



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID

TRABAJO FIN DE GRADO
GRADO EN INGENIERIA AEROESPACIAL

Diseño Preliminar de una Aeronave de Ala Rotatoria

Autor

Jaime Jiménez González

Tutor

Álvaro Cuerva Tejero

Departamento de Aeronaves y Vehículos Espaciales



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
AERONÁUTICA Y DEL ESPACIO

Madrid, Junio de 2019

Agradecimientos

Se acaba una época, una época dura, con mejores y peores momentos, de los cuales solo lo buenos quedarán en el recuerdo.

Aquí quiero agradecerle a todos aquellos que han estado a mi lado su incansable labor de hacerme el camino más fácil, empezando por mi familia, que ha estado ahí en todo momento aportando toda la tranquilidad posible y el apoyo que solo ellos saben dar.

También he de agradecer a mis amigos todas las risas y horas de trabajo compartidas, por compartir penas y alegrías que me han ayudado a llegar aquí, tanto a la gente que he conocido nueva, como a la que lleva conmigo desde antes, tanto en la Escuela como fuera de ella.

Por último dar las gracias a mi pareja, por haber estado a mi lado en todo momento ayudándome con esta carga hasta cuando parecía inaguantable. Nunca me ha fallado y siempre me ha ayudado a levantarme.

Gracias a todos por haberme acompañado y por hacer de esto una realidad.

Capítulo 1

Introducción

Como bien es sabido, el desarrollo de una nueva aeronave partiendo de 0 es un trabajo tremendamente complejo que supondría en la industria unos costes desmesurados. Por ello, en este Trabajo de Fin de Grado se plasmará el desarrollo de un diseño preliminar empleando para ello un análisis de vehículos semejantes ya existentes.

La aeronave a desarrollar será un UAV de un MTOW de 450kg de peso, por lo que será fundamental desarrollar una pequeña base de datos de aeronaves similares para poder obtener un primer diseño. En este capítulo se tratarán, además de los objetivos del trabajo, las bases de la mecánica de vuelo de las aeronaves de ala rotatoria de forma sencilla.

1.1. Objetivos del Trabajo

El objetivo principal de este trabajo es generar un diseño preliminar de una aeronave no tripulada de ala rotatoria de un peso máximo al despegue de 450kg. Este diseño, realizado mediante un estudio de aeronaves similares, será después validado por un análisis de sus actuaciones a partir del equilibrado de la misma. Es justo aquí donde se verá reflejada la originalidad del trabajo, a la hora de elegir las actuaciones a analizar.

La validación se llevará a cabo además de forma paralela a una optimización de características de la aeronave, como pueda ser el alcance o la autonomía, en función de otros parámetros de la misma.

Es importante también definir la misión de la aeronave a diseñar, ya que en función de esta optimizaremos unos parámetros u otros y exigiremos unos mínimos a las actuaciones de la misma.

1.2. Uso de las Aeronaves no Tripuladas

Las aeronaves no tripuladas (**UAV Unmanned Aerial Vehicle**) están fuertemente ligadas a la aviación militar, siendo esta industria la responsable principal de su desarrollo a lo largo de su historia. Aunque anteriormente se dieron casos de UAVs, como son los globos con los que el ejército austríaco bombardeó Venecia en 1849, las primeras aeronaves no tripuladas como las conocemos hoy se desarrollaron durante la Primera Guerra Mundial por parte de los Estados Unidos.

A día de hoy, y aunque el desarrollo de la tecnología ha sido gracias a la industria militar, más concretamente a la industria militar de Estados Unidos, su uso se ha extendido más allá de esta. Ya no se trata de instrumentos de guerra ni de un artículo de lujo, sino que existen una gran variedad de aeronaves que cumplen distintas funciones fuera de la aviación militar, sino como parte de la aviación comercial civil (como puedan ser las aeronaves radio control cuyo mando puede ser un *smartphone* personal).

Algunos de estos usos son los siguientes:

- Fotografía y grabación aérea, tanto profesional como recreativa.
- Control de daños en zonas afectadas por desastres.
- Transporte de mercancías.
- Seguimiento y predicción de fenómenos atmosféricos (tornados, tormentas, etc.)
- Control y patrulla de fronteras
- Inspecciones en zonas de difícil acceso (o imposible).
- Entretenimiento

Por otro lado siguen creciendo los usos militares;

- Combate aéreo
- Supervisión y control
- Balizas de objetivos

Estos son solo algunos de los usos de los UAVs, pero la lista crece continuamente.

