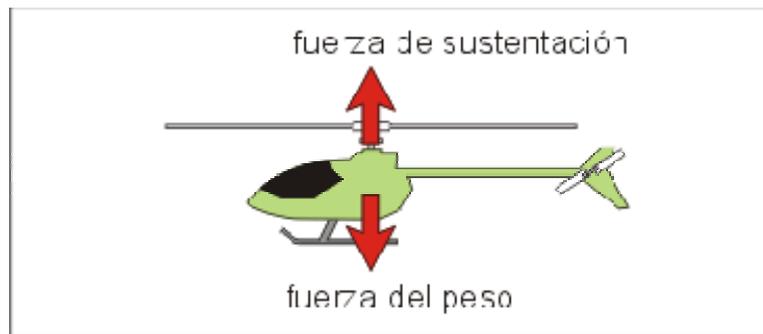


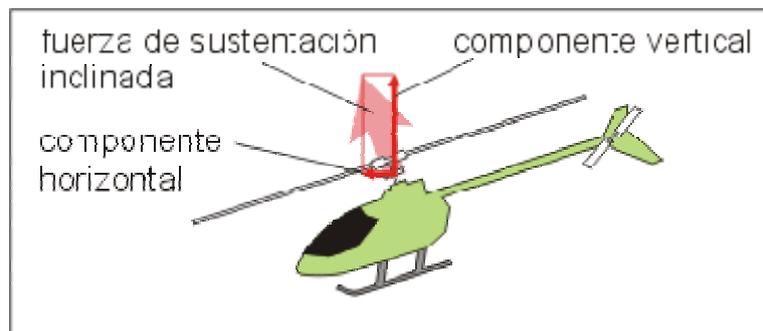
## Los mandos de un helicóptero

Si bien los mandos de un avión son relativamente simples al igual que la posición de sus superficies de control (timones, alerones, ...), en el caso de un helicóptero la cosa se complica bastante.

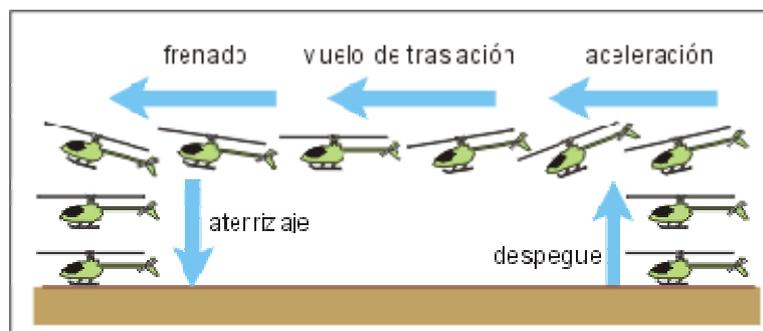
Partamos de la base que el helicóptero se encuentra en un vuelo estacionario. Es decir, el rotor principal gira a una cierta velocidad, suficiente para crear la sustentación necesaria y vencer la fuerza del peso del propio modelo.



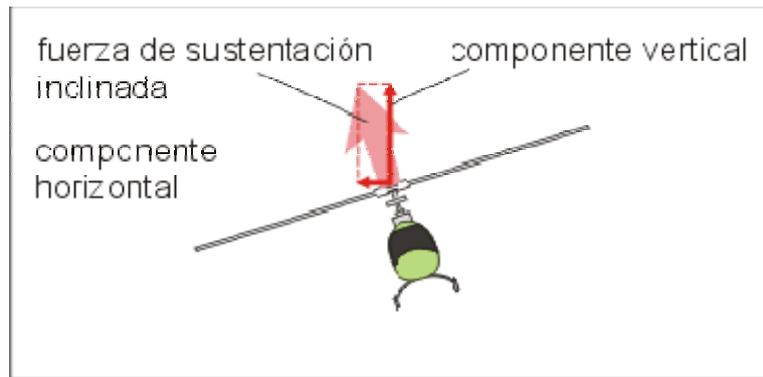
¿Cómo hacer ahora para que el modelo avance? Como sabéis, al contrario que un avión, el helicóptero no posee una hélice en el morro que le impulse hacia delante. El truco es simple: Inclinando el rotor principal hacia adelante, la fuerza de sustentación se inclina de la misma manera creando una fuerza en el sentido de la inclinación:



Y esto seguro que lo habréis observado en algún vuelo de un helicóptero. Al poco tiempo de despegar del suelo, se inclina hacia adelante y comienza a acelerar para pasar al llamado vuelo de traslación. En cambio, si quiere pasar del vuelo de traslación al estacionario, baja la cola para que ocurra exactamente lo contrario, es decir que la componente horizontal de la fuerza de sustentación se orienta hacia atrás frenando al helicóptero:



