

TRABAJO PRÁCTICO N°8. FUERZA DE EMPUJE EN DRONES

---

TP N°8. FUERZA DE EMPUJE EN DRONES

➤ **OBJETIVOS**

- Determinar la fuerza de empuje a aplicar para levantar un dron.
- Analizar las gráficas que resultan de la experiencia práctica.
- Determinar la Constante de Empuje del motor-hélice

**INTRODUCCION**

En la determinación del diseño de un Dron es importante considerar la fuerza de empuje que ejerce en vuelo. Esta fuerza de empuje es el resultado de la interacción del motor y la hélice. Es de interés determinar su valor para poder seleccionar el conjunto motor-hélice de mayor empuje en determinadas condiciones de vuelo. Varios factores intervienen en el vuelo de un Dron, por lo que la fuerza de empuje se relaciona con varias variables dinámicas que actúan en el aire. Investigaciones realizadas presentan varias fórmulas de determinación. Entre otras:

$$F = 1.225 \frac{\pi(0.0254 \cdot d)^2}{4} \left[ \left( RPM_{prop} \cdot 0.0254 \cdot pitch \cdot \frac{1min}{60sec} \right)^2 - \left( RPM_{prop} \cdot 0.0254 \cdot pitch \cdot \frac{1min}{60sec} \right) V_0 \right] \left( \frac{d}{3.29546 \cdot pitch} \right)^{1.5}$$

Donde:

Dynamic Thrust Equation

F = thrust (N), d = prop diam. (in.), RPM = prop rotations/min., pitch = prop pitch (in.), V<sub>0</sub> = propeller forward airspeed (m/s)

Una forma simplificada de determinación es:

$$F = 4.392399 \times 10^{-8} \cdot RPM \frac{d^{3.5}}{\sqrt{pitch}} (4.23333 \times 10^{-4} \cdot RPM \cdot pitch - V_0)$$

Donde:

F: Fuerza de empuje (N)

d: diámetro de la hélice (pulgadas)

pitch: paso de la hélice (pulgadas)

RPM: velocidad de rotación del motor.

V<sub>0</sub>: Velocidad del aire (m/s)

Se observa que la Fuerza de empuje depende del cuadrado de la velocidad de rotación de la hélice, y disminuye si hay viento. En cuanto al paso de la hélice, si es corto, el dron desarrolla vuelos más estables y lentos, la de paso largo, vuelos más rápidos con elevado consumo de energía

Para medir y caracterizar la fuerza de empuje se requiere de un dispositivo o banco de ensayo que permite obtener mediciones de la velocidad de la hélice, la potencia que desarrolla y el empuje que desarrolla.

## TRABAJO PRÁCTICO N°8. FUERZA DE EMPUJE EN DRONES

### BANCO DE ENSAYO

Existen varios modelos o dispositivos que permiten medir la fuerza de empuje. Un diseño considera una estructura tipo balancín con bases fijas para sostener un motor en cada brazo. Otras estructuras consideran el momento que desarrolla la hélice al girar sobre un brazo de palanca sobre un punto móvil.

En el presente trabajo Práctico se utiliza un diseño diferente que consta de una hélice concéntrica ubicada en el centro de un anillo circular con guías. Esto permite que el conjunto hélice-motor, al girar, desarrolle una fuerza sobre una balanza midiendo así el peso o empuje desarrollado por el conjunto motor-hélice.

### Elementos que componen el dispositivo

1. Motor y hélice (motor A2212/13T. Hélice 9047R).
2. Controlador de velocidad de 30Amp
3. Batería Lipo de 11,1 V.
4. Generador de señal de referencia PWM (placa Arduino programada)
5. Instrumento de medición de Tensión y Corriente
6. Medidor de RPM (tacómetro óptico)
7. Balanza digital

### HÉLICE DEL DRON

El perfil aerodinámico giratorio de la hélice permite que sea capaz, frente a una corriente de aire, de aprovechar las fuerzas originadas por el cambio de velocidad o presión.

Son las variaciones de energía de los diferentes motores y de las hélices las que además de elevarse, le permiten al dron realizar los movimientos controlados.

