

# Tema 3: Introducción a la Aerodinámica y la Mecánica de vuelo



Andreu Carbó Molina

Doctor en Ingeniería

[andreu.carbo@urjc.es](mailto:andreu.carbo@urjc.es)



# Introducción a la Aerodinámica y la Mecánica de vuelo

## 1. Aerodinámica (2 h)

- Principios básicos
  - ¿Por qué vuelan los aviones?
  - Fuerzas en perfiles aerodinámicos



Foto: G. van der Schaaf

## 2. Aeronaves de Ala Fija (2h)

- Aerodinámica de las aeronaves de ala fija (1h)
- Controles y actuaciones (1h)

## 3. Aeronaves de Ala Rotatoria (2h)

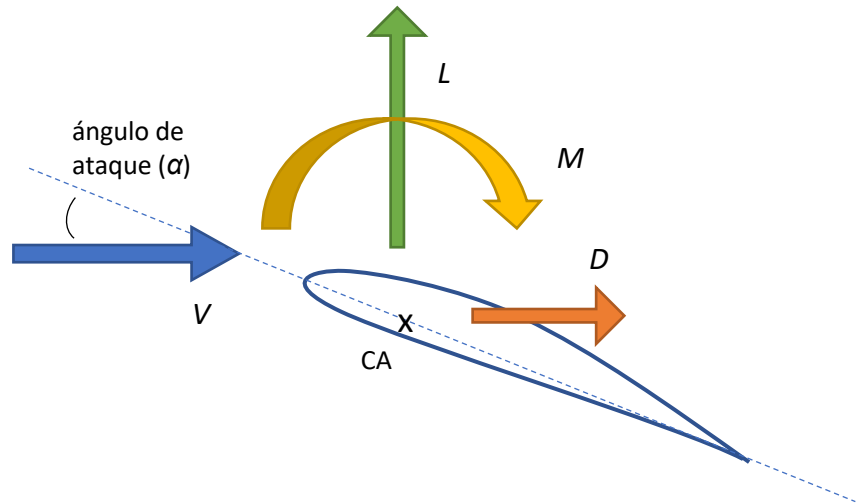
- Aerodinámica de las aeronaves de ala rotatoria (1h)
- Controles y actuaciones (1h)