Pese al fuerte desarrollo civil, el principal gasto mundial en aeronaves no tripuladas viene del sector militar, motivado también por el gasto que conllevan los programas militares y los costes de las aeronaves (en 2011, el coste del programa MQ-1 *Predator* era de 2,38 mil millones de dólares [DAF, 2011], mientras que el coste de una unidad del mismo se sitúa en 4,03 millones de dólares [USSOCOM, 2011]). Se espera un gasto global de 70 mil millones de dólares en aeronaves no tripuladas para 2020 [Sachs, 2016]

Sin embargo, el sector cuyo crecimiento se espera sea mayor es el civil. Según datos de BI Intelligence, se espera un crecimiento del 19 % en el mercado civil frente a un 5 % en el militar para el período 20015-2020. Esto se debe principalmente al incremento en la variedad de operaciones que los UAVs son capaces de realizar y a su implementación en las empresas. Debido a este crecimiento, se espera también la creación de 100.000 puestos de trabajo solo en Estados Unidos para 2025 [AUVSI, 2013].

1.3. Mecánica del Vuelo de un Helicóptero

A modo de introducción para el lector, se hará un resumen breve de la mecánica del vuelo de un helicóptero. Si se desea profundizar en el tema o resolver cualquier duda que pudiese surgir durante la lectura, se recomienda acudir a Cuerva et al. [2013] donde se desarrolla de forma mas exhaustiva y completa.

1.3.1. Sistemas de referencia

En la física es muy importante definir correctamente los sistemas de referencia que se emplean en la resolución de cada problema ya que las variables tendrán una forma u otra en función de en cual se definan. En el caso de un helicóptero, los sistemas de referencia principales son 4, a saber:

- Ejes tierra $[O_T; x_T, y_T, z_T]$
- Ejes cuerpo $[O; x, y, z]$
- Ejes árbol $[A; x_A, y_A, z_A]$
- Ejes pala $[E; x_b, y_b, z_b]$

El sistema de ejes tierra es aquel con origen $[O_T]$ en la superficie terrestre, z_T apuntando en la dirección de la gravedad y x_T e y_T pertenecientes al plano tangente a la superficie terrestre y formando un triedro a derechas. En este sistema, la posición del helicóptero queda definida por \mathbf{r}^O , siendo este el vector posición del centro de masas del helicóptero respecto al punto de referencia O_T .

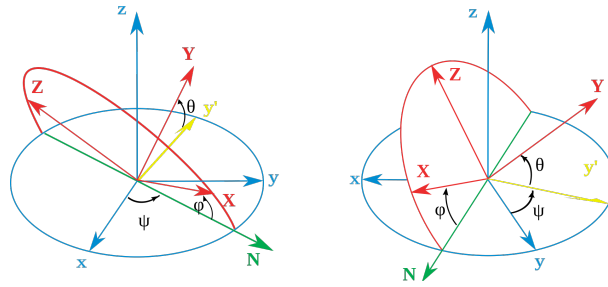


Figura 1.1: Representación de los ángulos de Euler, Guiñada, Cabeceo y Balanceo

El sistema de ejes cuerpo se define como el triedro a derechas con origen O en el centro de masas de la aeronave y x y z en el plano central, con x dirigido hacia adelante y z hacia abajo en una condición de vuelo normal. La importancia de este sistema radica en los ángulos de Euler, que son los ángulos que forman sus ejes con los ejes tierra, siendo estos:

- Guiñada Ψ
- Cabeceo Θ
- Balanceo Φ

Estos ángulos se pueden definir como el giro del sistema de ejes cuerpo respecto al de ejes tierra, partiendo de una condición de paralelismo entre ambos, respecto a los ejes z , y y x respectivamente. Para facilitar la comprensión del lector se ha añadido el esquema 1.1 que representan dichos ángulos.

El sistema de ejes árbol tiene su centro A en la intersección del eje del rotor con el plano del rotor y sus ejes forman un triedro a derechas orientándose z_A hacia el lado opuesto al fuselaje y x hacia la parte trasera del helicóptero, perteneciendo al plano del rotor.

