

CONTROL  
DRON

**GRUPO MOTOPROPULSOR**

# Índice

1. Motores
  - 1.1. Motores de explosión
  - 1.2. Motores de reacción
  - 1.3. Motores eléctricos
    - 1.3.1. Motores Brushed
    - 1.3.2. Motores Brushless
2. Hélices
3. Rotores
  - 3.1. Problemas asociados
  - 3.2. Características de control
  - 3.3. Multirrotores
4. Pilotos automáticos

## Grupo Motopropulsor

Son los dispositivos cuya función es la de generar la tracción necesaria para contrarrestar la resistencia aerodinámica que se genera precisamente por la sustentación. Estos motores son desarrollados y probados por su fabricante. En el caso de los aviones sin motor o planeadores, la tracción se obtiene por el componente de la gravedad según el coeficiente de planeo.

El grupo motopropulsor puede estar compuesto por uno o más motores convencionales de pistón, por uno o más motores turbohélices, o por uno o más motores a reacción.

# Motores

Los motores son los elementos fundamentales que aportan movimiento al RPA. Pueden suministrarlo por sí mismos (mediante turbinas) o por medio de las hélices o rotores, que serán los encargados de producir el desplazamiento del RPA al transformar la energía giratoria del eje del motor en empuje o tracción, según la disposición de estos elemento en el diseño del aparato.

## Motores de explosión

También conocidos como motores alternativos o de émbolo, fueron desarrollados por el Dr. Otto en 1872. El principio de operación de esta máquina consta de cuatro partes diferenciadas conocidas como tiempos.

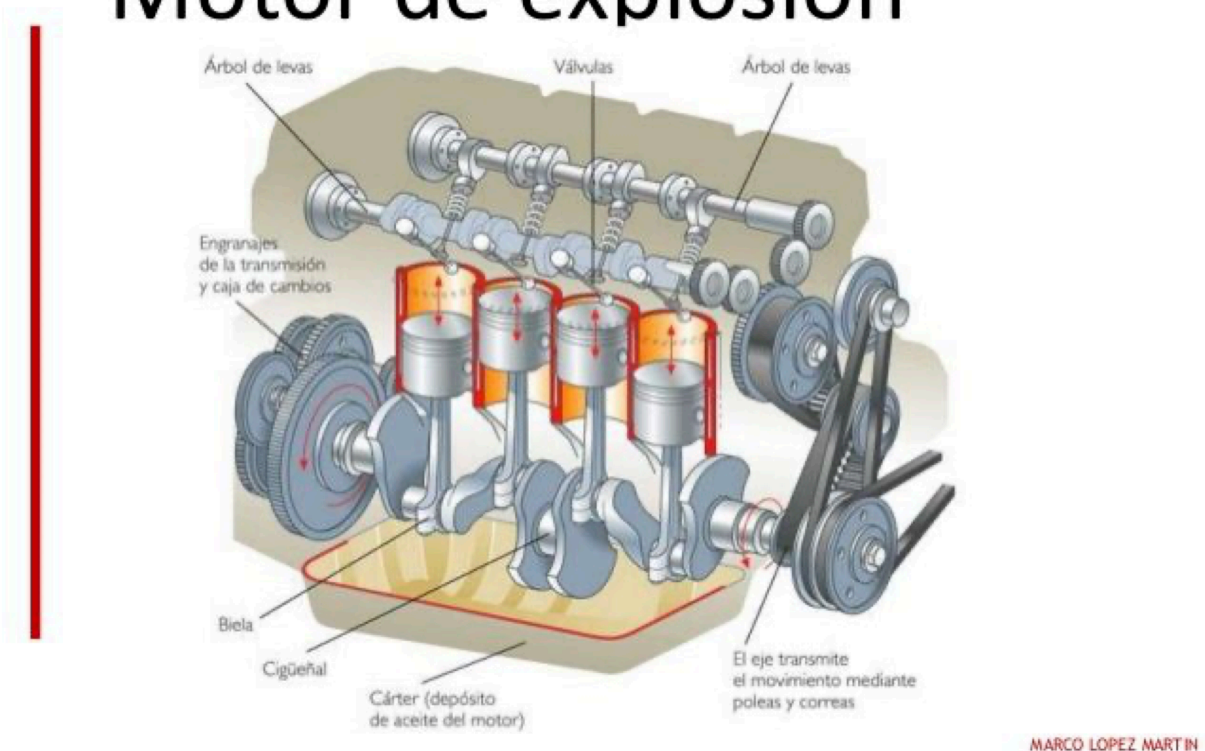
- **Admisión.** Se introduce en el interior de un cilindro una mezcla de aire-combustible.
- **Compresión.** Se sella herméticamente el interior del cilindro para que no escape la mezcla y, por medio de un pistón que sube dentro del cilindro, la mezcla es comprimida reduciendo su volumen, aumentando su densidad y, por consiguiente, su temperatura.
- **Explosión.** Se produce la ignición de la mezcla ya sea por medio de una chispa producida por un elemento eléctrico llamado bujía, un elemento incandescente (motores Glow-Plug) o simplemente como resultado de la fuerte compresión a la que se sometió en el tiempo anterior la mezcla (motores diésel). Esta ignición eleva considerablemente la temperatura, aumentando también la presión del gas en el interior del cilindro. Esta presión

