



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Vuelo vertical en helicópteros

Apellidos y nombre: García-Cuevas González, Luis Miguel (luiga12@mot.upv.es)¹
Carreres Talens, Marcos (marcarta@mot.upv.es)¹
Tiseira Izaguirre, Andrés Omar (anti1@mot.upv.es)¹

Departamento/Centro: ¹Departamento de Máquinas y Motores Térmicos
Universitat Politècnica de València

Índice general

1. Resumen	2
2. Objetivos	2
3. Introducción	2
4. Desarrollo	2
4.1. Requerimientos relativos de empuje y potencia	2
4.2. Límites del empuje del helicóptero en vuelo a punto fijo	3
4.3. Control de la aceleración ascensional	5
4.4. Control de la altitud de vuelo	6
4.5. Vuelo en descenso	6
4.6. Autorrotación	8
4.7. Control del paso colectivo del rotor antipar en vuelo axial	8
5. Cierre	9

1 Resumen

En este artículo vamos a presentar aspectos cualitativos del vuelo vertical en helicópteros, incluyendo sus ventajas frente a otras aeronaves de despegue y aterrizaje vertical, el empuje necesario para volar a punto fijo y sus límites, el control de la aceleración ascensional, el control de la altitud de vuelo, el vuelo en descenso, la autorrotación y el control del paso colectivo del rotor antipar en vuelo axial.

2 Objetivos

Tras leer detenidamente este documento, el lector ha de ser capaz de:

- Describir las limitaciones principales del empuje máximo del rotor de un helicóptero.
- Describir cómo realizar maniobras de vuelo axial en un helicóptero, incluyendo la autorrotación y el control del rotor antipar.

3 Introducción

De entre todas las aeronaves VTOL (de despegue y aterrizaje vertical), el helicóptero destaca por su elevada eficiencia para el vuelo a punto fijo y vertical (vuelo axial). Sacrificando actuaciones en avance, es capaz de realizar operaciones con vuelo vertical con unos consumos de potencia menores que los dados en otros tipos de aeronaves durante tiempos mayores. El vuelo axial de los helicópteros será controlado mediante la articulación de paso colectivo de su rotor principal, como se verá, pero habrá ciertas limitaciones a tener en cuenta. El objetivo de este documento está en dar una introducción al control del vuelo axial de helicópteros desde el punto de vista de las necesidades de potencia y paso colectivo y de las limitaciones encontradas en cuanto a altitud máxima y velocidad vertical máxima.

En las siguientes secciones se comenzará con un comentario sobre los requerimientos de empuje y potencia del helicóptero en comparación con otros tipos de aeronaves. A continuación, se presentarán los efectos de la densidad atmosférica, la geometría del rotor y su velocidad de giro en el empuje en vuelo a punto fijo. En la siguiente sección se comentará el control de la aceleración ascensional. Posteriormente, se deducirá que el paso colectivo en vuelo axial regula la altitud de vuelo en punto fijo. La siguiente sección tratará sobre las limitaciones que se tienen en el vuelo en descenso, para continuar después con el fenómeno de la autorrotación. Por último, se discutirá el control necesario en guiñada durante los cambios de paso colectivo del rotor principal cuando se utiliza un rotor antipar.

4 Desarrollo

4.1 Requerimientos relativos de empuje y potencia

Frente a las aeronaves de ala fija, los helicópteros requieren de mayores empujes para mantener el vuelo. Efectivamente, en los helicópteros, el empuje necesario será exactamente igual al peso durante el vuelo a punto fijo, frente al pequeño empuje necesario en las aeronaves de ala fija. En vuelo con aceleración ascensional o vuelo en avance, por supuesto, los requerimientos de empuje son incluso mayores.