Por último, el sistema de ejes pala tiene su origen E en la articulación de la pala. La dirección de x_b es radial hacia la punta de la pala y la de y_b es normal a ella, siendo z_b tal que el triedro $[x_b, y_b, z_b]$ sea a derechas.

Se puede apreciar que de estos 4 sistemas, los mas relevantes para el estudio serán los de ejes tierra y cuerpo, que sirven para describir la mecánica del vuelo de la aeronave, mientras que los ejes árbol y pala se reservan para el estudio aislado de la física del rotor y de las palas.

Una vez definidos los sistemas de referencias se pueden empezar a plantear las ecuaciones.

1.3.2. Ecuaciones del movimiento

Las primeras ecuaciones a considerar son las de fuerzas y momentos, siendo estas:

$$\mathbf{F}^{ex} + M\mathbf{g} = \frac{d(M\mathbf{V})}{dt} = M \left(\frac{d\mathbf{V}}{dt} \right)_C + M(\boldsymbol{\omega} \wedge \mathbf{V}) \quad (1.1)$$

$$\mathbf{M}^{ex} = \frac{d([\mathbf{I}]\boldsymbol{\omega})}{dt} = [\mathbf{I}] \left(\frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} \right)_C + \boldsymbol{\omega} \wedge [\mathbf{I}]\boldsymbol{\omega} \quad (1.2)$$

Donde $\mathbf{V}(t)$ es una velocidad de vuelo cualquiera y $\boldsymbol{\omega}(t)$ la velocidad de giro de los ejes cuerpo respecto a los ejes tierra con \mathbf{F}^{ex} y \mathbf{M}^{ex} las fuerzas y momentos externos que actúan sobre el centro de gravedad del helicóptero, $[\mathbf{I}]$ el tensor de inercia del vehículo, M su masa y \mathbf{g} el vector aceleración de la gravedad. El subíndice C indica derivadas en ejes cuerpo, tal y como aparece en [Cuerva et al. \[2013\]](#).

en equilibrio, es decir, aquel en el que la resultante de fuerzas y momentos externos al mismo es nula. Esto simplifica enormemente los cálculos

1.4. HEROES

Para el cálculo de las actuaciones de la aeronave se empleará *HEROES*. *HEROES* es una herramienta de MATLAB desarrollada en conjunto por profesores y alumnos de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeronáutica y del Espacio de la Universidad Politécnica de Madrid, principalmente del departamento de Aeronaves y Vehículos Espaciales.

Esta herramienta permite un cálculo rápido del equilibrado de un helicóptero (entre otras muchas funciones). Es muy importante saber distinguir en esta herramienta cuáles son las variables de entrada del problema y las de salida. Esto que en primera instancia puede parecer sencillo, requiere un nivel de comprensión alto de la mecánica del vuelo de un helicóptero.

Para el caso del equilibrado, las variables de entrada principales serán el modelo de atmósfera y la altura, el modelo del vehículo y las condiciones de vuelo del mismo. *HEROES*, con los datos aportados, generará un modelo adimensional y resolverá las ecuaciones del equilibrado para después dimensionalizar los resultados. Estos resultados son las variables de salida, y entre muchas otras se encuentran las potencias de los rotores, las fuerzas y momentos aerodinámicos y los controles del helicóptero.

1.5. Descripción del Proyecto

Esto deja claro las características necesarias para la aeronave;

- Una carga de pago máxima lo más alta posible, de manera que resulte eficiente y no sean necesarios múltiples vuelos diarios para un mismo despliegue salvo casos excepcionales.
- Una velocidad de crucero buena, de manera que el tiempo que la aeronave esta en vuelo sea el mínimo posible, para evitar así la intercepción. Además también servirá para transportar suministros médicos en caso de emergencia.
- Un alcance de unos 400 Km, de manera que pueda abastecer a distancias de alrededor de 200 Km. Es importante que la aeronave pueda realizar el trayecto de ida y vuelta sin repostar, ya que ello obligaría a disponer de combustible en las zonas a abastecer, lo que no es conveniente para la misión. También hay que tener en cuenta que la mitad del trayecto se realizará con la máxima carga de pago la mayoría de las ocasiones, pero la otra mitad la aeronave no tendrá en la mayoría de los casos carga alguna (será posible enviar de vuelta a las bases principales pequeñas cargas en caso de necesidad).
- Un techo de vuelo suficiente para dificultar su intercepción, ya que la aeronave no contará con un blindaje militar para priorizar otras características.

