  $I = Q/t$  por tanto,  $Q = I \cdot t$ , si despejamos en la fórmula del trabajo,  $W = V \cdot I \cdot t$ , y como  $I \cdot t = Q$ ; nos queda que  $W = V \cdot Q$ . Conocemos el voltaje de la batería y la carga que se ha consumido.

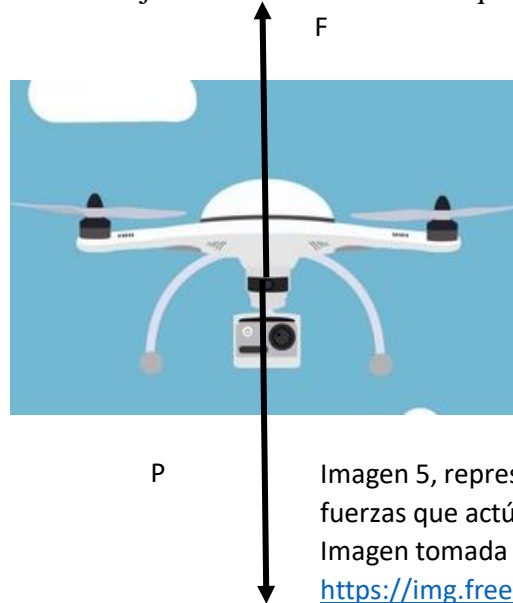


Imagen 5, representación de las fuerzas que actúan en el vuelo. Imagen tomada de [https://img.freepik.com/vector-gratis/disenio-fondo-dron\\_1212-249.jpg?size=338&ext=jpg](https://img.freepik.com/vector-gratis/disenio-fondo-dron_1212-249.jpg?size=338&ext=jpg)

## Material

- Dron, modelo Phantom 3 pro 1,280kg
- Control remoto
- Baterías 4480mAh, 15,2V, 68Wh
- Teléfono móvil
- Tijeras
- Regla  $\pm 1 \text{ mm}$
- Aplicación móvil del dron, DJIgo



## Procedimiento

Lo primero antes de realizar el experimento es cargar completamente las baterías, en mi caso utilizaré 5 baterías de modo que en cada corte de las hélices, tenga una batería cargada totalmente. Este experimento no se puede realizar en cualquier sitio, debido a que acorde a la ley española actual no se puede volar en espacio aero-controlado, ni a menos de 8km respecto a un aeropuerto, ni en aglomeraciones de edificios o de personas al aire libre. El experimento lo realicé dos veces, cada uno en un espacio distinto para variar las condiciones ambientales alterando la densidad del aire. Cada experimento se debe realizar en el mismo espacio y en el menor tiempo posible, para que las condiciones climáticas sean lo más semejante posible. Por ejemplo, la dirección y velocidad del viento es un factor a tener en cuenta, pero, en cada experimento, suponemos un viento constante ya que la variación del mismo es muy baja en tan poco tiempo.

Se debe tener instalada la aplicación DJIgo en el teléfono móvil para poder monitorizar los datos captados por los sensores del dron. Los datos que son relevantes son, la altura a la que se encuentra el dron con respecto al suelo y la batería restante. Se busca una zona plana para hacer posible el despegue del dron. Se necesita un piloto que dirija el dron y otra persona para controlar el cronómetro. Se debe tener el dron con los motores en marcha, pero en el suelo, para evitar desincronizaciones o problemas a la hora de despegar. Una vez arrancado, manteniéndose en el suelo, se anota la batería que tiene. Coordinadamente, se pone en marcha el cronómetro y el piloto debe subir la palanca del controlador al máximo, con el fin de mantener constante la potencia que debe ser suministrada a los motores en todas las pruebas. Se espera a que el dron alcance la altura de 200m, momento en que se para el cronómetro y se anota la batería que queda en ese instante. Esto se repite 3 veces. Tras esto, por seguridad se quita la batería del dron, y se

cambia por otra totalmente cargada. Una vez retirada la batería del dron, con la regla se indica 1cm en cada lado de la hélice y se corta, es decir, se recortan 2cm de diámetro en cada corte. Se introduce otra batería cargada totalmente y se repite la operación hasta el límite de cortes. Además, conociendo el peso del dron, y la cantidad de energía eléctrica que se precisa para la ascensión, podemos calcular el rendimiento de los motores en cada longitud de la hélice. Concluido este experimento se repiten las mediciones otro día con otras condiciones.