producida por la expansión de los gases fuerza al pistón a descender en el interior del cilindro. El movimiento lineal del pistón se transforma en un movimiento giratorio por medio del sistema biela-cigüeñal, que hace girar el eje del motor.

- Escape. Los gases de la combustión son expulsados a la atmósfera y nuevamente el motor se encontrará configurado para repetir nuevos ciclos empezando con el primer tiempo de admisión.

## LOS MOTORES

# Motor de explosión



La capacidad total de admisión es la suma de las capacidades de todos sus cilindros y se expresa en centímetros cúbicos o en litros (siendo la equivalencia  $100 \text{ cm}^3 = 1 \text{ L.}$ ). Esto es lo que conocemos como cilindrada de un motor.

Los motores de explosión pueden encontrarse sobre todo en drones de tipo avión o helicóptero que requieran mayores prestaciones a las aportadas por las motorizaciones eléctricas. Los aparatos más pequeños podrán equipar motores del tipo Glow-Plug, de reducido tamaño y simplicidad mecánica, al emplear como sistema de encendido de la mezcla un filamento que inicialmente se calienta con una batería de 1,5 V. Cuando se ha inflamado la mezcla comprimida, el filamento se mantiene incandescente debido a las sucesivas explosiones. Para los de mayor tamaño se emplearán motores más sofisticados y potentes.



## Motores a reacción

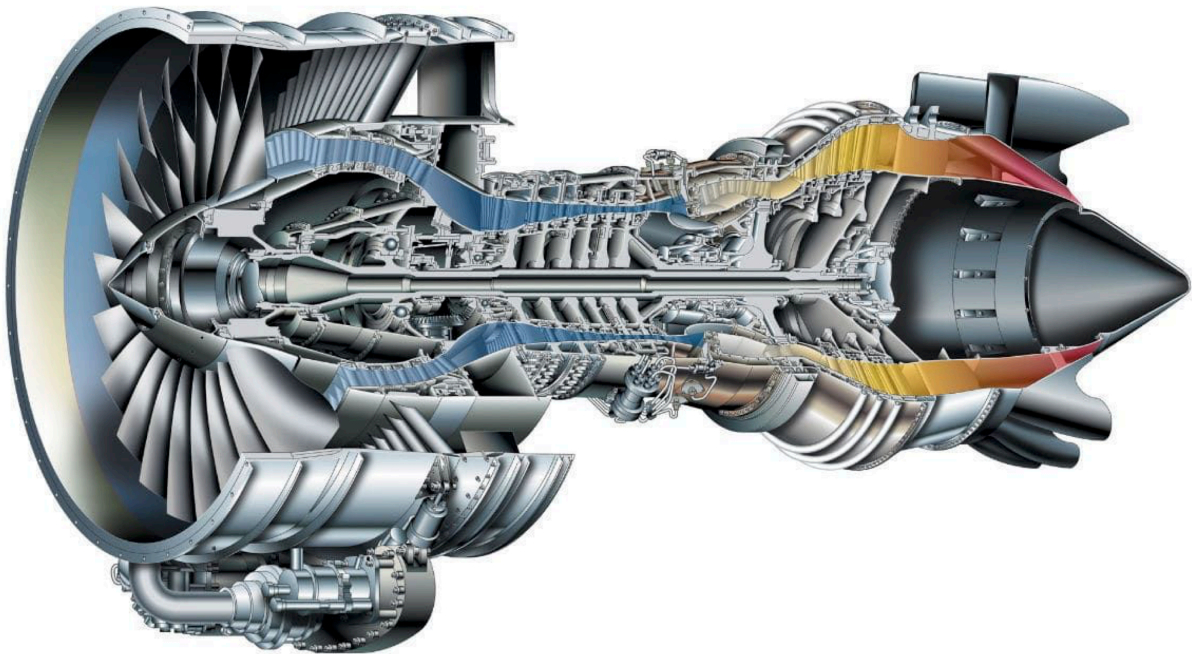
Aunque este tipo de motorizaciones son poco frecuente por el momento en drones civiles, es posible encontrarlos en drones de tipo avión diseñados para desplazarse a gran velocidad y altitud. Los dos tipos de reactores más frecuentes son el turbo reactor y el pulsorreactor (versión más sencilla que se conoce, si partes móviles giratorias).