Como se observa, apenas se han definido numéricamente estas características, ya que en una primera aproximación no se conoce con exactitud la misión, por lo que todos estos parámetros se intentarán maximizar durante el diseño para obtener unas actuaciones lo mejores posible y que la aeronave pueda ser útil en un rango más amplio de situaciones.

Capítulo 2

Análisis de Semejantes

Tal y como se ha reflejado en la introducción, el proceso a seguir para obtener un diseño preliminar, será el análisis de semejantes. Este análisis consiste en crear una base de datos de aeronaves ya existentes, cuyas características sean similares a las que podría tener la nuestra, de manera que mediante un análisis estadístico se pueda obtener una primera aproximación de algunas características de nuestra aeronave.

Dado que el objetivo es el diseño de un helicóptero no tripulado de 450 Kg de $MTOW$, los vehículos a analizar serán helicópteros de una masa similar, en torno a 400-500 kg, pero al no existir una cantidad suficiente dentro de este margen, se ha decidido ampliar este. En las tablas 2.1 y 2.2 se encuentran los helicópteros seleccionados para el análisis

MODELO	MTOW[kg]	d[m]	Ω [rad/s]	b	b_a	h_{max} [m]	V_{max} [km/h]
SA-200 Weasel	70	2,07	167,55	2	6	3100	167
Yamaha R-50	90	3,07	88,6	2	2	300	VACÍO
R-350	150	3,5	82,86	3	2	2500	120
SD 150 Hero	150	3,5	105,14	3	2	4000	90
APID 55	160	3,3	54,54	2	2	3000	90
APID 60	180	3,3	90,97	2	2	3000	110
Camcopter S100	200	3,4	130,73	2	2	5500	222
Pelícano	200	3,3	81,22	2	2	3600	180
DP 5X Wasp	227	3,2	127,33	4	4	4100	160

Tabla 2.1: Valores de diferentes parámetros de las aeronaves empleadas para el análisis de semejantes cuyos valores de velocidad de giro del rotor principal han sido publicados

Una vez se ha obtenido la selección de aeronaves semejantes, se procede a realizar un análisis estadístico de las distintas características de los mismos para

MODELO	MTOW[kg]	d[m]	b	b_a	h_{max} [m]	V_{max} [km/h]
Scout B1-100	77	3,2	2	2	VACÍO	VACÍO
Neo S300	85	3	3	2	VACÍO	VACÍO
Skeldar V-200	235	4,6	2	2	3500	140
Tanan EADS	300	5	2	2	4000	150
SVU-200	360	4,92	4	2	4200	209
Cicare 7B	430	6,28	2	2	3000	194
Robinson R-22	622	7,67	2	2	4267	188
VSR700	680	7,2	3	7	3600	187
Brantly B-2	757	7,24	3	2	3290	161
Schweizer 300	930	8,2	3	2	4300	176

Tabla 2.2: Valores de diferentes parámetros de las aeronaves empleadas para el análisis de semejantes cuyos valores de velocidad de giro del rotor principal no han sido publicados

obtener unos primeros valores de diseño. Al ser la característica más definitoria de la aeronave el peso máximo al despegue, se observará la evolución de los distintos parámetros con el MTOW. En este capítulo se pueden observar las gráficas que se obtienen del análisis anterior para cada parámetro, incluyendo una línea de tendencia que nos permita obtener una primera aproximación en el diseño. Cabe indicar que se han omitido, en las gráficas correspondientes, aquellos vehículos cuyas características no eran conocidas, sin eliminarlos del resto de ellas. Las líneas de tendencia se han generado usando una aproximación lineal, lo cual puede llevar a una mala aproximación dependiendo de los datos.

Como se puede observar, muchos helicópteros comparten características aunque sus pesos sean muy distintos, y algunas líneas de tendencia se alejan considerablemente de los valores promedio para la zona que corresponde a 450 kg. Esto se debe principalmente a la falta de datos de referencia, los pocos desarrollos que se han dado de aeronaves de ala rotatoria en el entorno de pesos dado dificultan en gran medida la verificación de nuestro modelo al no existir una norma de diseño en la que basarnos. Los desarrollos han sido dispersos, así que los parámetros iniciales de diseño no se basarán únicamente en los valores de tendencia obtenidos.