Foto: Darz Mol

# Fuerzas aerodinámicas en el helicóptero

## Fuerzas en el ala (pala)

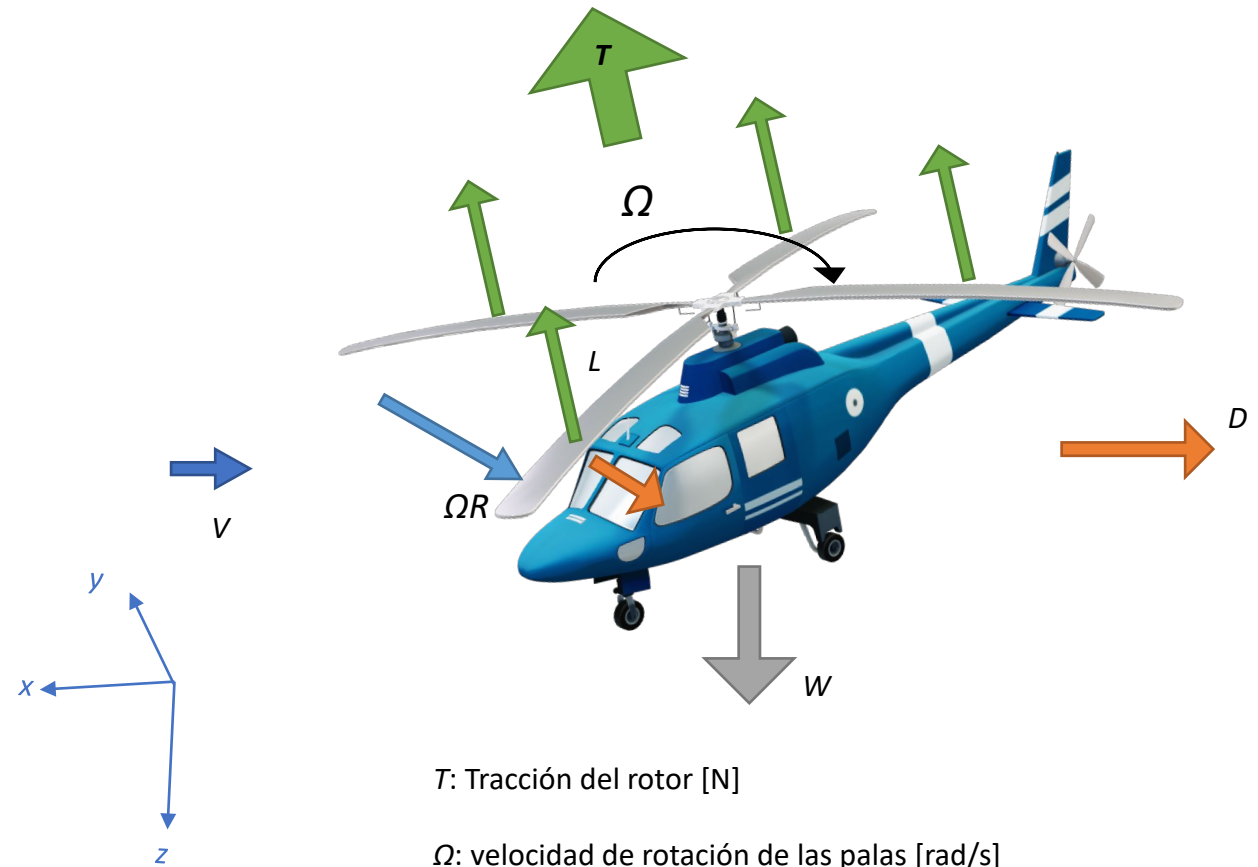


$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho S V^2}$$

$$D = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_D$$

$$C_{MCA} = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho S V^2 c}$$

## Fuerzas aerodinámicas en el helicóptero (ejes viento)



$T$ : Tracción del rotor [N]

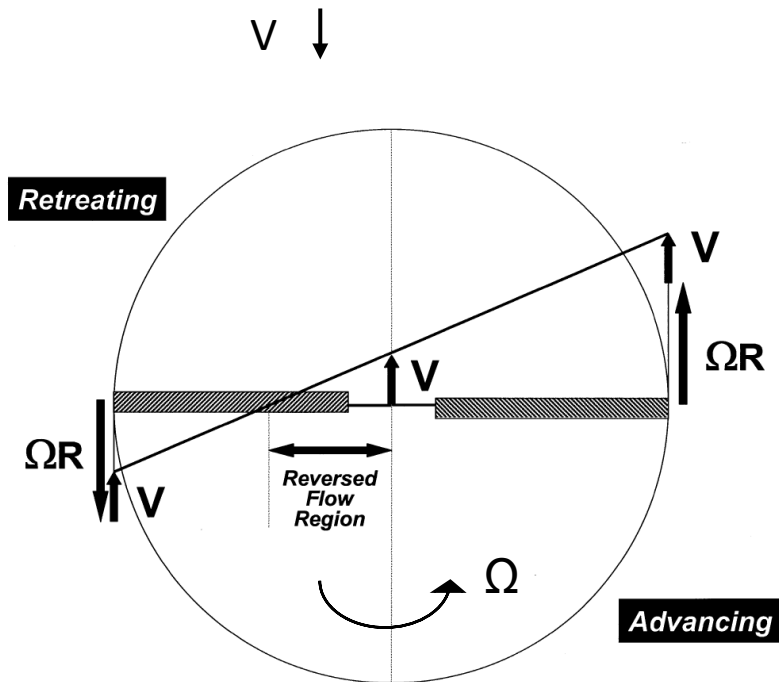
$\Omega$ : velocidad de rotación de las palas [rad/s]

$R$ : radio del rotor [m]

# Fuerzas aerodinámicas en el helicóptero

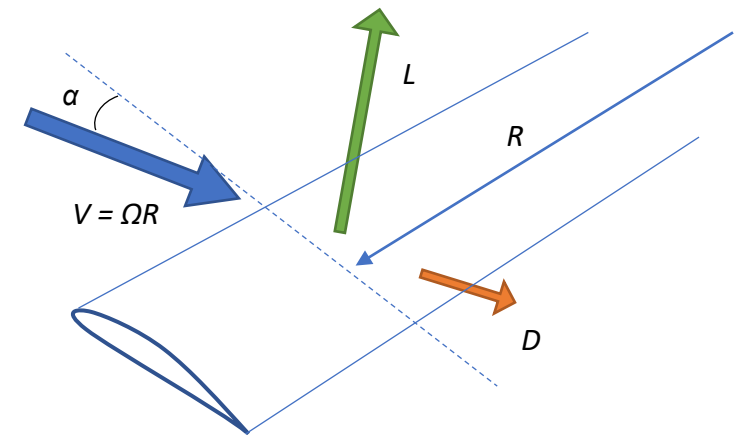
## Vuelo en avance

La velocidad incidente ( $V$ ) de la pala depende de si ésta avanza en el sentido del vuelo o si va en el contrario.



## Vuelo a punto fijo (*hover*)

La velocidad incidente ( $V$ ) de la pala sólo depende de la velocidad de rotación ( $\Omega$ ) y del radio del rotor ( $R$ ).