Frente a otras aeronaves VTOL, los requerimientos de empuje son similares durante el vuelo a punto fijo o vertical: el empuje volverá a ser igual al peso o algo superior cuando haya

aceleraciones ascensionales. Sin embargo, los requerimientos de potencia suelen ser menores para una misma carga de pago: otras aeronaves con capacidad para volar a punto fijo durante elevados periodos de tiempo, como las de ala o rotor basculante, requieren de estructuras y mecanismos más pesados que penalizan la operación. Otras aeronaves, como las de chorro deflectado, sólo pueden hacer uso de los elevados empujes necesarios para el vuelo a punto fijo durante pequeños periodos de tiempo, y requieren de grandes consumos energéticos. La elevada envergadura de las palas de los helicópteros asegura que, para un empuje dado, éste se consiga moviendo grandes masas de aire a velocidades relativamente pequeñas, perdiéndose así poca energía en aumentar la energía cinética del aire y obteniéndose unos buenos rendimientos. El cociente entre el empuje producido por el sistema propulsivo de una aeronave y la superficie de la sección por la que pasa el aire usado como masa de reacción se conoce como carga discal, y es un parámetro con el que la eficiencia propulsiva está muy relacionada: cargas discales bajas suelen estar asociadas a eficiencias altas, mientras que cargas discales grandes suelen estar asociadas con eficiencias bajas.

4.2 Límites del empuje del helicóptero en vuelo a punto fijo

La [figura 1](#) muestra una vista en planta del rotor de un helicóptero girando a velocidad angular ω . La velocidad relativa del aire, en el plano del disco en el que gira el rotor, es igual a la velocidad angular multiplicada por la distancia a la cabeza del rotor, r .

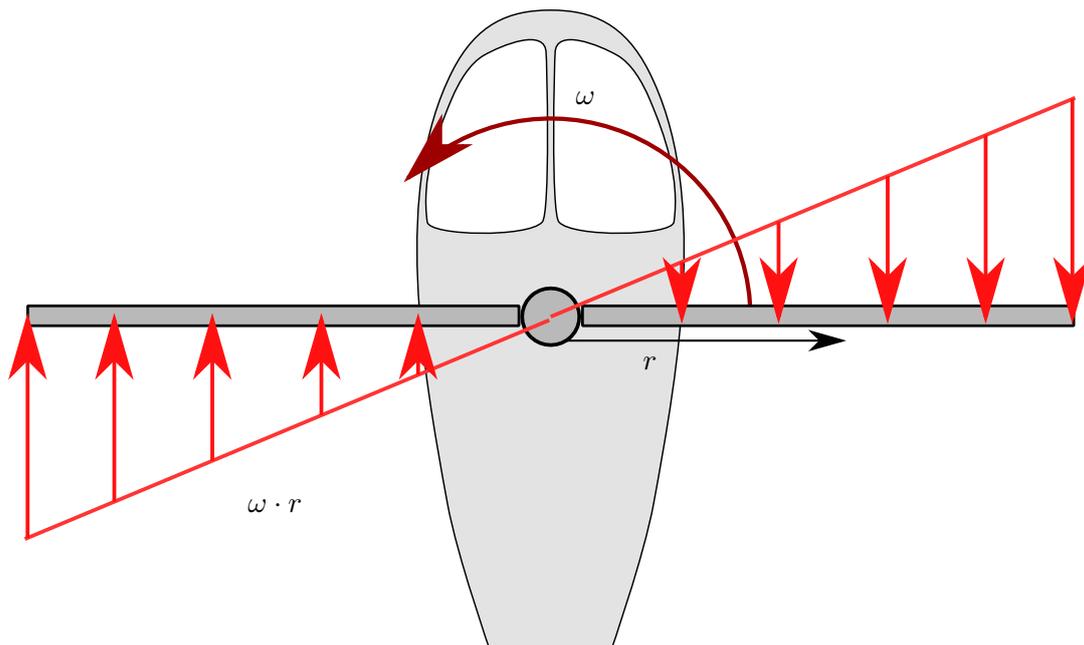


Figura 1: Velocidad relativa de la corriente sobre las palas de un rotor en vuelo axial, vista en planta. Nótese cómo la velocidad aumenta desde la cabeza del rotor hasta la punta de pala.