- d: 5,5 m
- b: 2
- b_a antipar: 2
- t_e : 3 horas
- h_{max} : 3200 m
- V_{max} : 190 m/s

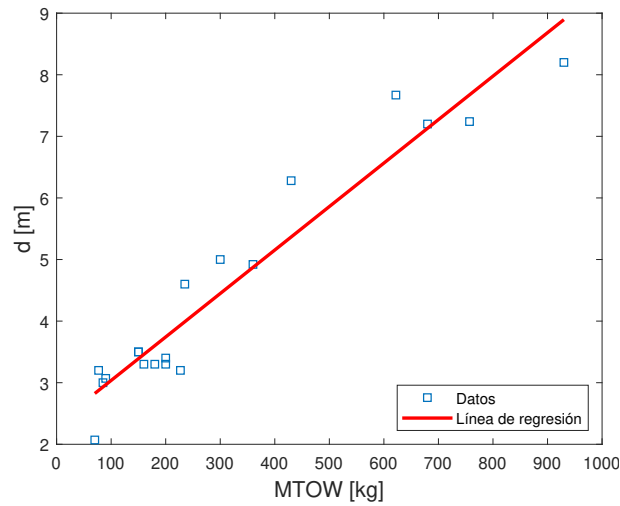


Figura 2.1: Relación entre los diámetros de las palas de los helicópteros y sus MTOW junto a su línea de tendencia

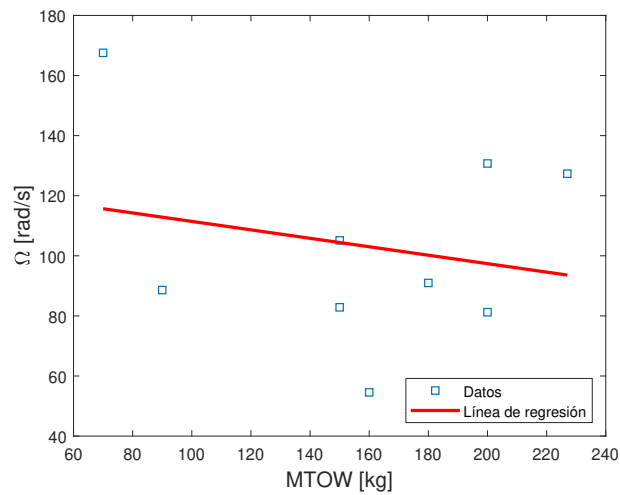


Figura 2.2: Relación entre las velocidades de giro del rotor de los helicópteros y sus MTOW junto a su línea de tendencia

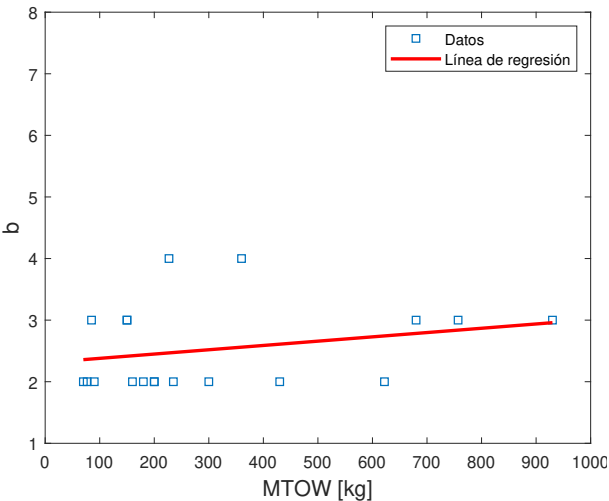


Figura 2.3: Relación entre el número de palas del rotor principal de los helicópteros y sus MTOW junto a su línea de tendencia

