

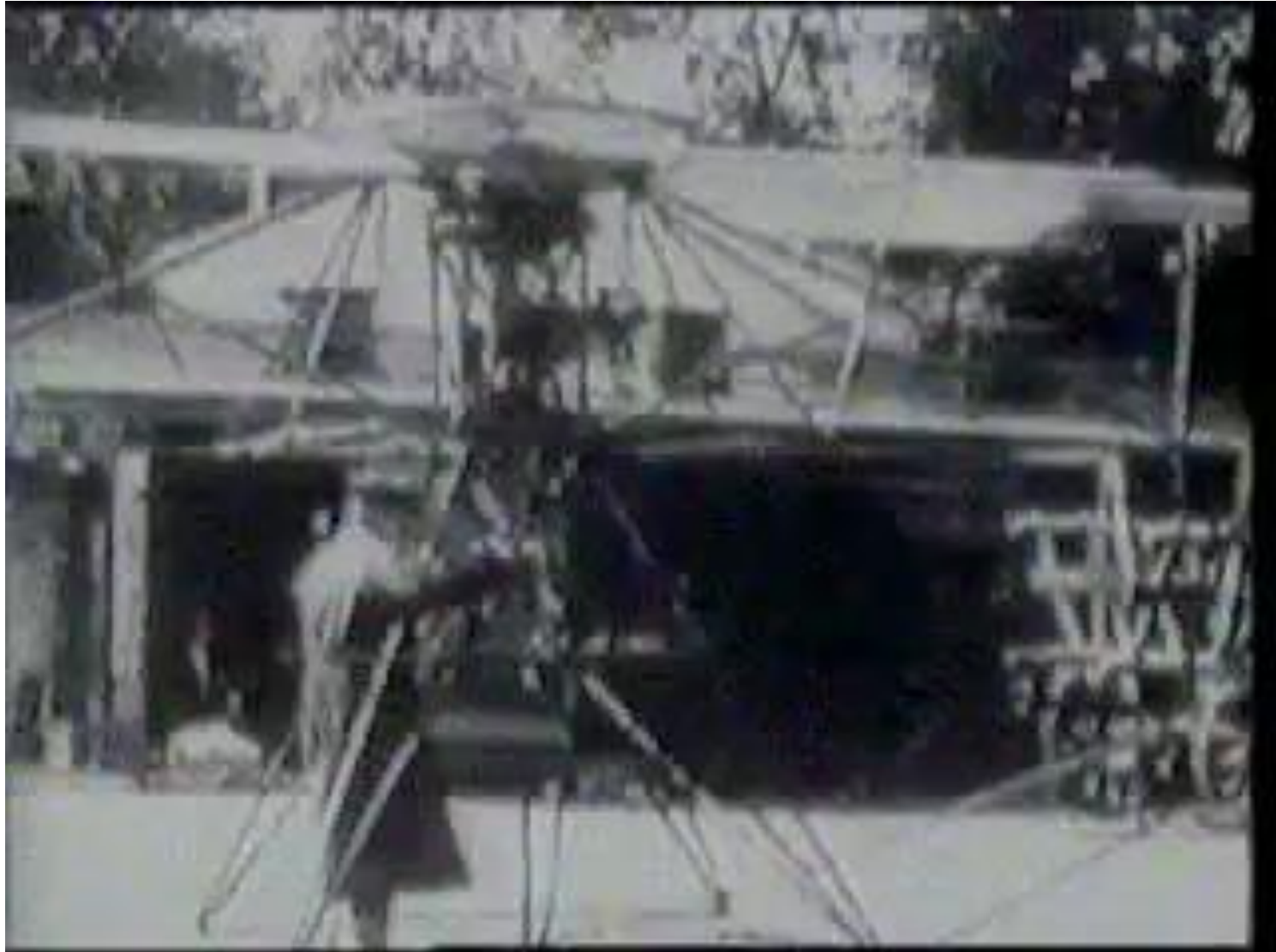
ALAS ROTATIVAS

1^{ra} PARTE



ALAS ROTATIVAS

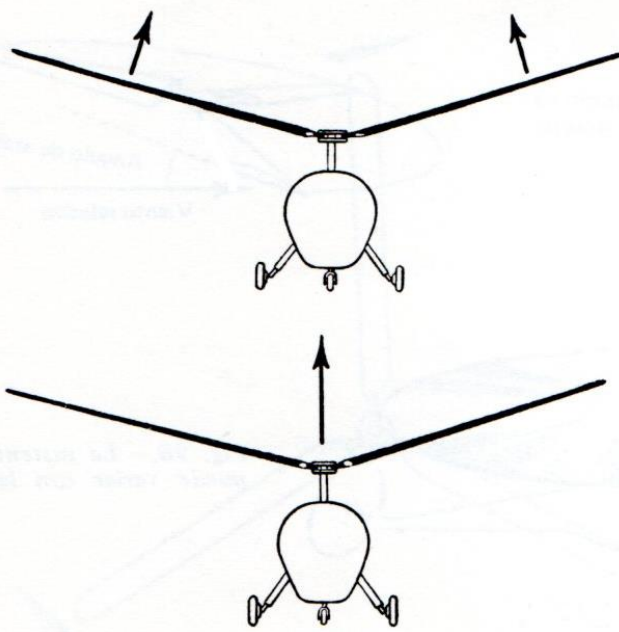
Historia



ALAS ROTATIVAS



ALAS ROTATIVAS

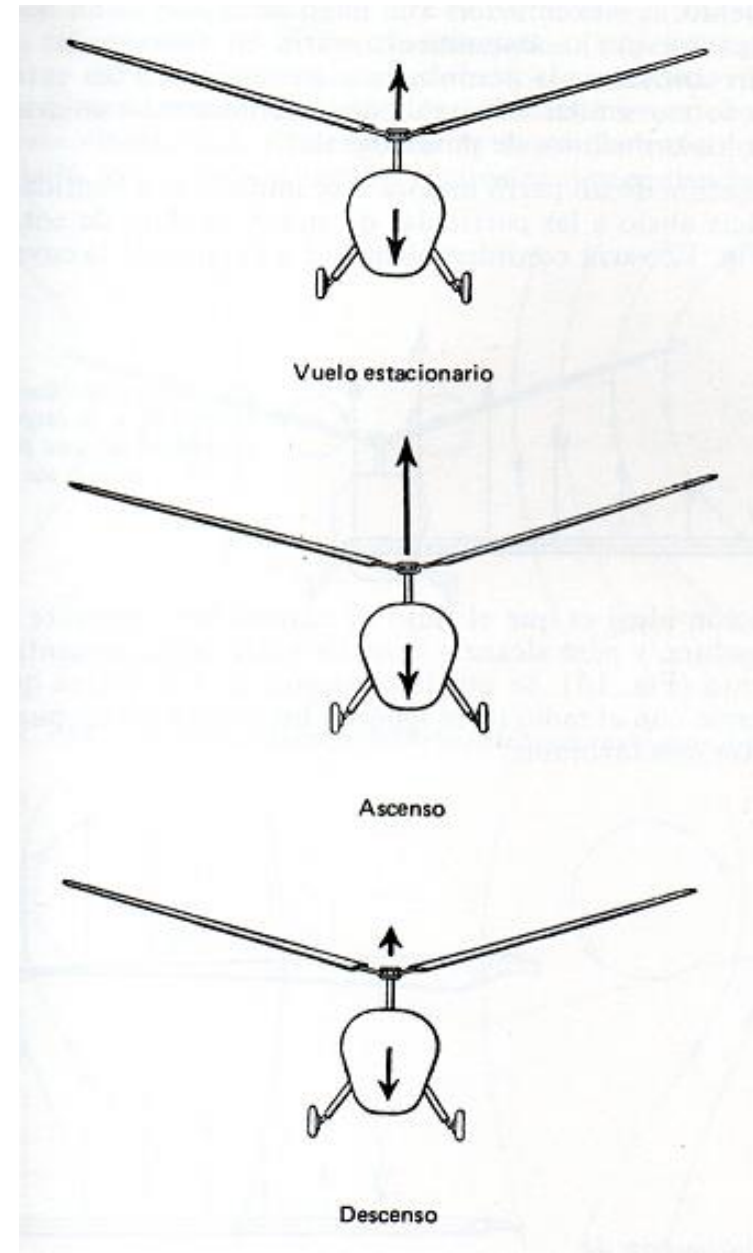


Para que un helicóptero se eleve se debe aplicar una fuerza hacia arriba.

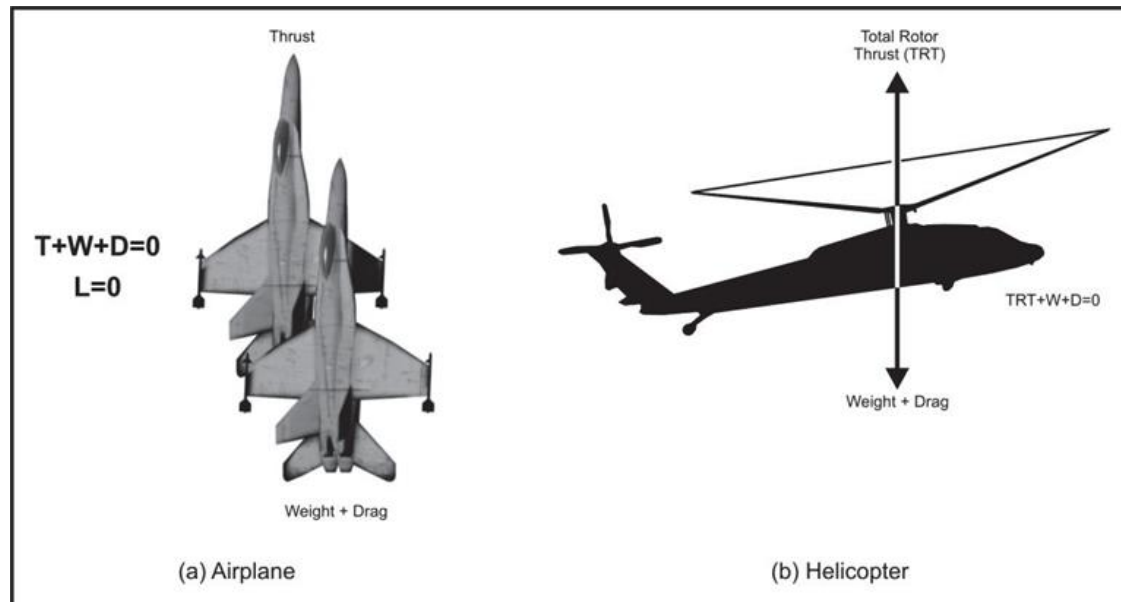
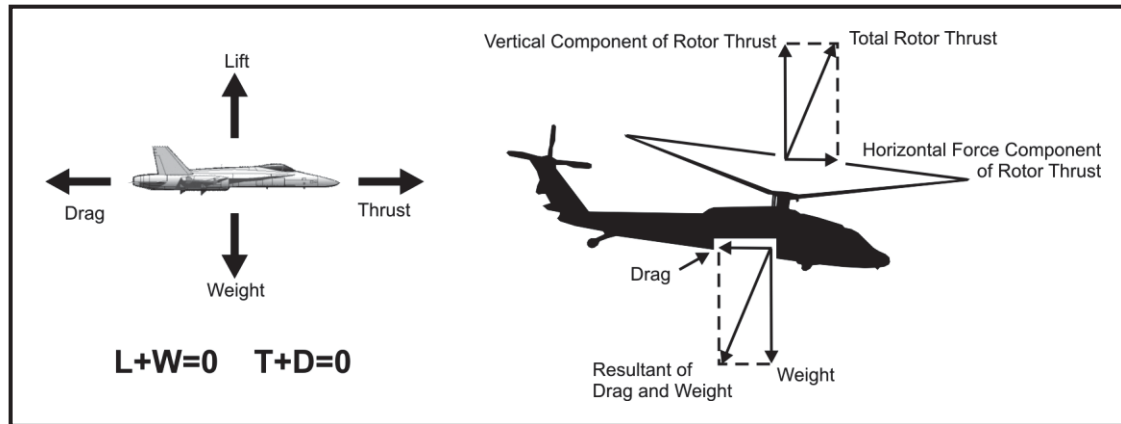
El motor suministra la potencia inicial y hace girar las palas produciendo que sus perfiles generen sustentación de igual forma que el ala de un avión, con la diferencia que tienen un movimiento angular en vez de lineal.

Si el rotor tiene suficiente velocidad angular, al aumentar el paso, las palas tienden a elevarse y arrastran a la aeronave hacia arriba por encontrarse unida a ellas.

Como en los aviones, la sustentación depende del ángulo de ataque y del cuadrado de la velocidad, por lo tanto en el caso del rotor principal la sustentación depende del paso de sus palas y de su velocidad angular.



ALAS ROTATIVAS



ALAS ROTATIVAS

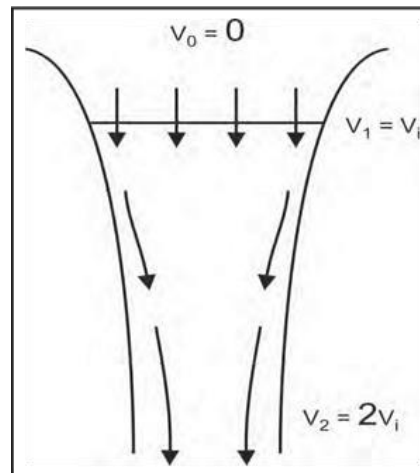
Teoría de la Cantidad de Movimiento.

La teoría muestra que dada una velocidad inicial (v_0) muy por encima del rotor, el sistema acelera el aire hacia abajo a través de los rotores hasta una velocidad v_1 (velocidad inducida) basada en el diámetro del rotor, la densidad del aire y peso del helicóptero.