Robinson R44 *hovering* a cámara lenta.  
<http://www.slow-motion.ca>



$$T = L \cdot b$$

$b$ : número de palas

# La importancia del rotor de cola

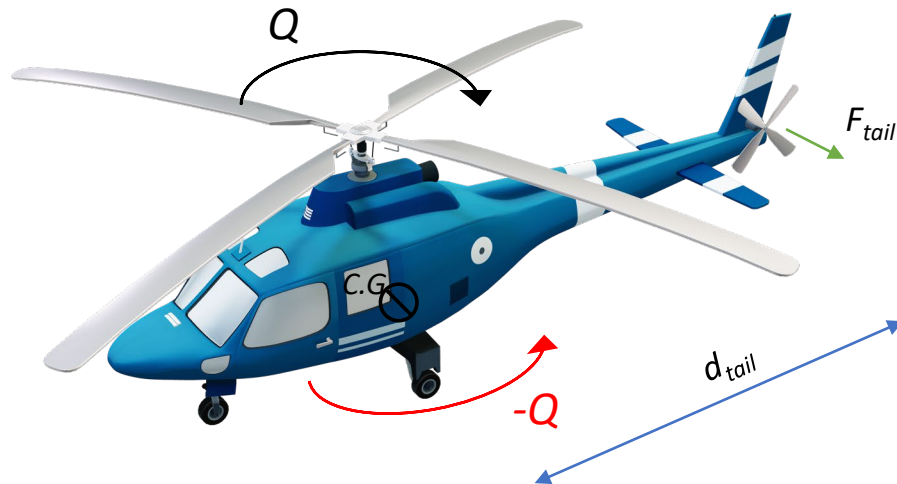


Isaac Newton [Wikipedia]

## Tercera ley de Newton o principio de acción y reacción:

Con toda acción ocurre siempre una reacción igual y contraria: quiere decir que las acciones mutuas de dos cuerpos siempre son iguales y dirigidas en sentido opuesto.

$Q$  = par motor (*torque*) transmitido por el motor para mover las palas produce un momento de rotación en el fuselaje. Se necesita rotor de cola para que el helicóptero no gire sin control.

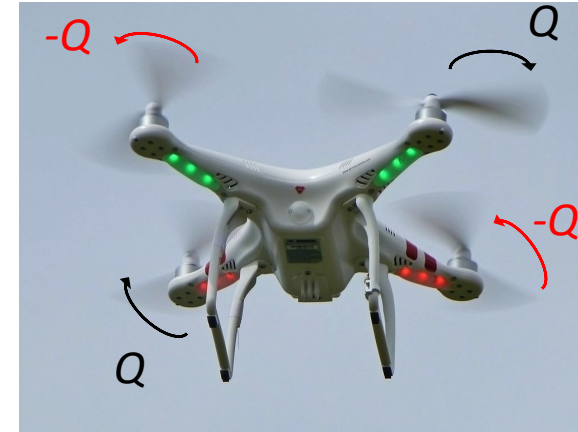


"Fatal Loss of Tail Rotor Effectiveness, Collision" del canal de Youtube "What you haven't seen".

## Otras configuraciones



Boeing CH-47: Birrotor tándem



DJI phantom 1: cuatrirrotor

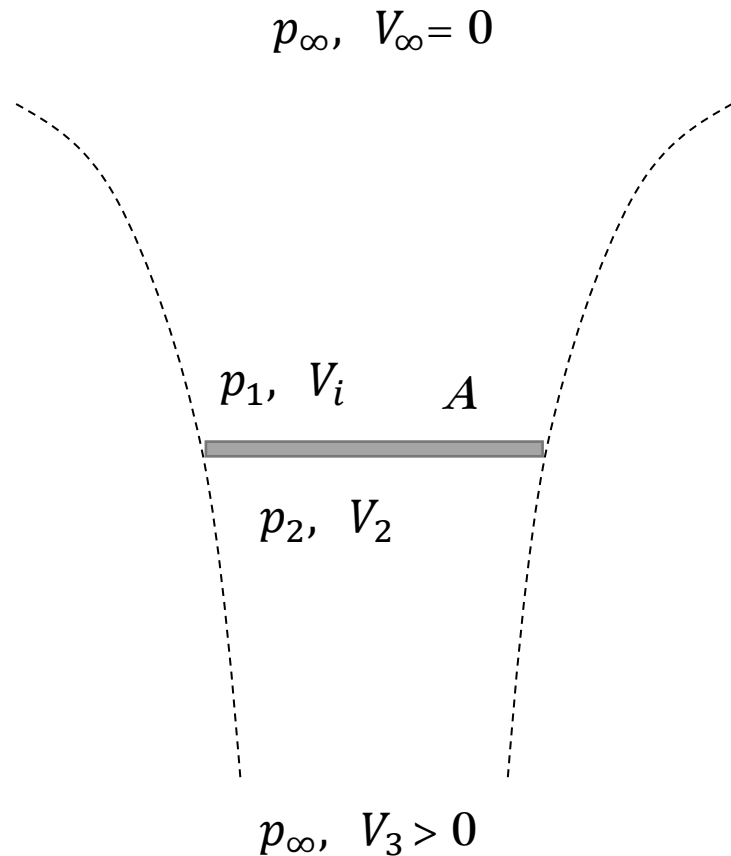


Kamov Ka-226 : Birrotor coaxial



¿Multirrotores?

