

PROYECTO FINAL DE CARRERA:

MODELIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LA CABEZA DE UN ROTOR DE AEROMODELO



Especialidad: Mecánica

Marzo 2012



Universidad
Zaragoza

Autor: Andrea Salinero Aso
Director: Rafael Rey Gayo

ÍNDICE

1	<i>Introducción.....</i>	3
2	<i>Conceptos básicos.</i>	4
2.1	<i>Conceptos básicos de las palas.....</i>	4
2.2	<i>La fuerza de sustentación.....</i>	6
3	<i>Comandos de vuelo de un helicóptero.</i>	8
3.1	<i>Comando de paso colectivo.....</i>	8
3.2	<i>Comando de paso cíclico.</i>	10
3.3	<i>Comando de rotor de cola.....</i>	13
3.4	<i>Comandos de vuelo y cadena cinemática del T-REX 550.</i>	14
4	<i>Fundamento teórico. Cinemática de un rotor de helicóptero en vuelo axial.</i>	19
4.1	<i>Teoría del elemento de pala. Cinemática de la pala.</i>	19
4.2	<i>Fuerzas aerodinámicas en el elemento de pala.</i>	24
4.2.1	<i>Simplificación para pequeños ángulos de entrada de corriente:</i>	25
4.2.2	<i>Adimensionalización:.....</i>	26
4.3	<i>Simplificaciones de la teoría del elemento de pala las fuerzas aerodinámicas para vuelo axial. </i> 26	
4.3.1	<i>Ley de sustentación lineal.....</i>	27
4.3.2	<i>Ley de resistencia parabólica.</i>	27
4.4	<i>Teoría de cantidad de movimiento.....</i>	28
4.5	<i>Combinación de teorías de cantidad de movimiento y elemento de pala.</i>	29
5	<i>Descripción del proceso de simulación y análisis.</i>	32
5.1	<i>Simulación gráfica de las piezas en SolidWorks.</i>	32
5.2	<i>Mediciones.</i>	34
5.3	<i>Ensamblaje de las piezas del rotor en SolidWorks.</i>	35
5.4	<i>Simulación en Adams.</i>	42
5.4.1	<i>Joints.....</i>	42
5.4.2	<i>Motor.....</i>	44
5.4.3	<i>Fuerzas.</i>	45
6	<i>Objetivos y resultados.</i>	49
6.1	<i>Objetivo 1.</i>	49

6.2	<i>Objetivo 2.</i>	53
6.3	<i>Objetivo 3.</i>	55
7	<i>Montaje del rotor del T-REX 550</i>	58
8	<i>Conclusiones</i>	60
9	<i>Bibliografía</i>	61

1 Introducción.

Un helicóptero es una aeronave que es sustentada y impulsada por uno o más rotores horizontales, cada uno formado por dos o más palas. Los helicópteros están clasificados como aeronaves de alas giratorias para distinguirlos de las aeronaves de ala fija porque los helicópteros crean sustentación con las palas que rotan alrededor de un eje vertical. La palabra «helicóptero» deriva del término francés hélicoptère, acuñado por el pionero de la aviación Gustave Ponton d'Amécourt en 1863 a partir de las palabras griegas ελικόπτερος, helix/helik- (hélice) y pteron (ala).

En este proyecto se va a realizar un estudio sobre el rotor de un aeromodelo, más específicamente sobre el rotor del T-REX 550. Para ello, en primer lugar, se explican diferentes conceptos y aspectos del aeromodelo así como de los helicópteros en general, como por ejemplo los comandos de vuelo. A continuación se presenta el fundamento teórico a partir del cual se va a basar el estudio. Y posteriormente la construcción de un modelo virtual del rotor, para el cual se utilizarán dos *software*: el SolidWorks, un programa de diseño asistido por ordenador para modelado mecánico, y el MSC Adams, un programa dedicado al análisis de mecanismos.

Los objetivos de este proyecto son:

- Hallar la relación entre la resultante de la sustentación, el ángulo de paso, y la distancia a la que se encuentra el plato oscilante en el eje.
- Relacionar la resultante de la sustentación, el ángulo de paso, y la potencia consumida por el rotor.
- Estudiar el diagrama de cuerpo libre de un *linkage* para diferentes ángulos de paso.

Y por último, se adjuntan los resultados de los objetivos, con sus correspondientes conclusiones.

2 Conceptos básicos.

El rotor es la parte rotativa de un aeromodelo que genera la sustentación aerodinámica necesaria para la elevación del helicóptero.

2.1 Conceptos básicos de las palas.

Las palas son la parte más importante del rotor. Son realmente las encargadas de crear la sustentación para que el helicóptero pueda elevarse. A continuación se va a detallar diferentes aspectos de éstas.

A continuación se muestran las partes más importantes de la pala.

- Perfil aerodinámico de una pala:

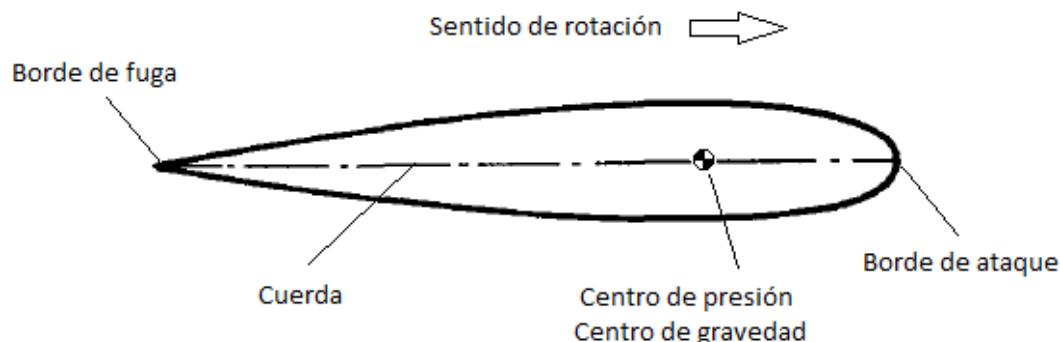


Figura 1

- Desde la vista aérea:

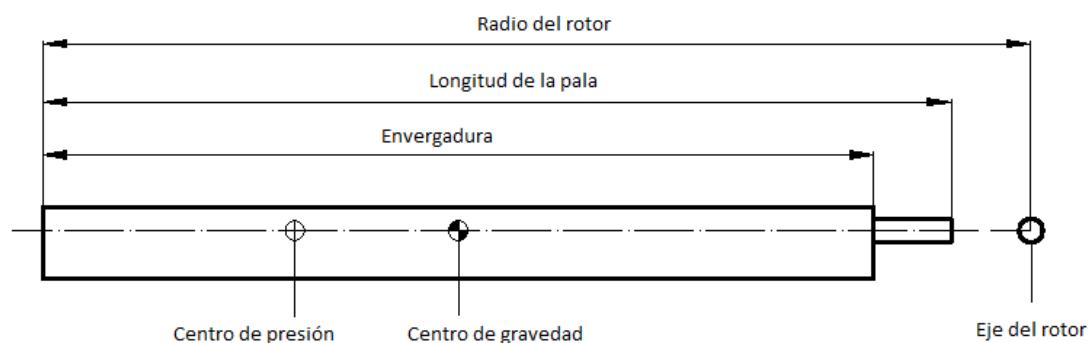


Figura 2

Una vez vista la nomenclatura de las diferentes partes de la pala, se van a definir los diferentes grados de libertad que tienen las palas en un rotor articulado.