### El Factor P o Par Motor.

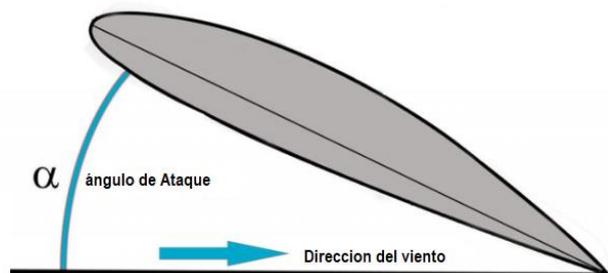
Al observar las hélices de un dron se ve que tienen dos posiciones diferentes. Esto es para contrarrestar el Factor P o Par motor que se explica con la tercera ley de Newton, cualquier fuerza que se ejerza va a resultar otra fuerza igual y de sentido contrario.

El dron necesita de las hélices para elevarse, para ello las palas de las hélices deben estar inclinadas. Lo que ocurre es que la hélice no solo va a generar una fuerza vertical, hacia arriba, sino que además se genera una fuerza horizontal que va a hacer que el dron rote sobre sí mismo. Para compensar este efecto se utilizan hélices contrarrotatorias, este es el motivo por el que un Dron dispone de dos hélices diferentes en cuanto a la dirección de las palas. De esta manera la fuerza horizontal que genera cada hélice se contrarresta con una hélice opuesta girando en el sentido contrario.

La diferencia no se encuentra únicamente en la hélice, sino que para rotar en sentido contrario se necesita también de motores que giren en dirección opuesta, en función de la hélice. Esta es la razón de disponer motores con giro horario y motores con giro anti horario, cada uno con su correspondiente hélice para contrarrestar el Efecto P.

### Ángulo de Ataque.

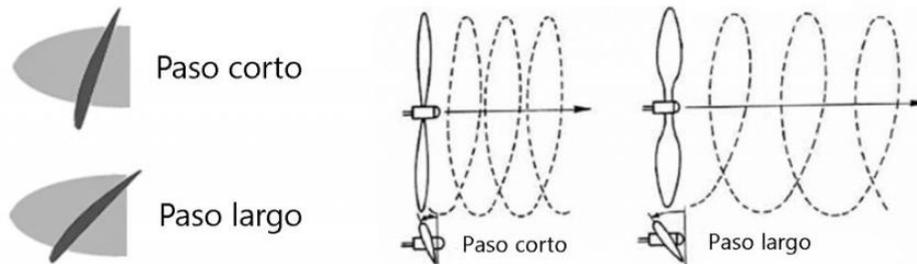
Hace referencia al ángulo entre la línea imaginaria que une los extremos de una pala (desde la parte superior a la inferior) y el viento relativo, es decir, aquel que proviene de la dirección en la que la pala de la hélice avanza.



## TRABAJO PRÁCTICO N°8. FUERZA DE EMPUJE EN DRONES

### **Paso de la hélice**

Es el ángulo que forman las palas de las hélices y su plano de giro (inclinación de las hélices).



El paso marca la distancia que avanzaría la hélice con un giro completo si pudiera avanzar. Las hélices de paso corto son apropiadas para vuelos lentos y estables, son de menor consumo de la batería. Las hélices de paso largo permiten vuelos rápidos y presentan un mayor consumo de la batería.

### **Medida de la Hélice**

Una hélice se caracteriza por dos números que indican diámetro y paso.

Una hélice de 5 x 4,5 significa que la hélice tiene 5 pulgadas de diámetro y 4,5 pulgadas de paso.

También puede venir indicada como “5045” para éstas mismas medidas.



Diámetro. Es la distancia de extremo a extremo de la hélice, expresada en **pulgadas**.

Paso. Es la distancia que avanzaría la hélice en un medio sólido con un giro completo expresado también en pulgadas.

Sentido de giro. Hélices de giro horario o giro anti horario.

Peso. El peso de las hélices indica el peso extra que se añade al dron con cada hélice, en función del tamaño y material de las hélices.