### Datos y cálculos

Lo primero es calcular la densidad del aire en ambos experimentos. Para hacer esto, he utilizado una calculadora de densidad del aire, proporcionada por la página web del CENAM (Centro Nacional de Meteorología). En esta calculadora, introduciendo la temperatura, la presión y la humedad relativa de la zona dónde hicimos el experimento, obtenemos la densidad del aire. El primer experimento lo hice en Islares, Cantabria, con los datos aportados por la Aemet se puede calcular la densidad, como se ve en la imagen 6.

Magnitud	Valor	Incertidumbre ( $k = 1$ )
Temperatura, $t$ :	15 °C	1 °C
Presión, $p$ :	102700 Pa	100 Pa
Humedad Relativa, $h$ :	83 %	1 %

Realizar Cálculo

	Resultado
Densidad del aire:	1.2357068 kg/m <sup>3</sup>
Incertidumbre ( $k = 1$ ):	0.0048703 kg/m <sup>3</sup>

Imagen 6, cálculo de la densidad del aire en Islares. Cálculo realizado con la página <http://www.cenam.mx/publicaciones/cdensidad.aspx>

El segundo experimento lo realicé en Medina de Pomar, Burgos, con los datos aportados por la Aemet, se calcula la densidad del aire, como se ve en la imagen 7

Registre los datos que se solicitan

Calcular con:

☒ **Humedad Relativa**  
☐ **Temperatura de Punto de Rocío**

Magnitud	Valor		Incertidumbre ( $k = 1$ )	
Temperatura, $t$ :	20	°C	1	°C
Presión, $p$ :	96100	Pa	1	Pa
Humedad Relativa, $h$ :	52	%	1	%

Realizar Cálculo

Resultado

Densidad del aire:	1.1369681	kg/m <sup>3</sup>
Incertidumbre ( $k = 1$ ):	0.0042282	kg/m <sup>3</sup>

Imagen 7, cálculo de la densidad del aire en Medina de Pomares  
 Cálculo realizado con la página  
<http://www.cenam.mx/publicaciones/cdensidad.aspx>

Conociendo la altura a la que asciende el dron y el tiempo que tarda en la ascensión, podemos calcular la velocidad de la aeronave, como vemos en la tabla 1 y 3

## Experimento 1; Islares, Cantabria

Organizamos los datos tomados en tablas con el programa de Windows Excel.

diámetro $\pm 0,1\text{cm}$	batería inicial $\pm 1\text{mAh}$	batería final $\pm 1\text{mAh}$	tiempo $\pm$ 0,01s	Consumo $\pm 2\text{mAh}$
24	3090	2970	41,31	120
	2755	2673	43,31	82
	2015	1891	42,36	124
22	4056	3944	42,18	112
	3264	3129	42,76	135
	2883	2757	42,59	126
20	3606	3484	41,75	122
	3120	2998	41,03	122
	2795	2633	41,26	162
18	3614	3449	41,61	165
	3121	2957	40,37	164
	1724	1560	43,59	164

Tabla 1, datos del experimento 1.  
Tabla realizada con Excel

diámetro $\pm 0,1\text{cm}$	MEDIA Consumo $\pm 0,2\text{mAh}$	velocidad (m/s)	MEDIA velocidad
24	109	4,84	4,73
		4,62	
		4,72	
22	124	4,74	4,70
		4,68	
		4,70	
20	135	4,79	4,84
		4,87	
		4,85	
18	164	4,81	4,78
		4,95	
		4,59	