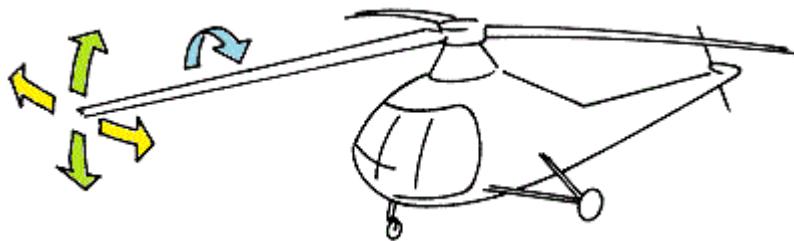


Figura 3

- **Paso:** es el giro de la propia pala respecto de su eje longitudinal. Está representado por la flecha azul.
- **Alabeo:** en el portapalas, parte que une la pala al rotor, existe una articulación que permite el movimiento vertical de la pala. Está representado por las flechas verdes.
- **Retraso:** en el portapalas, parte que une la pala al rotor, existe una articulación que permite el movimiento horizontal de la pala. Está representado por las flechas amarillas.

En la *Figura 4* están representados los diferentes ángulos, ejes y planos en las diferentes vistas.

- Perfil aerodinámico de una pala:

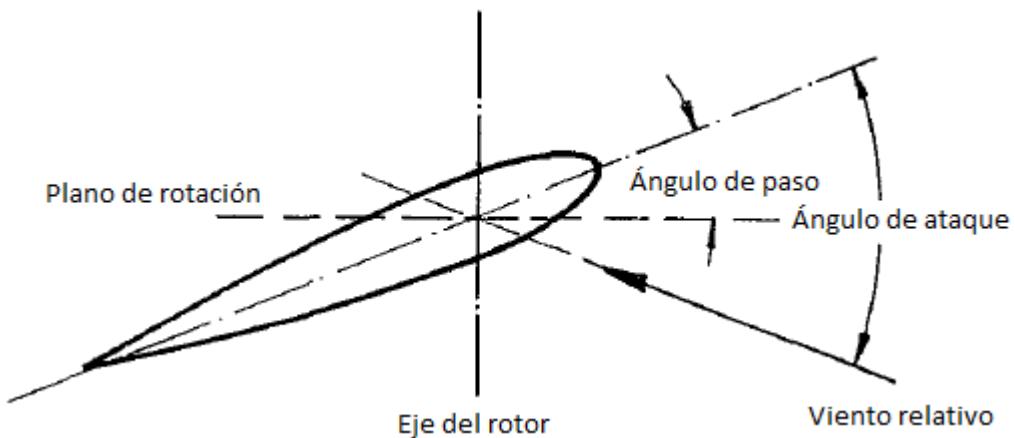


Figura 4

Como se puede ver, el ángulo de paso es el formado entre la prolongación de la cuerda del perfil aerodinámico y el plano de rotación. El ángulo de ataque está formado por la prolongación de la cuerda y la dirección del viento relativo. El plano de rotación siempre es perpendicular al eje del rotor.

- Desde la vista aérea:

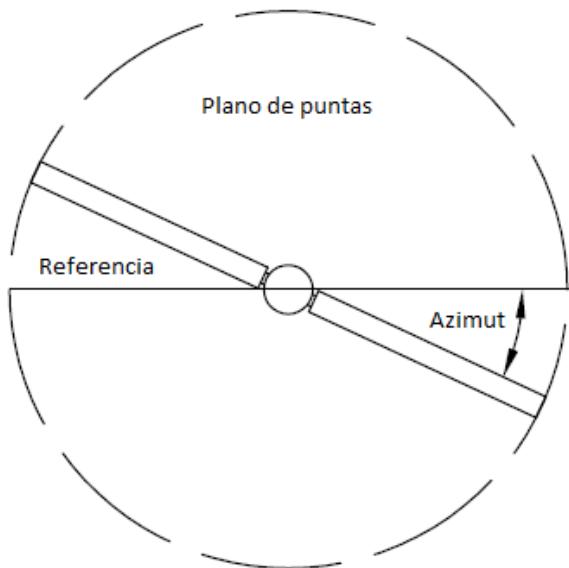


Figura 5

El azimut es el ángulo que forma la pala respecto de una referencia fijada. El plano de puntas es el formado por la rotación de las puntas de las palas.

2.2 La fuerza de sustentación.

La sustentación es la fuerza aerodinámica generada por la rotación de las palas. Esta fuerza depende de la densidad del aire, de la superficie de la pala, del coeficiente de sustentación (dependiente del tipo de perfil y del ángulo de paso de la pala) y de la velocidad de desplazamiento, respectivamente.

$$L = \frac{1}{2} \rho S c_l V^2 \quad (2.2.1)$$

En el despegue del helicóptero la fuerza sustentadora tiene que superar el valor del peso del mismo:

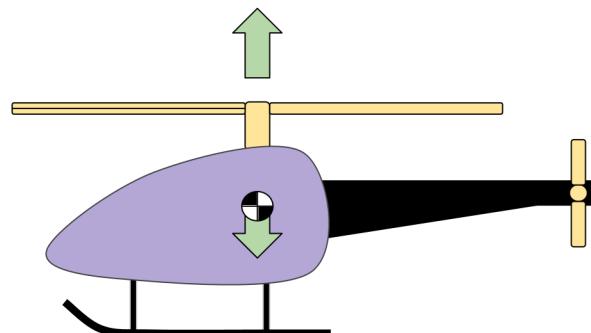


Figura 6

En vuelo estacionario, el peso del helicóptero tiene que ser igual a la sustentación producida por éste:

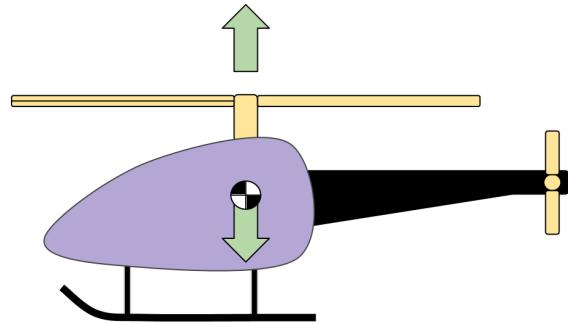


Figura 7

En el aterrizaje del helicóptero, la sustentación tiene que ser menor al peso:

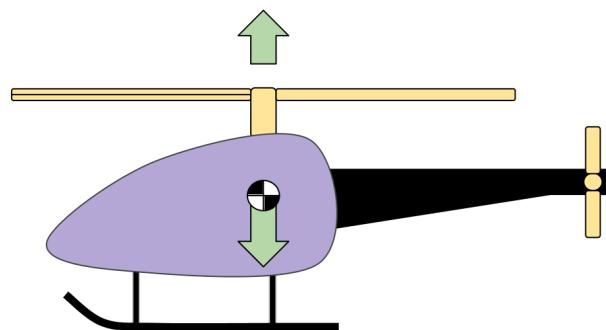


Figura 8

3 Comandos de vuelo de un helicóptero.

En el helicóptero hay tres comandos de vuelo y un control de potencia del motor mediante un acelerador. Los comandos son:

- Comando de paso colectivo.
- Comando de paso cíclico.
- Comando de rotor de cola.