A modo simplificado, un motor a reacción del tipo turbo reactor se asemeja a un cilindro hueco donde el aire entra por uno de los extremos llamado difusor (donde se produce la fase de admisión). Seguidamente, el aire se encuentra con una serie de compresores que elevan su presión (fase de compresión), para dirigirse a la cámara de combustión (aquí se inyecta combustible a la masa de aire a la vez que se quema: fase de explosión). En la cámara de combustión, los gases aumentan significativamente su temperatura y volumen viéndose forzados a salir al exterior por la parte de atrás del cilindro que componen el motor, llamado tobera (fase de escape). Cabe destacar que los gases, antes de ser expulsados por la tobera, hacen girar una turbina a altas revoluciones unida directamente por un eje al compresor, cerrando así el círculo de funcionamiento.

Hay una variante de estos motores en los que en vez de emplear los gases de escape para producir empuje, los utilizan fundamentalmente para hacer girar el eje del motor. Este, está conectado a una serie de engranajes que desmultiplican el régimen de giro y lo transmiten a una hélice o rotor.

Los pulsorreactores, en lugar de tener un compresor tras el difusor, contienen una válvula que sólo permite la entrada de aire al interior del cilindro impidiendo que retorne. El flujo de aire, una vez atravesada esta válvula, se encuentra directamente en la cámara de combustión donde se pulveriza el combustible y se quema con la

actuación de la chispa producida por una bujía. Al producirse la expansión en el interior de los gases, estos se dirigen por la única salida que encuentran hacia el estrechamiento en forma de embudo de la parte de atrás, que canaliza el chorro hacia el exterior y produce en ese momento el empuje. A diferencia de los turborreactores, la combustión no es continua. Esta se realiza de forma intermitente con una alta frecuencia de explosiones. Una vez evacuado el aire quemado de la cámara de combustión por la tobera de escape, se inicia un nuevo ciclo con la entrada de aire nuevo al interior.



## Motores eléctricos

El motor eléctrico es el motor más extendido dentro del mundo de los drones multirrotores por su fiabilidad, simplicidad mecánica y suavidad de funcionamiento. Este motor permite la transformación de energía eléctrica en energía mecánica mediante la rotación de un campo magnético alrededor de un bobinado por donde circula la corriente eléctrica. Los hay que funcionan con una corriente alterna, conocidos como Brushless y otros con una corriente continua (Brushed) y la variable fundamental a tener en cuenta es la potencia que suministra el motor.