Tabla 2, valores medios del experimento 1  
Tabla realizada con Excel

## Experimento 2, Medina de Pomar. Burgos

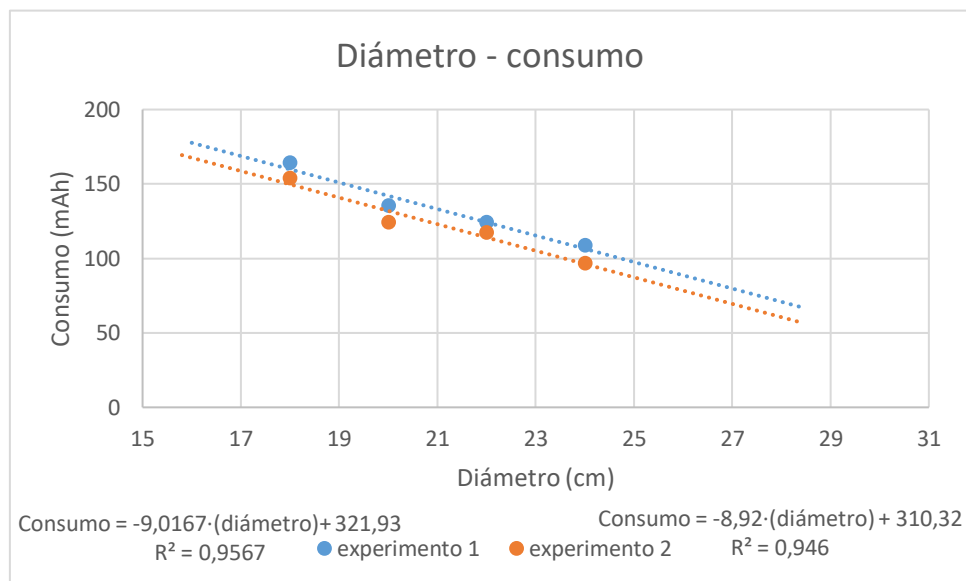
diámetro $\pm 0,2\text{cm}$	batería inicial $\pm 1\text{mAh}$	batería final $\pm 1\text{mAh}$	tiempo $\pm$ 0,01s	Consumo $\pm 2\text{mAh}$
24	3150	3052	43,09	98
	2871	2775	41,05	96
	2708	2609	42,34	99
	2643	2548	42,55	95
	2461	2365	40,55	96
22	3935	3834	42,42	101
	3752	3633	42,51	119
	3595	3478	41,33	117
	3485	3369	42,13	116
	2245	2112	41,52	133
20	4130	4013	41,34	117
	3884	3740	41,36	144
	3693	3550	41,05	143
	3530	3423	42,01	107
	3432	3323	41,43	109
18	4020	3900	40,54	120
	3845	3713	41,09	132
	3623	3491	40,32	132
	3370	3156	41,03	214
	3170	2998	41,05	172

Tabla 3, datos del experimento 2  
Tabla realizada con Excel

diámetro $\pm 0,2\text{cm}$	MEDIA Consumo $\pm 0,2\text{mAh}$	velocidad (m/s)	MEDIA velocidad
24	97	4,64	4,77
		4,87	
		4,72	
		4,70	
		4,93	
22	117	4,71	4,76
		4,70	
		4,84	
		4,75	
		4,82	
20	124	4,84	4,83
		4,84	
		4,87	
		4,76	
		4,83	
18	154	4,93	4,90
		4,87	
		4,96	
		4,87	
		4,87	

Tabla 4, valores medios del experimento 2  
Tabla realizada con Excel

Con el fin de poder comparar ambos experimentos, he agrupado ambas gráficas en una sola.



Gráfica 1, correspondiente a la tabla 2 y tabla 4  
Gráfica realizada con Excel

### Rendimiento

Para calcular el consumo en cada vuelo, se calcula la diferencia de batería anotando la cantidad de batería restante, antes y después de ascender los 200m.

Para calcular el rendimiento, necesitamos calcular el trabajo útil y el trabajo teórico.

El trabajo útil es el que se debe a la fuerza ejercida por los motores. La fuerza necesaria para ascender la aeronave a una velocidad constante, tiene que ser igual al peso de la misma. Por tanto,  $E_{\text{útil}} = m \cdot g \cdot h$ ;  $E_{\text{útil}} = 1'280 \cdot 9'8 \cdot 200 = 2508,8\text{J}$ .