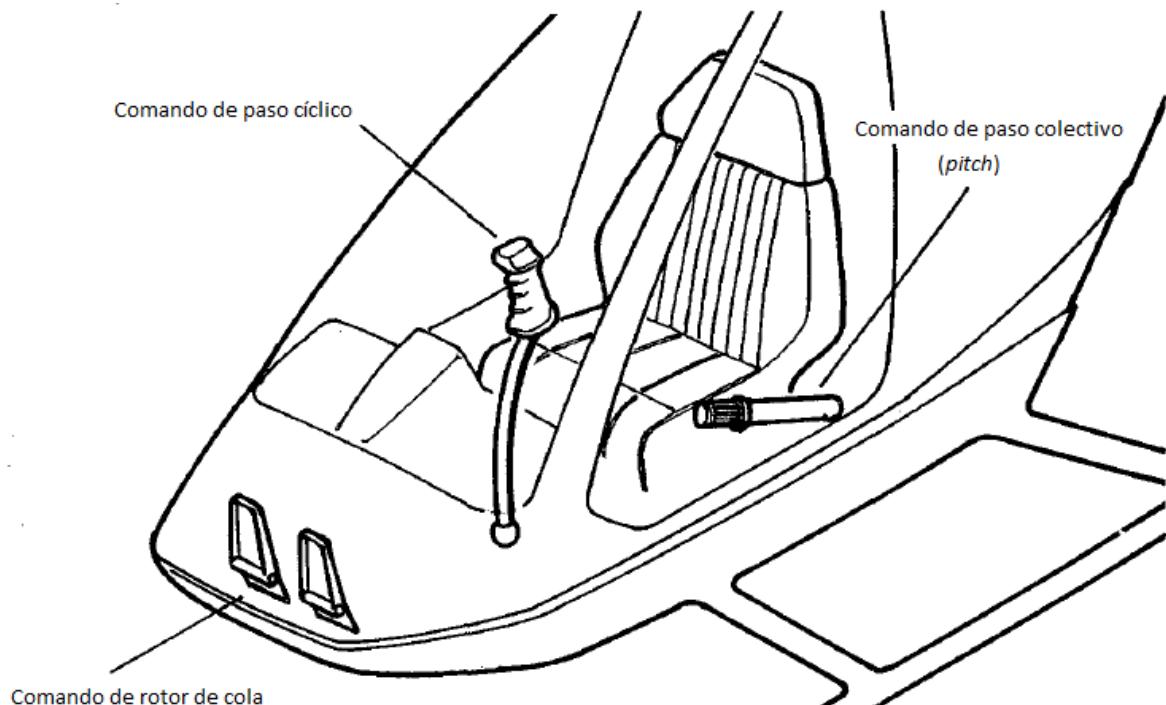


Figura 9

3.1 Comando de paso colectivo.

Para ascensos o movimientos verticales los helicópteros utilizan este comando, también conocido como *pitch*. El *pitch* está situado a la izquierda del asiento del piloto y la palanca sólo puede moverse hacia abajo o hacia arriba (*Figura 10*). Cuando se eleva la palanca, el ángulo de paso de las palas aumenta y eso conlleva que también aumente la fuerza sustentadora, y viceversa.



Figura 10

Con estas maniobras de aumento y disminución del ángulo de paso están implícitas respectivamente el aumento y la disminución de la resistencia aerodinámica de las palas del rotor. Para mantener constantes las revoluciones del rotor ante variaciones del paso colectivo se dispone en la misma empuñadura del *pitch* un acelerador del motor. Este acelerador es similar al acelerador de una motocicleta. Así pues el piloto corrige las revoluciones según las variaciones del paso colectivo que haga. Para facilitar su control, el sentido de giro del acelerador se ha establecido de la manera indicada en la *Figura 11*.

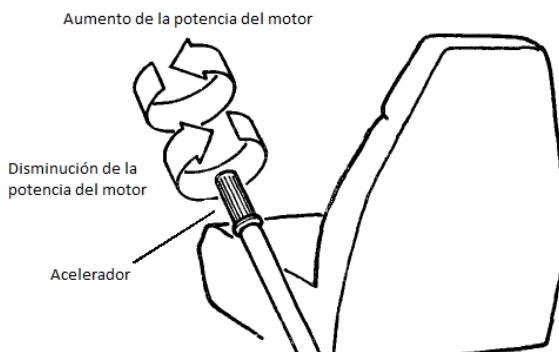


Figura 11

De lo visto hasta el momento se deduce que simultáneamente se debe elevar el *pitch* y acelerar el motor para mantener las revoluciones del rotor constantes, y viceversa.

En la *Figura 12* que se muestra a continuación se puede ver un esquema muy sencillo para ayudar a entender la trasmisión de movimiento del *pitch* a las palas. Este se transmite mediante unas varillas y el plato oscilante. Cuando se eleve el *pitch* la varilla del *pitch* se desplaza verticalmente hacia arriba, lo que provocará que el plato oscilante ascienda verticalmente siempre paralelo al plano de rotación. Esto hará que las dos varillas que unen el plato oscilante con las palas se desplacen la misma distancia y por lo tanto provoquen variaciones del ángulo de paso en las palas exactamente iguales.

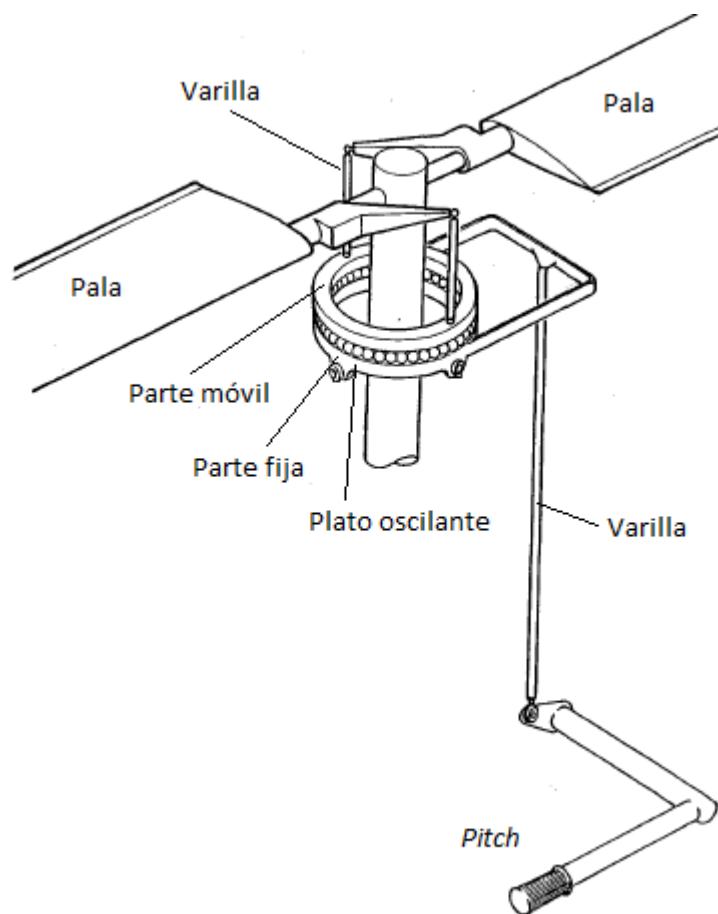


Figura 12

3.2 Comando de paso cílico.

El comando de paso cílico es la palanca situada entre las piernas del piloto. Esta palanca es la encargada de ejercer el control del giro del rotor. El varillaje que conecta la palanca con el plato oscilante inclina este último en una dirección determinada dependiente del desplazamiento del comando de paso cílico.