Al girar el rotor del helicóptero, éste genera una fuerza sobre el aire y lo impulsa hacia abajo, como se ve en la [figura 5](#).

El empuje T del helicóptero en vuelo a punto fijo (sin moverse en horizontal o vertical) será:

$$T = W = \frac{1}{2} \cdot \rho_{\infty} \cdot n \cdot \int_0^R c_l(r) \cdot c_d(r) \cdot (\omega \cdot r)^2 dr \quad (1)$$

donde W es el peso del helicóptero, ρ_{∞} es la densidad atmosférica, n es el número de palas del rotor principal, R es el radio del rotor principal, $c_l(r)$ es el coeficiente de sustentación local del

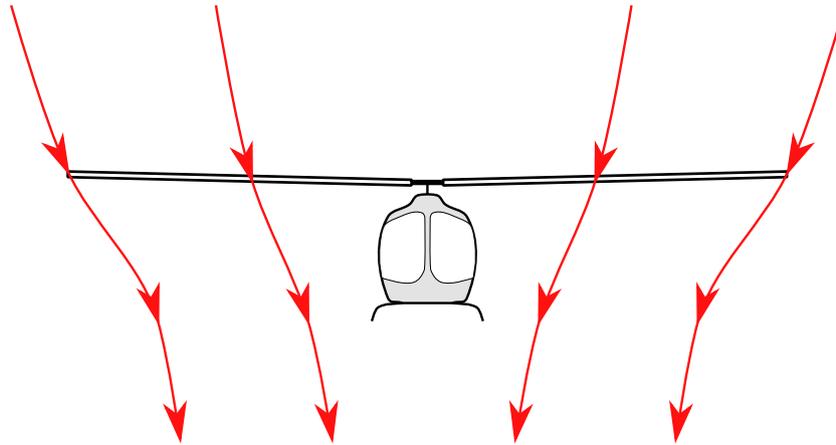


Figura 2: Vuelo axial a punto fijo. En rojo, líneas de corriente con la dirección de la velocidad de la corriente de aire marcadas.

perfil situado a un radio r , $c(r)$ es la cuerda del perfil situado a un radio r y ω sigue siendo la velocidad de giro del rotor principal. Nótese que la [Ecuación 1](#) es la ecuación de la sustentación de n alas en las que la velocidad de la corriente incidente de sus perfiles varía a lo largo de la envergadura de modo que dicha velocidad es igual a $\omega \cdot r$: se ha supuesto que la velocidad vertical de la corriente pasando a través del disco del rotor principal es pequeña respecto de la velocidad de rotación de las palas.

Para cada uno de los perfiles, suponiendo que no existe torsión y los perfiles son simétricos por simplicidad, se tiene la [Ecuación 2](#):

$$c_l \simeq 2 \cdot \pi \cdot \alpha \simeq 2 \cdot \pi \cdot \left(\theta + \frac{v_i}{\omega \cdot r} \right) \quad (2)$$

donde se ha supuesto una pendiente del coeficiente de sustentación del perfil frente a su ángulo de ataque α igual a $2 \cdot \pi$. El ángulo de ataque será igual al ángulo de paso colectivo θ más el provocado por la velocidad de la corriente que pasa por el disco del rotor, v_i : como esta velocidad ha de ser hacia abajo, el ángulo de ataque se reduce respecto del de paso. A más paso colectivo, más ángulo de ataque. Habrá una velocidad v_i incluso a punto fijo: al generar sustentación las palas, moverán aire hacia abajo. La fuerza generada por el aire en las palas se genera por las palas en el propio aire, por lo que éste tendrá que moverse (según la tercera ley de Newton). La [figura 3](#) muestra un esquema de los ángulos y velocidades que afectan a un perfil de la pala del rotor. Como $|v_i| \ll |\omega \cdot r|$, el ángulo que forma la velocidad incidente de la corriente sobre la pala con la velocidad sólo debida a la rotación del rotor se puede aproximar por $v_i/(\omega \cdot r)$.