La potencia se puede expresar en términos de fuerza (F) y velocidad (V), o alternativamente como par (Q) y rpm del rotor (Ω):

$$P = F * V$$

$$P = Q * \Omega$$



Estas relaciones permiten analizar una parte importante de la potencia requerida para volar, llamada potencia inducida (P_i). La potencia inducida es la parte de la potencia total utilizada para acelerar el aire hacia abajo y crear elevación. Entonces, en equilibrio, el empuje o la fuerza generada por el rotor debe ser igual al peso de la aeronave, por lo que la potencia inducida requerida para estar en equilibrio es entonces una función del peso de la aeronave, la Tracción (T) para el empuje y la velocidad inducida (V_i):

$$P_i = T * V_i$$

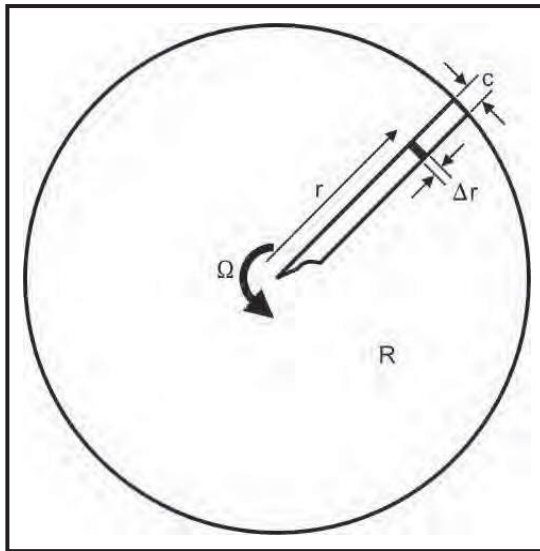
ALAS ROTATIVAS

Teoría del Elemento de Pala.

Mientras que la teoría de la Cantidad de Movimiento puede describir las fuerzas generales en todo el disco del rotor, la teoría del Elemento de la Pala permite una mayor fidelidad en la comprensión de la acción y reacción de las palas individuales dentro de un disco del rotor.

La base de la teoría es tomar una porción muy pequeña de la pala del rotor y determinar las fuerzas que actúan sobre ella. La porción que elegimos tendrá un ancho Δr y una longitud c (correspondiente a la longitud de la cuerda de pala). Al multiplicar estas dos distancias juntas, ahora tenemos un área sobre la cual se pueden calcular las fuerzas usando la ecuación de sustentación.

El elemento de pala se encuentra a una distancia, r , del cubo, por lo tanto, su velocidad está determinada por Ωr .



$$\Delta L = 1/2 \rho (\Omega r)^2 (c \Delta r) c_L$$

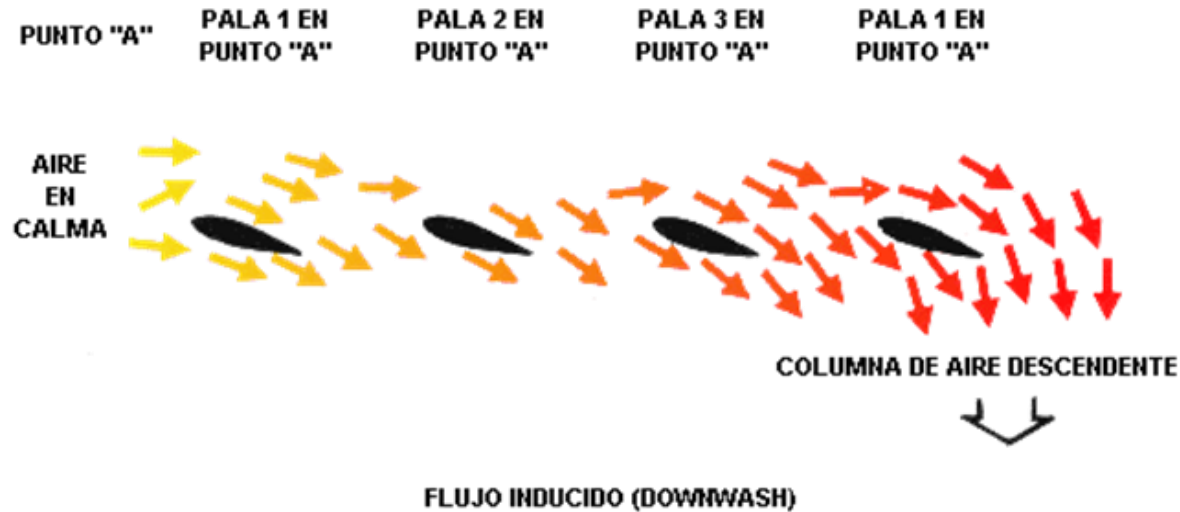
Se obtiene la sustentación generada por ese elemento de pala.

La repetición de este proceso muchas veces dará la sustentación en la pala.

Multiplicando por el número de palas se obtiene la sustentación general del rotor.

ALAS ROTATIVAS

Viento Relativo



En un helicóptero, con un día sin viento y en vuelo estacionario, el viento relativo rotacional será creado por la rotación de las palas.

Como el rotor está moviéndose horizontalmente, el efecto es desplazar algo de aire hacia abajo (downwash).

El movimiento de las palas a través del mismo trayecto da un punto en rápida sucesión (un rotor con tres palas girando a 320 RPM, tendrá en el mismo punto un pasaje de palas de 16 veces por segundo).

El dibujo muestra como el aire calmo es cambiado a una columna de aire descendente por acción de las palas del rotor.

Este flujo de aire es llamado Flujo Inducido (Downwash); este flujo de aire hacia abajo es aún inducido en condiciones de viento.

ALAS ROTATIVAS

Viento Relativo

El tránsito del flujo de aire a través del disco del rotor modifica el viento relativo rotacional.

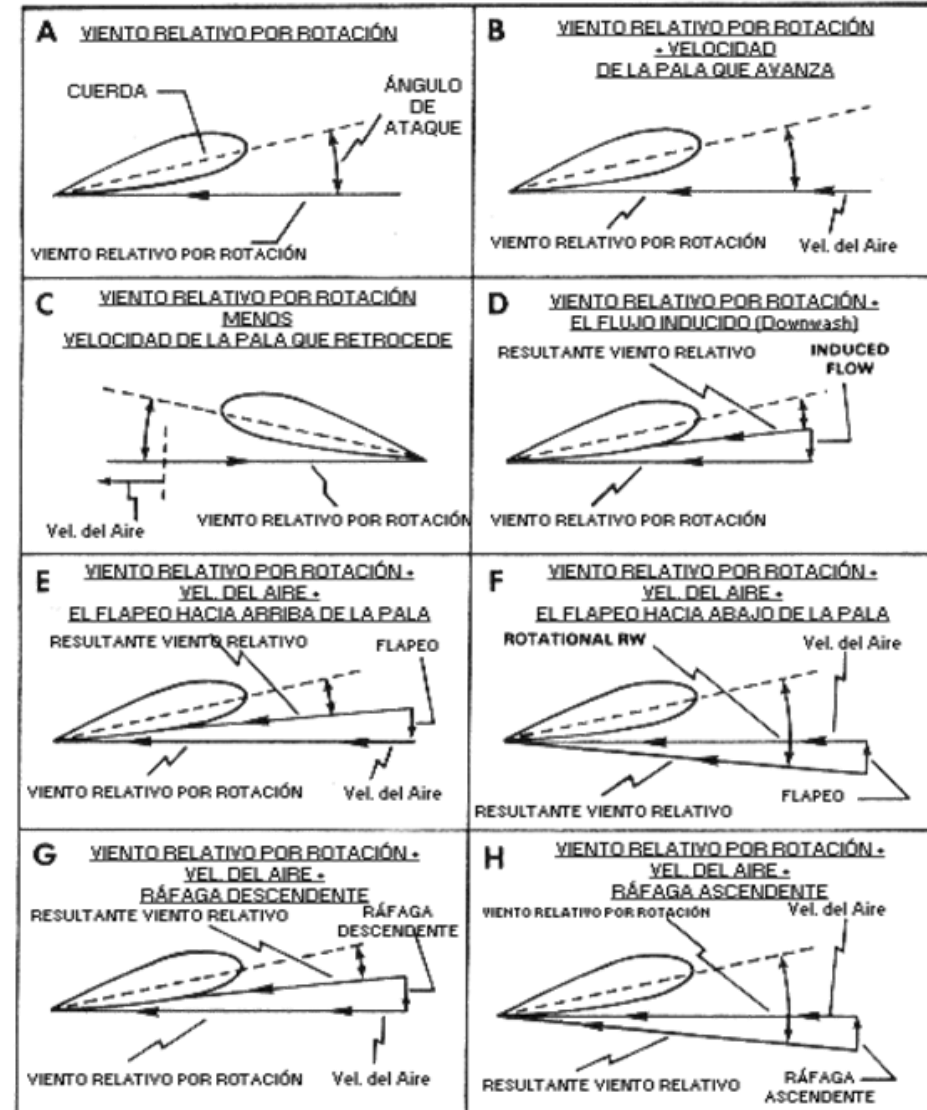
El flujo de aire de la rotación, modificado por el flujo inducido, produce la Resultante del Viento Relativo.

El ángulo de ataque es reducido por el flujo inducido, causando sobre el perfil una sustentación menor.

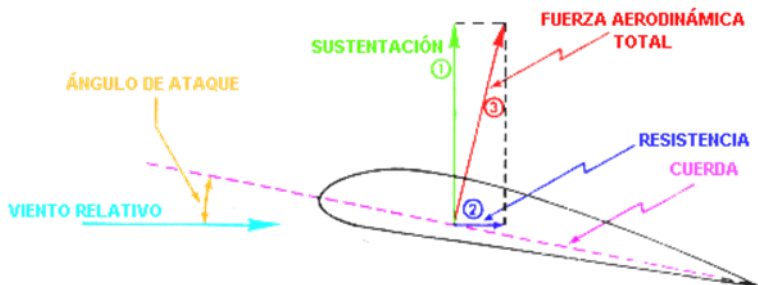
Cuando el helicóptero tiene movimiento horizontal, la resultante del viento relativo es además cambiada por la velocidad del helicóptero.

Se debe tener en cuenta que también cambia si se encuentra en ese momento en la pala que avanza o en la que retrocede, sumando o restando el viento relativo.

El flujo inducido también sufre variaciones con la velocidad de desplazamiento.

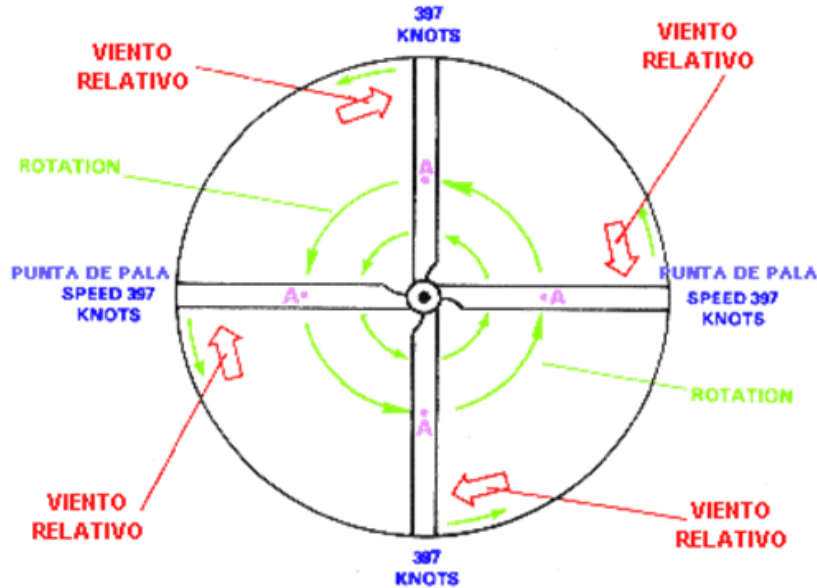


COMPONENTES DEL VIENTO RELATIVO



ALAS ROTATIVAS

Velocidad del Rotor



Durante el vuelo estacionario, el flujo de aire sobre las palas es producido por el giro del rotor del helicóptero.

La velocidad cercana a la raíz es menor que en la punta, tomando un punto medio entre la raíz y la puntera de pala (punto A), se obtiene una velocidad superior a la de la raíz pero menor a la de la puntera, la velocidad tangencial aumenta a medida que aumenta el radio.

La sustentación varía con el cuadrado de la velocidad, o sea que cuando la velocidad aumenta al doble, la sustentación se verá aumentada cuatro veces.

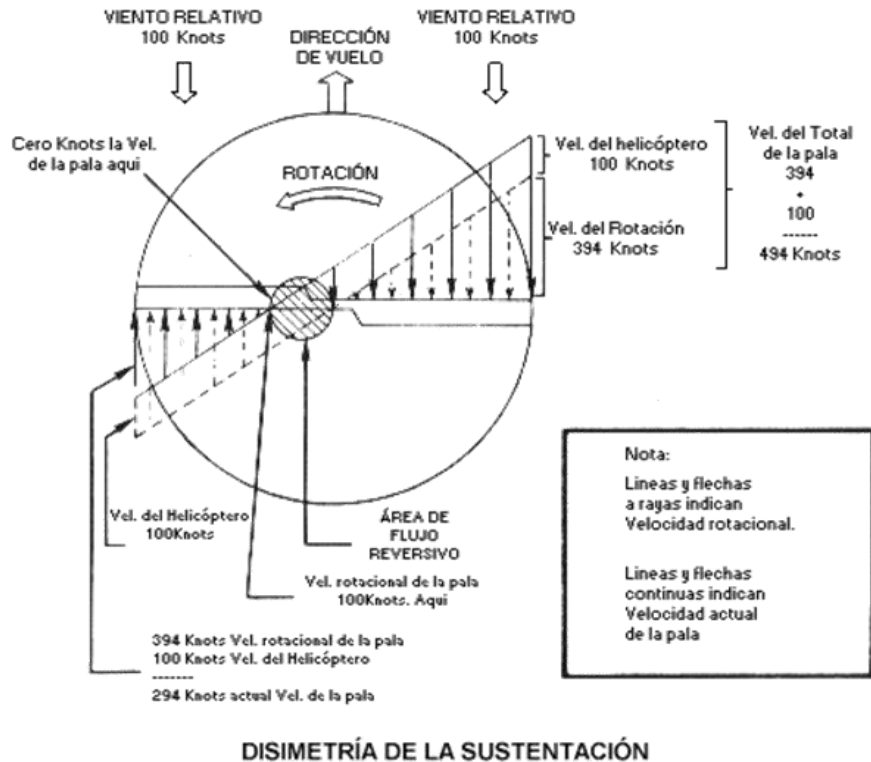
Por lo tanto en el punto "A" se tendrá solo 1/4 parte de la sustentación total de la pala (asumiendo que el ángulo de ataque y la superficie de la pala son los mismos a lo largo de ella).