### CALCULAR LA POTENCIA DE UN MOTOR

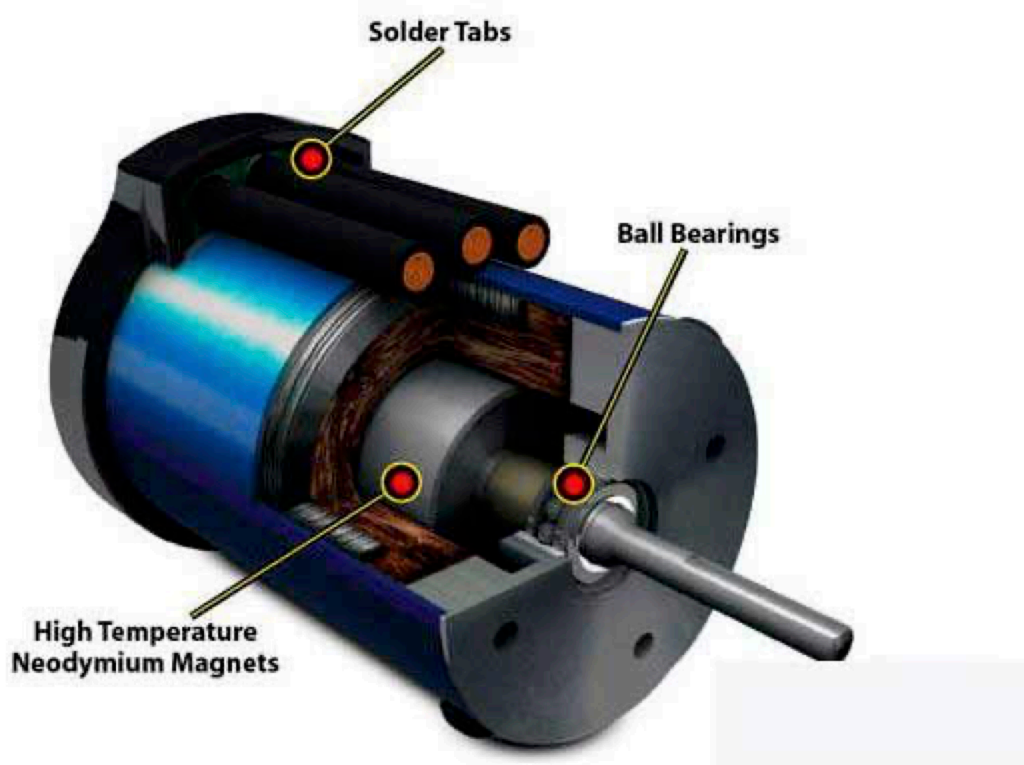
Se multiplican los amperios de consumo máximo desarrollado del motor, que indica el fabricante, por los voltios de la batería que se use. Por ejemplo, si tenemos un motor con un consumo de 15 amperios y una batería con un voltaje nominal de 11,1 voltios:

$$15 \text{ amperios} \times 11,1 \text{ voltios} = 166,5 \text{ vatios}$$

## TIPOS DE MOTORES ELÉCTRICOS

### Motores Brushed

Estos motores funcionan con corriente continua. El control de velocidad se obtiene por medio de un reostato (una resistencia variable) y se puede invertir el sentido de giro simplemente cambiando la polaridad.



Utilizan escobilla para cerrar eléctricamente el circuito entre el estator (parte no giratoria del motor) y el rotor en función del ángulo de giro de este último. Las escobilla no son más que un elemento de material conductor que transmite la electricidad al bobinado del núcleo (rotor).

Estos motores de corriente continua tienen el inconveniente de ser tres veces más pesados que los motores sin escobillas (Brushless).

## Motores Brushless

Son motores de corriente alterna trifásicos y, tal como su nombre indica, carecen de escobillas. Estos motores toman la corriente mediante cables (uno por cada fase) conectados a los tres terminales del bobinado, que se encuentran fijos en el estator. Su funcionamiento es regulado por medio de un controlador de velocidad electrónico.

Existen dos tipos de motores eléctricos Brushless:

- **Inrunner:** conservan una disposición convencional, en el que el rotor (imanes) gira en el interior del estator (bobinado), haciendo que se vea girar únicamente el eje como en el caso de los motores tradicionales de escobillas. Se caracteriza por un alto régimen de revoluciones. Por el contrario, tienen la desventaja de proporcionar un par (potencia) muy bajo. por lo que será adecuado para hélices pequeñas y turbinas eléctrica (ducted fan). Si queremos utilizar una hélice grande con este tipo de motores, no tendremos más remedio que emplear una reductora, que desmultiplique las vueltas de giro y aporte mayor fuerza a las palas.
- **Outrunner:** este tipo de motor recibe el nombre de carcasa giratoria, ya que lo que gira es la carcasa interior. Esta carcasa incorpora los imanes en su cara interna. Se caracteriza por aportar menos revoluciones que los Inrunner, pero proporcionan un gran par de giro (menos revoluciones pero más potencia). Esto les permite mover hélices de gran diámetro sin incorporar reductora.