El ángulo de paso colectivo θ es común a todas las palas, y es controlado mediante la palanca de paso colectivo del helicóptero.

Se comprueba que el empuje del helicóptero es proporcional a la densidad atmosférica, al número de palas, a la cuerda de dichas palas, al cuadrado de la velocidad de rotación de las mismas y al cubo del radio del rotor. Además, se modifica con el paso colectivo, pues éste modifica el ángulo de ataque de las palas. Se puede conseguir el mismo empuje para una determinada altitud de vuelo con distintas combinaciones de número de palas, velocidad de rotación del rotor y radio del mismo. Por supuesto, habrá un límite en el producto $\omega \cdot R$: la velocidad de punta de pala tendrá que mantenerse lo suficientemente subsónica para que el vuelo pueda realizarse. El régimen de giro del rotor acabará siendo constante, manteniéndose en una situación lo más óptima posible para el conjunto del helicóptero y sus motores.

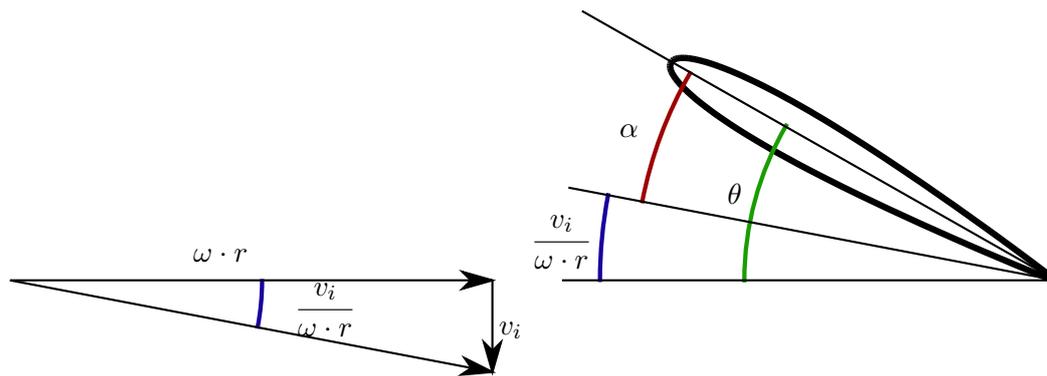


Figura 3: Velocidades y ángulos de la corriente sobre un perfil de un rotor de helicóptero en vuelo axial. Nótese que la velocidad de la corriente vertical v_i se debe a la velocidad inducida y a la propia velocidad ascensional del rotor. v_i se ha supuesto pequeña respecto de la velocidad debida al giro del rotor.

Al volar a altitudes mayores, la densidad atmosférica es menor, por lo que se vuelve necesario compensar la caída de empuje mediante un aumento en el régimen de giro del rotor o un aumento del paso colectivo de las palas. Además de haber un límite en el régimen de giro máximo del rotor, hay también un límite en el coeficiente de sustentación máximo que se puede alcanzar. Cuando el ángulo de ataque supera el ángulo de ataque crítico, el coeficiente de sustentación deja de crecer y cae, entrando las palas en pérdida. Esto marca otro límite de empuje máximo que se puede alcanzar.

Otro límite lo marcará la potencia máxima del motor. El rotor, al girar, estará sometido a resistencia aerodinámica. Al aumentar el empuje crecerá la resistencia inducida de las palas, por lo que es posible que se llegue a la potencia máxima del motor antes de que se produzcan las limitaciones por entrada en pérdida o flujo transónico en las palas.