Si suponemos que estamos pilotando y desplazamos la palanca del paso cílico hacia nosotros, se puede ver mediante la trasmisión de varillas que el plato oscilante comenzará a inclinarse hacia atrás. Si alejamos la palanca de nosotros, el plato oscilante se inclinará hacia delante. Si movemos la palanca hacia la izquierda, el plato oscilante se inclinará hacia la izquierda, y viceversa.

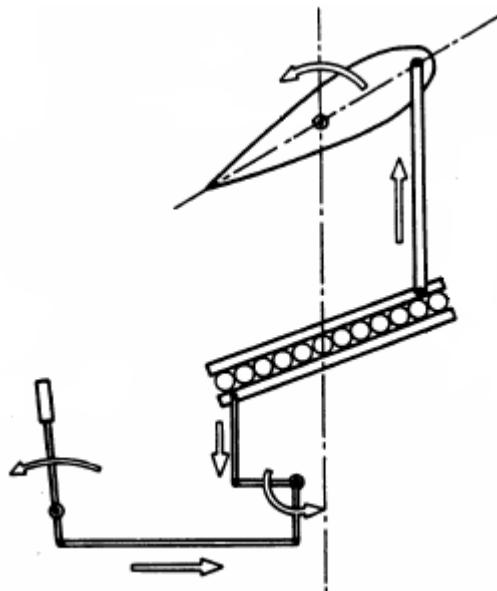


Figura 13

El paso cíclico tiene como misión variar el ángulo de paso de las palas a lo largo de su recorrido circular, lo que variará el valor de la sustentación de manera que se pueda dirigir el helicóptero en la dirección deseada. En la *Figura 14* se puede ver la variación de los ángulos cuando el plato oscilante es inclinado por el comando de paso colectivo.

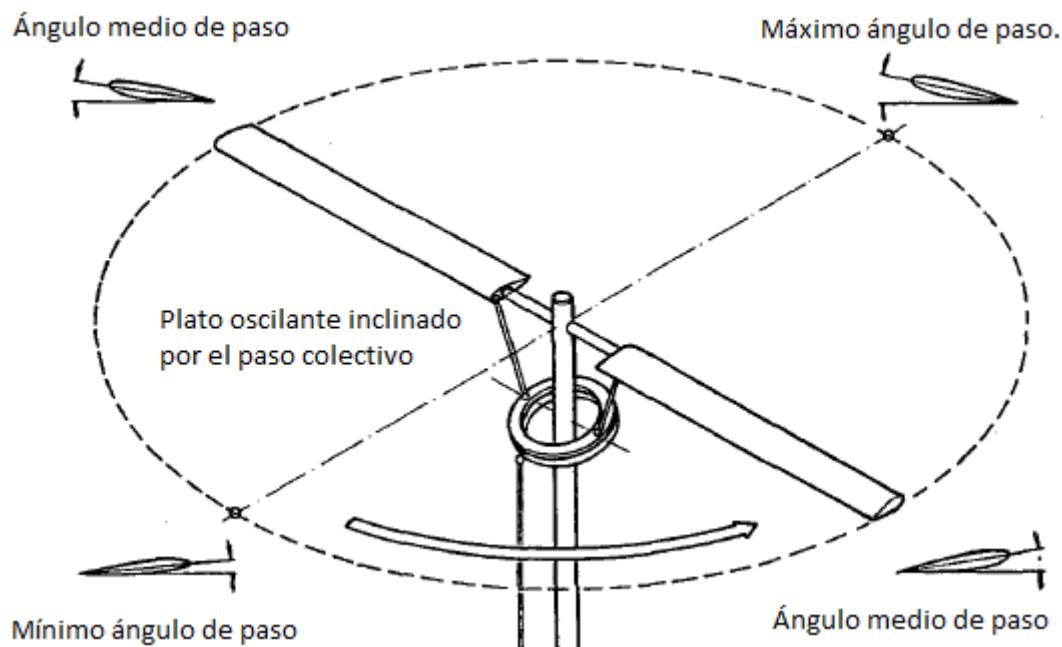


Figura 14

El semicírculo del plano de puntas comprendido entre los ángulos medios de paso y el mínimo ángulo de paso poseerá menos sustentación que la porción restante, ya que la sustentación es directamente proporcional al ángulo de paso. En la *Figura 15* se puede

ver representado gráficamente. Si hay más sustentación en la parte trasera del helicóptero, éste tenderá a ir hacia adelante.

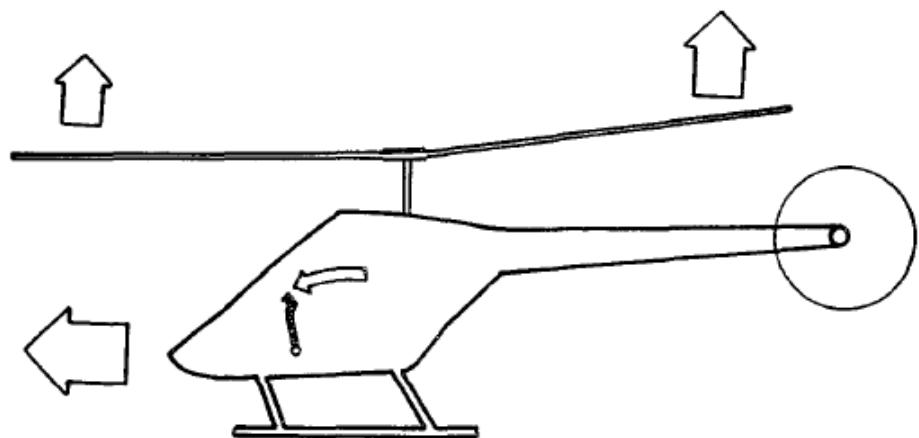


Figura 15

Si por el contrario accionamos la palanca hacia atrás:

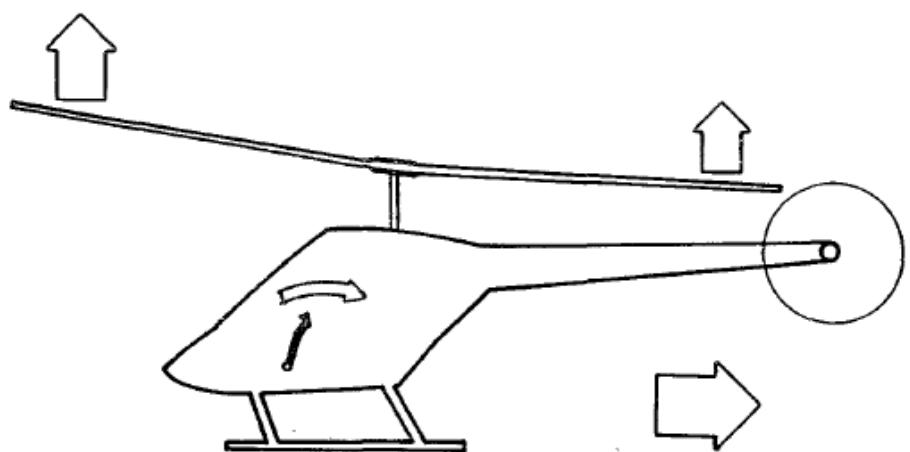


Figura 16

Y si la accionamos hacia los laterales:

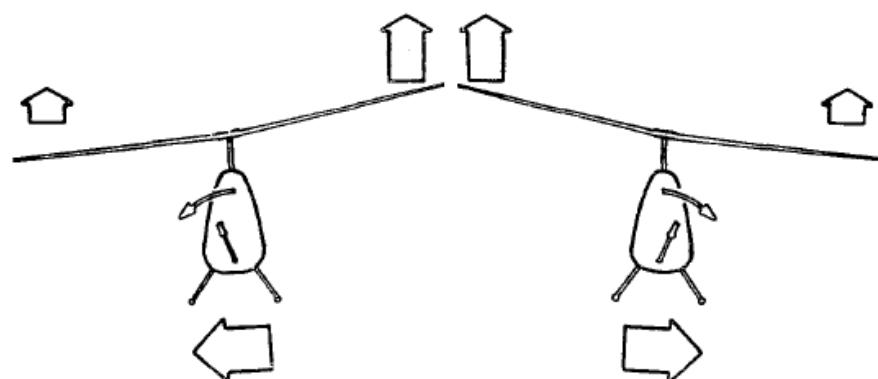


Figura 17

3.3 Comando de rotor de cola.

El control del comando de rotor de cola se realiza mediante los pedales. Su nombre más técnico es paso <<colectivo de rotor de cola>>, y varía el ángulo de las palas del rotor de cola simultáneamente.

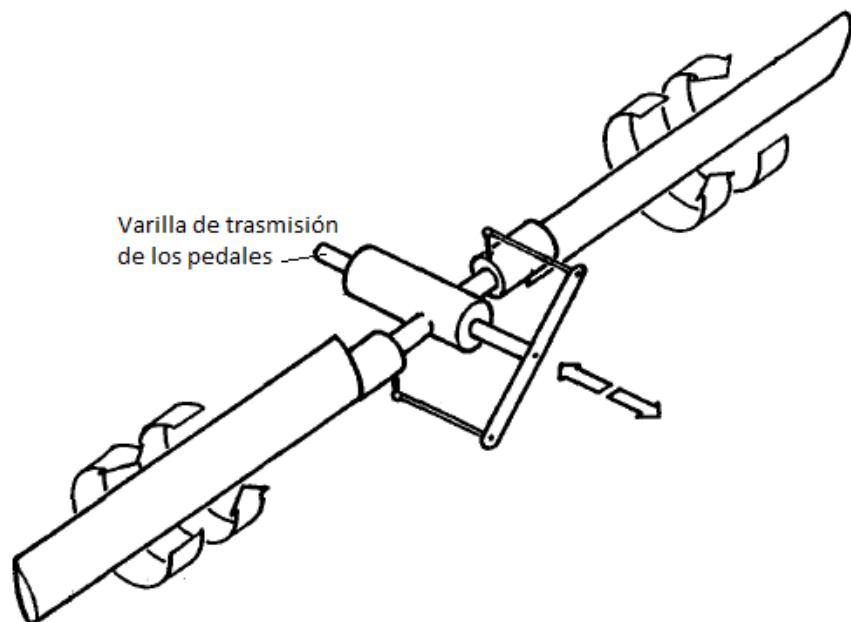


Figura 18

Al presionar el pedal izquierdo el piloto consigue girar la nariz del helicóptero hacia la izquierda y al presionar el pedal derecho, gira hacia la derecha.

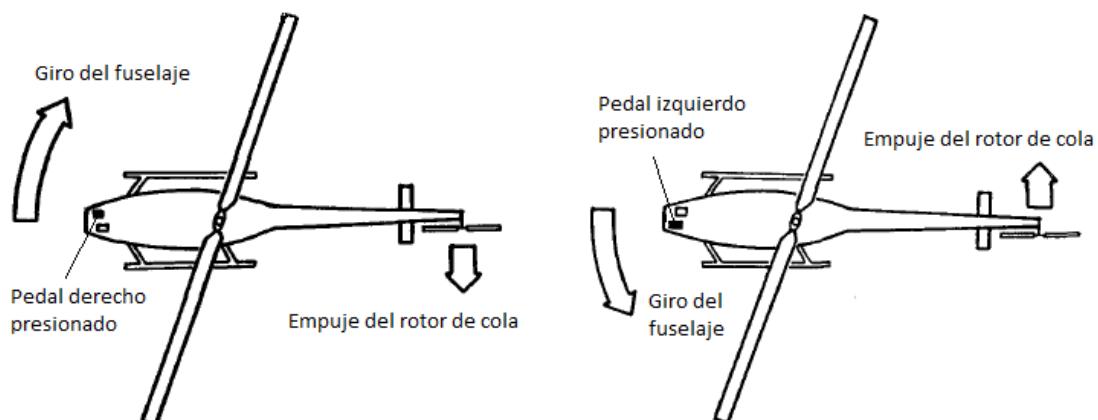


Figura 19

3.4 Comandos de vuelo y cadena cinemática del T-REX 550.

En el apartado anterior se han visto los comandos de vuelo, cómo al mover la palanca, el *pitch* o los pedales reacciona el helicóptero. En este apartado se va a ver cómo recibe esos comandos el aeromodelo concerniente a este proyecto, el T-REX 550, así como la cadena cinemática de todas las piezas del rotor en el proceso.

En este caso, los comandos no son dirigidos por una palanca, un *pitch* y unos pedales, evidentemente. En los aeromodelos se utilizan emisoras radio control. A través de éstas se envía una señal que es captada por el receptor, y éste a su vez envía la señal al servo o los servos correspondientes.

Un servo, o un servomotor, es un dispositivo actuador que tiene la capacidad de ubicar en cualquier posición su brazo dentro de un rango de operación, y de mantenerse estable en dicha posición. Su margen de funcionamiento generalmente es de menos de una vuelta completa.

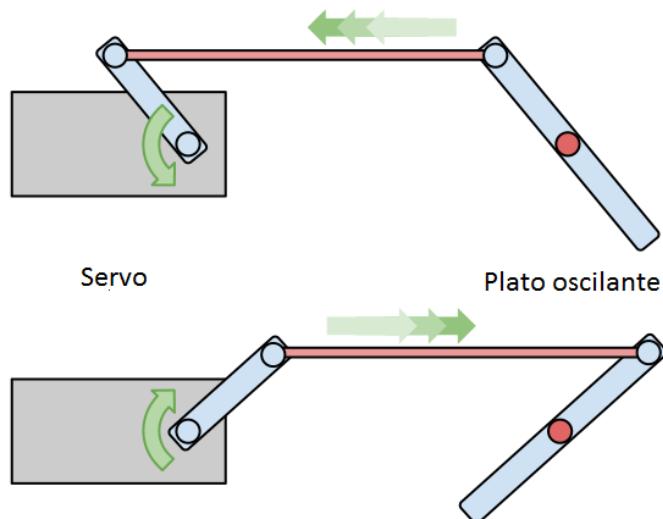


Figura 20

Los servos del rotor principal utilizados en el T-REX 550 son el de la siguiente figura:



Figura 21

En el orificio del brazo más alejado del extremo roscaremos la pieza con terminación esférica. Y el brazo irá montado sobre la superficie cilíndrica dentada. Esa pieza metálica se unirá con su terminación esférica a las varillas que se muestran a continuación, que a su vez se unirán al plato oscilante del rotor, con la misma unión que con el servo. Las dos piezas plásticas se roscarán en los extremos de la barra metálica para formar la varilla.