## Cálculo de la potencia (*hover*)

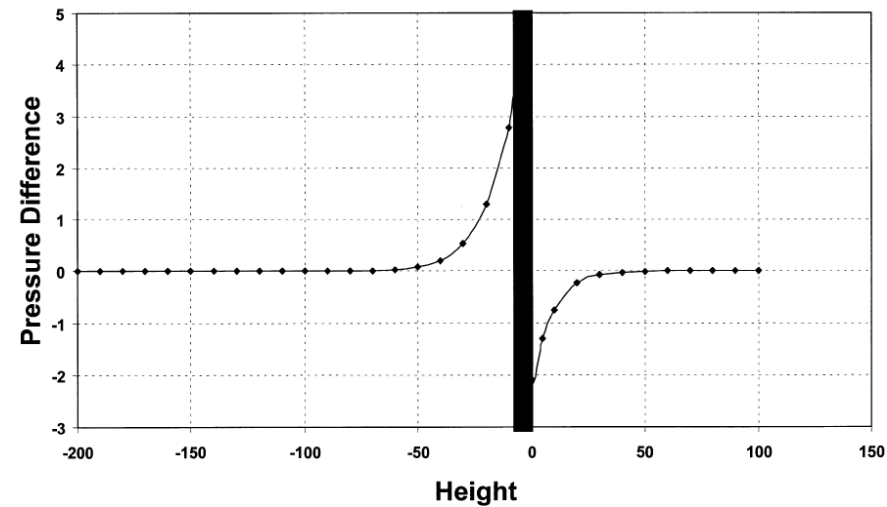
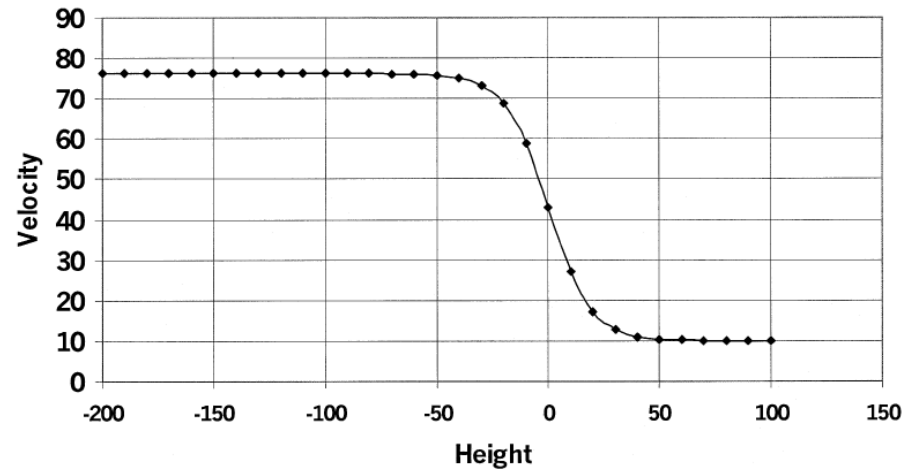
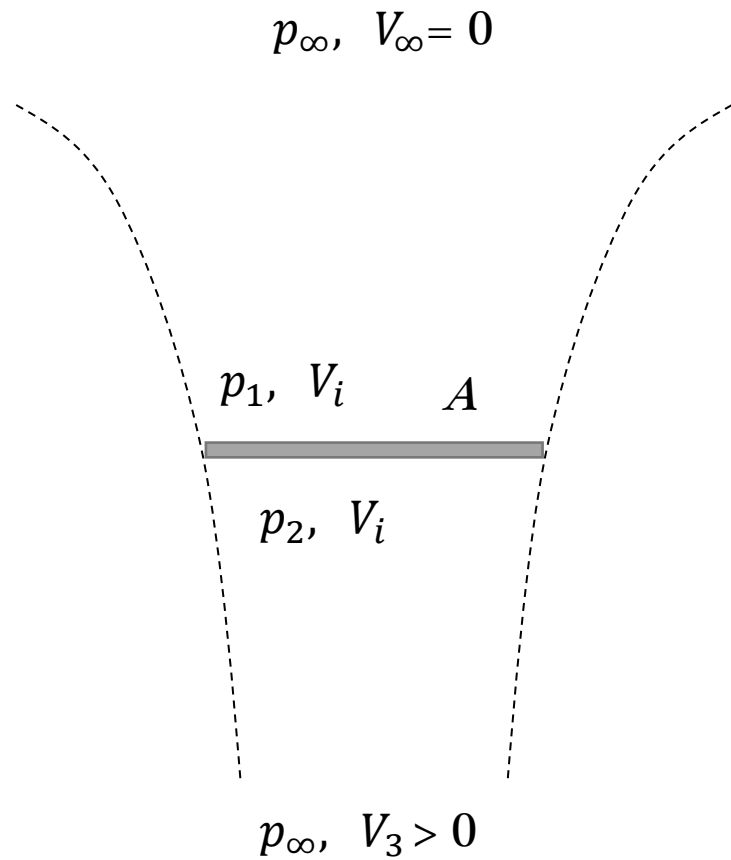


### Teoría del Disco Actuador:

- El aire es fluido ideal
- Sustituimos el rotor por un disco poroso de área  $A$ .
- Corriente afectada por el disco está delimitada por un tubo de corriente.
- Movimiento del fluido en el tubo de corriente se considera adimensional.
- Se desprecian efectos de rotación de estala y efectos de punta de pala.