4.3 Control de la aceleración ascensional

Para controlar la aceleración ascensional, el helicóptero ha de modificar el paso colectivo de su rotor principal. Si se quiere aumentar la aceleración ascensional (por ejemplo, para pasar de vuelo a punto fijo a velocidad vertical positiva), es necesario aumentar el paso colectivo. De este modo, para una altitud dada, al aumentar el paso colectivo subirá el valor de c_l en todas las secciones y, por tanto, el empuje será superior al peso. En cuanto el helicóptero vaya ganando velocidad vertical, la velocidad de la corriente de aire que pasa por el disco respecto a las palas irá aumentando en módulo, lo que irá reduciendo el ángulo de ataque: un aumento del paso colectivo primero genera una aceleración vertical, pero pronto la aceleración se reduce hasta llegar a una velocidad de ascenso constante. Si se quiere seguir acelerando, será necesario ir aumentando poco a poco el ángulo de paso colectivo.

Al aumentar el empuje del rotor aumentando su paso colectivo, también se generará más resistencia inducida. Para compensar esto, la potencia generada por los motores tendrá que subir mientras se aumenta el paso colectivo, o el régimen de giro del rotor caerá.

4.4 Control de la altitud de vuelo

En realidad, tras aumentar el paso colectivo ocurren los siguientes procesos:

- Primero, aumenta la aceleración vertical.
- La aceleración decrece hasta llegar a ser nula cuando la velocidad de la corriente reduce el ángulo de ataque hasta que el empuje vuelve a ser igual al peso.
- La densidad atmosférica decrece al ir aumentando la altitud. Ya que el empuje es proporcional a dicha densidad, el helicóptero pierde velocidad vertical. Pero si la velocidad vertical decrece, el ángulo de ataque crece: el helicóptero se va frenando despacio desde su velocidad ascensional máxima tras unos pocos segundos después del aumento del paso colectivo.
- Llegará un momento en el que la velocidad vertical se vuelva cero y el helicóptero vuelva a volar a punto fijo.

Así, el control de paso colectivo controla la altitud de vuelo a punto fijo: pasos colectivos pequeños suponen un vuelo a punto fijo a baja altitud, mientras que pasos colectivos grandes suponen un vuelo a punto fijo a alta altitud.

La máxima altitud estará limitada, si no lo hace antes el propio motor, por el coeficiente de sustentación máximo proporcionado por las palas del rotor y su entrada en pérdida. Si el coeficiente de sustentación máximo es elevado, la altitud máxima también puede serlo.

Al igual que en las aeronaves convencionales, el efecto suelo aumenta la sustentación generada por las palas: en efecto suelo es posible aumentar el techo de vuelo y la altitud de vuelo para un determinado paso colectivo. Se puede volar a más altitud (medida respecto al nivel del mar) que la del techo de vuelo normal si se mantiene una altura pequeña (medida respecto al suelo).

4.5 Vuelo en descenso

Si el vuelo de descenso se realiza a poca velocidad, el comportamiento del helicóptero es similar al que se tiene en ascenso.

Si la velocidad de descenso es algo mayor, es posible que el rotor del helicóptero se introduzca en su propia estela. Cuando esto ocurre, el rotor entra en un régimen de funcionamiento llamado de anillos turbillonarios, como se ve en la [figura 4](#). En este régimen de vuelo la estela se mezcla con el propio rotor, se generan fuertes vibraciones, alta turbulencia y cambios no estacionarios en las fuerzas aerodinámicas que dificultan enormemente el vuelo. La sustentación cae fuertemente y se vuelve muy complicado salir de este régimen. Al aumentar la potencia del motor y aumentar el paso y el régimen de giro del rotor principal no se consigue recuperar sustentación: en vez de eso, los torbellinos que se forman en punta de pala se vuelven más intensos. Posiblemente, uno de los casos más famosos de accidente causado por el estado de anillos turbillonarios tuvo lugar durante la Operación Lanza de Neptuno de 2011, perdiéndose un helicóptero MH-60 fuertemente modificado.