Las palas de los helicópteros son construidas con una "Torsión" (torsión "Twist"), con un ángulo de ataque mayor en la raíz que en las puntas, logrando con esto una distribución de la sustentación más uniforme desde la raíz hacia la puntera.



ALAS ROTATIVAS

Asimetría de Sustentación



La asimetría de la sustentación sobre el rotor de un helicóptero se debe a la diferencia de sustentación entre la mitad del rotor que avanza y la mitad que retrocede.

La pala que pasa por el rotor de cola y avanza hacia adelante por el lado derecho del helicóptero (giro en contra de las agujas del reloj) tiene un incremento de velocidad la cual alcanza su máxima a los 3/4 del giro.

A partir de ese punto (3/4 giro) hacia la nariz del helicóptero la pala va perdiendo velocidad y continúa en esta situación hasta obtener la mínima a los 90° a la izquierda y luego comienza nuevamente a ganar velocidad.

Se genera una zona circular sombreada llamada "Área de Flujo Inverso (reverso)".

La velocidad en el extremo de esta zona es de cero nudos, dentro de esta zona el aire se mueve desde el borde de fuga hacia el borde de ataque.

Desde el extremo de esa zona hacia la punta de la pala la velocidad aumenta hasta 294 Knots (en el ejemplo).

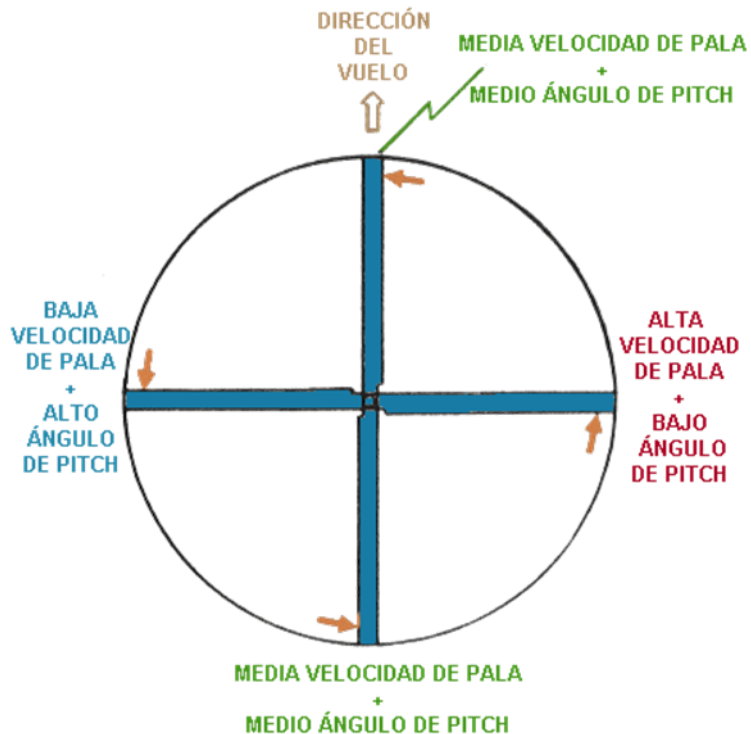
A una velocidad de 100 Kts. del helicóptero, como en el ejemplo, existe una diferencia de 200 Kts. entre la pala que avanza y la que retrocede.

Puesto que la sustentación se incrementa con el cuadrado de la velocidad, una potencial variación de la sustentación existe entre la zona del rotor que avanza con la zona que retrocede.

Esta diferencia de sustentación debe ser controlada sino un helicóptero realizaría un rolido hacia la izquierda.

ALAS ROTATIVAS

Asimetría de Sustentación



La sustentación en las dos zonas mantiene dos factores de su ecuación, densidad y la superficie de la pala permanecen constantes tanto en la pala que avanza como en la que retrocede.

Los factores que varían son la velocidad y el ángulo de ataque, factores que deben compensarse entre ellos para contrarrestar la asimetría de la sustentación.

Las RPM del rotor y la velocidad del helicóptero en vuelo hacia adelante, controlan la velocidad de la pala, ambos factores deben mantenerse en ciertos valores operativos.

La figura muestra la relación que existe entre el ángulo de paso de la pala y la velocidad de la misma, en vuelo hacia adelante.

El ángulo de paso es más bajo sobre el lado del disco que avanza para compensar el aumento de la velocidad de la pala sobre este sector y por el contrario es aumentado el ángulo de paso sobre el lado con menor velocidad de la pala.

Estos cambios se realizan en forma automática y fuera del control del piloto por un mecanismo muy simple que permite a la pala subir o bajar ("flapear") libremente.

Cuando la pala comienza a ganar velocidad (parte derecha del dibujo) comienza a tener más sustentación, al tener más sustentación la pala va a subir al colocársele un dispositivo que permita que la pala suba (pin horizontal), su viento relativo hace que el ángulo de ataque disminuya y por lo tanto la sustentación disminuye también, autorregulándose en todo el viaje alrededor de su eje.

En la parte izquierda del rotor con la disminución de la velocidad y la consecuente disminución de la sustentación la pala va a bajar, aumentando su ángulo, y aumentando luego la sustentación, esta articulación se la conoce como Articulación de Batimiento ó Flapeo.

ALAS ROTATIVAS

Pérdida en la Pala que Retrocede

Así como la pérdida limita las posibilidades de la disminución de velocidad mínima de un avión, la pérdida en la pala que retrocede en vuelo hacia adelante, limita el desarrollo de altas velocidades de los helicópteros.

La velocidad de la pala que retrocede es menor a medida que la velocidad del helicóptero aumenta.

Esta parte del rotor (la izquierda) debe mantener una sustentación igual a la de la parte derecha, por lo tanto al disminuir "su" velocidad, aumentará el ángulo de ataque para seguir produciendo la misma sustentación.

En algún momento de este proceso, si se sigue aumentando la velocidad del helicóptero, la pala tendrá un alto ángulo de ataque que le provocará que entre en pérdida.

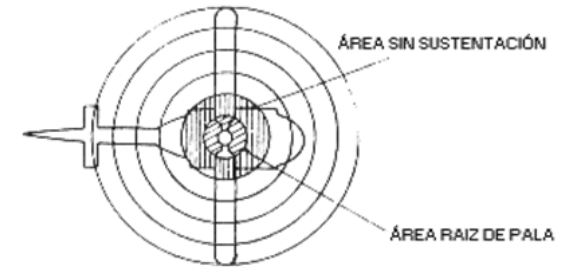
En vuelo hacia adelante, la "zona de no -sustentación" se correrá hacia la izquierda del centro.

Esto produce que la parte exterior de la pala deba generar más sustentación para compensar la disminución de la sustentación en la parte interna de la misma.

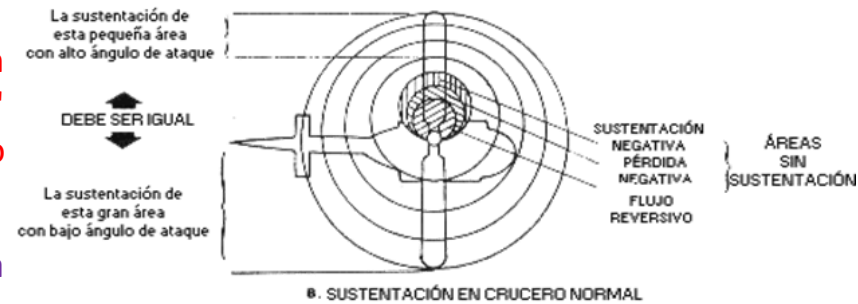
En el área de "flujo inverso (reverso)", la velocidad de rotación de esta parte de la pala es menor que la velocidad del helicóptero, por lo tanto el flujo de aire se desplaza desde el borde de fuga hacia el borde de ataque.

Esta zona tiene un alto ángulo de ataque pero no es suficiente como para generar sustentación.

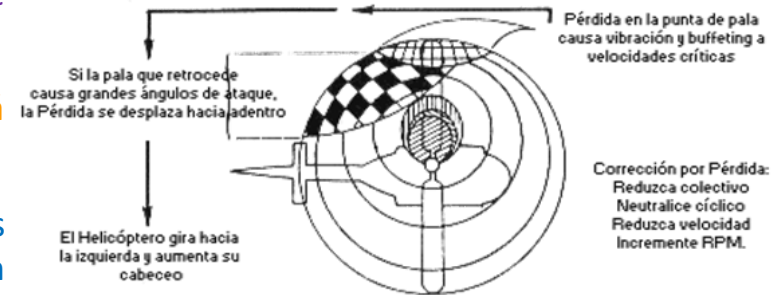
La figura muestra un disco de rotor que ha alcanzado una condición de pérdida sobre la pala que retrocede.



A. DISTRIBUCIÓN DE LA SUSTENTACIÓN EN ESTACIONARIO



B. SUSTENTACIÓN EN CRUCERO NORMAL



C. DISTRIBUCIÓN DE LA SUSTENTACIÓN EN VELOCIDADES CRÍTICAS

ALAS ROTATIVAS

Pérdida en la Pala que Retrocede

La distribución del ángulo de ataque es mostrada en 8 posiciones diferentes, a lo largo del recorrido de la pala en el rotor y se considera que el ángulo de ataque de entrada en pérdida, para este rotor, es de 14° .

Aunque las palas están torsionadas, teniendo menos ángulo de paso en las punteras que en la raíz, el ángulo de ataque en la puntera es mayor debido al flujo inducido, y se puede definir un sector de entrada en pérdida.

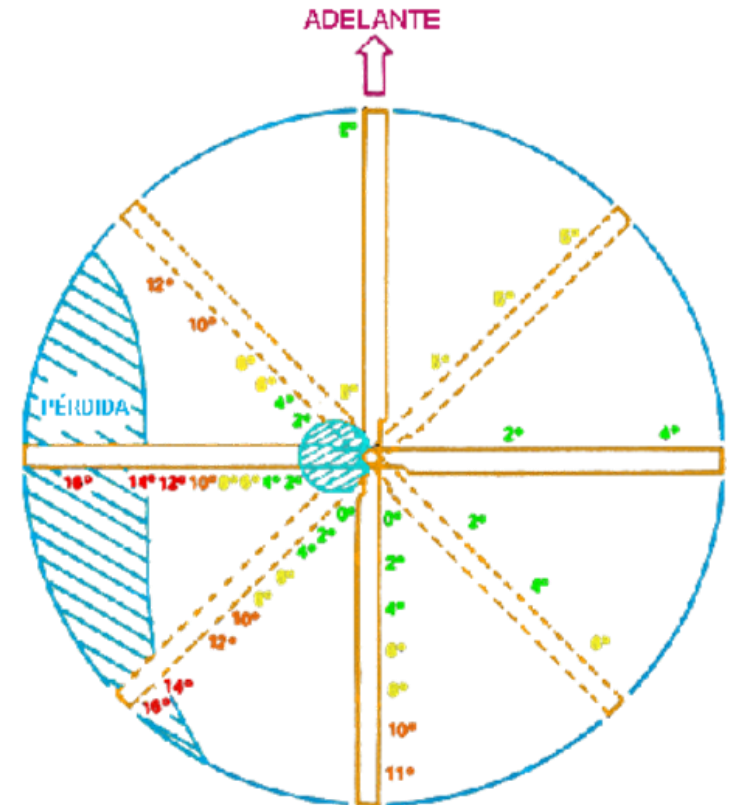
Cercano a la entrada en pérdida, el primer efecto que se nota es una apreciable vibración sobre el helicóptero.

Esto es seguido por una tendencia a rolar a la izquierda y a levantar la nariz.

Cuando se opere a altas velocidades, el alto peso operativo, las bajas RPM, la alta densidad, las maniobras empinadas o abruptas y si existe turbulencia, incrementarán las condiciones de una entrada en pérdida.

Cuando el piloto sospeche de una posible entrada en pérdida, puede prevenirla:

1. Reduciendo potencia (reduciendo paso colectivo).
2. Reduciendo la velocidad de translación.
3. Reduciendo las "G" en las maniobras.
4. Incrementando las RPM (si es posible).