Exactamente lo mismo ocurre lateralmente:

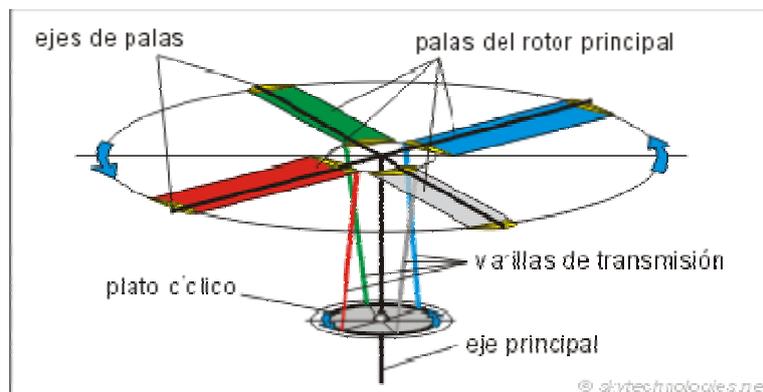


Resumiendo, el helicóptero es capaz inclinar el rotor a cualquier lado. Este es el mando que generalmente se tiene en el stick principal de la emisora (en los helicópteros tripulados, el piloto maneja estas funciones con la palanca principal que está situada entre las piernas). Cuando empujamos el stick hacia delante, el helicóptero se inclina hacia adelante. Lo mismo hacia atrás y lateralmente.

La pregunta ahora es cómo hacer que el rotor se incline hacia el lado deseado. Esta respuesta ya no es tan simple. En los próximos dibujos se explicará el principio del plato cíclico de una forma simplificada. Este tipo de control del rotor es el mismo que en los helicópteros reales.

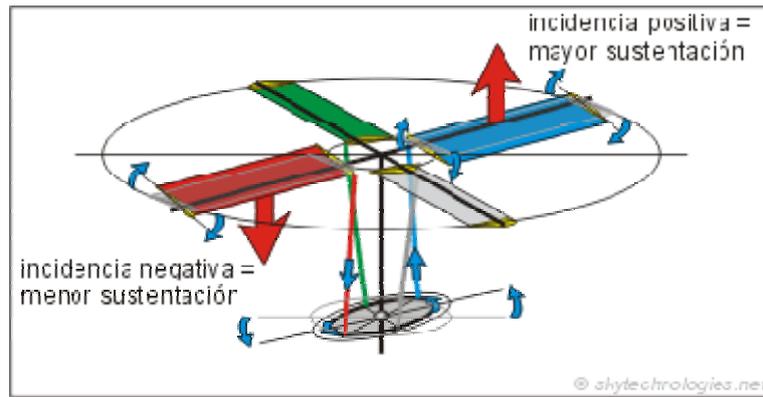
### El plato cíclico

Imaginémonos un rotor simplificado con cuatro palas:



Las palas están montadas sobre los ejes de palas de tal forma que puedan girar alrededor de éstos lo que permite cambiar la incidencia de las mismas. Para que las palas mantengan todas la misma incidencia, están unidas a unas varillas de transmisión -todas de la misma longitud- que a su vez están fijadas al plato cíclico. Este está compuesto de un plato exterior fijo y uno interior giratorio que están unidos mediante un cojinete que permite el giro entre ellos. En el plato exterior van fijadas las varillas de mando que vienen de los servos y en el plato interior que gira igual que el rotor se enganchan las varillas que controlan la incidencia de las palas. El plato cíclico interior y las palas giran alrededor del eje principal simultáneamente. En este caso en contra del sentido de las agujas del reloj. Con esta configuración, si comenzamos a girar el rotor alrededor del eje principal, las palas generarán una sustentación uniforme y equilibrada.

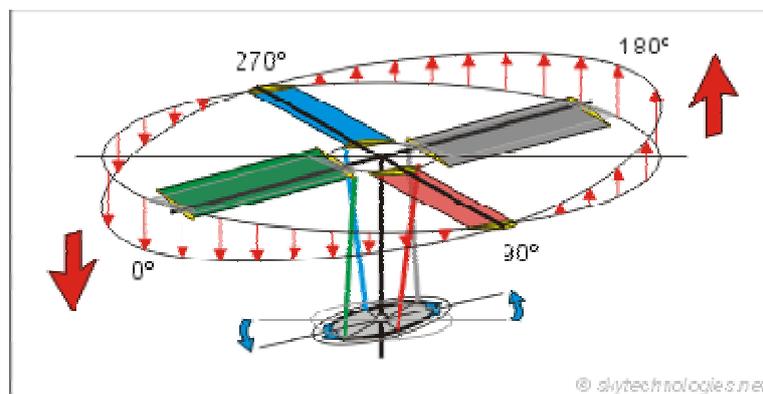
Para que el rotor se incline hacia algún lado será necesario que en alguna parte de la rotación se produzca más sustentación que en otra, cosa que conseguiremos cambiando cíclicamente la incidencia de las palas del rotor:



Para ello se inclina el plato cíclico (que de esto recibe su nombre). Miremos que pasa detalladamente: El plato cíclico se inclina. La varilla azul se eleva empujando en la parte delantera de la pala azul causando un giro de ésta alrededor del eje de palas obteniendo una mayor incidencia y a consecuencia mayor sustentación. En el lado opuesto del plato cíclico pasa exactamente lo contrario. Esta parte del plato baja, con lo que la varilla roja estira de la parte delantera de la pala originando una incidencia negativa de la pala, que da lugar a una sustentación negativa. En las otras dos palas esta inclinación del plato cíclico no tiene repercusión alguna, se quedan con la misma incidencia neutral.

Así pues, la pala azul produce una fuerza orientada hacia arriba y la roja una a la inversa, es decir hacia abajo, con lo que todo el conjunto tendería a inclinarse hacia la izquierda. (Los expertos me disculpen en este momento, porque bien sabrán que esto, debido a efectos de inercia no es del todo cierto. Pero en este momento para simplificar el entendimiento la mecánica este fenómeno no se tiene en cuenta.)

Para que este desequilibrio de sustentación se mantenga, el sentido de la inclinación del plato cíclico es constante, es decir en el caso del dibujo hacia la izquierda. Si giramos 90 grados el rotor en contra del sentido de las agujas del reloj pasa lo siguiente:

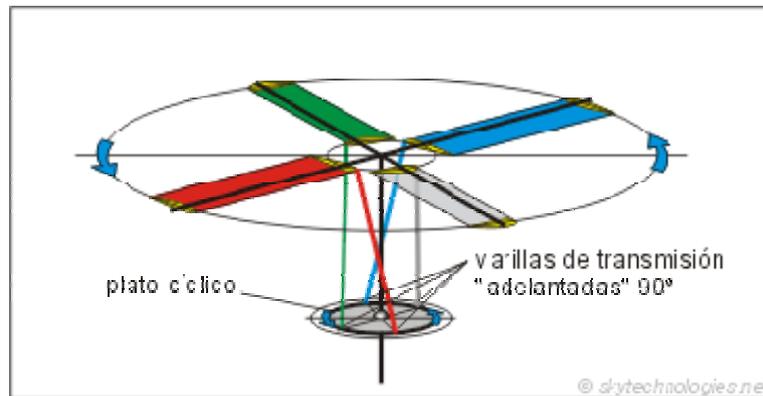


Las varillas de las palas azul y roja pasan por el punto neutral del plato cíclico con lo que su incidencia pasará a ser neutral. En cambio las palas verde y gris cambian su sustentación de la misma forma como lo hicieran 90 grados antes las otras dos palas. Es decir que una pala va cambiando su incidencia cíclicamente: En el lado izquierdo tiene una incidencia negativa, a lo largo de los próximos 90 grados de giro del rotor va aumentando su incidencia hasta estar neutral, entre los 90 y 180 grados sigue aumentando la incidencia llegando al máximo a los 180 grados de giro en la parte derecha. Entre los 180 y 360 grados vuelve a disminuir progresivamente la incidencia pasando por neutral a los 270 grados volviendo al punto de partida a la izquierda con incidencia negativa. Y así cada pala en cada giro!

### La inercia del sistema y su consecuencia

Como se indicó un poco más arriba, la incidencia de las palas y su efecto a lo largo de un giro de rotor no son del todo correctas. Debido a que la pala no genera su mayor