# Hélices

Una hélice es un perfil aerodinámico giratorio. Están compuestas por dos o más palas implantadas en un soporte (bujes), que tiene como cometido proporcionar tracción o arrastre utilizando la potencia que le transmite el motor. En función de la disposición de la hélice en la aeronave, se podrá decir que es de tracción (montaje convencional) si la hélice “apunta” hacia la parte delantera de la aeronave, de impulsión o empuje en el caso de que se encuentre apuntando hacia la parte trasera de la aeronave, o una combinación de ambas: una hélice montada hacia delante y otra hacia atrás (tipo: push pull).



Al tratarse de un perfil aerodinámico en revolución, el efecto que se consigue es el mismo que el producido en el perfil de un plano o ala de un avión al exponerlo a un flujo de aire en movimiento: se genera sustentación. Dado que actúan los mismos principios físicos, un factor determinante será la densidad del aire por lo que, a mayor densidad, mayor rendimiento de la hélice (que generará más fuerza de sustentación, la fuerza impulsora).

Tanto al habla de hélices como de rotores, antes debemos conocer los siguientes tres conceptos que incumban a ambos por igual:

### **Factor P**

Causado por la tercer ley de Newton: “Siempre que se ejerce una fuerza (acción) resulta otra fuerza igual y de sentido contrario (reacción)”, este fenómeno lo conocemos como efecto par motor o factor P. Su repercusión en las aeronaves propulsadas por hélices o rotores es que tienden a rotar el fuselaje alrededor del eje de giro en sentido contrario al mismo, de manera proporcional a la potencia aplicada por el motor. Este efecto ha de compensarse por algún medio aerodinámico que lo contrarreste (por ejemplo, mediante el uso de alerones, rotores antipar o hélices contrarrotatorias).

### **Ángulo de ataque**

Corresponde al ángulo entre la cuerda (línea imaginaria que une el borde de ataque y el de salida de un perfil aerodinámico) y el viento relativo (resultante de la velocidad de rotación de la hélice y de la velocidad del avión).

### **Paso de la hélice**

Es el ángulo que forma la cuerda de los perfiles de la pala y el plano de giro de la hélice. A grandes rasgos puede decirse que las hélices de paso pequeño son adecuadas para vuelos lentos, mientras que las de paso grande lo son para vuelos rápidos. Estas últimas, más sofisticadas, cuentan con un mecanismo llamado gobernador que permite modificar el paso para conseguir mejor rendimiento dentro de un rango de velocidades más amplio que las de paso fijo.

Otra particularidad de las hélices es que las puntas de las palas tienen mayor velocidad de desplazamiento en su plano de giro que las partes cercanas al eje (igual velocidad angular pero distinta velocidad lineal), hecho que posibilita que lleguen a alcanzar antes velocidades próximas a la del sonido. Cuando esto ocurre, se produce una gran disminución en su rendimiento. Por ello, para poder evitar esta situación, las hélices tienen limitados su diámetro y su velocidad de rotación. Esta misma diferencia de velocidad a lo largo de las palas, que va en incremento a medida que nos alejamos del buje en dirección a las puntas, afecta a su diseño encontrándose estas torsionadas de tal forma que proporcione un importante ángulo de pala cerca del buje y un ligero ángulo de pala en sus extremos, además de ir variando el grosor y la cuerda (longitud) del perfil. De este modo, se obtiene el más eficaz ángulo de ataque y perfil aerodinámico para cada sección de la pala y se mantiene constante el valor de la fuerza de sustentación que generan a lo largo de todos sus puntos.

Para concluir, las características propias que describen a una hélice son: diámetro, paso, peso, forma, número de palas y material de construcción (aluminio, plástico o fibra de carbono).