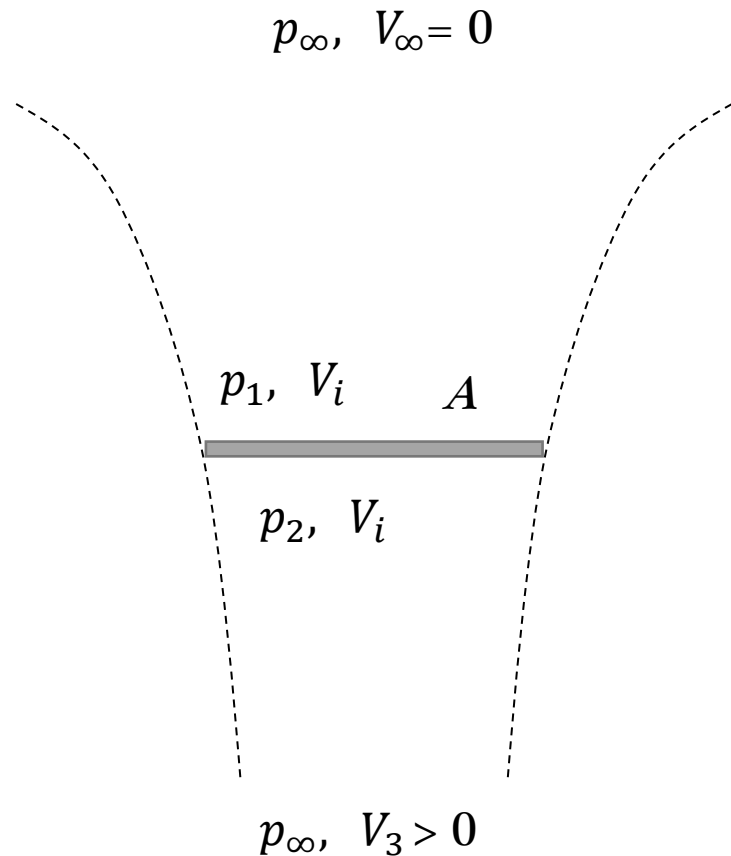
# Cálculo de la potencia (*hover*)



Conceptos de la TDA  
J. Sheddon, 2002.



## Cálculo de la potencia (*hover*)



### Leyes de conservación:

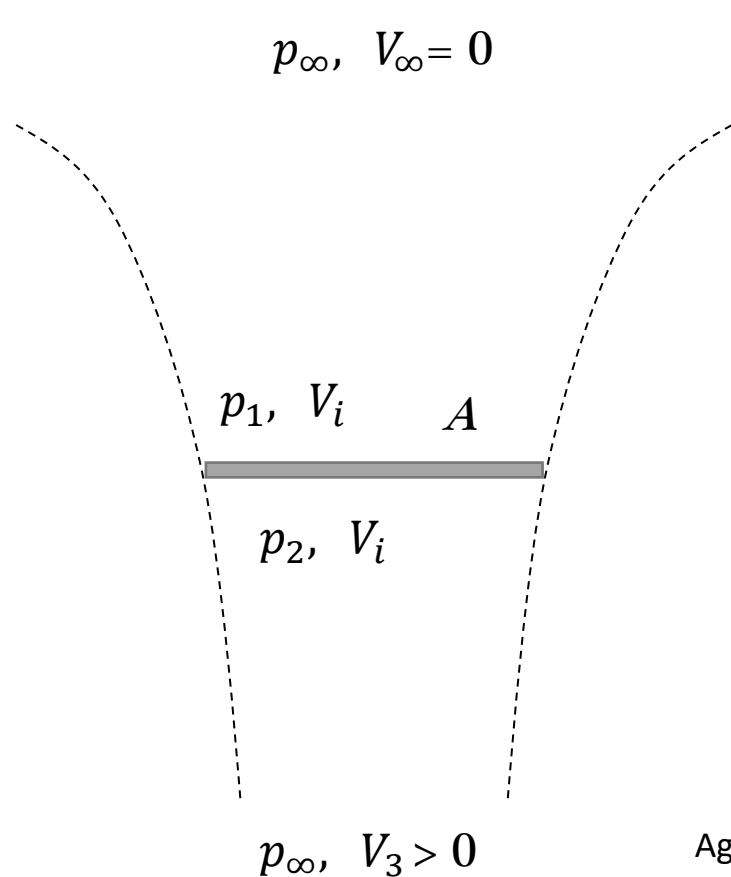
- Conservación de masa:

$$\rho VA = \text{ct.}$$

- Conservación de momento -> **Bernoulli**:

$$p + \frac{1}{2}\rho V^2 = \text{ct.}$$

# Cálculo de la potencia (*hover*)



Potencia inducida

$$P_i = T \cdot V_i$$

Tracción rotor (diferencia de presión x superficie)

$$T = (p_2 - p_1) \cdot A$$

Bernoulli en líneas de corriente

 $\infty \rightarrow 1,$   
 $2 \rightarrow 3$ 

$$\begin{cases} p_\infty = p_1 + \frac{1}{2} \rho V_i^2 \\ p_2 + \frac{1}{2} \rho V_i^2 = p_\infty + \frac{1}{2} \rho V_3^2 \end{cases}$$