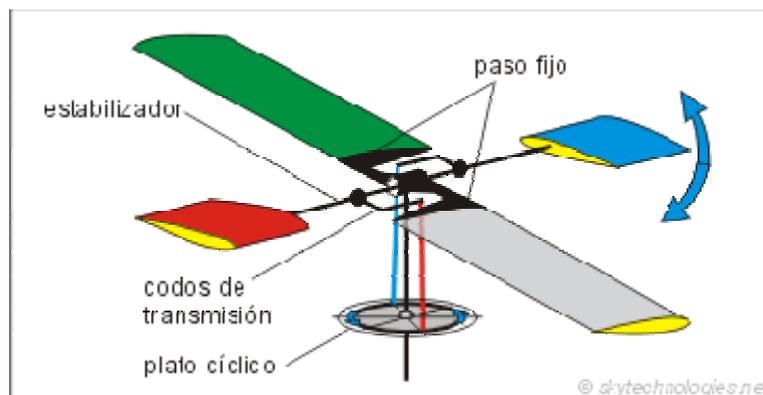
sustentación exactamente en el segmento de la rotación por la que está pasando en ese instante, el rotor sufre la mayor influencia de la pala aproximadamente 90 grados más tarde (muchos razonan esto con el efecto predecesor de un giroscopo, pero no es cierto, es simplemente la pasividad del sistema). En otras palabras: Si inclinamos el plato cíclico hacia adelante, en nuestro caso (sentido de giro del rotor en contra de las agujas del reloj) el helicóptero realmente se inclinaría hacia la izquierda. Para solventar ese problema, simplemente se cambia la posición de las varillas en el plato cíclico por 90 grados, de tal forma que en fondo las varillas vayan 90 grados adelantadas.



Obsérvese como las varillas están unidas aquí adelantadas 90 grados. El grado de esta pasividad a la reacción depende de la configuración y el tipo del cabezal del rotor. En los utilizados en el aeromodelismo son aproximadamente 90 grados. En helicópteros reales de cabezales semirígidos como el del BO105/BK117 el ángulo es de aproximadamente 78 grados.

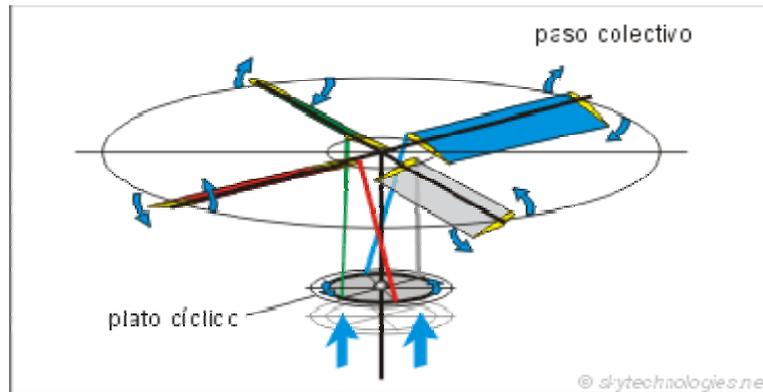
### Paso colectivo y paso fijo

Hemos visto que inclinando el plato cíclico hacia un lado el rotor se inclinará al mismo lado, con lo que podemos controlar las inclinaciones del helicóptero y con ello el vuelo de traslación. Llegados a este punto tenemos que diferenciar dos tipos de helicópteros. Los de paso fijo y paso colectivo. Los de paso fijo tienen palas que, al contrario de lo indicado arriba, no se pueden girar alrededor de el eje de palas, únicamente el estabilizador es capaz de girar.



Un detalle que se ve en el dibujo, es el uso de unos codos de transmisión que se ocupan de adelantar las varillas que recorren el plato cíclico en los 90 grados necesarios mencionados arriba para que el rotor se incline hacia el mismo lado que se inclina el plato cíclico. En los helicópteros de paso fijo el control de altura se consigue variando las revoluciones del rotor. Este mando se encuentra en el segundo stick de la emisora siendo la posición inferior la equivalente de motor parado y la superior la de máximas revoluciones. Normalmente si el stick está entre la posición centrada y el tercio superior el helicóptero se encuentra en vuelo estacionario.

En cambio en los helicópteros de paso variable es posible de cambiar la incidencia de todas las palas a la vez subiendo o bajando el plato cíclico.



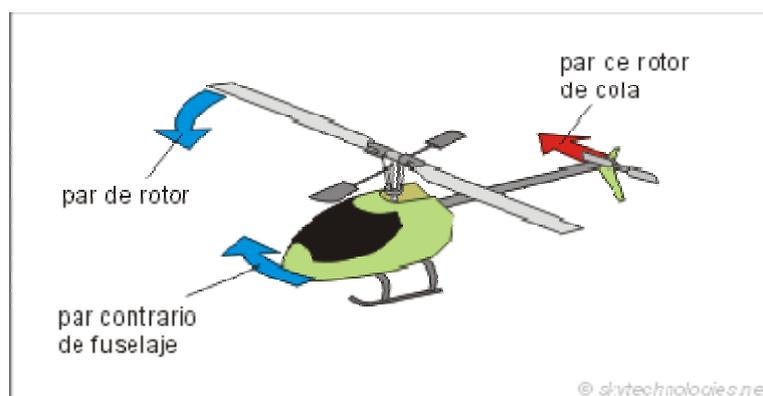
Al contrario que en los helicópteros de paso fijo, en este tipo no se controla la altura del helicóptero mediante las revoluciones del motor, sino por el cambio de paso. Es decir que en la emisora tendremos en el stick el mando de paso de rotor y no el acelerador del motor. En los helicópteros reales este mando se controla mediante una palanca situada al lado izquierdo del piloto parecido a un freno de mano. Cuando el piloto eleva la palanca aumenta el paso de las palas del rotor principal.