$E_{\text{teórica}} = -\Delta\text{batería} \cdot 3600\text{s} \cdot 15,2\text{V}$ , obviamente el incremento de batería va a ser negativo. Para obtener una energía positiva, usamos el menos incremento de batería. La carga consumida en la batería la tenemos en mAh y necesitamos pasarlo a As, para eso hacemos lo siguiente.  $W = V \cdot I \cdot 10^{-3} \cdot 3600$ . De este modo obtenemos la energía



consumida en cada vuelo. Con este cálculo, hallamos la tabla 5 correspondiente al experimento 1 y la tabla 6 que se corresponde con el experimento 2

diámetro $\pm 0,1\text{cm}$	rendimiento		$\eta$
24	6566,4	5946,24	34,6
	4487,04		
	6785,28		
22	6128,64	6803,52	30,3
	7387,2		
	6894,72		
20	6675,84	7405,44	27,8
	6675,84		
	8864,64		
18	9028,8	8992,32	22,9
	8974,08		
	8974,08		

Tabla 5, cálculo del rendimiento del experimento 1  
Tabla realizada con Excel

diámetro $\pm 0,1$ cm	rendimiento		$\eta$
24	5362,56	5296,90	38,9
	5253,12		
	5417,28		
	5198,4		
	5253,12		
22	5198,4	6413,18	32,1
	5253,12		
	5526,72		
	6511,68		
	6402,24		
20	6511,68	6785,28	30,3
	6402,24		
	6347,52		
	7277,76		
	6402,24		
18	7277,76	8426,88	24,4
	6402,24		
	7879,68		
	7824,96		
	5855,04		

Tabla 6, cálculo del rendimiento en el experimento 2  
Tabla realizada con Excel

Al igual que antes, para poder comparar, he dispuesto una única gráfica para representar los datos de las tablas 5 y 6.

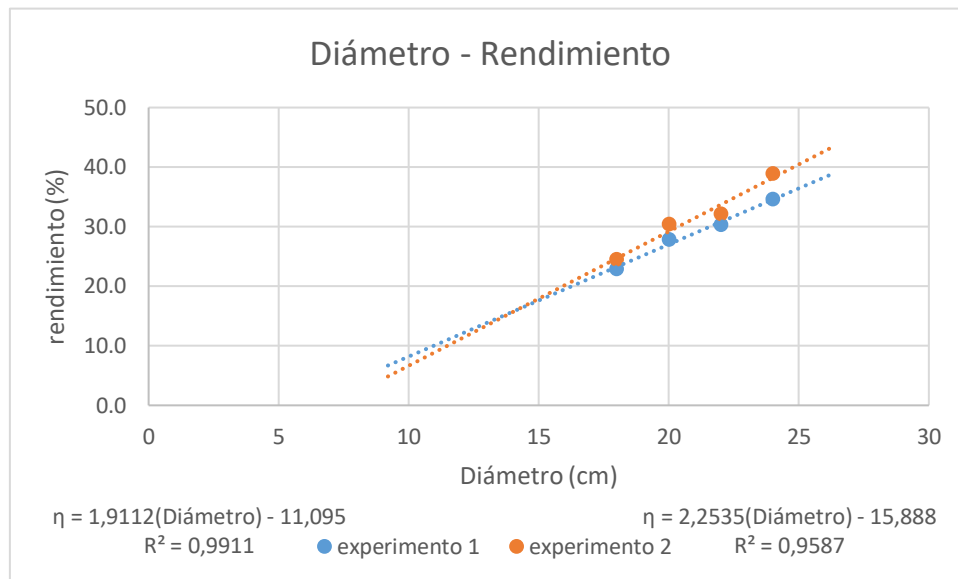


Gráfico 2, correspondiente a las tablas 5 y 6  
Gráfica realizada con Excel

Diferencia porcentual del consumo entre ambos experimentos se calcula:

$$9'016 - 8,92 = 0,036\text{mAh/cm}$$

$$\frac{0,036}{8,92} \cdot 100 = 1,07\%$$

Diferencia porcentual del rendimiento entre ambos experimentos se calcula:

$$2'25 - 1'91 = 0'34\%/cm$$

$$\frac{0,34}{1,91} \cdot 100 = 17'8\%$$

### Errores

El diámetro es 2.R, el error de R es  $\pm 0,1\text{cm}$ , por tanto, el error del diámetro es  $\pm 0,2\text{cm}$