## Rotores

El roto, al igual que la hélice, transforma el movimiento giratorio que proporciona el motor en tracción, gracias a los dos o más palas que puede tener. Estas desplazan la masa de aire que barren a su paso.

Los rotores, a diferencia de las hélices, no se encuentran en el mismo viento relativo en todos los puntos de su giro en el momento que se desplazan horizontalmente; lo que conlleva unos problemas asociados que se incrementan con la velocidad de desplazamiento. Esto es tenido en cuenta en su diseño para poder solventarlo.



## Problemas asociados

Debido al modo de desplazamiento horizontal (de transición) al que suelen estar sometidos los rotores en su operación, resulta que la pala que avanza en contra del sentido de desplazamiento o realizando su giro, se encuentra con mayor velocidad de viento relativo en cara que la que se encuentra desplazándose al otro lado en sentido opuesto. Este hecho da origen a los siguientes problemas asociados:

- Limitaciones de velocidad de giro.
- Asimetría de sustentación e intrínsecamente.
- Asimetría de resistencia inducida y parásita.

Esto influye en la estabilidad de la aeronave y, de no ser tenido en cuenta ningún medio de compensación, el aparato tendería a guiñar, a alabear y hasta a descontrolarse. Afortunadamente, esta tendencia es contrarrestada por el mismo diseño del rotor, ya que cuenta con articulaciones que permiten que en la mitad de su plano de giro, donde las palas se encuentran un flujo de aire más rápido (pala que avanza), disminuye su ángulo de paso (y por ende el de ataque); como consecuencia, la sustentación no aumenta. Mientras, en el lado donde las palas se enfrentan al flujo de aire más lento (pala que retrocede), el ángulo de ataque aumenta. Por tanto, la sustentación aquí no disminuye. De esta forma, se mantiene el equilibrio en todo el disco rotor.

La longitud de las palas, unido a su velocidad de giro y a la de la aeronave, puede provocar que en los extremos de las palas que avanzan en el sentido de desplazamiento de ésta, la velocidad del viento relativo sea tal que se llegue a alcanzar velocidades transónicas o superiores (unos 340 m/s), generando una pérdida de sustentación a la vez que un incremento de resistencia importante en la parte afectada.

Llegados a es punto crítico, se produce una seria disminución de las performances y, al producirse de manera asimétrica, pérdida de estabilidad y hasta de control del aparato. Para evitar esta situación, las RPM del rotor así como la velocidad máxima de la aeronave estarán ajustadas a un límite de manera que se mantenga siempre un estado subsónico de las palas.

### Características de control

Igual que los drones de tipo avión controlan su actitud de vuelo en alabeo, cabeceo y guiñada (libertad de movimiento a lo largo del eje longitudinal, transversal y vertical), gracias a las superficies de control (aleros y timones de profundidad y dirección); los drones de tipo helicóptero emplean un sofisticado mecanismo de articulaciones y palieres para modificar los parámetros del roto. Así obtienen capacidad de control y plena libertad de movimiento.

Para regular el flujo de aire que desplaza el roto y variar así la fuerza de sustentación que genera, se modifica el paso de las palas por igual gracias a un mecanismo instalado en el buje del rotor, llamado **colectivo**. Este sistema permite mantener las revoluciones óptimas de funcionamiento constantes, funcionando de forma parecida a las hélices de paso variable.

A la hora de obtener el control de alabeo y cabeceo, se modifica el plano de giro del rotor, rompiendo la perpendicularidad de este con el eje. El conjunto de elementos mecánicos que hacen esto posible recibe el nombre de **cíclico**.

Por último, para conseguir control de guiñada (rotación sobre el eje vertical) y compensar la tendencia de la aeronave a dar vueltas sobre su eje como consecuencia del efecto par motor (en sentido contrario al giro del rotor principal), se pueden utilizar soluciones como el rotor de cola o antipar. Este dispositivo no es más que un pequeño rotor dispuesto en vertical que compensa el factor P. Este rotor se sitúa en el extremo de un larguero para contrarrestar su pequeño tamaño con el efecto “brazo de palanca”.



El control de guiñada a derechas o a izquierdas se consigue simplemente aumentando o disminuyendo la fuerza de sustentación que genera (ya sea variando las revoluciones de giro o el paso de las palas). De esta forma, se rompe el punto de equilibrio en el que el factor P quedaba compensado.