### Sistemas de estabilización

Las descripciones del control de las palas del rotor principal por encima de estas líneas, no recogen sistemas de estabilización. La más utilizada en aeromodelismo es la de Bell-Hiller. Generalmente se encuentran rotores de sólo dos palas sustentadoras y un estabilizador con dos palas pequeñas que no generan sustentación. Las palas sustentadoras y el estabilizador están unidos por un sistema de palancas mediante los cuales se transmiten las fuerzas estabilizadoras. El funcionamiento en concreto no se explicará aquí en este momento.

### La función del rotor de cola

Cuando el rotor gira hacia un lado impulsado por el motor del helicóptero genera una resistencia, sea por aerodinámica o por inercia, que ocasiona un giro contrario del fuselaje del helicóptero.



El rotor de cola sirve para parar este giro. Generalmente está impulsado por el mismo motor que impulsa el rotor principal mediante un engranaje desmultiplicador y un eje o una correa dentada. El mayor o menor empuje de este rotor se controla -si está impulsado por el mismo motor del rotor principal- por el cambio de paso de las palas. Y con esto tenemos el último de los controles de un helicóptero, que es la guiñada o giro alrededor del eje vertical del modelo. Este mando está situado normalmente en el segundo stick de la emisora horizontalmente y comparable al timón de dirección de un avión. En el helicóptero real este

mando se controla -al igual que en los aviones- mediante dos pedales. Si el piloto aprieta el pedal izquierdo, el morro del helicóptero girará hacia la izquierda y la cola detrás suyo a la derecha. Igualmente sucederá si inclinamos el stick de la emisora a la izquierda.

### **Concentración y coordinación**

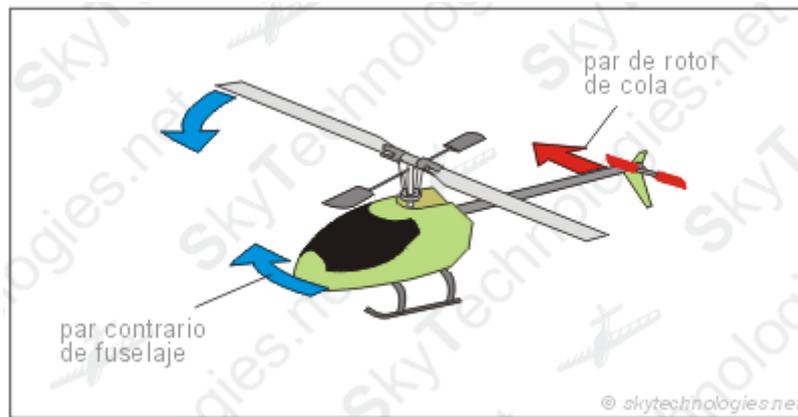
El helicóptero es un aparato que requiere plena atención. Únicamente ya por el hecho de que es por naturaleza inestable. Por muy bien ajustado que esté, siempre hay que ir corrigiendo para mantenerlo en vuelo. Yo siempre lo comparo a mantener un palo en equilibrio vertical encima del dedo de la mano. Por otro lado, cuando pasamos de un vuelo estacionario a uno de traslación es necesario compensar con el paso la pérdida de sustentación por la inclinación del rotor. El mando de cola (guiñada) es un mando esencial que no podremos pasar por alto como por ejemplo en un avión de alerones. Todos los mandos están en acción. Por ejemplo para volar una curva es necesario primero estar en un vuelo de traslación hacia adelante, inclinar el helicóptero alrededor del eje longitudinal (como un avión o una moto), girarlo alrededor de su eje vertical con el rotor de cola, tirar un poco (mando traslacional hacia atrás) pero sin pasarse para que no pierda velocidad el modelo y aumentar el pitch para no perder altura.