Como el consumo es  $C = \Delta \text{batería} = \text{batería}_{\text{final}} - \text{batería}_{\text{inicial}}$

$$\Delta C = \Delta \text{batería}_{\text{final}} + \Delta \text{batería}_{\text{inicial}} = 0,1 + 0,1 = \pm 0,2 \text{mAh}$$

$$\Delta E_{\text{teórica}} = g \cdot \left( \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta h}{h} \right) = 9,8 \cdot \left( \frac{0,001}{1280} + \frac{1}{200} \right) = \pm 0,049 \text{J}$$

$$\begin{aligned} \Delta E_{\text{útil}} &= E_{\text{útil}} \cdot \left( \frac{\Delta C}{C} + \frac{\Delta \text{Voltaje}}{\text{Voltaje}} \right) = \\ &= 2058,8 \cdot \left( \frac{0,2}{\text{Consumo}} + \frac{0,1}{15,2} \right) \end{aligned}$$

	24	22	20	18
Consumo	109	124	135	164
$\Delta \text{Consumo}$	$\pm 17,3$	$\pm 16,9$	$\pm 16,6$	$\pm 16,1$

Tabla 7, errores en el consumo del experimento 1

Tabla realizada con Excel

	24	22	20	18
Consumo	97	117	124	154
$\Delta \text{consumo}$	$\pm 17,8$	$\pm 17,1$	$\pm 16,9$	$\pm 16,2$

Tabla 8, errores en el consumo del experimento 2

Tabla realizada con Excel

## Conclusiones

Lo primero que llama la atención es que la velocidad de ascensión a la que se mueve es siempre la misma, alrededor de 4,7m/s, para explicar este suceso se acude a la programación del software. Cuando el piloto mueve la palanca al máximo para que ascienda, el control remoto envía al dron la velocidad a la que tiene ir el conjunto, no la velocidad a la que tienen que girar los motores o la energía que debe suministrar a los motores, sino la velocidad a la que necesita ir. Cuando el dron ha recibido la velocidad a la que debe ir, el variador suministra electricidad hasta que el velocímetro incorporado

indica que ya se mueve a dicha rapidez, en ese momento el variador deja de incrementar el suministro a los motores y los mantiene constantes.

Con el primer corte no se aprecian diferencias en cuanto a la estabilidad se refiere. En el segundo corte, en la primera ascensión, apareció un error que invalidó la muestra. El error era de sobrecalentamiento de motores. Al tener que mantener la misma velocidad con menor diámetro, con cada giro los motores mueven menor masa de aire, por tanto, deben aumentar las revoluciones, y, por seguridad, el dron tiene un sistema que protege del sobrecalentamiento de estos. En este corte, se notó que aumentaba la inestabilidad del vuelo. En el tercer corte, en todos los vuelos, se apreciaba una clara dificultad a la hora del despegue. Una vez que despegaba, volaba con normalidad, pero se escuchaba un sonido de motores a demasiadas revoluciones, además también se notó un aumento de la inestabilidad del dron. En el 4º corte, con 16cm de diámetro, despegó y a los pocos metros, 1 o 2, se desestabiliza totalmente y cae. Esto sucedió debido a que, para estabilizar el vuelo, el dron tiene un sistema para aportar mayor energía a unos u otros motores con el fin de mantener un vuelo recto. En este caso, cuando el dron trata de estabilizarse, alguno de los motores deja de funcionar como medida de seguridad debido a su alta velocidad de giro. Como para mantener la misma velocidad de ascensión con un diámetro de 8cm menos, necesita más revoluciones por minuto, el motor se sobrecalienta y se para. Al pararse por unos instantes, el dron cae y el propio sistema de seguridad hace que se precipite contra el suelo sin poder evitarlo. En el experimento 2, tratamos de hacer un cuarto corte de 0,5cm en cada lado de la hélice, de modo que el diámetro sería de 17cm, pero el resultado fue el mismo que con 16cm.