### **DETERMINACIÓN LA FUERZA DE EMPUJE Y CONSTANTE DEL SISTEMA.**

Los ensayos sobre el motor y hélice determinan dos graficas interesantes, la Relación *Empuje vs. Corriente de consumo*, y la relación *Empuje vs. Velocidad de giro*.

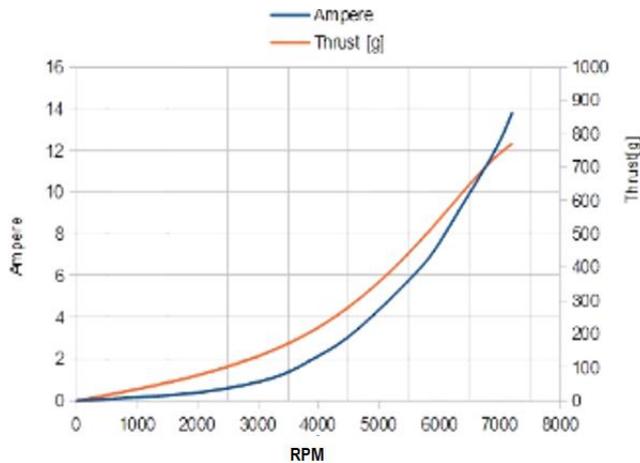
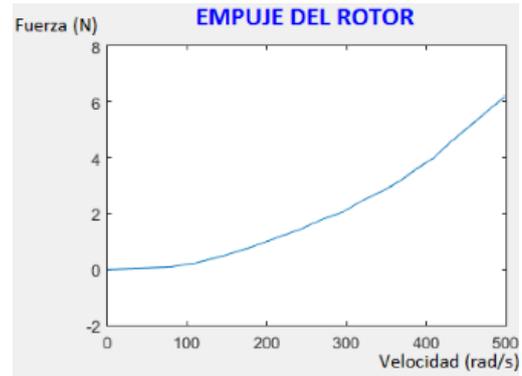
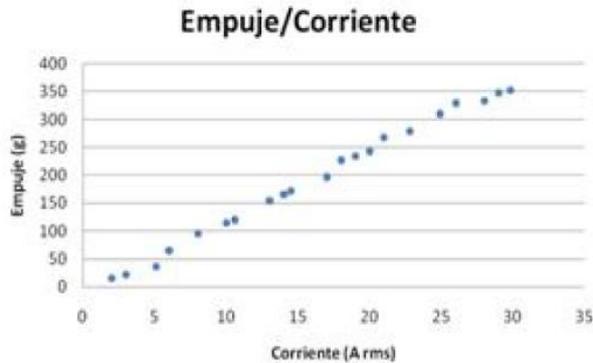
Cada una de estas gráficas sirve para caracterizar e identificar el conjunto motor-hélice

La relación *empuje vs corriente* sirve para determinar la capacidad y autonomía del motor.

La relación *Empuje vs. Velocidad de giro* sirve para determinar La Constante del conjunto motor-hélice. Un ejemplo de las gráficas:

*Empuje vs. Corriente de consumo*

*Empuje vs. Velocidad de giro*



### Identificación de la Constante y empuje de los motores

Según la señal de mando expresada por el PWM se obtienen diferentes velocidades de giro del conjunto motor-hélice y la fuerza de empuje. La relación entre la Fuerza de Empuje y la velocidad de giro determinan una Constante del conjunto motor-hélice.

En la determinación se observa un valor máximo (K empuje máx) y un valor mínimo (K empuje min) y un valor medio aproximadamente constante (K empuje)

La expresión es  $T = K \omega^2$

Donde

“T” es la Fuerza o empuje (N)

“K” es la Constante del conjunto motor-hélice

“W<sup>2</sup>” es la velocidad de giro del motor-hélice (rad/s)

$$K_t = \frac{T}{\omega^2}$$

### Conclusión

La Constante K o K<sub>t</sub> relaciona la fuerza de empuje del rotor con la velocidad de giro del motor. Significa que la Constante K relaciona un parámetro dinámico útil para determinar el empuje del rotor a diferentes velocidades del motor y para una determinada hélice.