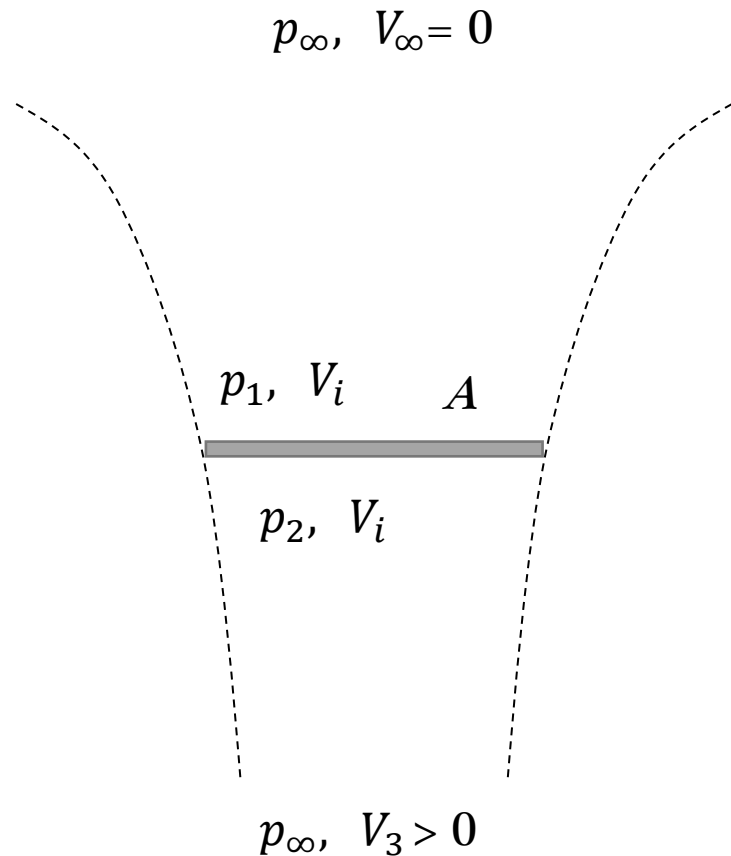
Aislamos  $p_\infty$ 

$$p_1 + \cancel{\frac{1}{2} \rho V_i^2} = p_2 + \cancel{\frac{1}{2} \rho V_i^2} - \frac{1}{2} \rho V_3^2$$

Agrupamos presiones

$$p_2 - p_1 = \frac{1}{2} \rho V_3^2 = \frac{T}{A}$$

# Cálculo de la potencia (*hover*)



De antes

$$T = \rho A \frac{V_3^2}{2}$$



Segunda ley de Newton:

El cambio en la **cantidad de movimiento** es directamente proporcional a la fuerza motriz impresa y ocurre según la línea recta a lo largo de la cual aquella fuerza se imprime.

Aplicando la conservación de momento a todo el conjunto

$$T = \dot{m}(V_3 - V_{\infty}) = \rho A V_i \cdot V_3$$

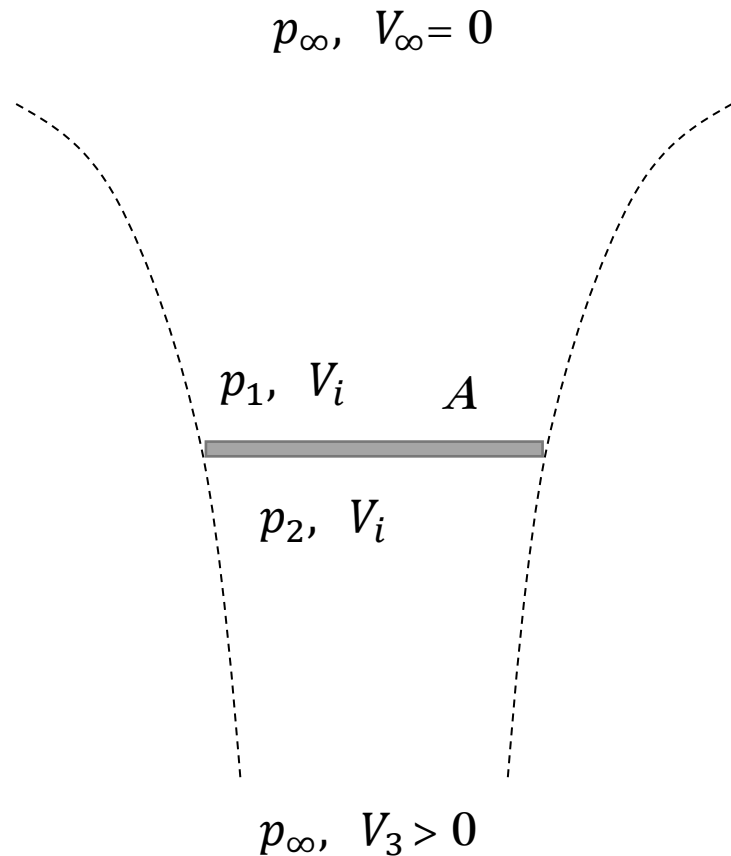
flujo másico:  $\dot{m} = \rho A V_i$

$$\rho A \frac{V_3^2}{2} = \rho A V_i \cdot V_3$$



$$2V_i = V_3$$

$$T = 2\rho A V_i^2$$

Cálculo de la potencia (*hover*)