Con el experimento, obtenemos la gráfica 1, en la que podemos apreciar la relación del consumo frente al diámetro. En el tramo experimentado entre 18cm y 24cm, observamos que es inversa y lineal. En el experimento 1, con una densidad de aire de 1,24

kg/m<sup>3</sup>, la relación es de -9'016 mAh/cm y en el experimento 2, con una densidad de aire del 1,14 kg/m<sup>3</sup>, es de -8'92mAh/cm. La diferencia entre ambos experimentos es de 0'096 mAh/cm, por tanto, la diferencia porcentual entre ambos experimentos es del 1,07%. Sin embargo, debido a los pocos valores obtenidos, quedaría por determinar hasta qué punto es lineal, ya que según el experimento teóricamente llegaría un diámetro cuyo consumo sea 0, y es imposible que en un vuelo no haya consumo. Sin embargo, tal punto es inexistente ya que, fuera del intervalo experimentado [18, 24] el modelo analizado no alcanza los 200m. Si el diámetro es menor que 18cm, el dron no vuela con estabilidad y se precipita a los pocos metros, y, no puede ser mayor de 24cm ya que chocarían entre ellas al girar y no despegaría. Por tanto, como el intervalo no es muy amplio, no es posible tomar un mayor número de datos y con los obtenidos concluimos que la relación es lineal en todo su dominio. Con 24cm de diámetro (medida estándar para el modelo Phantom 3 pro) el consumo en el experimento 1 es de 109mAh, y con 18cm de 164mAh, es decir, aumenta 55mAh. En el experimento 2, con 24cm el consumo es de 97mAh, y con 18cm es de 154mAh, es decir, aumenta 57mAh. La diferencia entre ambas no es relevante, sin embargo, sí que lo es el aumento del consumo a medida que disminuimos el diámetro.

En cuanto al rendimiento, lo primero que se observa es que, con el diámetro estándar (24cm) para este modelo, el rendimiento es del 34,6% (en el experimento 1) y del 38,9 (en el experimento 2), lo que es bastante bajo. Ese 65.4% del experimento 1 o 61'1% del experimento 2 de energía que no se aprovecha, se convierte principalmente en calor. En calor por el rozamiento de los motores, en calor en la batería y en los circuitos electrónicos. También se consume energía para contrarrestar la fuerza de rozamiento que ejerce el aire, en alimentar a los sensores que asisten el vuelo y en menor medida en los circuitos electrónicos que no transmiten el total de la electricidad. Con el experimento también se obtiene la gráfica 2, en la que se observa que la relación del rendimiento con

respecto al diámetro en el tramo experimentado, entre 18cm y 24cm, es lineal y directa. En el experimento 1, con una densidad de aire del  $1,24 \text{ kg/m}^3$ , la relación es de  $1'91\%/cm$  y en el experimento 2, con una densidad de aire del  $1,14 \text{ kg/m}^3$ , es de  $2'25 \text{ \%/cm}$ . La diferencia entre ambos es de  $0'34\%/cm$ , por lo que la diferencia porcentual es de  $17'8\%$ . Sin embargo, al igual que ocurre con la relación con el consumo, teóricamente existirá un diámetro cuyo rendimiento sea del 100%, lo cual es imposible. Pero, al igual que en el caso anterior, fuera del tramo [18, 24] el dron no alcanza los 200m, debido al mismo razonamiento que en la relación del consumo frente al diámetro. Por tanto, esta relación también es lineal en todo su dominio. Además, se observa que al tener menor diámetro de hélice, el rendimiento baja. Esto se debe a que, como ya he dicho antes, al mover menor masa de aire, para mantener la misma velocidad, debe aumentar las revoluciones de los motores, aumentando así la energía perdida en el rozamiento de los motores. En el experimento 1, el rendimiento se reduce un  $12'6\%$  y, en el experimento 2 se reduce un  $14'5\%$ . Esto quiere decir que, con menor diámetro de hélice, se aprovecha menor cantidad de energía.