**TRABAJO PRÁCTICO N°8. FUERZA DE EMPUJE EN DRONES**

➤ **DESARROLLO DEL TRABAJO PRACTICO**

**PROCEDIMIENTO**

**EJERCICIO 1. (Resuelto)**

El ensayo consta en activar el motor y controlar la velocidad de giro mediante el programa en Arduino (hardware y software) y un potenciómetro para dar la consigna variable PWM. Se mide Tensión, corriente, RPM y Fuerza de empuje sobre la balanza digital. Se ensaya un Motor tipo **A2212/13T de 1000RPM/V. Hélice 1045.**

La tabla muestra los resultados obtenidos de un ensayo

Motor A2212/13T de 1000RPM/V. Hélice 1045			
RPM	Amper	Volt (V)	Empuje (g)
1293	0.22	11.29	
2253	0.49	11.28	
3278	1.13	11.28	
3925	2.03	11.23	212
4569	3.24	11.19	
5459	5.67	11.12	
5924	7.23	11.05	
6364	9.3	10.97	620
6912	11.95	10.88	
7204	13.81	10.82	770

**a. Determinar:**

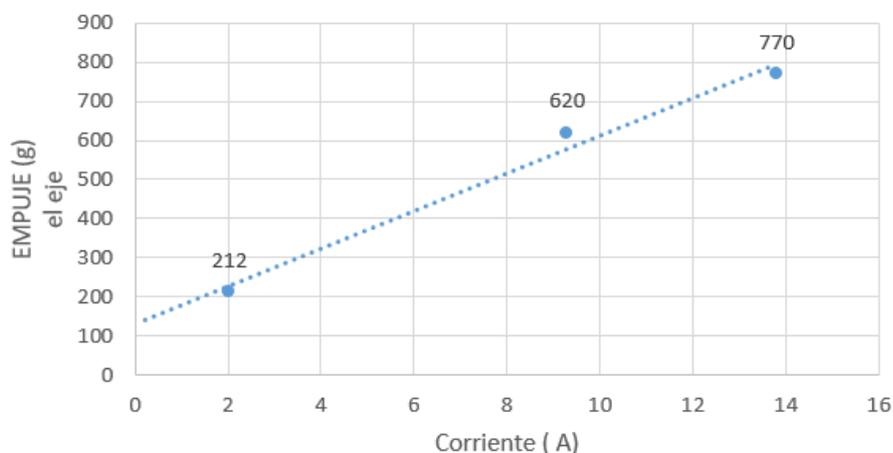
Con los valores medidos se determinan las gráficas.

1. Empuje vs. Corriente de consumo
2. Empuje vs. Velocidad

**b. Determinar** la Constante del rotor-hélice K empuje ( $K= E/(vel)^2$ )

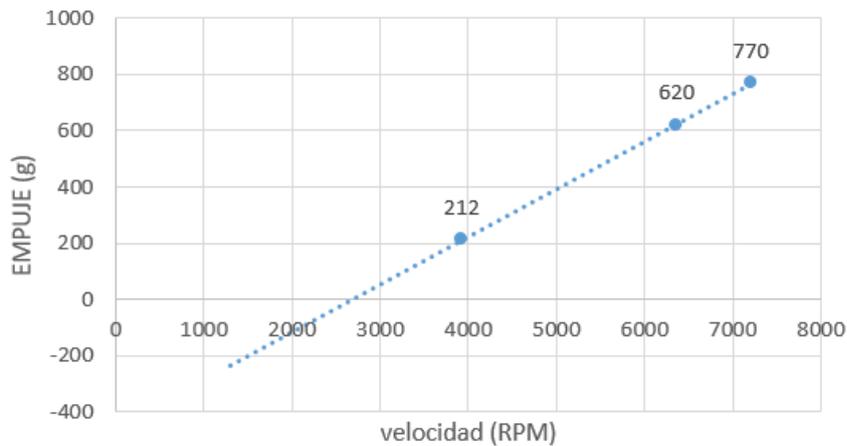
Motor **A2212/13T de 1000RPM/V. Hélice 1045**

**EMPUJE vs. CORRIENTE**



**TRABAJO PRÁCTICO N°8. FUERZA DE EMPUJE EN DRONES**

EMPUJE vs. VELOCIDAD



Kempuje (3925rpm)  $137 \times 10^{-6}$   
 Kempuje (6364rpm)  $153 \times 10^{-6}$   
 Kempuje (7204rpm)  $148 \times 10^{-6}$

(Nota. Los valores de K deberían aumentar y disminuir. Probablemente existan datos mal tomados en el ensayo.)