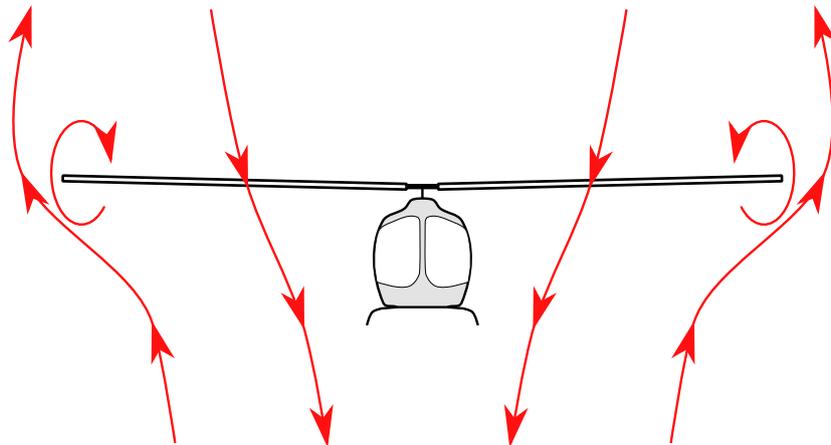


Figura 4: Vuelo axial en régimen de anillos turbillonarios. En rojo, líneas de corriente con la dirección de la velocidad de la corriente de aire marcadas.

Para velocidades de descenso todavía mayores, la estela se mezcla aun más con el rotor, pasando a un régimen llamado de estela turbulenta. El comportamiento de la corriente es el de la ???. Si la velocidad de descenso es lo suficientemente grande, la estela pasa a moverse hacia arriba respecto del rotor y se pasa al comportamiento llamado de molinete frenante, más sencillo de controlar, que se da durante la autorrotación.

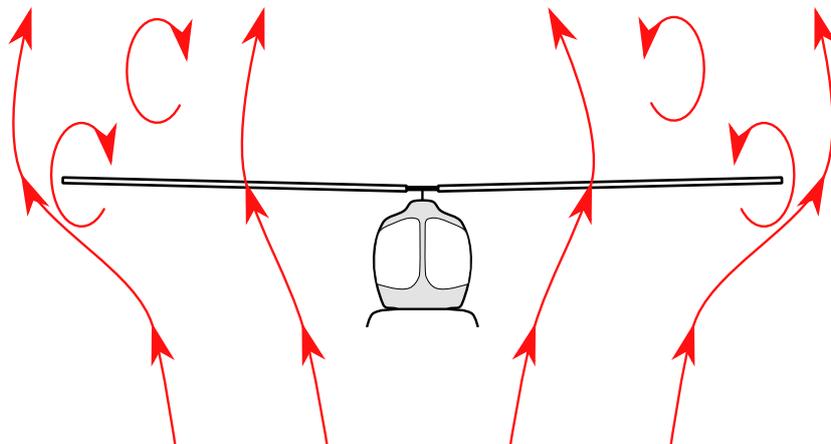


Figura 5: Vuelo axial en régimen de estela turbulenta. En rojo, líneas de corriente con la dirección de la velocidad de la corriente de aire marcadas.

Por supuesto, el comportamiento en régimen de descenso del rotor principal es análogo en un rotor antipar cuando éste se mueve en guiñada hacia su propia estela.

El descenso de multirrotores, incluyendo el de los pequeños drones por radiocontrol, es análogo al descrito en este apartado. Si se hace descender demasiado deprisa una de estas aeronaves, se corre el riesgo de entrar en un régimen de funcionamiento en el que se pierde la sustentación y del que es muy difícil salir.

4.6 Autorrotación

En la autorrotación (como en la [figura 6](#), la corriente de aire entra desde la zona inferior del rotor y genera fuerzas aerodinámicas que lo mantienen en movimiento. Es el comportamiento habitual de los generadores eólicos, en los que el rotor extrae energía de la corriente de aire. En el caso de los helicópteros, este régimen es interesante porque puede ser usado durante situaciones de emergencia.