## Inclinación lateral de un helicóptero en vuelo estacionario

*Seguro que lo habréis observado alguna vez: Despegáis el helicóptero del suelo y cuando lo tenéis en vuelo estacionario delante de vosotros os dais cuenta que el fuselaje del modelo está inclinado lateralmente. Como muy tarde salta a la vista cuando se intenta aterrizar suavemente: siempre un patín toca primero el suelo que el otro. Esto a qué es debido?*

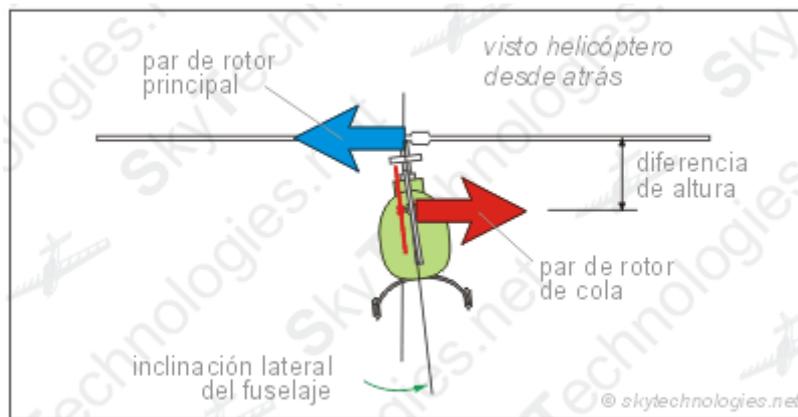
La explicación es simple. La causante de esta inclinación es la posición del rotor de cola. No tiene nada que ver con fuerzas de precesión giroscópicas del rotor ni las misteriosas fuerzas de Coriolis. Echémosle un vistazo a la actuación del rotor de cola:

Como bien es sabido, la fuerza del motor montado rígidamente sobre el chasis del helicóptero que impulsa el rotor, crea un antipar que produce un giro del fuselaje al sentido contrario del rotor. El rotor de cola produce una fuerza opuesta en un extremo para que la orientación del fuselaje se pueda mantener fija.



Con el fin de simplificar el diseño y la construcción del conjunto de cola, en la mayoría de los helicópteros RC, el rotor de cola se aloja en el extremo de un tubo recto que está montado a una cierta distancia por debajo del rotor principal. La distancia entre el plano del rotor y el tubo de cola está definida por el diseñador del helicóptero. Éste necesita una distancia mínima de seguridad para que en una maniobra brusca las palas del rotor principal no choquen contra el tubo de cola.

Así, el centro del rotor de cola montado en el extremo del tubo de cola recto quedará por debajo del plano del rotor principal. Esto tiene como efecto, que la fuerza del rotor de cola que crea el antipar no esté alineada con la fuerza de par del rotor principal que tiene su origen exactamente en el plano de rotor:



Si nos imaginamos el fuselaje del helicóptero libremente colgado debajo del rotor principal, veremos cómo la fuerza del rotor de cola no se encuentra en línea con el plano del rotor principal, por lo que al actuar sobre el fuselaje, lo desvía y produce la inclinación de éste.

El nivel de desviación depende de varios factores: El peso del fuselaje, la posición del centro de gravedad, la distancia a la que está por debajo el rotor de cola y naturalmente de la intensidad de la fuerza que genera el rotor de cola ...y ésta depende a su vez del tamaño del rotor principal, el paso de las palas y las revoluciones por minuto a la que gira el rotor principal. Generalmente, cuanto más pequeño sea el helicóptero, más se apreciará este efecto. Por ejemplo en el Piccolo de Ikarus este efecto es tan acusado, que el fabricante incluso ha diseñado los patines a diferentes alturas para disimularlo un poco y mejorar la estabilidad en el aterrizaje.

La solución para evitar este efecto de inclinación es bastante sencillo. Sólo hace falta que el centro del rotor de cola se encuentre en una altura con el plano del rotor principal, como por ejemplo en el helicóptero BO105:



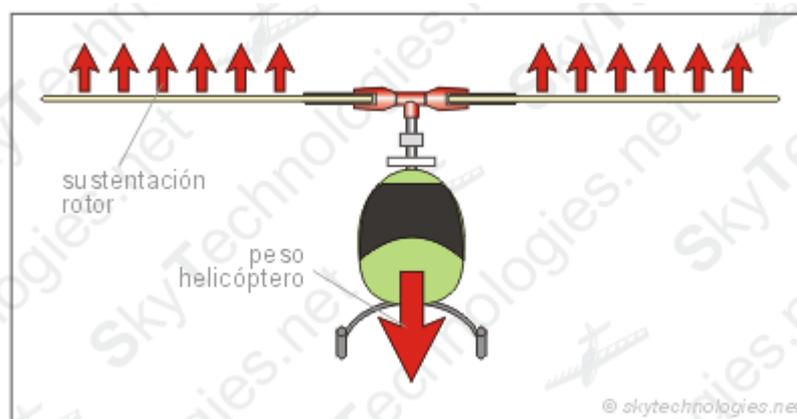
Pero como ya comenté más arriba, la realización técnica es bastante más complicada. Se necesitan más piezas, éstas aumentan el peso del modelo y son fuentes adicionales de posibles fallos o imprecisiones en forma de holguras... En los helicópteros RC 'sport' seguro que no vale la pena. Esto sólo será algo para los especialistas en maquetas.