**EJERCICIO 2.**

Realizar el mismo ensayo utilizando el conjunto motor-hélice, Motor tipo **A2212/13T de 1000RPM/V. Hélice 9047**. Determinar las K empuje ( $K= E/(\text{vel})^2$ )

La tabla muestra los resultados obtenidos de un ensayo

**Motor A2212/13T de 1000RPM/V. Hélice 9047**

RPM	Amper	Volt (V)	Empuje (g)
1250	0.21	11.29	
2260	0.51	11.28	
3310	1.2	11.28	
3950	2.1	11.23	204
4600	3.45	11.19	
5500	5.8	11.12	
5900	7.44	11.05	
6350	9.48	10.97	534
6890	12.2	10.88	
7500	14.1	10.82	650

a. **Determinar:**

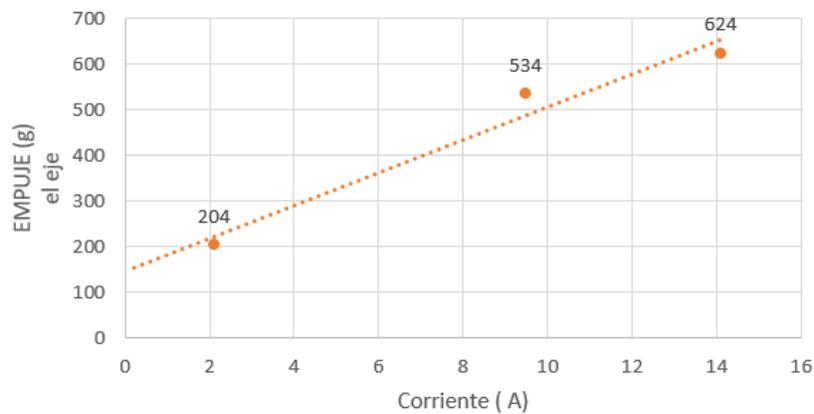
Con los valores medidos se determinan las gráficas.

1. Empuje vs. Corriente de consumo
2. Empuje vs. Velocidad

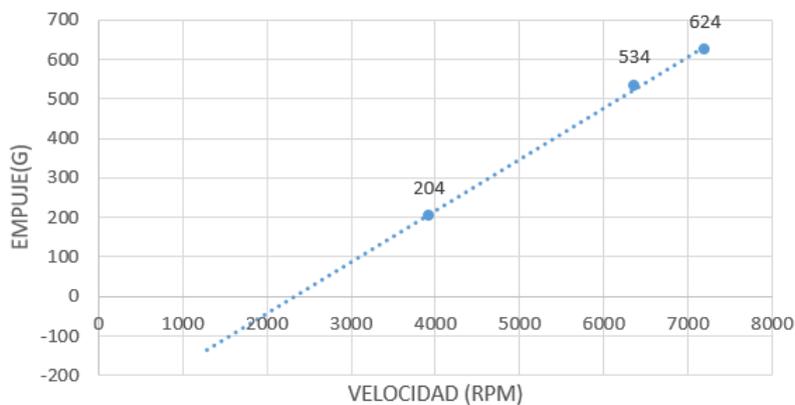
b. **Determinar** la Constante del rotor-hélice K empuje ( $K= E/(\text{vel})^2$ )

TRABAJO PRÁCTICO N°8. FUERZA DE EMPUJE EN DRONES

EMPUJE vs. CORRIENTE. Hélice 9047



EMPUJE vs. VELOCIDAD (Hélice 9047)



**EJERCICIO 3.**

Realice una comparación de los ejercicios 1 y 2.

- A- Determine cuál es la mejor hélice.
- B- Exprese una conclusión.