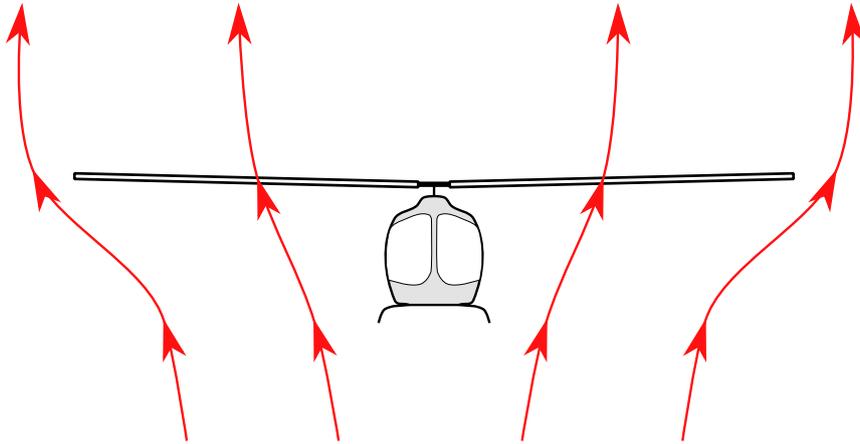


Figura 6: Vuelo axial en régimen de molinete frenante o autorrotación. En rojo, líneas de corriente con la dirección de la velocidad de la corriente de aire marcadas.

En situación de fallo completo de los motores del helicóptero, el rotor principal se frena y deja de generar el empuje necesario para mantener el vuelo. Si se desembraga el rotor, la corriente de aire lo mantendrá en movimiento: ya que la sustentación es perpendicular a la corriente incidente, se genera una fuerza que pone en movimiento las palas. Según vayan volviendo a girar, el vector de fuerzas aerodinámicas de cada pala irá girándose hacia arriba, frenando la caída del helicóptero.

Para poder recuperar el helicóptero de un fallo catastrófico de sus motores, será necesario desembragar el rotor y mantenerlo con un paso colectivo no muy elevado mientras cae. La autorrotación reducirá la velocidad de la caída, pero será necesario aumentar el paso colectivo cuando se esté cerca del suelo para frenar la caída todo lo que se pueda antes del impacto, perdiendo parte de la velocidad de rotación del rotor en esa última maniobra. El aumento de paso colectivo ha de hacerse de forma controlada, ya que de lo contrario se podría superar el ángulo de ataque crítico de las palas y hacerlas entrar en pérdida. Es una maniobra peligrosa, pero realizarla correctamente puede suponer la diferencia entre la vida y la muerte en caso de emergencia.

4.7 Control del paso colectivo del rotor antipar en vuelo axial

Cuando el helicóptero utiliza un rotor antipar, éste se controla igual que el rotor principal: aumentando su paso colectivo se aumenta el empuje del antipar.

Cuando se aumenta el paso colectivo del rotor principal, se aumenta su empuje y, por tanto, su resistencia inducida. Este aumento de resistencia inducida genera, a su vez, un aumento del par resistente que pondrá a girar el helicóptero en sentido contrario al de su rotor principal. Si el rotor principal gira en el sentido de las agujas del reloj, el aumento del paso colectivo genera un par en el sentido contrario a las agujas del rotor sobre el propio helicóptero. Para compensarlo, habrá que aumentar el empuje del rotor antipar, lo que se consigue aumentando su paso colectivo. Recuérdese que el rotor antipar tendrá que generar empuje hacia la izquierda (moviendo aire hacia la derecha) si el rotor principal gira en sentido horario visto desde arriba y hacia la derecha (moviendo aire hacia la izquierda) si gira en sentido antihorario.

5 Cierre

En este artículo hemos visto cuáles son los principales límites de empuje máximo del rotor de un helicóptero, cómo controlar la velocidad ascensional y la altitud final de vuelo utilizando el paso colectivo, los problemas del vuelo en descenso, la autorrotación y cómo controlar el paso colectivo del rotor antipar ante cambios del empuje del principal.