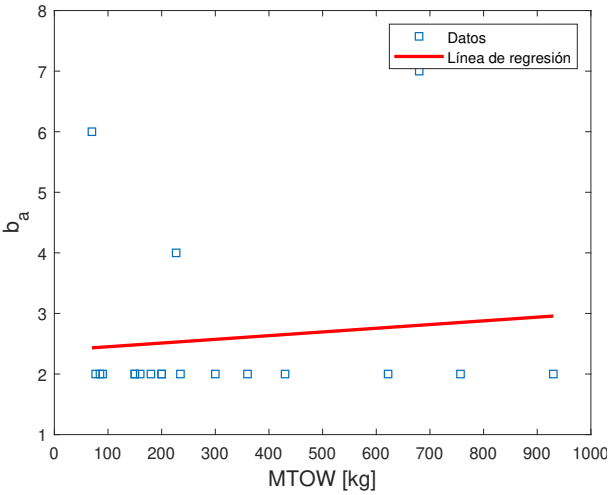


Figura 2.4: Relación entre el número de palas del rotor antipar de los helicópteros y sus MTOW junto a su línea de tendencia

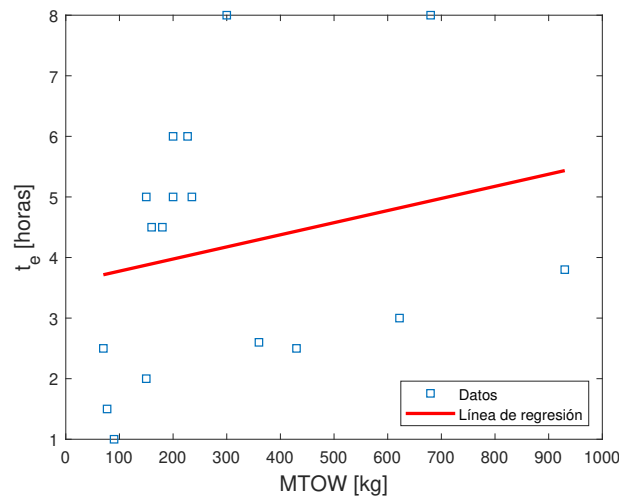


Figura 2.5: Relación entre las autonomías de los helicópteros y sus MTOW junto a su línea de tendencia

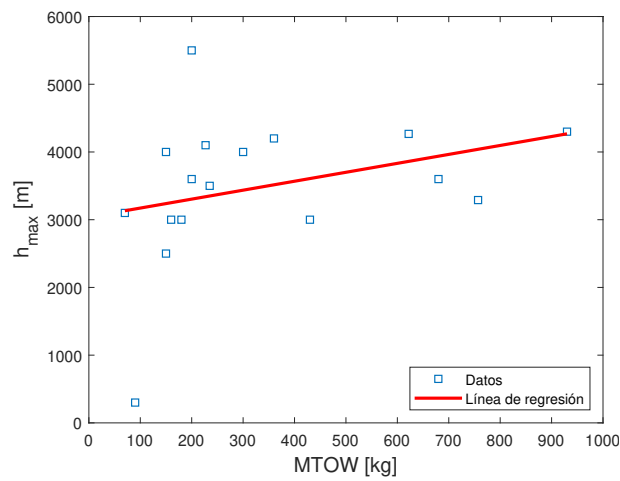


Figura 2.6: Relación entre los techos de vuelo de los helicópteros y sus MTOW junto a su línea de tendencia

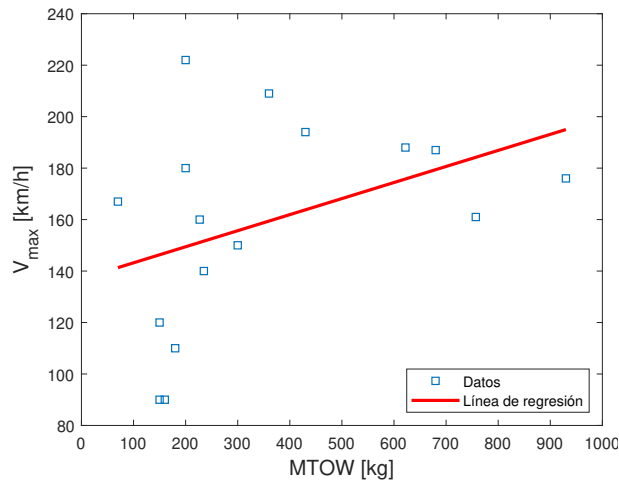


Figura 2.7: Relación entre las velocidades máximas de avance de los helicópteros y sus MTOW junto a su línea de tendencia

Queda patente que en algunos casos, se han aproximado los valores omitiendo las líneas de tendencia, usando en su lugar los valores de los helicópteros cuyos MTOW son más próximos al de la aeronave a diseñar.