ALAS ROTATIVAS

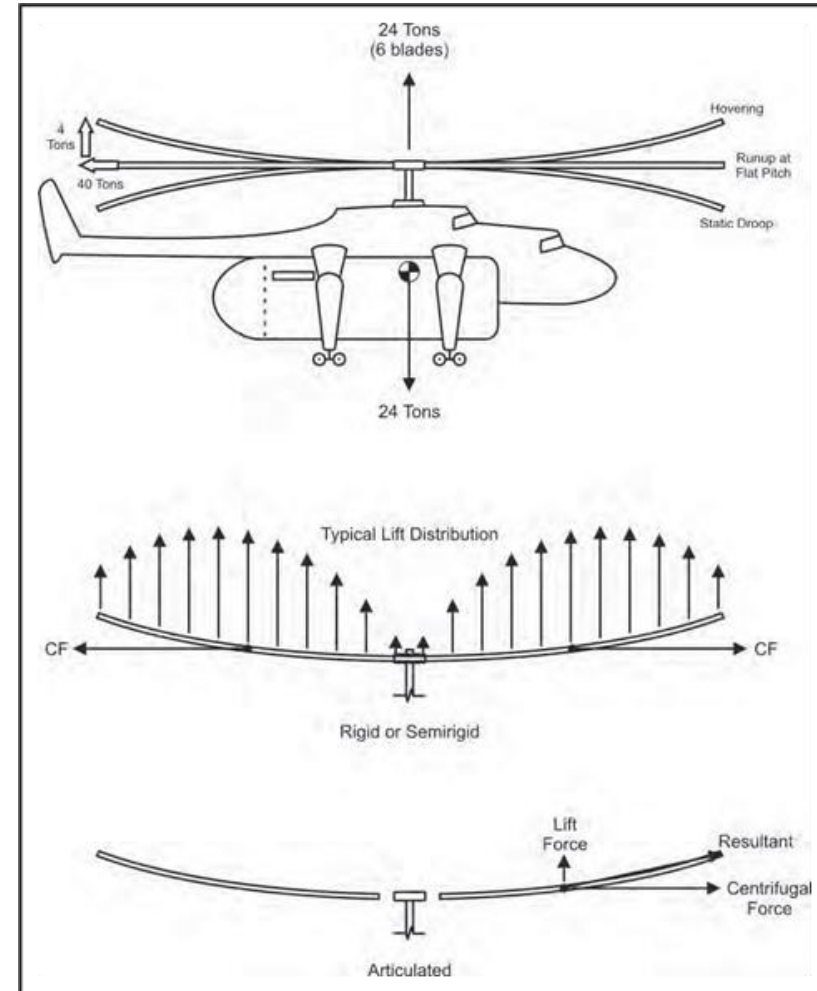
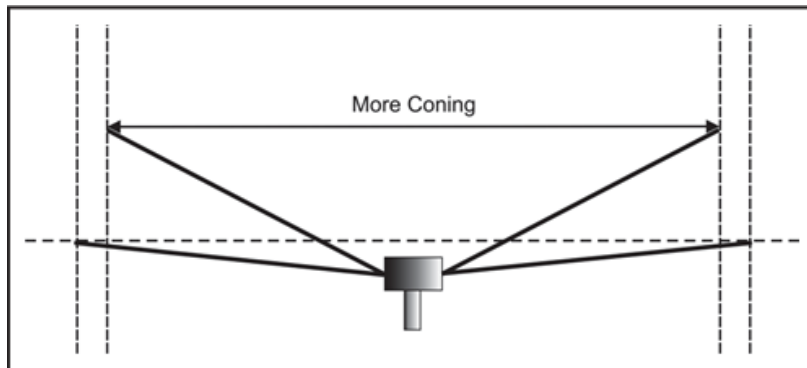
Cono o "Coning"

La rotación de las palas en el helicóptero producen una muy alta fuerza centrífuga, cargando la misma sobre el rotor y el conjunto de las palas.

Cuando las palas del rotor no están girando, caen hacia abajo debido a su propio peso. Cuando comienza la rotación del conjunto, las palas comienzan a elevarse de su posición de descanso debido a la fuerza centrífuga. A velocidad operacional, debido a su ángulo de ataque, las palas se encuentran en posición "recta", todavía no están generando sustentación.

Cuando el rotor comienza a generar sustentación, las palas abandonan su posición "recta" y comienzan a generar una posición de "cono". La medida de este cono depende de las RPM, el peso total, y las fuerzas G experimentadas en el vuelo. Si las RPM permanecen constantes, el cono aumenta si: el peso total y las fuerzas G son aumentadas. También, si las RPM disminuyen, manteniendo el peso y las G constantes, el cono va a aumentar.

Excesivo "cono" (coning) causa fatiga sobre las palas además de una disminución de la sustentación al disminuir el área del disco rotor.

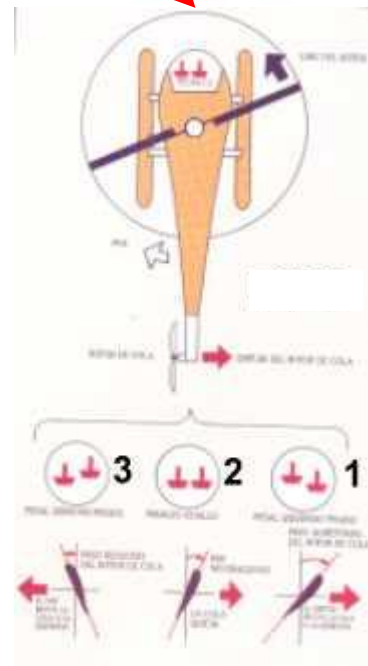
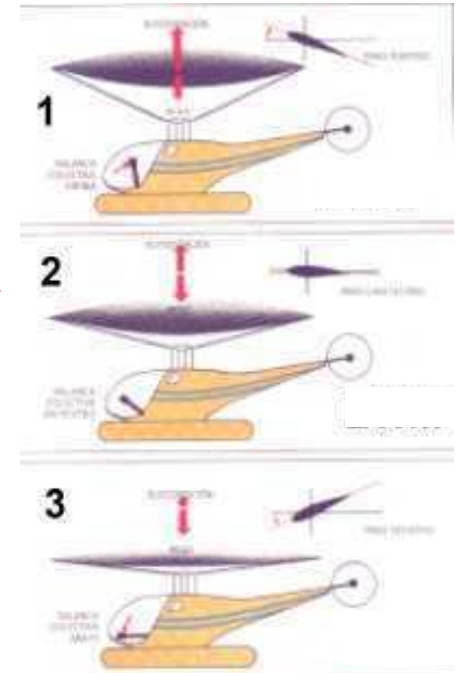
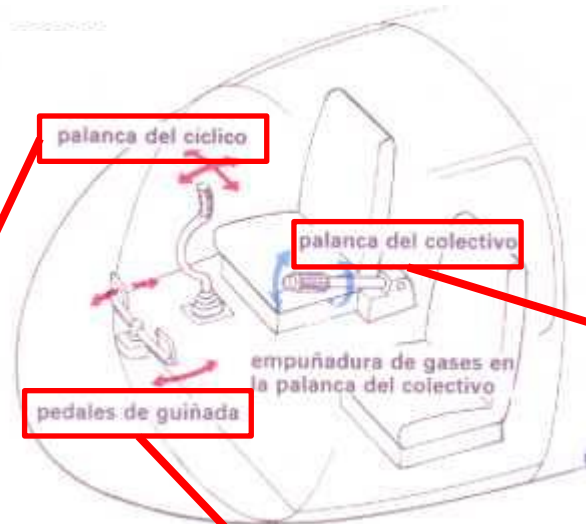
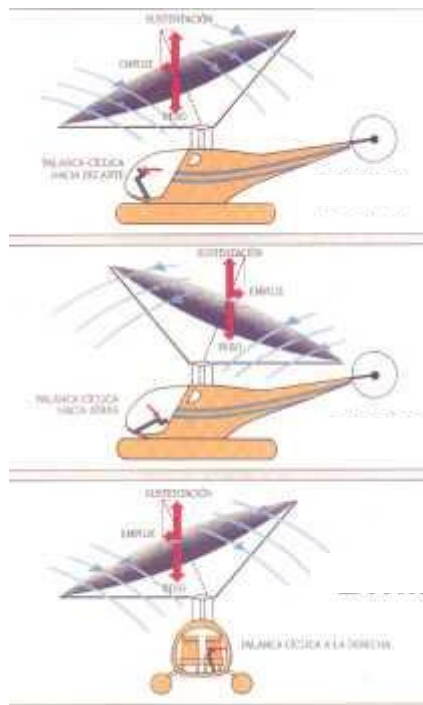


El diámetro efectivo del disco del rotor, con el coning incrementado, es menor que el disco sin coning.

A menor diámetro de disco obtendremos menor sustentación.

ALAS ROTATIVAS

Controles



ALAS ROTATIVAS

Controles - Plato Oscilante (SWASHPLATE)

Las palas de los helicópteros están montadas sobre ejes horizontales de tal forma que puedan girar alrededor de éstos lo que permite cambiar la incidencia de las mismas.

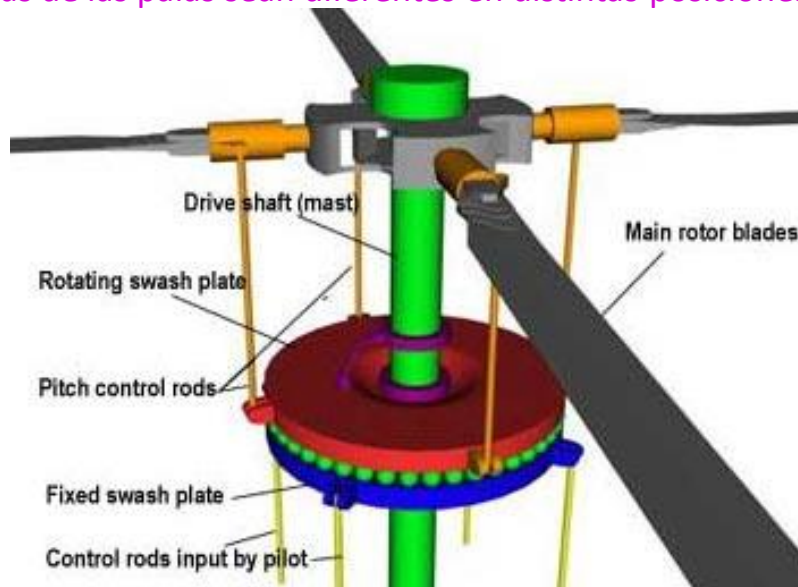
Para que las palas mantengan todas la misma incidencia, están unidas a unas varillas de transmisión -todas de la misma longitud- que a su vez están fijadas al **plato oscilante**.

El **plato oscilante** está compuesto de un **plato fijo** y uno **giratorio** que está unido mediante un cojinete que permite el giro entre ellos.

En el **plato fijo** van fijadas las varillas de mando que vienen de los servos y en el **plato giratorio** que gira igual que el rotor se conectan las varillas que controlan la incidencia de las palas.

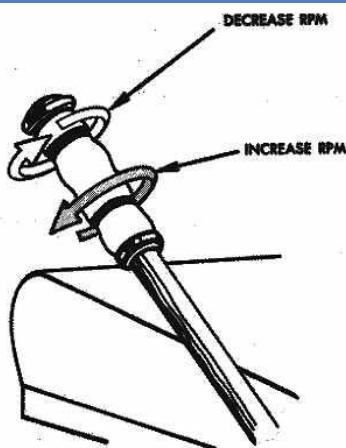
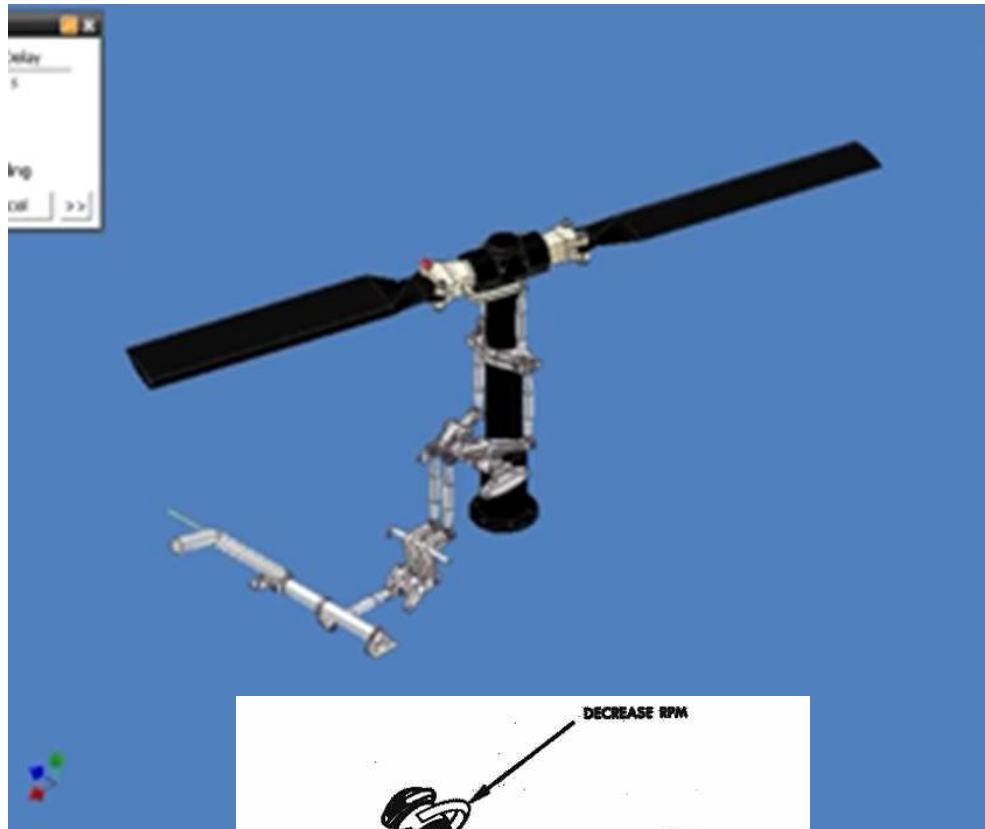
El **plato giratorio** y las palas son movidos en conjunto por el eje principal (mástil).

Un cambio de ángulo del **plato fijo**, mediante los servos de control, hace que varíe el plano de giro del **plato giratorio** logrando que las incidencias de las palas sean diferentes en distintas posiciones de su rotación.



ALAS ROTATIVAS

Controles – Control Colectivo



-Throttle control: Rotating the throttle outboard (viewed from the top) increases RPM; rotating it inboard decreases RPM.

Las varillas conectadas en sus extremos a los servos y al **plato fijo** respectivamente hacen que el **plato oscilante** suba o baje verticalmente, con lo que se varía por igual el ángulo de incidencia de las palas colectivamente.

Los ángulos de incidencia de las palas varían simultáneamente cuando suben o bajan las barras de control que se encuentran conectadas al **plato giratorio del plato oscilante**.

Por eso se llama actuador colectivo y el mismo nombre recibe la palanca con que lo mueve el piloto desde la cabina: palanca de paso colectivo o colectivo, simplemente.