## Multirrotores

Los multirrotores, en comparación con los tradicionales helicópteros de un solo rotor principal, cuentan con mayor estabilidad al tener más repartido los puntos de sustentación de donde “cuelga” el fuselaje de la aeronave. Puede decirse que a mayor número de rotores, mayor estabilidad. Además, obtienen mejores performances al poder emplear palas más cortas (ya que la sustentación total se obtiene de la suma de fuerzas de sustentación generada por cada rotor del dron, estos pueden ser más pequeños). De esta forma se dispone de más margen de velocidades sin sufrir los efectos de las ondas de choque originadas al alcanzar velocidad de supersónicas.



Otra ventaja de los multirrotores es que consiguen un mayor rendimiento al emplear toda la potencia del motor en crear sustentación, ya que compensan el efecto par y obtienen control de guiñada mediante el empleo de rotores contrarrotatorios. Los helicópteros, por el contrario, emplean de un 5% a un 15% de su energía en mover el rotor antipar.

Por último, cabe destacar que los drones con cuatro o más rotores utilizan rotores de diseño fijo similares a una hélice convencional (sin los mecanismos de cíclico y colectivo). En su lugar, emplean la asimetría de potencia de los motores (incrementando o reduciendo su régimen de giro de manera individual o de forma coordinada) para modificar la actitud del aparato y controlar así sus movimientos. Esto simplifica su diseño, su mantenimiento y ahorra peso.

*Unidad inercial.* A diferencia del equipo GPS, la unidad inercial es un sistema autónomo (no requiere ningún tipo de infraestructura externa para funcionar). Este equipo, además de tener un giróscopo en cada uno de los ejes, X, Y, Z del aparato (de los que obtenemos la actitud de vuelo), incluye tres acelerómetros. Estos sensores miden las aceleraciones lineales a las que se exponen cada uno de los tres ejes durante el vuelo. Integrando estas aceleraciones se obtiene la información de velocidad terrestre (velocidad de desplazamiento respecto al suelo) y, conociendo la duración de estas, se consiguen las distancias. Los vectores (dirección y sentido de las aceleraciones) se dan por medio de los giróscopos. Sabiendo las distancias recorridas y sus vectores se pueden deducir la posición de la aeronave siempre que se parta de una posición inicial conocida.

Tanto el GPS como el inercial, ofrecen información de altura o altitud real, velocidad terrestre (conocida como *GSo Ground Speed*), régimen de ascenso o descenso, así como indicación de rumbo.

# Pilotos Automáticos

Estos dispositivos procesan la información aportada por los sensores anteriores, siendo capaces de pilotar y guiar la aeronave de manera autónoma con gran precisión a través de los puntos de ruta por coordenadas (waypoints) que se le introduzcan desde el ordenador de control. Igualmente, seguirá el perfil de vuelo que se programe para cada punto de la ruta (velocidades, regímenes de ascenso/descenso, altitudes...), aplicando automáticamente las correcciones de deriva necesarias para compensar el desvío producido por el viento. Este equipo facilita en gran medida la operación del dron, posibilitando que el operador se centre en el manejo del resto de equipos que lleve instalado tales como las cámaras de vídeo o resto de sensores, en lugar de tener que ocuparse completamente del pilotaje.

Otra modalidad de funcionamiento del piloto automático normalmente basa en la asistencia de posicionamiento GPS, es el vuelo manual asistido. En este modo de operación, el dron se mantendrá autonivelado en el punto en que soltemos los controles de vuelo. También producirá un desplazamiento muy controlado y estabilizado a la hora de mover las palancas de mando hasta llevarlo a la nueva posición que deseemos. Para usar esta función en equipos guiados por GPS es necesario cerciorarse de tener una buena recepción de los satélites y tener la ubicación exacta conseguida, ya que de otro modo, es posible que el aparato se des controle involuntariamente tratando de seguir falsos posicionamientos.

Mientras usemos un modo de vuelo que emplee funciones automáticas, debemos estar siempre alerta y preparados para recuperar el control manual al instante, ante cualquier alteración imprevista en la trayectoria del RPA.