En la comparación de ambos experimentos se presenta un problema. Todas las medidas se ven influenciadas por la dirección y sentido del viento, si bien es cierto que no es relevante en las medidas del mismo experimento, sí que lo es a la hora de comparar los dos experimentos con viento distinto. En el experimento 1 en Islares, Cantabria, había una velocidad del viento de  $8\text{m/s}$ , (dato tomado de la AEMET) la zona elegida estaba rodeada por un monte y bosque, de modo que no hay mucho viento por el resguardo del entorno, sin embargo, en el experimento 2 en Medina de Pomar, Burgos había un viento de  $20\text{m/s}$  (dato obtenido de la AEMET) al realizarse el experimento en lo alto de una colina sin resguardo de ningún tipo. Esto es un problema, ya que la variación de los datos

originada por el viento no es posible delimitarla, por tanto, una parte de dicha variación es debida al viento y no a la densidad del aire en su totalidad.

Finalmente, vemos que la diferencia de variación porcentual del consumo frente al diámetro entre el experimento 1 y el 2 es del 1'07% y, la diferencia del rendimiento frente al diámetro es del 17'8%. Se aprecia que cuando la densidad es menor, también es menor la energía necesaria para impulsar al dron, ya que al haber menor cantidad de materia se requiere menos energía para impulsar la aeronave, aunque desarrolle menor impulso. Se observa que el aumento del consumo entre el experimento 1 y 2, no es significativo. Sí que disminuye el consumo al tener menos densidad de aire, pero dónde se aprecia mayor variación, es en el rendimiento. La diferencia del rendimiento entre el experimento 1 y 2 es del 17'8%, una relación no muy alta, pero sí que es significativa. Es decir, a medida que disminuimos el diámetro de las hélices, aumenta el consumo de batería y disminuye el rendimiento de los motores. Por este motivo, las hélices de los drones tienen el diámetro máximo posible para sus dimensiones y masa, ya que con un diámetro mayor al que usa cada modelo, las hélices chocarían entre ellas y sería peligroso y con un diámetro menor, se necesitaría mayor energía y se aprovecharía menor cantidad de la misma.

## Bibliografía

- AEMET, <http://www.aemet.es/es/eltiempo/observacion/ultimosdatos?k=cle&w=0&datos=img&x=h01&f=presion> [Consulta 1/3/2019]

- *Diseño aerodinámico de un UAV de baja velocidad*, Adrián Martín Cañal  
[http://aero.us.es/sesteban/pdf/PFC/Cefiro/PFC\\_Adrian/PFC\\_Adrian.pdf](http://aero.us.es/sesteban/pdf/PFC/Cefiro/PFC_Adrian/PFC_Adrian.pdf) [Consulta 15/1/2019]



- *Cálculo de la densidad del aire utilizando la fórmula del CIPM-20071*, CENAM

<http://www.cenam.mx/publicaciones/cdensidad.aspx> [Consulta 14/1/2019 y 1/3/2019]

- *Física de un quadróptero*, Estefanía Mancioc

[http://documentacio.vedrunacatalunya.cat/recerques//treballs/2017/tarrega/TR\\_estefania\\_mancioc.pdf](http://documentacio.vedrunacatalunya.cat/recerques//treballs/2017/tarrega/TR_estefania_mancioc.pdf) [Consulta 14/1/2019]

- *Principios básicos*, Miguel Ángel Muñoz

<http://www.manualvuelo.com/PBV/PBV13.html> [Consulta 14/1/2019]

- *Cómo funcionan y vuelan los drones*, Drones, Tecnología

<http://inforespuesto.com/como-funcionan-y-vuelan-los-drones/> [Consulta 14/1/2019]

• Apuntes personales: Fluidos. Tomados en clase del profesor Gómez Romero, Alfredo. IES Carlos III, curso 2017/2018. Asignatura: Física.

- *Normativa drones RPAS Real Decreto 1036/2017: Debate Drone by Drone*,

Drone by Drone, <https://www.youtube.com/watch?v=1A6YzIMeLrU> [Consulta 18/1/2019]