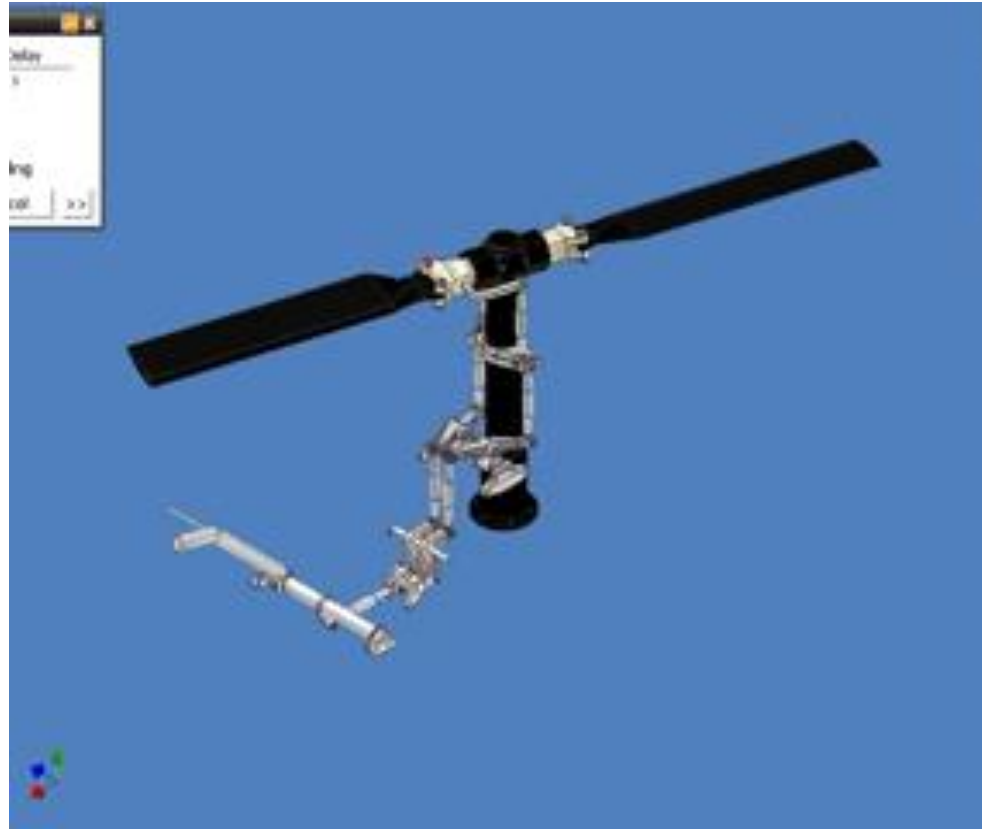
Este mando es el que hace que varíen las demandas de potencia al motor, a más paso colectivo, más demanda de potencia.

El mango de la palanca rota incrementando o disminuyendo las RPM del motor.

Con esta configuración las palas generarán una sustentación uniforme y equilibrada durante el giro del rotor.

ALAS ROTATIVAS

Controles – Control Colectivo



ALAS ROTATIVAS

Controles – Control Cíclico

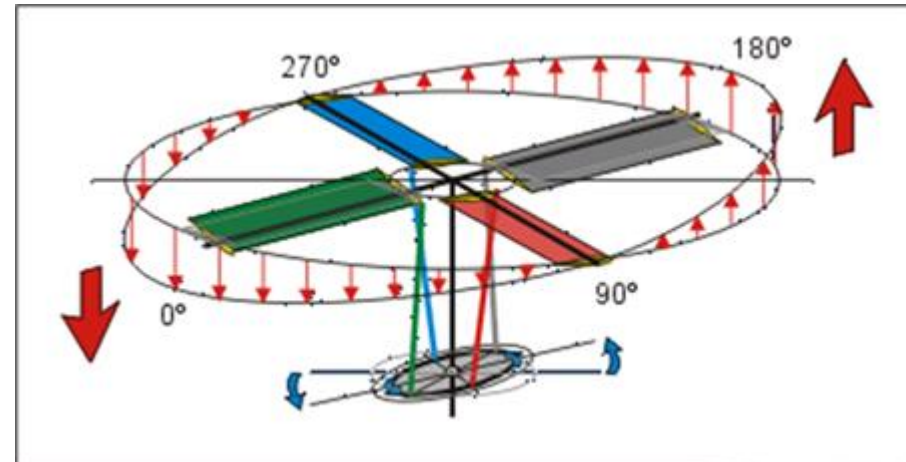
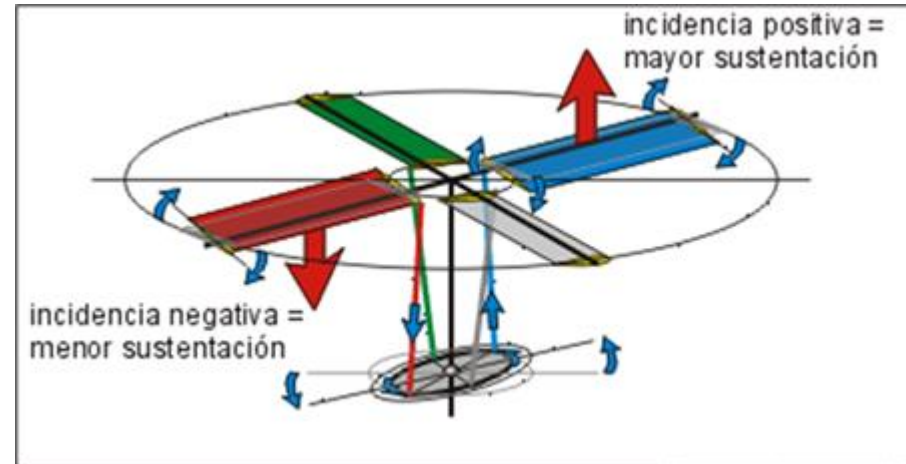
Para que el rotor se incline hacia algún lado será necesario que en alguna parte de la rotación se produzca más sustentación que en otra, cosa que conseguiremos cambiando cíclicamente la incidencia de las palas del rotor.

El **plato oscilante** se inclina elevando la varilla azul y 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 oscilante** pasa exactamente lo contrario, ésta parte del plato baja, con lo que la varilla roja tira 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.

La **pala azul** produce una fuerza orientada hacia arriba y la **roja** una a la inversa, es decir hacia abajo.



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.

ALAS ROTATIVAS

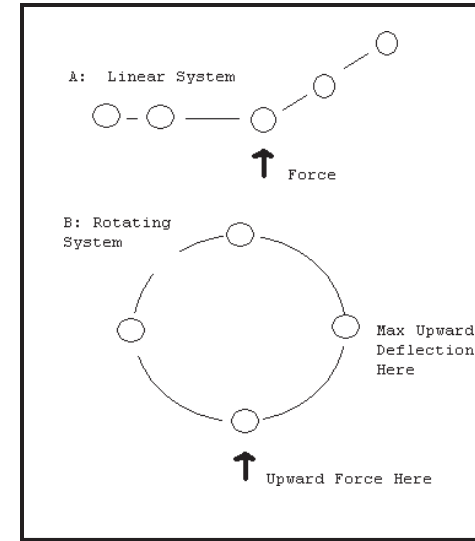
Controles – Control Cíclico – Precesión Giroscópica

En un sistema lineal, la bola en la parte A, cuando pasa sobre un chorro de aire, tenderá a desviarse en la dirección de la fuerza aplicada, su desplazamiento máximo ocurriría en algún momento después de que se aplicara la fuerza.

Lo mismo sucede en un sistema rotacional, pero en lugar de lograr el desplazamiento máximo a cierta distancia lineal, el objeto logra el desplazamiento máximo a algún ángulo de distancia.

En la parte B, se muestra que los desplazamientos máximos ocurren 90° después de la fuerza aplicada.

Este retraso en el desplazamiento máximo se llama “Retraso de Fase” (Phase Lag) y es una propiedad de todos los sistemas rotativos sobre los que actúa una fuerza periódica.

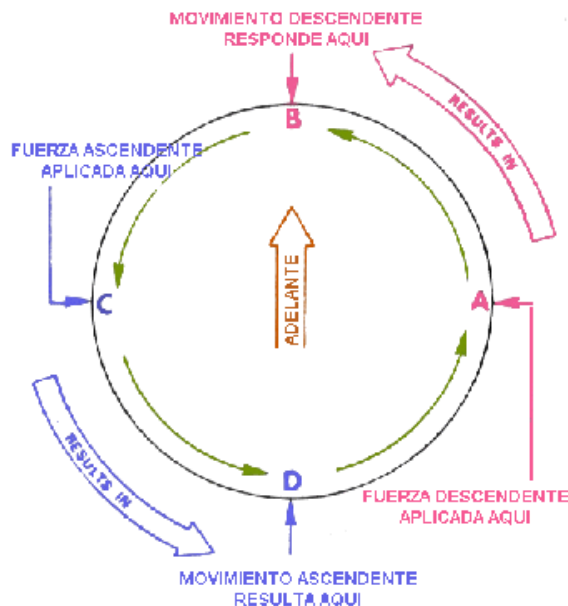


La precesión giroscópica ocurre en todos los cuerpos que giran, en los cuales, al aplicárseles una fuerza, esta se manifiesta 90° más tarde en la dirección de la rotación.

Una fuerza descendente aplicada en el punto "A" resulta en un cambio descendente del rotor en el punto "B" y viceversa si aplicamos una fuerza ascendente en el punto "C" obtendremos un movimiento ascendente en el punto "D".

Para un sistema que está articulado en el eje de rotación, el desfase es de 90° , o sea que una fuerza aplicada provoca un desplazamiento máximo 90° más tarde en el ciclo, en la dirección de rotación.

Un sistema que está articulado a cierta distancia del eje de rotación (como una cabeza de rotor completamente articulada) tiene un **retraso de fase** de un poco menos.



ALAS ROTATIVAS

Controles – Control Cíclico – Precesión Giroscópica

Las varillas están vinculados a diferentes sectores angulares del **plato oscilante**.

La varilla transmite la altura del **plato fijo** en su posición axial actual variando el ángulo de incidencia de la pala.

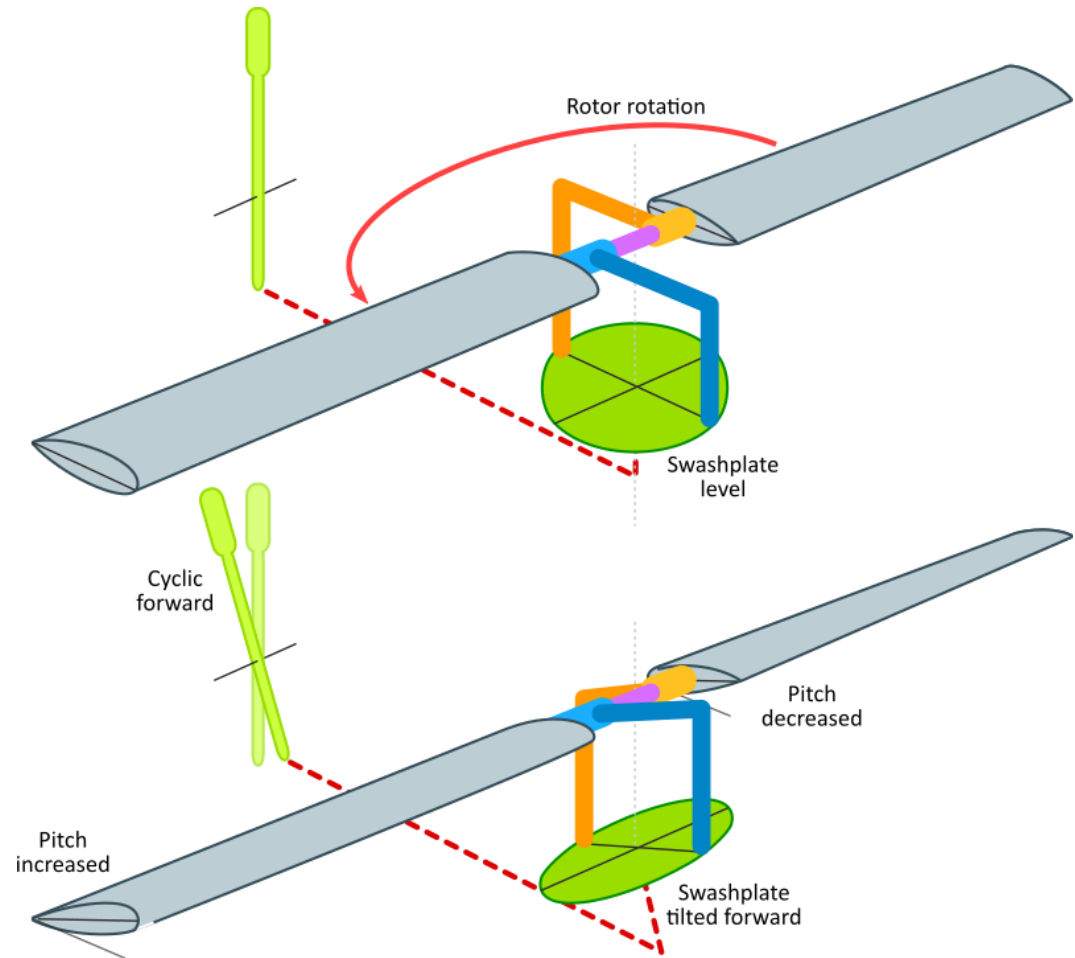
Al ubicar la varilla 90° por delante de la pala, el enlace se encarga de la precesión del rotor.

Cuando el piloto empuje el comando cíclico hacia adelante, el **plato oscilante** se inclinará hacia adelante en la misma proporción.

Las varillas de control se posicionarán en la altura del **plato oscilante** haciendo que las palas tomen ese ángulo de incidencia a los 90° atrasados.