## La dinámica del rotor

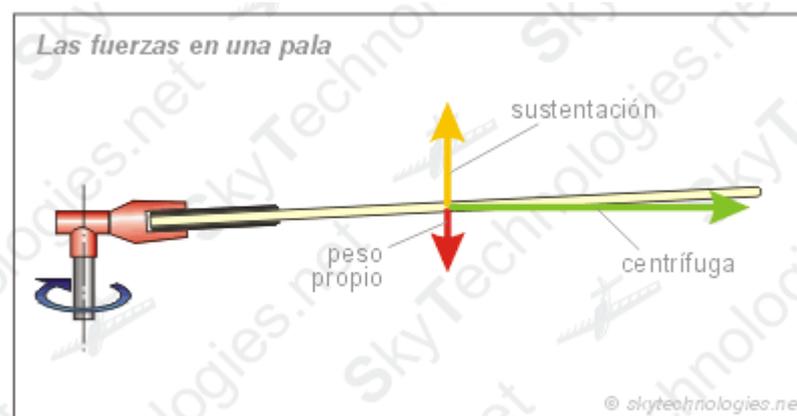
*El secreto de un mando cíclico preciso y un vuelo suave está en el perfecto equilibrio del rotor. Sin embargo se conocen dos tipos de equilibrio: el estático y el dinámico. ¿ Donde está la diferencia y cual es el idóneo en que caso?*

El rotor principal es la pieza central de cada helicóptero. A fin de cuentas mantiene todo el aparato en el aire y mediante un complejo sistema de mandos permite que se pueda inclinar a todos los lados. Las palas en giro representan una considerable masa en movimiento circular que está expuesta a una serie de fuerzas. Para entender la razón de un equilibrio dinámico, primero tenemos que hacer una pequeña excursión y analizar las cargas que sufre el rotor de un helicóptero.

Como siempre nos miramos el tema desde el principio. El rotor situado encima del cuerpo del helicóptero genera mediante rotación la suficiente fuerza de sustentación como para vencer el peso de todo el aparato.



Si ahora sacamos una pala del sistema y analizamos qué fuerzas actúan exactamente mientras se somete a rotación, encontraremos las siguientes tres: 1.- La fuerza vertical hacia abajo que genera el propio peso de la pala, 2.- la fuerza opuesta hacia arriba, que es la fuerza de sustentación y deberá levantar todo el helicóptero y 3.- finalmente la fuerza centrífuga de la masa en rotación que es la pala.



Ésta última, la fuerza centrífuga, es de largo la más elevada de todas! La fuerza del propio peso es la más reducida y será completamente absorbida por la de sustentación, que aparte del peso de la pala deberá levantar todo el modelo. Es decir que en todo caso, en un helicóptero en vuelo, habrá una pareja de fuerzas que atacan la pala del rotor: Una hacia arriba que intentará levantar la pala y otra hacia afuera que intentara bajarla, o mejor dicho, alinearla a un ángulo recto con el eje de giro. Esto tiene como consecuencia, que el extremo

exterior de la pala se elevará más o menos por encima del centro del rotor siguiendo así con su giro de rotación la forma de un cono con la punta hacia abajo. Por ello el ángulo que se forma se denomina ángulo de cono.



El valor de este ángulo depende del número de revoluciones por minuto que gira el rotor, del peso del modelo, del peso de las palas y del ángulo de paso de las palas. Y aunque parezca que no, SIEMPRE hay un ángulo de cono. Esto es ley física!

En la siguiente imagen se puede apreciar en un Raptor 30 en vuelo estacionario, unas 1.600 r.p.m. en el rotor principal, un peso de aproximadamente 2.900g y de 3° a 4° de paso positivo en las palas.



El ángulo de cono disminuye con el tamaño de los modelos. Porque? Principalmente porque el número de revoluciones por minuto del rotor puede ser más elevado. Esto es debido a que el número de revoluciones está limitado por dos factores. Por un lado por la fuerza centrífuga que pueden soportar componentes como el portapalas, eje central, rodamientos, tornillos, etc., y por otro lado la velocidad de las puntas de las palas. Ambos factores incrementan con el aumento de revoluciones y tamaño. Cuanto más grande el rotor, más pesadas las palas y mayor la velocidad de la punta de las palas debido a la mayor distancia que recorre la punta en una circunferencia de mayor diámetro. En cambio, cuanto más pequeño el rotor, a más revoluciones por minuto lo podremos girar.