Figura 22

En esta imagen se puede ver claramente la unión de las piezas:

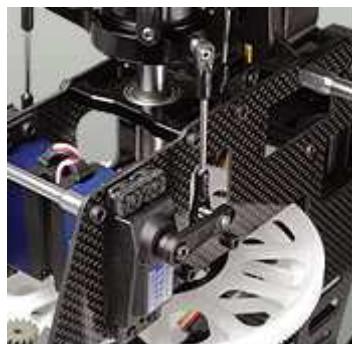


Figura 23

Los comandos una vez hayan llegado al plato oscilante serán igual que en un helicóptero, y ya está descrito en el apartado anterior. Con lo cual vamos a dar paso a la cadena cinemática.

Cuando un servo sea activado, moverá la varilla verticalmente hacia arriba o hacia abajo, lo que provocará que el plato oscilante se mueva de suposición de equilibrio, ya bien sea trasladándose verticalmente, hacia arriba o hacia abajo, porque los tres servos actúen a la vez (comando de paso colectivo), o sólo uno o dos de ellos, en cuyo caso el plato oscilante dejará de estar paralelo al plano de rotación (comando de paso cíclico).

Un símil del funcionamiento del plato oscilante sería un rodamiento. Hay una parte fija (de la hablada hasta ahora, la que está unida a los servos) y otra parte móvil (la que está en contacto con el eje y otras piezas del rotor).

A continuación se va a mostrar cómo repercute en el rotor el comando de paso colectivo y cíclico. Las partes

➤ **Paso colectivo:**

Se va a ver cómo afecta el paso colectivo a las palas y los estabilizadores por separado, para explicarlo de una manera más clara y concisa.

Los tres servos actúan a la vez y sincronizados, así que el plato oscilante se traslada verticalmente hacia arriba. Las varillas unidas a él transmiten el movimiento hasta la otra pieza a la que están unidas. Esta pieza puede girar sobre el eje señalado en la figura, y actúa como un balancín. Si una varilla sube, la otra tendrá que bajar. La varilla que baja está unida al portapalas, y provocará en este un momento que hará que gire, cambiando así el ángulo de paso de la pala. En la figura solo está representado un movimiento, pero es análogo para las piezas homólogas. Los dos movimientos se realizan a la vez y el cambio del ángulo de paso es el mismo para las dos palas.

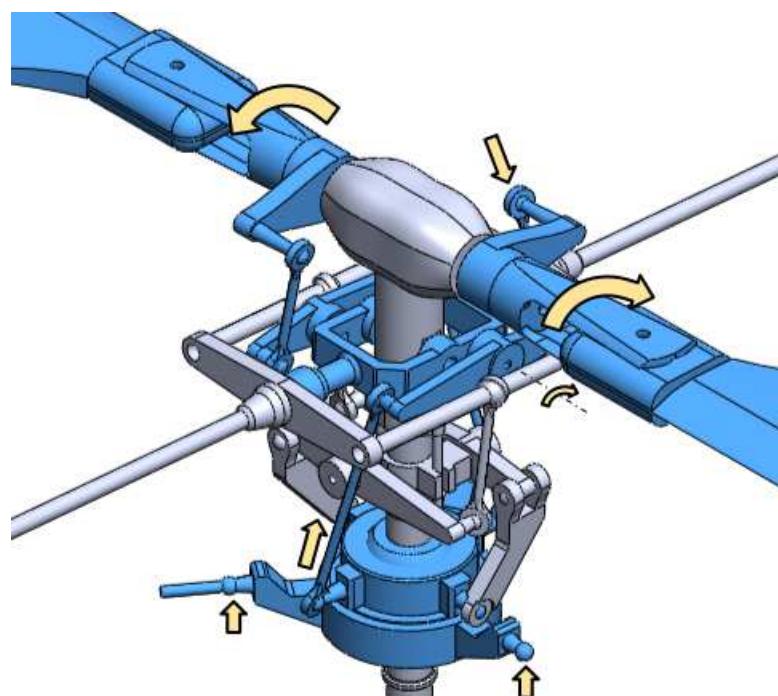


Figura 24

El paso colectivo no actúa sobre los estabilizadores porque las fuerzas se compensan como se puede ver en la figura. En ella está representada una de las transmisiones de movimiento, pero la otra es idéntica, ya que el plato oscilante se desplaza paralelamente al plano de rotación.

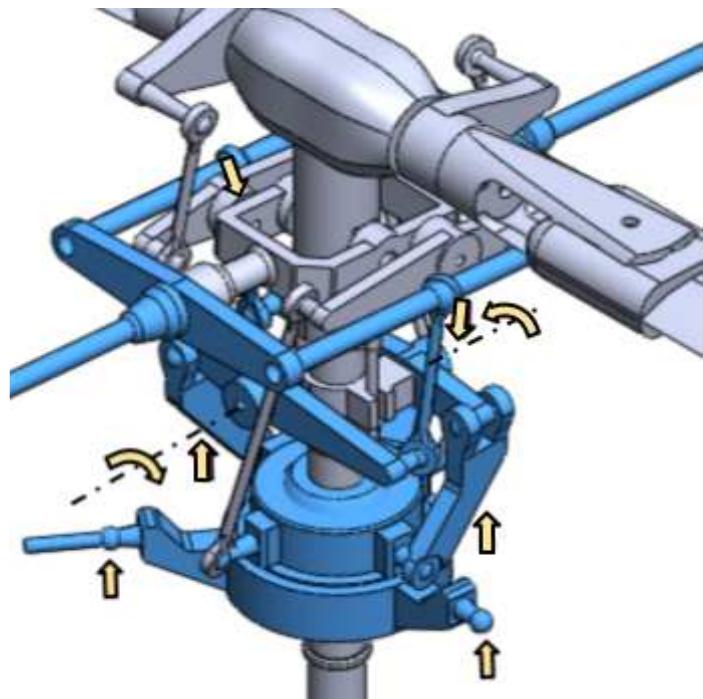


Figura 25

➤ **Paso cíclico:**

En este caso solo actúa un servo, por lo tanto el plato oscilante no se traslada, si no que gira sobre sí mismo. Al igual que en el apartado anterior, se va a ver cómo afecta el paso cíclico a las palas y los estabilizadores por separado, para explicarlo de una manera más clara y concisa.

Es un caso similar al anterior en cuanto a movimientos se refiere, pero la diferencia es que el movimiento se acentúa más en unas zonas que en otras, dado a la inclinación del plato oscilante respecto al plano de rotación. En la siguiente figura se puede observar mediante flechas (el tamaño de éstas va en función del movimiento) el servo que se ha activado así como la repercusión en el resto de piezas.