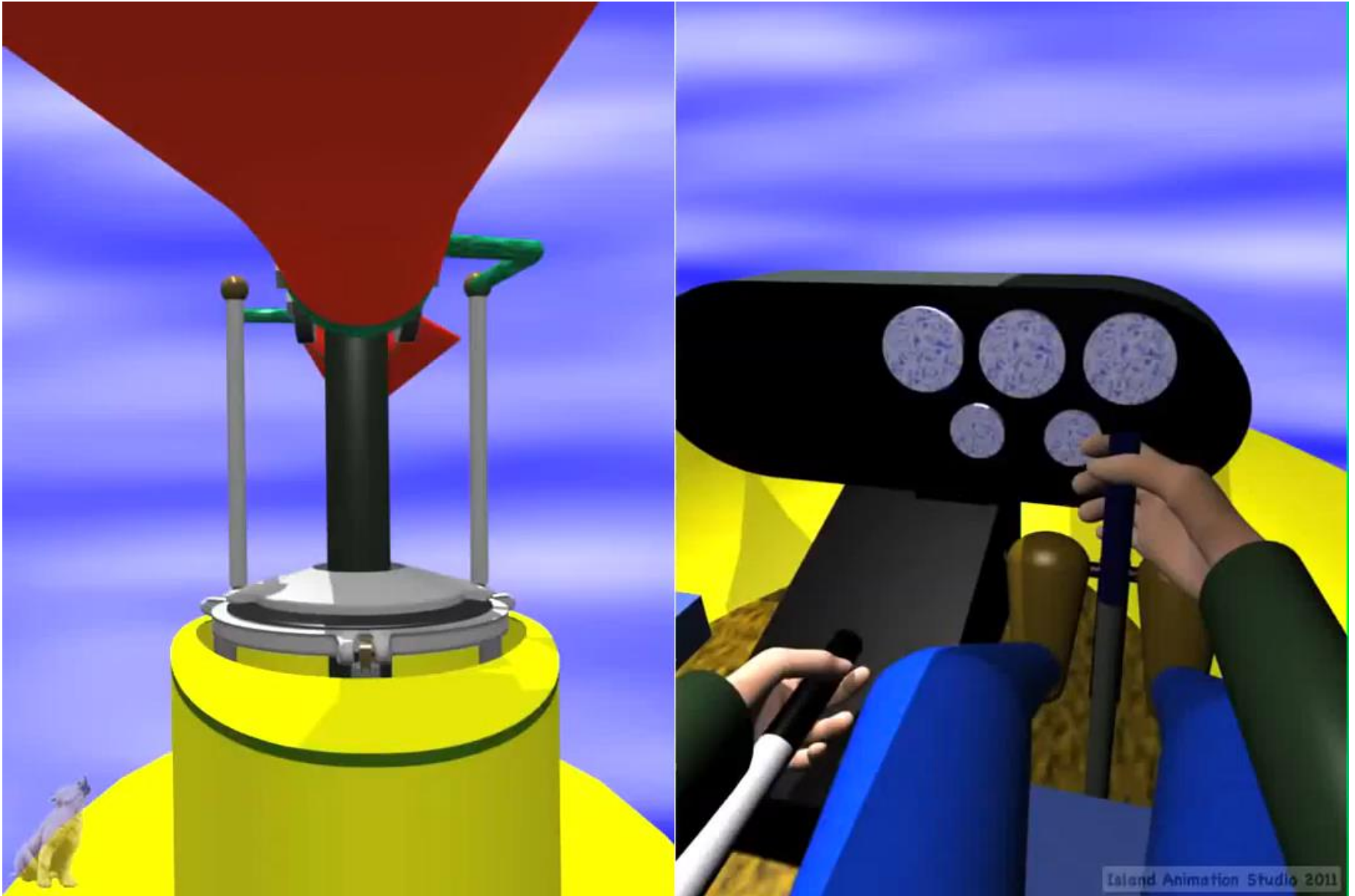
En realidad el sistema de rotor es “como” un giroscopio y tiene algunas propiedades similares, pero no es un sistema fijo como un giroscopio.

Las palas pueden agitarse o flexionar y, en un sistema totalmente articulado, avanzar o retroceder, por lo tanto el punto de acción puede ubicarse desde 90° a un punto basado en ese sistema de rotor específico: es diferente para cada helicóptero, por ejemplo en los helicópteros Robinson no es de 90° , es de 72° .



ALAS ROTATIVAS

Controles Colectivo y Cíclico



ALAS ROTATIVAS

Rotor Principal

El sistema de rotor es la parte giratoria del helicóptero que genera sustentación.

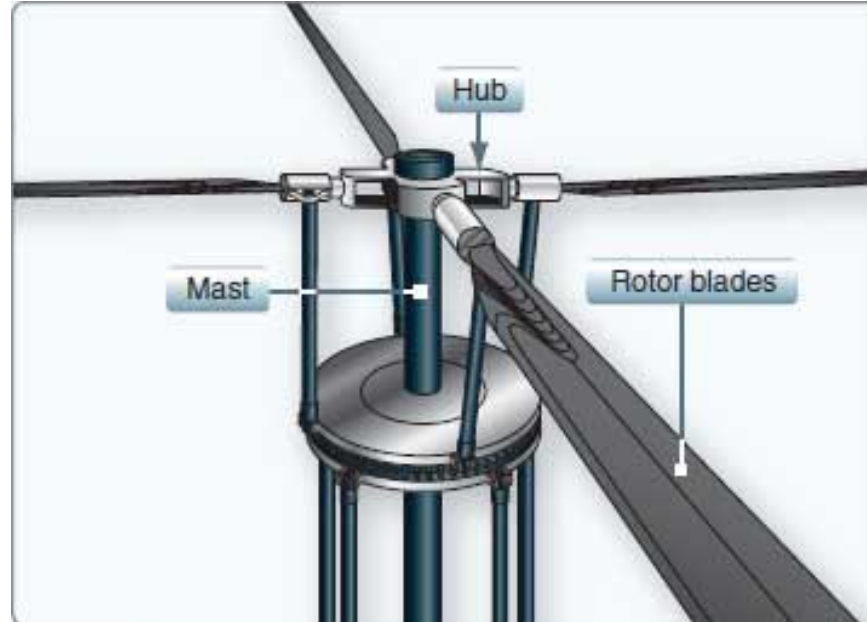
El rotor consta de un mástil (MAST), cubo (HUB) y palas del rotor (ROTOR BLADES).

El mástil es un eje metálico cilíndrico hueco que se extiende hacia arriba y es impulsado por la transmisión.

En la parte superior del mástil se encuentra el punto de unión de las palas del rotor llamado cubo.

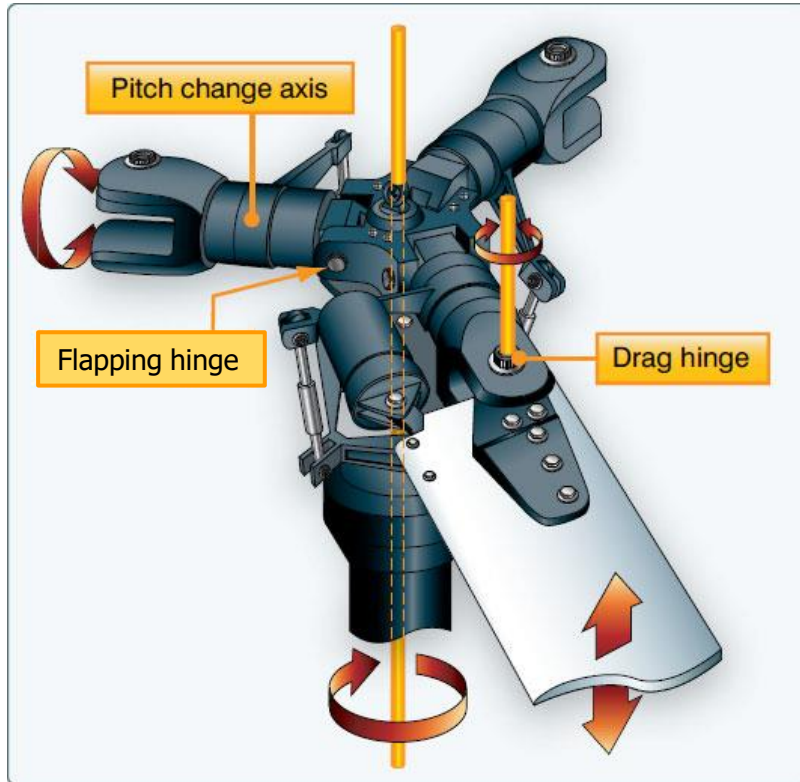
Los sistemas de rotor principal se clasifican según cómo se unen las palas del rotor principal y cómo se mueven en relación con el cubo.

Hay tres clasificaciones básicas: totalmente articulado, semirrígido o rígido.



ALAS ROTATIVAS

Rotor Principal Totalmente Articulado



Los sistemas de rotor completamente articulados permiten libre movimiento de las palas en los tres ejes: cada pala se mueve hacia adelante y hacia atrás mediante un eje vertical (DRAG HINGE), se mueva hacia arriba o hacia abajo mediante un eje horizontal (FLAPPING HINGE) independiente de las otras palas y cambia su paso (PITCH CHANGE) mediante un eje transversal.

Este tipo de rotor se encuentra en helicópteros con más de dos palas.

A medida que el rotor gira, cada pala responde a las entradas del sistema de control para permitir el control de la aeronave.

Cuando aumenta la sustentación en una pala determinada, ésta tiende a elevarse hacia arriba.

La bisagra de elevación de la pala permite este movimiento y la fuerza centrífuga trata de mantenerla en el plano horizontal.

Cuando la pala se eleva o desciende, su CG se desplaza cambiando el momento local de inercia de la pala con respecto al sistema del rotor y se acelera o ralentiza con respecto al resto de las palas y todo el sistema del rotor.

Cuando la pala se eleva, el CG se acerca al centro de giro, acelerando la pala, haciendo que avance, cuando la pala desciende ocurre lo contrario.

Siguiendo una sola pala a través de una rotación que comienza en una posición neutral, a medida que aumenta la sustentación debido al aumento de paso, se eleva y avanza, a medida que continúa, desciende y se retrasa.

ALAS ROTATIVAS

Rotor Principal Semirrígido

Un sistema de rotor semirrígido generalmente se compone de dos palas que están montadas rígidamente en el cubo del rotor principal.

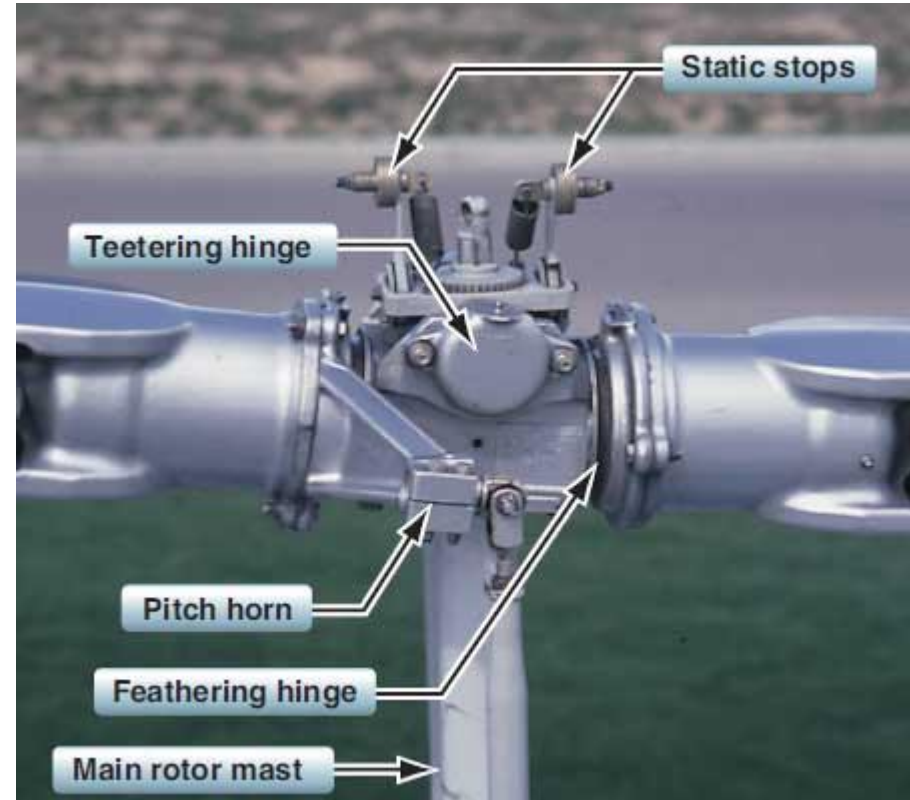
El cubo del rotor principal puede inclinarse libremente con respecto al eje del rotor principal gracias a una bisagra con eje horizontal permitiendo que las palas oscilen juntas como una unidad, produciendo que cuando una pala se eleva, la otra desciende.

Como no hay una bisagra de eje vertical, las fuerzas de avance / retroceso son absorbidas y mitigadas por la flexión de la pala.

El rotor semirrígido posee capacidad de variar el ángulo de paso de pala.

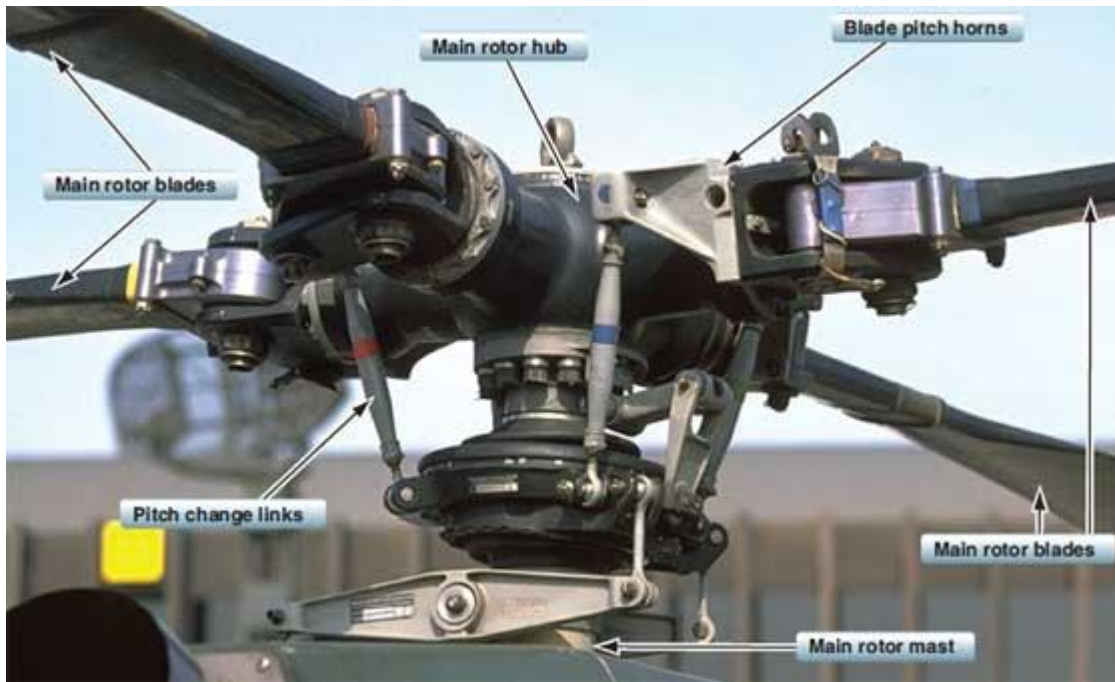
El rotor semirrígido es un rotor suspendido; su centro de gravedad (CG) está debajo de la unión al mástil, este montaje inferior está diseñado para alinear el centro de masa de las palas.