Esto se puede observar en las siguientes fotos: Si bien en el Dragonfly 35 el ángulo de cono casi es inapreciable (pero está ahí!)

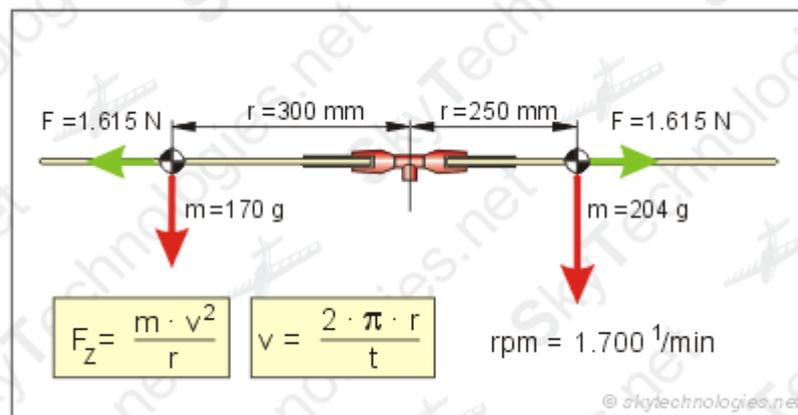


...en el helicóptero real es muy acusado:



Pero ¿qué tiene que ver ahora toda esta explicación con el equilibrado dinámico o estático?

Para eso es necesario hacer una excursión a la física. Analicemos la situación concreta de la siguiente imagen:



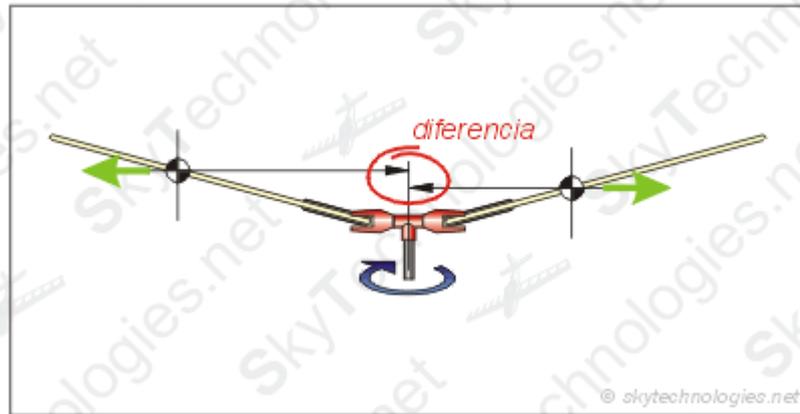
F<sub>z</sub>: fuerza centrífuga (N)  
 m: masa (kg)  
 v: velocidad (m/s)  
 r: radio (m)  
 t: tiempo (s)

En este caso, en la pala izquierda el centro de gravedad está situado a 300mm del eje del rotor y el peso es de 170g. En la pala derecha el centro de gravedad está situado a 250mm y el peso de la pala es de 204g. Es decir, una pala pesa 170g y la otra 204g. Rápidamente

tenderíamos a pensar que este rotor no puede estar equilibrado, puesto que las palas tienen una diferencia de peso de 34g. Sin embargo sí lo está! Porque las distancias de los centros de gravedad son diferentes y en este caso coinciden exactamente para que el sistema esté en equilibrio.

Esto cuenta tanto para el equilibrio estático (el rotor no gira) como el dinámico (el rotor está en giro). Aunque parezca que la fuerza centrífuga debería de ser más alta en la pala de mayor peso, ésta también tiene una dependencia de la distancia a la que se encuentra el centro de gravedad del eje y en este caso también coincide.

Pero este caso sólo es válido si las palas se encuentran exactamente en ángulo recto con el eje central. Ahora es donde entra en juego el ángulo de cono explicado arriba... Si ahora doblamos las palas hacia arriba debido a las cargas aerodinámicas, los diferentes centros de gravedad se sitúan a una altura diferente a lo largo del eje del rotor y esto es lo que finalmente causará vibraciones:



En resumen, si queremos un rotor perfectamente equilibrado, deberemos hacer coincidir tanto los pesos como los centros de gravedad de ambas palas. Por otro lado, como vimos arriba, cuanto más pequeño el helicóptero y más altas las revoluciones del rotor principal, menos ángulo de cono y menos influencia de este desequilibrio. Es más, la experiencia ha demostrado que todo rotor que gira a más de 2.000rpm la diferencia entre un equilibrio dinámico y un estático ya no es perceptible...