Como se puede observar, al existir muy pocos datos respecto a las velocidades de giro del rotor principal de los helicópteros elegidos, la obtención de una Ω inicial ha de obtenerse de algún otro modo. Uno de ellos es la limitación del M_{crit} en la punta de las palas del rotor principal, que es la que se desarrollará a continuación.

La limitación en la velocidad de giro del rotor viene dada por la aparición de efectos supersónicos en las puntas de las palas del mismo. Estos efectos, como puedan ser ondas de choque, empeoran el comportamiento de las palas, pueden hacerlas entrar en pérdida e incluso provocar daños estructurales debido a cargas elevadas. Por esto es común establecer un límite conocido como M_{crit} basado en la velocidad $\Omega \cdot R$, es decir, la velocidad de avance de las puntas de las palas. Este límite suele ser del orden de 0,4 para vuelo estacionario y 0,8 para vuelo en avance.

La gráfica 2.8 representa la superficie que da un valor de potencia de la aeronave para cada Ω y R del rotor. Con esto es posible observar los valores mínimos de potencia, lo que nos permite elegir unos valores de Ω y R que optimicen la potencia necesaria. Sin embargo, al añadir la limitación del M_{crit} las opciones de configuración disponibles se ven reducidas a aquellas que la cumplan. La gráfica 2.9 representa la superficie de la gráfica ?? sobre el plano ΩR y encima la anterior limitación.

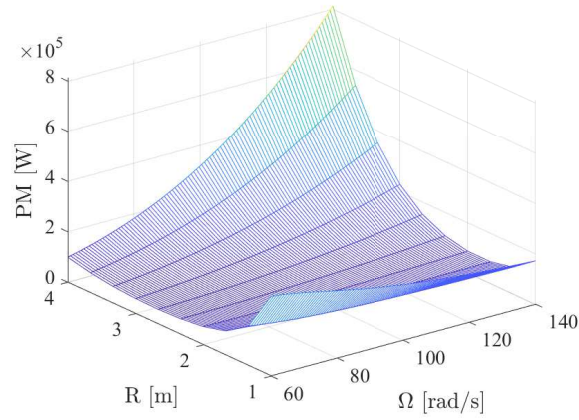


Figura 2.8: Consumo de Potencia de la aeronave en función de la velocidad de giro del rotor y el radio del mismo

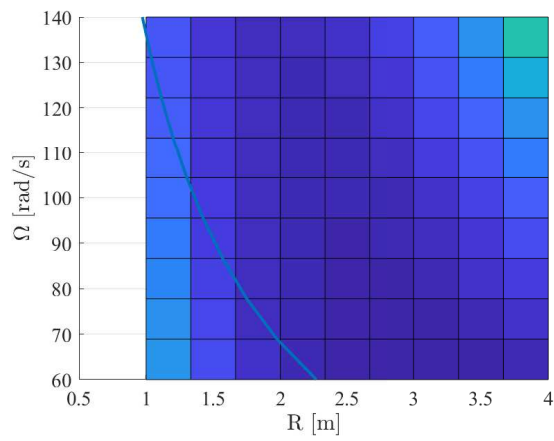


Figura 2.9: Consumo de Potencia de la aeronave en función de la velocidad de giro del rotor y el radio del mismo junto a la limitación de Ω a causa del M_{crit} (0,4)

Bibliografía

AUVSI. The economic impact of unmanned aircraft systems integration in the united states. <https://www.auvsi.org/our-impact/economic-report>, 2013.

Álvaro Cuerva et al. *Teoría de los Helicópteros*. Garceta, 2013.

DAF. Department of the air force fiscal year 2011 budget estimates. <http://www.saffm.hq.af.mil/shared/media/document/AFD-100128-072.pdf>, 2011.

Goldman Sachs. Drones, reporting for work. <https://www.goldmansachs.com/insights/technology-driving-innovation/drones/>, 2016.

USSOCOM. Exhibit r-2, rdt&e budget item justification. https://apps.dtic.mil/descriptivesum/Y2012/Other/stamped/0305219BB_7_PB_2012.pdf, 2011.