Los helicópteros con rotores semirrígidos son vulnerables a una condición conocida como golpe de mástil que puede hacer que las palas hagan tope brusco con el mástil y lo deterioren, por lo tanto poseen un límite físico determinando una máxima oscilación de las palas.



ALAS ROTATIVAS

Rotor Principal Rígido



El sistema de rotor rígido es mecánicamente simple, pero estructuralmente complejo porque las cargas de operación deben ser absorbidas en flexión en lugar de a través de bisagras, dado que las palas están unidas rígidamente al cubo del rotor, no obstante hay libertad de movimiento para el cambio de paso.

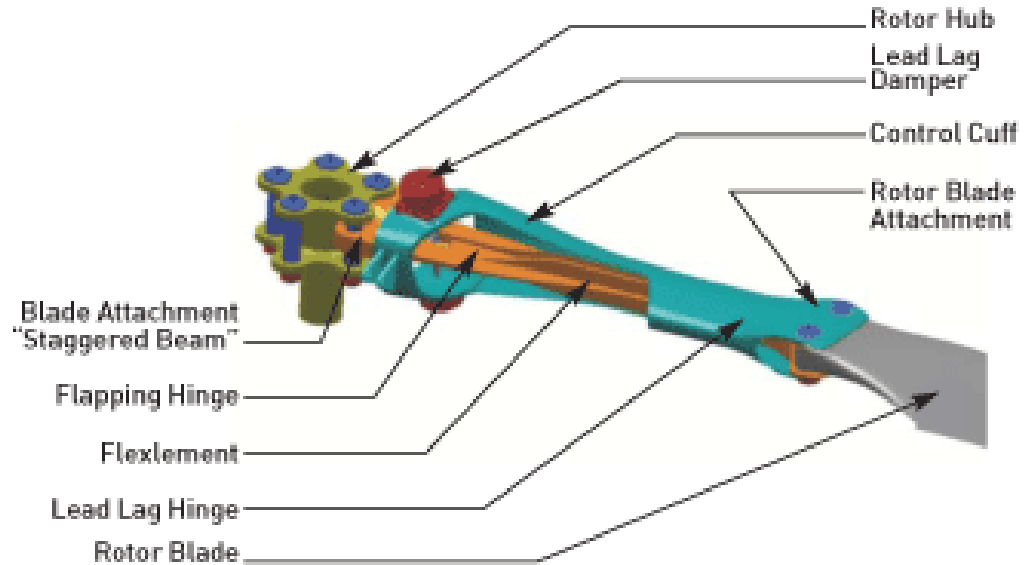
Esta configuración permite que el rotor y el fuselaje se muevan juntos como una entidad y elimina gran parte de la oscilación entre ambos, generalmente presente en los otros diseños.

Otra ventaja del rotor rígido es la reducción en el peso al no poseer las complejas bisagras, volviéndolo mucho más confiable y más fácil de mantener que las otras configuraciones de rotor.

Una desventaja de este sistema es que al no haber bisagras para ayudar a absorber las cargas más grandes, las vibraciones se sienten en la cabina mucho más que los otros diseños.

ALAS ROTATIVAS

Rotor Principal Rígido



El Rotor de Tecnología Avanzada (Advanced Technology Rotor) consta de un cubo extremadamente ligero y compacto, sin bisagras ni cojinetes, compuesto por una viga flexible, lo que significa mucho menos desgaste.

Los componentes mecánicos están hechos de materiales compuestos, que no requieren mantenimiento.

La pala está separada de la raíz con ventajas de plegado rápido del rotor y la posibilidad de sustituir las palas y adaptarlas a misiones específicas aumentando el diámetro de la pala o mejorando su perfil aerodinámico.

ALAS ROTATIVAS

Rotor de Cola

La dirección convencional del rotor principal se elige en sentido antihorario visto desde arriba. Un solo rotor principal imparte un momento en el fuselaje que hará que el fuselaje gire en sentido horario alrededor del eje vertical. Este momento se compensa colocando un rotor de cola antipar a cierta distancia del centro de gravedad de la aeronave.

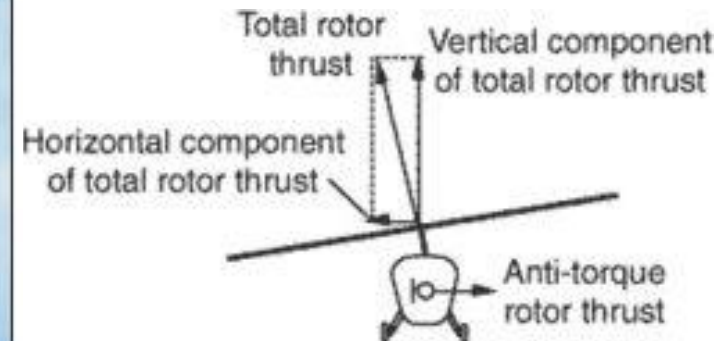
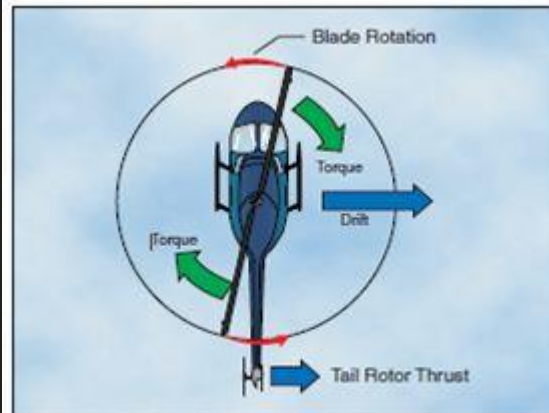
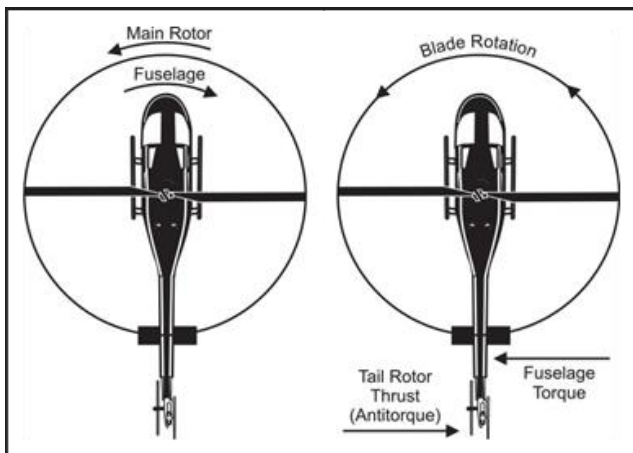
El rotor de cola proporciona control direccional, así como su función antipar, que se ve aumentada por el brazo de palanca y el estabilizador vertical trasero en vuelo hacia adelante.

El movimiento de los pedales de control direccional variará el paso colectivo de las palas del rotor de cola.

Las fuerzas y los momentos involucrados considerados en combinación produce que los momentos se equilibran pero las fuerzas no. La fuerza desequilibrada del rotor de cola provoca una tendencia de traslación hacia la derecha que es más notable en un vuelo estacionario y ocurre en menor medida en vuelo hacia adelante. El empuje del rotor principal se compensa para producir un empuje lateral para corregir la deriva del rotor de cola. Esta tendencia debe realizarse moviendo el paso cíclico en la dirección opuesta a la de la deriva para que el disco se incline ligeramente y detenga la deriva. El otro método para corregir la deriva del rotor de cola es tener un mástil inclinado o el uso de sesgo en el mecanismo de control cíclico.

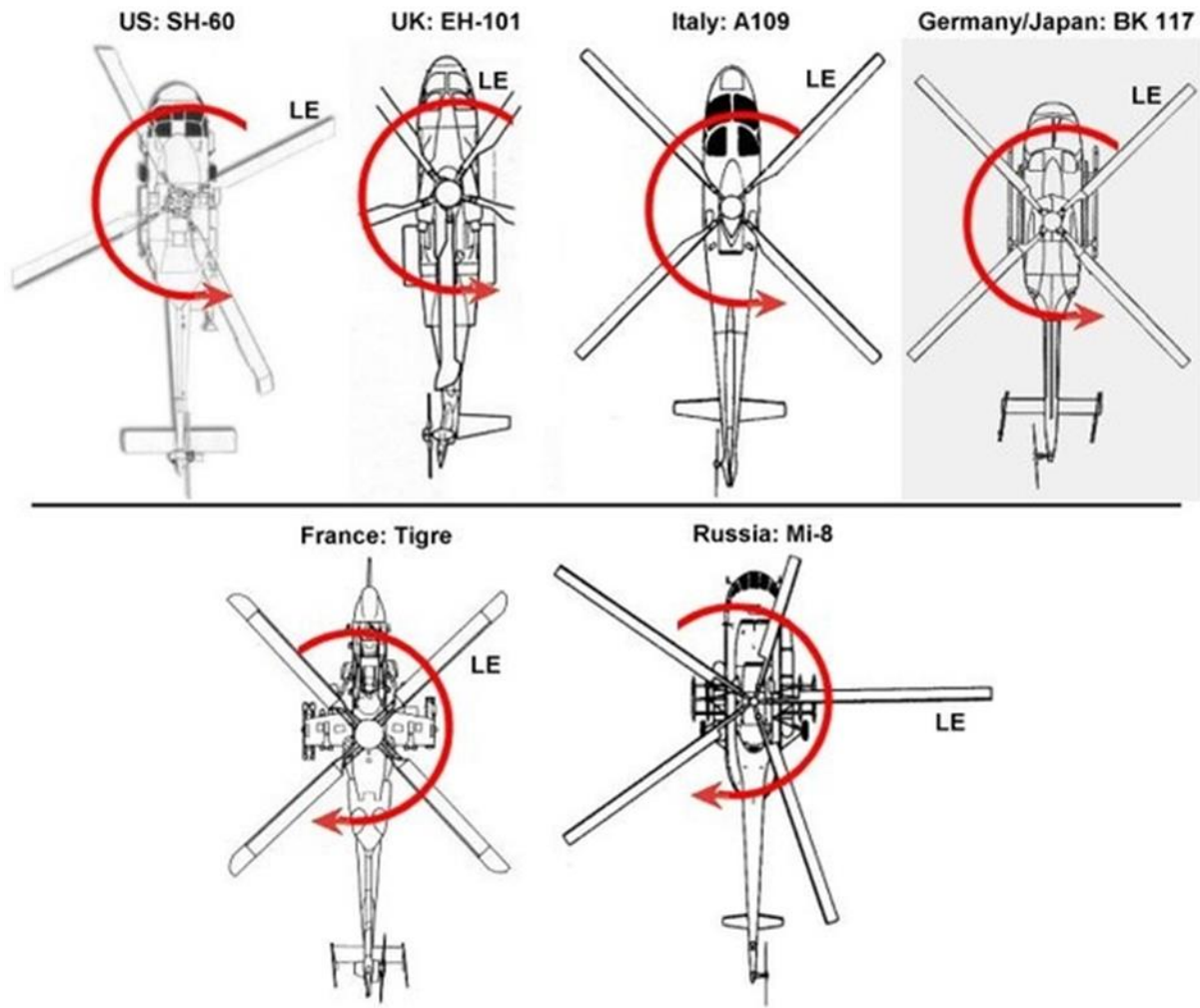
Los rotores de cola están diseñados para proporcionar empuje en ambas direcciones. Durante el vuelo de autorrotación cuando no hay par disponible desde el sistema del rotor, el rotor de cola debe ser capaz de proporcionar tracción en ambas direcciones para el control del rumbo.

Cualquier cambio en la potencia cambiará el par y, por lo tanto, la guiñada.



ALAS ROTATIVAS

Rotor de Cola



ALAS ROTATIVAS

Rotor de Cola Entubado (FENESTRON)

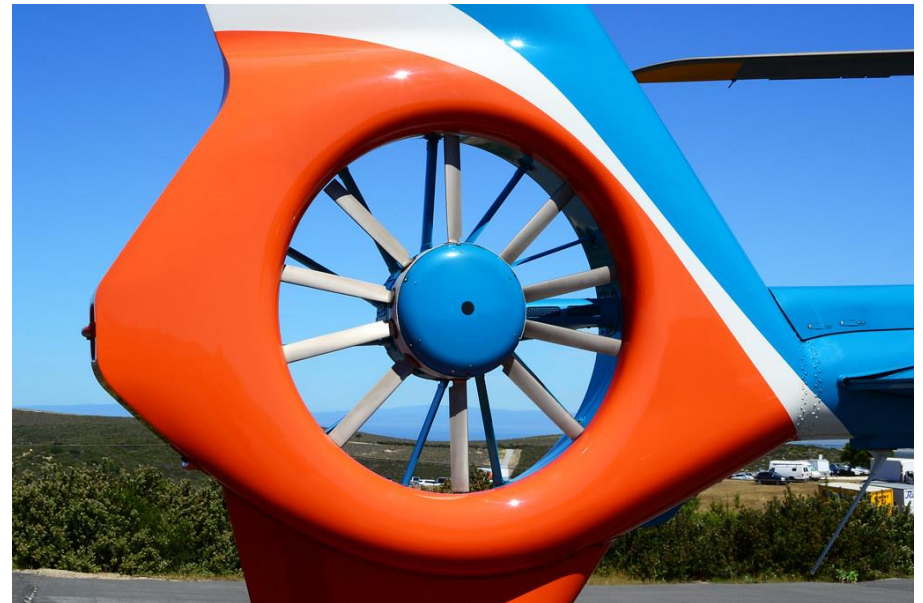
Es un rotor de cola entubado en lugar del rotor de cola tradicional.