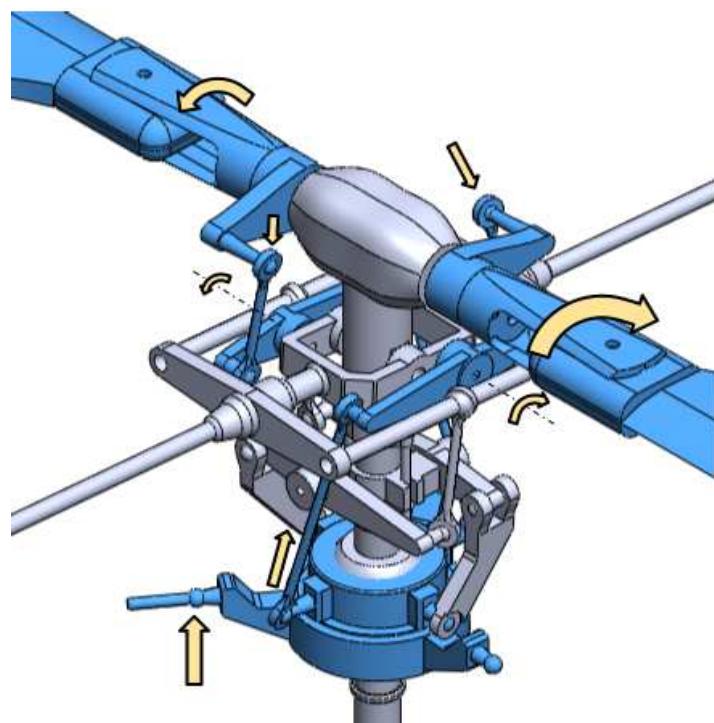


Figura 26

Como se puede comprobar, la pala de la derecha tendrá un mayor ángulo de paso que la pala de la izquierda, ya que el varillaje que la une con el plato oscilante se encuentra en la parte más alta de la inclinación, y por lo tanto eso producirá un mayor desplazamiento.

Como en el caso de las palas, en el de los estabilizadores es un caso similar al del paso colectivo, la trasmisión de movimiento es la misma pero se acentúa más en unas partes que en otras.

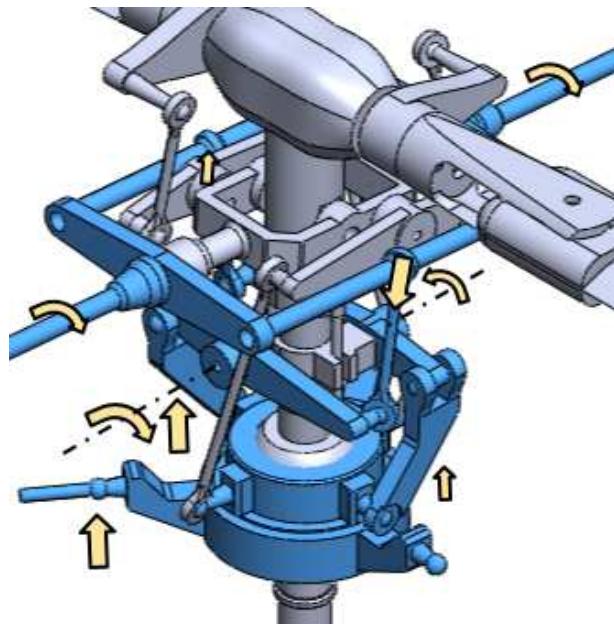


Figura 27

4 Fundamento teórico. Cinemática de un rotor de helicóptero en vuelo axial.

En este apartado se van a detallar la teoría de la cantidad de movimiento y la teoría del elemento de pala al vuelo axial, al igual que combinación entre ellas. Así mismo se verán las fuerzas de sustentación y de resistencia

4.1 Teoría del elemento de pala. Cinemática de la pala.

Un elemento de pala puede considerarse como una pala de envergadura diferencial en régimen bidimensional de corriente, de tal forma que las fuerzas aerodinámicas dependerán de la velocidad relativa de su punto de referencia respecto al aire. Esta velocidad depende a su vez del equilibrio dinámico de la pala, teniendo en cuenta las libertades de movimiento que le permiten sus articulaciones de abatimiento, arrastre y cambio de paso, por lo cual empezaremos por calcular cual es la velocidad relativa de un elemento de pala respecto al aire, cuando se conocen las velocidades que regulan su cinemática. La posición de la pala respecto a un triángulo de referencia $(0.X_0, Y_0, Z_0)$ se obtiene por medio de:

➤ Giro ψ alrededor de $0Z_0$:

$$\begin{Bmatrix} \vec{i}_1 \\ \vec{j}_1 \\ \vec{k}_1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & \operatorname{sen}\psi & 0 \\ -\operatorname{sen}\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \vec{i}_0 \\ \vec{j}_0 \\ \vec{k}_0 \end{Bmatrix} \quad (4.1.1)$$

➤ Giro β alrededor de BY_1 :

$$\begin{Bmatrix} \vec{i}_2 \\ \vec{j}_2 \\ \vec{k}_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \operatorname{sen}\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\operatorname{sen}\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \vec{i}_1 \\ \vec{j}_1 \\ \vec{k}_1 \end{Bmatrix} \quad (4.1.2)$$

➤ Giro $-\zeta$ alrededor de AZ_2 :

$$\begin{Bmatrix} \vec{i}_3 \\ \vec{j}_3 \\ \vec{k}_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\zeta & -\operatorname{sen}\zeta & 0 \\ \operatorname{sen}\zeta & \cos\zeta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \vec{i}_2 \\ \vec{j}_2 \\ \vec{k}_2 \end{Bmatrix} \quad (4.1.3)$$

➤ Giro θ alrededor de PX_3 :

$$\begin{Bmatrix} \vec{i} \\ \vec{j} \\ \vec{k} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \vec{i}_3 \\ \vec{j}_3 \\ \vec{k}_3 \end{Bmatrix} \quad (4.1.4)$$