$$V_i = \sqrt{\frac{W}{2\rho A}}$$

$$P_i = T \cdot V_i = \sqrt{\frac{W^3}{2\rho A}}$$

**Estimaciones**

+ 10 % rotor de cola

+ 5 % fuselaje

+ 10 % resistencia en las palas

$$\longrightarrow P_{motor} = P_i \cdot 1,25$$

# Controles del helicóptero



- **Pedales:** controlan el rotor de cola
- **Colectivo:** aumenta/disminuye el ángulo de las palas todas a la vez.
- **Cíclico:** aumenta el ángulo de ataque de sólo un lado del rotor para dirigirlo.

Al aumentar el ángulo de ataque de las palas, aumenta su sustentación, y por tanto la fuerza de tracción del rotor ( $T$ ).

¿Cómo vuela un helicóptero? Animación del canal "Smithsonian National Air and Space Museum", [www.youtube.com](http://www.youtube.com)

## Ejercicio 5

- Calcular la velocidad inducida y la potencia necesaria para el vuelo a punto fijo de un Robinson R66 con peso máximo al despegue, a una altitud de 1000ft en condiciones ISA:



$$V_i = \sqrt{\frac{W}{2\rho A}}$$

$$P_i = T \cdot V_i = \sqrt{\frac{W^3}{2\rho A}}$$

- $W$ : Peso del aeronave (N)
- $\rho$ : Densidad (Kg/m<sup>3</sup>)
- $A$ : Área del rotor (m<sup>2</sup>)

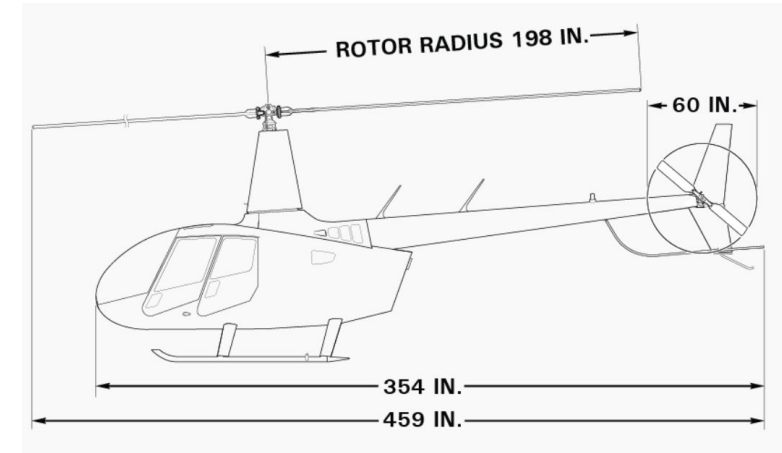
## Ejercicio 5

- Peso del aeronave (N): MTOW
- Área del rotor ( $m^2$ )

Web del fabricante <https://robinsonheli.com>

## Specifications &amp; Dimensions

Helicopter	R66 Turbine
Engine	Rolls Royce RR300 Turbine
Horsepower	300 shp turboshaft; derated to 270 shp for takeoff and 224 shp continuous
Maximum Gross Weight	2700 lb (1225 kg)
Approximate Empty Weight (including oil & standard avionics)	1280 lb (581 kg)
Fuel Capacity (73.6 gal)	493 lb (224 kg)
Pilot, Passengers, and Baggage (with maximum fuel)	927 lb (420 kg)
Cruise Speed at Maximum Gross Weight	up to 110 kts (204 km/h)
Maximum Range (no reserve)	approximately 350 nm (650 km)



$$R = 198 \text{ in} \cdot \frac{2,54 \text{ cm}}{1 \text{ in}} = 502,9 \text{ cm} = 5,03 \text{ m}$$