Tal disposición ofrece muchas ventajas (a expensas del posible peso adicional). La estructura circundante protege al rotor de los vientos generados durante el vuelo de avance.

También tiende a ser más silencioso (dependiendo de la velocidad y el diseño de la pala) porque el rotor genera pocos vórtices de puntera y está protegido de la interacción con los vórtices del rotor principal.

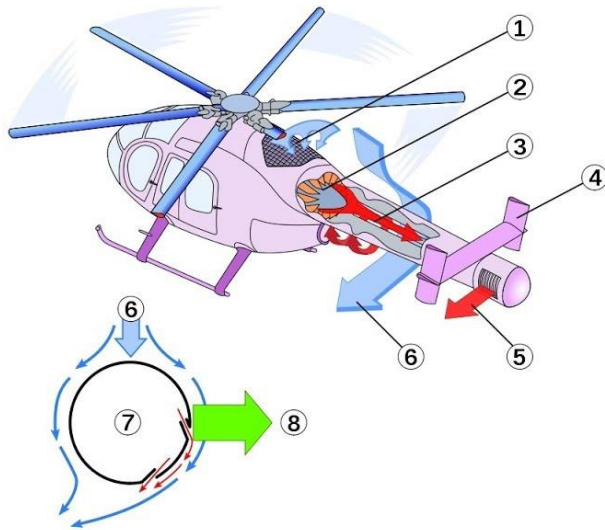
El rendimiento obtenido permite que sus dimensiones sean un 30% menores que un rotor de cola convencional pero que produce el mismo efecto.

Proporciona seguridad para el personal que opera alrededor de la aeronave en la línea de vuelo mientras la aeronave está rodando.



ALAS ROTATIVAS

NO Tail Rotor



- 1 Air intake
- 2 Variable pitch fan
- 3 Tail boom with Coandă Slots
- 4 Vertical stabilizers
- 5 Direct jet thruster
- 6 Downwash
- 7 Circulation control tailboom cross-section
- 8 Anti-torque lift

El sistema anti-torque NOTAR® elimina todas las desventajas mecánicas de un rotor de cola, incluidos los largos ejes de transmisión, los cojinetes de suspensión, las cajas de engranajes intermedios y las cajas de engranajes de noventa grados. Utilizando las características naturales de la aerodinámica del helicóptero, el sistema NOTAR proporciona un control direccional seguro, silencioso y resistente a daños.

El ventilador de material compuesto y paso variable produce un alto volumen de aire ambiente para presurizar el brazo de cola.

El aire se expulsa a través de dos ranuras que corren a lo largo del brazo de cola en el lado de estribor (derecho), causando un control de capa límite llamado Efecto Coanda.

El resultado es que el brazo de cola se convierte en un "ala", volando en la corriente descendente del sistema del rotor, produciendo hasta el 60 % del antitorque requerido en un vuelo estacionario. El equilibrio del control direccional se logra mediante un propulsor de chorro directo rotativo.

En vuelo hacia adelante, los estabilizadores verticales proporcionan la mayoría del antitorque, sin embargo, el control direccional sigue siendo función del propulsor de chorro directo.

Mayor seguridad

Los estudios han demostrado que el 21 % de todos los accidentes se deben a golpes del rotor de cola o pérdida de efectividad del rotor de cola; los sistemas NOTAR® eliminan estos problemas.

Ruido reducido

Diseñado y probado para ser un 50 % más silencioso que cualquier otro helicóptero. Los helicópteros equipados con NOTAR se encuentran entre los helicópteros certificados más silenciosos disponibles.

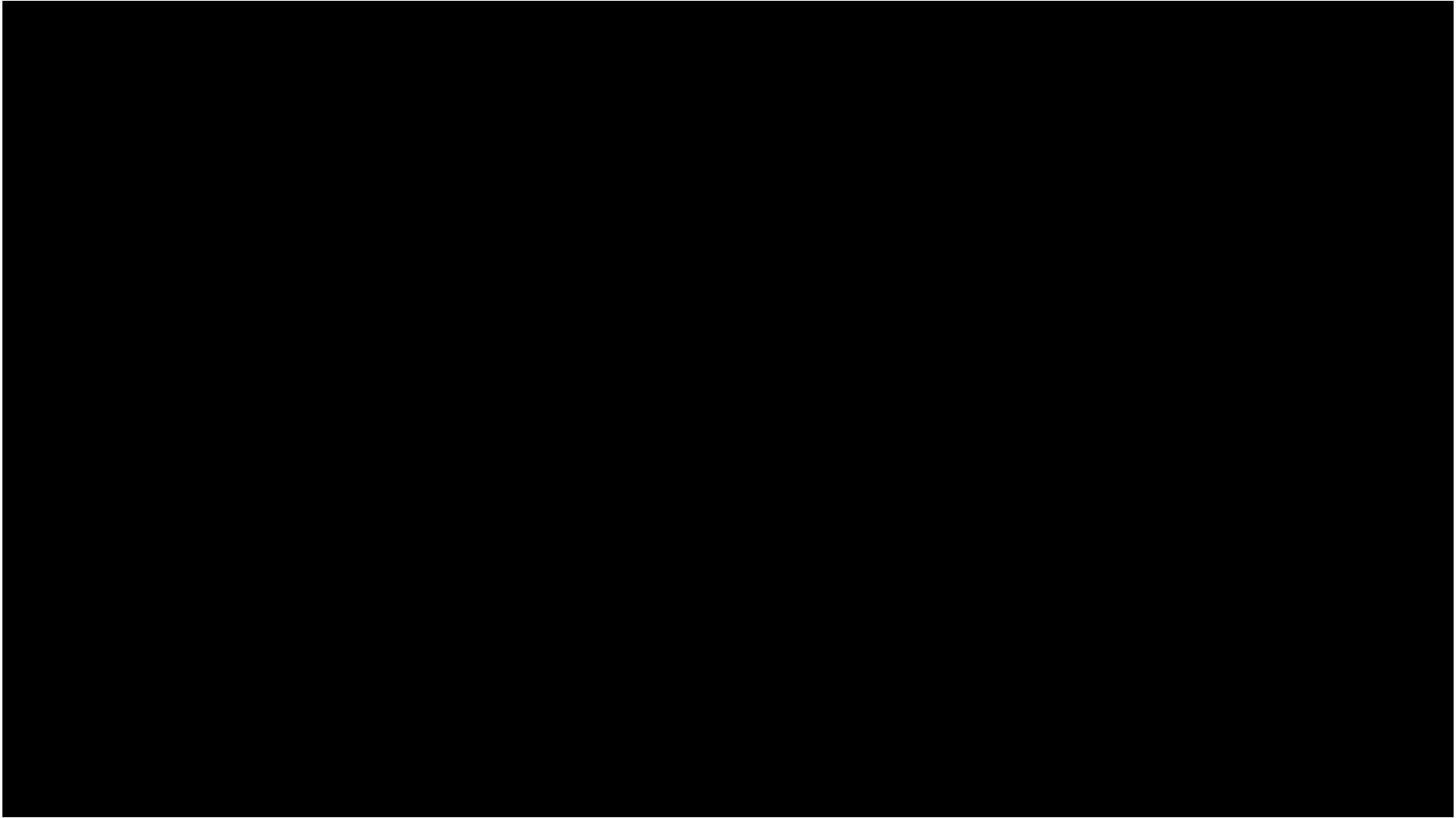
Carga de trabajo del piloto reducida

Usando el efecto Coanda para proporcionar el efecto antitorque, hace al sistema más estable y más fácil de controlar. Este efecto también reduce la inestabilidad ante vientos laterales.

Vibración reducida de la aeronave

La estabilidad inherente se mejora aún más mediante la eliminación del conjunto del rotor de cola expuesto, que reduce las vibraciones generales del helicóptero y aumenta la comodidad del pasajero al tiempo que reduce la fatiga del piloto.

ALAS ROTATIVAS



Rotor Único

El diseño del rotor principal único que utiliza un rotor de cola antipar ha sido la configuración más común durante más de medio siglo.

En un vuelo estacionario, normalmente se usa el 85% de la potencia del motor para generar sustentación con el rotor principal, mientras que la potencia restante se consume por el rotor de cola, la transmisión de accesorios y las pérdidas de transmisión.

El rotor principal único tiene menos partes móviles que las necesarias con múltiples rotores principales. Sin embargo, un solo rotor principal que gira en una dirección (en sentido antihorario visto desde arriba) imparte un momento en el fuselaje que, si se deja desequilibrado, haría que el fuselaje gire en la dirección opuesta (en sentido horario) alrededor del eje vertical, este momento se compensa colocando un rotor de cola antipar a cierta distancia del centro de gravedad de la aeronave.

El rotor de cola proporciona control direccional, así como su función antipar, que se ve aumentada por el brazo trasero y el estabilizador vertical en vuelo hacia adelante.



ALAS ROTATIVAS

Motores en Puntera



Los rotores principales accionados por impulso en la puntera evitan la necesidad de un sistema antipar.

Los primeros intentos incluyeron hélices montadas en la puntera; también se evaluaron los jets y cohetes.

Se pensó que los Ramjets eran un sistema de propulsión ideal, debido a su alta eficiencia a las velocidades subsónicas a las que se limitan las palas del rotor principal, pero el ruido y los problemas con la capacidad de autorotación resultaron desafiantes.

También se utilizó el generador de pulsos más eficiente en combustible, pero resultó ser aún más ruidoso que el ramjet.

Incluso se evaluó el potencial de cohetes de peróxido de hidrógeno, pero era complejo el control de potencia.

Otro diseño fue el del chorro de aire a presión donde el aire comprimido del motor se condujo a las puntas del rotor, se mezcló con combustible y se encendió para impulsar las palas del rotor.

ALAS ROTATIVAS

Rotores Múltiples

Rotores Múltiples principales que giran en dirección opuesta resuelven el problema del par manteniendo un equilibrio debido a sus momentos opuestos.

Los helicópteros de rotor múltiple (en tándem, coaxial, de lado a lado (sincrópteros)) aún deben satisfacer las demandas de potencia, pero no consumen potencia a través de un rotor de cola.

Esto puede llevar a uno a concluir que se puede usar más potencia del motor para generar elevación, pero las pruebas de helicópteros en tándem y coaxiales han demostrado que los requisitos de potencia no mejoran significativamente el rendimiento.

La razón es la interferencia entre ambos rotores que reduce la eficiencia hasta el punto en que la potencia aumenta significativamente; al acercarse la distancia entre los discos del rotor aumenta la interferencia y el consumo de energía asociado.



ALAS ROTATIVAS

Rotores en Tandem

El diseño del rotor en tándem coloca un rotor principal horizontal detrás del otro, girando en direcciones opuestas. Los pares opuestos se contrarrestan entre sí.

Aunque el piloto aplicará comandos cíclico, colectivo y de pedal como cualquier otro helicóptero, los controles están vinculados de maneras algo diferentes a cada uno de los dos sistemas de rotor principal para producir el efecto deseado.

El control colectivo funciona de manera similar a cualquier otro helicóptero, aplicando un paso colectivo a ambos rotores principales, mientras que el control cíclico se aplica simultáneamente tanto al rotor delantero como al trasero, para cambiar la actitud de cabeceo de la aeronave, proporcionando a su vez un componente horizontal del vector de empuje total para acelerar o desacelerar la aeronave.

Los pedales aplican entradas de paso cíclico diferencial (opuesto) a cada uno de los dos sistemas de rotor, haciendo que el rotor delantero se inclina hacia la izquierda mientras que el rotor trasero se inclina hacia la derecha y, a la inversa.



ALAS ROTATIVAS

Rotores Coaxiales

Los helicópteros coaxiales tampoco necesitan un rotor de cola porque los dos rotores giran en direcciones opuestas y cancelan el par del otro.

Toda la potencia del motor está disponible para producir sustentación, aunque la interferencia del flujo de aire es máxima debido a que la separación del mástil es cero dado que un rotor está ubicado encima del otro.

Dependiendo de qué rotor posea mayor paso colectivo (produzca más sustentación), el helicóptero girará hacia la izquierda o hacia la derecha debido al torque.

Los helicópteros diseñados originalmente con esta configuración no podían alcanzar una velocidad de crucero alta porque la resistencia era demasiado grande.

Solo después del desarrollo del rotor rígido fue posible construir los dos rotores más juntos y reducir la resistencia considerablemente.

La contrarrotación en helicópteros coaxiales conlleva una penalización de peso al requerir cajas de engranajes y placas oscilantes más complejas.



ALAS ROTATIVAS

Rotores Sincronizados (sincróptero)

El sistema de doble rotor sincronizado es un sistema donde dos rotores se engranan entre sí, como una rueda dentada.

Al igual que el rotor en tándem, esta configuración no necesita un rotor de cola porque el par se compensa con la rotación opuesta de los rotores.

Los sincrópteros se parecen en muchos aspectos al diseño coaxial, pero existen algunas diferencias.

Cuando se realiza una autorotación el flujo lateral a través de los rotores crean un momento de guiñada inestable.

Esto se ha corregido mediante la adición de más área estabilizadora, comúnmente dos aletas verticales grandes.



ALAS ROTATIVAS

Resumen de compensación de torque y control de guiñada según configuración de diseño

Helicopter Configuration	Torque Balance	Directional Control
		Yaw Moment
Single MR, TR	TR Thrust	TR Collective
Tandem	MR diff torque	MR diff cyclic
Coaxial	MR diff torque	MR diff collective
Side-by-side	MR diff torque	MR diff cyclic

MR: Main Rotor (Rotor Principal)

TR: Tail Rotor (Rotor de Cola)

ALAS ROTATIVAS