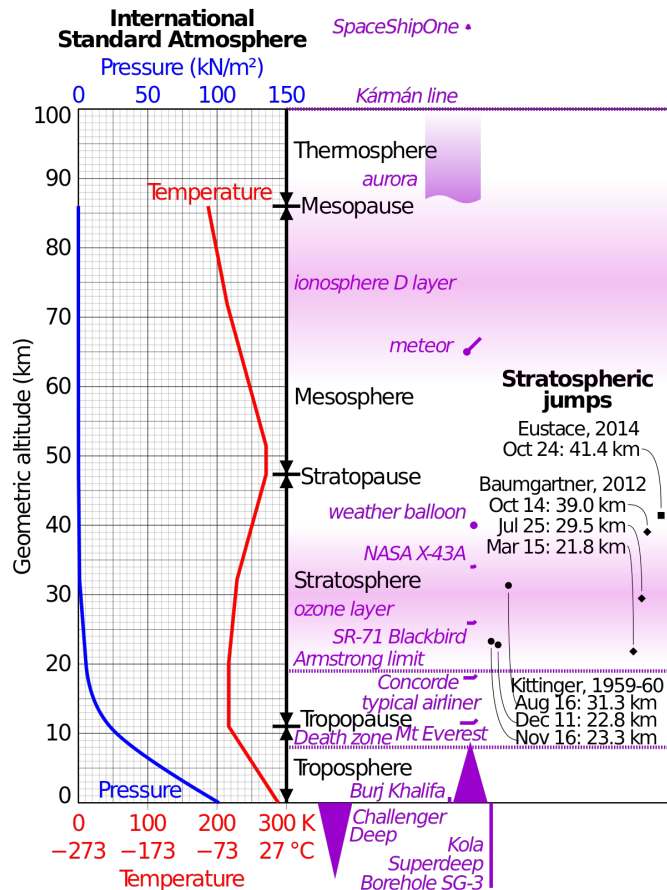
$$A = \pi R^2 = 79,5 \text{ m}^2$$

$$W = m \cdot g = 1225 \text{ Kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 12017,3 \text{ N}$$



## Ejercicio 5

- Densidad ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ ): ISA 1000 ft (304,8 m)

Troposfera

$$T = T_0 - 6,5 \frac{h}{1000}$$

$$p = p_0 \left( 1 - 0,0065 \frac{h}{T_0} \right)^{5,2561}$$

$$\rho = \frac{p}{RT}$$

$$p_0 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$T_0 = 288,15 \text{ K}$$

$$\rho_0 = 1,225 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$R = 287 \frac{\text{J}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}$$

Table 3 International Standard Atmosphere [2]

ALTITUDE (Feet)	TEMP. ( $^{\circ}\text{C}$ )	PRESSURE			PRESSURE RATIO $\delta = p/p_0$	DENSITY $\sigma = \rho/\rho_0$	Speed of sound (kt)	ALTITUDE (meters)
		hPa	PSI	In.Hg				
3 000	+ 9.1	908	13.17	26.82	0.8952	0.9151	654	914
2 000	+ 11.0	942	13.67	27.82	0.9298	0.9428	656	610
1 000	+ 13.0	977	14.17	28.86	0.9644	0.9711	659	305
0	+ 15.0	1013	14.70	29.92	1.0000	1.0000	661	0
- 1 000	+ 17.0	1050	15.23	31.02	1.0366	1.0295	664	- 305

Archivo "The International Standard Atmosphere" de M. Cavcar

$$\rho = \rho_0 \sigma = 1,225 \text{ Kg} / \text{m}^3 \cdot 0,9711 = 1,189 \text{ Kg} / \text{m}^3$$

## Ejercicio 5

$$V_i = \sqrt{\frac{W}{2\rho A}} = \sqrt{\frac{12017}{2 \cdot 1,189 \cdot 79,5}} = 7,97 \text{ m/s}$$

$$P_i = T \cdot V_i = \sqrt{\frac{W^3}{2\rho A}} = \sqrt{\frac{12017^3}{2 \cdot 1,189 \cdot 79,5}} = 9,58 \cdot 10^4 \text{ W} = 95,8 \text{ kW}$$

**Estimaciones**

- + 10 % rotor de cola
- + 5 % fuselaje
- + 10 % resistencia en las palas



$$P_{motor} = P_i \cdot 1,25 = 119,75 \text{ kW}$$

**Specifications & Dimensions**

Helicopter	R66 Turbine
Engine	Rolls Royce RR300 Turbine
Horsepower	300 shp turboshaft; derated to 270 shp for takeoff and 224 shp continuous

Web del fabricante <https://robinsonheli.com>

$$\text{Max } P_{motor} = 224 \text{ shp} = 167 \text{ kW}$$

(La potencia necesaria en *hover* es el 71,7 % de la máxima)

## ¿Qué pasa si tenemos $N$ rotores?



Calculamos velocidad inducida y potencia ideal para un solo rotor:

$$V_i = \sqrt{\frac{W/N}{2\rho A}}$$

$$P_i = T \cdot V_i = \sqrt{\frac{(W/N)^3}{2\rho A}}$$



### Estimaciones

~~+ 10 % rotor de cola~~

+ 5 % fuselaje

+ 10 % resistencia en las palas

$$\longrightarrow P_{motor} = N \cdot P_i \cdot 1,15$$

## Problema 2 Tema 3

Dentro del **20 %** de la nota de problemas *Cp*.

**Elegir un helicóptero.** A partir de la búsqueda de información, definir:

- Peso máximo de la aeronave (MTOW).
- Área del rotor principal (o de los rotores principales).
- Potencia máxima del motor.

Para **un vuelo a punto fijo a 1500 m de altitud** (condiciones ISA), calcular:

1. Velocidad inducida por el rotor principal.
2. Potencia que el motor tiene que proporcionar a los rotores para mantener el vuelo.
3. Porcentaje de la potencia máxima del motor que esto constituye.

Trabajo **individual**, importante clarificar cálculos y fuentes de información.

Entrega en .pdf vía Aula Virtual. Fecha límite **viernes 3 de noviembre a las 23:59**.