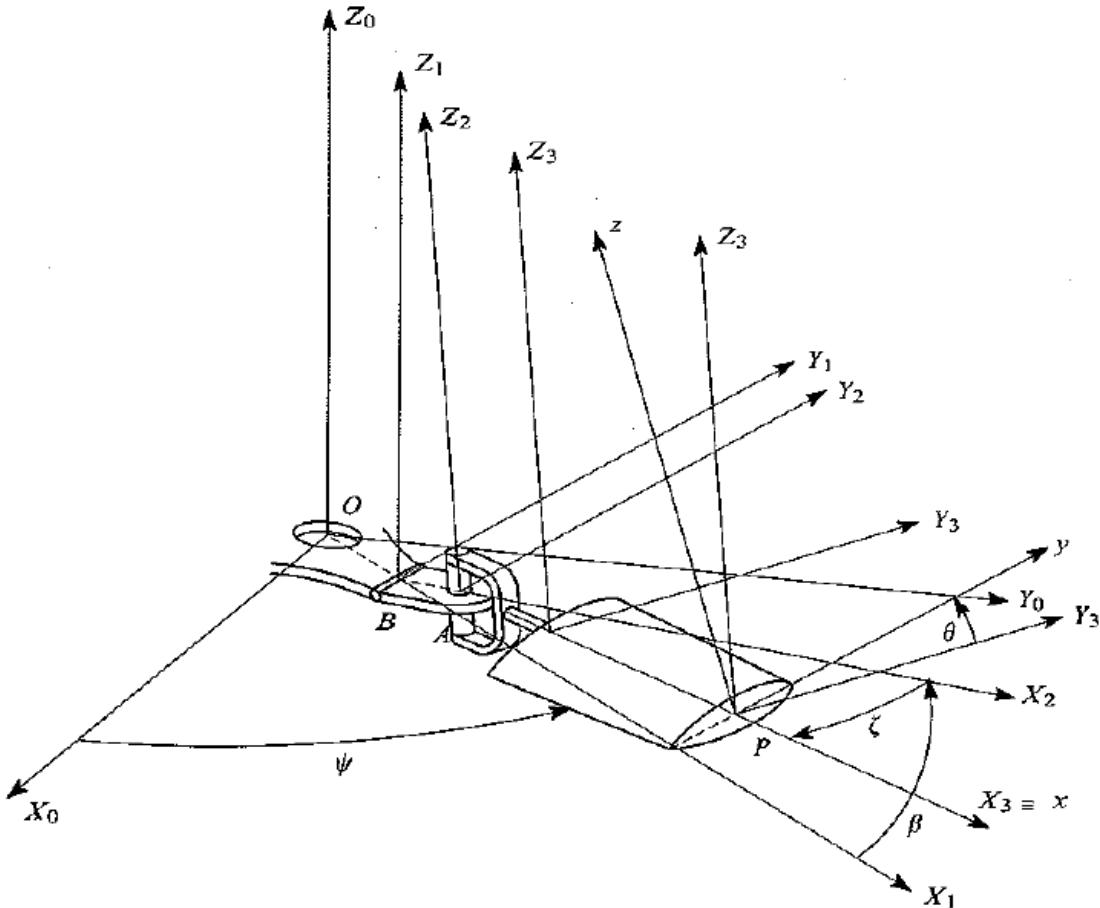


Figura 28

En la *Figura 28* se representan los triédros ligados a los diferentes sólidos que intervienen en la cinemática de la pala y las relaciones de paso entre los sistemas de ejes. Teniendo en cuenta que:

$$\overrightarrow{OB} = e_b \vec{i}_1 ; \quad \overrightarrow{BA} = (e_a - e_b) \vec{i}_2 ; \quad \overrightarrow{AP} = (r - e_a) \vec{i}_3 \quad (4.1.5)$$

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{d\beta}{d\psi} \frac{d\psi}{dt} = \Omega \frac{d\beta}{d\psi} ; \quad \frac{d\zeta}{dt} = \Omega \frac{d\zeta}{d\psi} \quad (4.1.6)$$

La velocidad del punto P del eje de la sección de pala puede expresarse en la forma:

$$\vec{V}_p = \vec{V}_0 + \Omega \vec{k}_0 \times \overrightarrow{OP} - \frac{d\beta}{dt} \vec{j}_1 \times \overrightarrow{BP} - \frac{d\zeta}{dt} \vec{k}_2 \times \overrightarrow{AP} \quad (4.1.7)$$

La velocidad del punto O respecto del aire es:

$$\vec{V}_0 = -\vec{V} \cos \alpha \vec{i}_0 - (\vec{V} \sin \alpha - v_i) \vec{k}_0 \quad (4.1.8)$$

con lo cual:

$$\begin{aligned} \vec{V}_p = & -\vec{V} \cos \alpha \vec{i}_0 - (\vec{V} \sin \alpha - v_i) \vec{k}_0 + \\ & + \Omega \vec{k}_0 \times (e_b \vec{i}_1 + (e_a - e_b) \vec{i}_2 + (r - e_a) \vec{i}_3) - \\ & - \Omega \frac{d\beta}{d\psi} \vec{j}_1 \times ((e_a - e_b) \vec{i} + (r - e_a) \vec{i}_3) - \Omega \frac{d\zeta}{d\psi} \vec{k}_2 \times (r - e_a) \vec{i}_3 \end{aligned} \quad (4.1.9)$$

Desarrollando los productos vectoriales entre los versores de los distintos sistemas que aparecen, se tiene:

$$\begin{aligned} \vec{V}_p = & -\vec{V} \cos \alpha \vec{i}_0 - (\vec{V} \sin \alpha - v_i) \vec{k}_0 + \Omega e_b \vec{j}_1 + \Omega (e_a - e_b) \cos \beta \vec{j}_1 + \\ & + \Omega (r - e_a) \vec{i}_3 [\cos \beta \cos \zeta \vec{j}_1 + \sin \zeta \vec{i}_1] + \\ & + \Omega \frac{d\beta}{d\psi} [(e_a - e_b) \vec{k}_2 + (r - e_a) \cos \zeta \vec{k}_2] - \Omega \frac{d\zeta}{d\psi} (r - e_a) \vec{j}_3 \end{aligned} \quad (4.1.10)$$

Adimensionalizando esta ecuación, dividiendo por ΩR y llamando:

$$\frac{r}{R} = x \quad ; \quad \frac{e_b}{R} = \bar{e}_b \quad ; \quad \frac{e_a}{R} = \bar{e}_a \quad ; \quad \frac{V \cos \alpha}{\Omega R} = \mu \quad ; \quad \frac{V \sin \alpha - v_i}{\Omega R} = \lambda \quad (4.1.11)$$

tenemos:

$$\begin{aligned} \frac{\vec{V}_p}{\Omega R} = & -\mu \vec{i}_0 - \lambda \vec{k}_1 + [\bar{e}_b + (\bar{e}_a - \bar{e}_b) \cos \beta + (x - \bar{e}_a) \cos \beta \cos \zeta] \vec{j}_2 + \\ & + (x - \bar{e}_a) \sin \zeta \vec{i}_1 + \frac{d\beta}{d\psi} [(\bar{e}_a - \bar{e}_b) + (x - \bar{e}_a) \cos \zeta] \vec{k}_3 - \\ & - \frac{d\zeta}{d\psi} (x - \bar{e}_a) \vec{j}_3 \end{aligned} \quad (4.1.12)$$

Para el cálculo de las fuerzas aerodinámicas sobre el elemento de pala conviene expresar esta velocidad en sus componentes en los ejes $(P.X_3, Y_3, Z_3)$ utilizando las relaciones entre versores (4.1.1), (4.1.2), (4.1.3), (4.1.4). Así:

$$\vec{i}_0 = \cos \psi \vec{i}_1 - \sin \psi \vec{j}_1 = \cos \psi \vec{i}_1 - \sin \psi \vec{j}_2 \quad (4.1.13)$$

con lo cual:

$$\begin{aligned} \frac{\vec{V}_p}{\Omega R} = & \left[-\mu \cos \psi + (x - \bar{e}_a) \sin \zeta \right] \vec{i}_1 + \lambda \vec{k}_1 + \\ & + \left[\mu \sin \psi + \bar{e}_b + (\bar{e}_a - \bar{e}_b) \cos \beta + (x - \bar{e}_a) \cos \beta \cos \zeta \right] \vec{j}_2 + \\ & + \frac{d\beta}{d\psi} \left[(\bar{e}_a - \bar{e}_b) + (x - \bar{e}_a) \cos \zeta \right] \vec{k}_3 - \frac{d\zeta}{d\psi} (x - \bar{e}_a) \vec{j}_3 \end{aligned} \quad (4.1.14)$$

como:

$$\begin{aligned} \vec{i}_1 &= \cos \beta \vec{i}_2 - \sin \beta \vec{k}_3 \\ \vec{k}_1 &= \sin \beta \vec{i}_2 + \cos \beta \vec{k}_3 \end{aligned} \quad (4.1.15)$$

$$\begin{aligned} \frac{\vec{V}_p}{\Omega R} = & \left[-\mu \cos \psi \cos \beta - \lambda \sin \beta + (x - \bar{e}_a) \cos \beta \sin \zeta \right] \vec{i}_2 + \\ & + \left[\mu \sin \psi + \bar{e}_b + (\bar{e}_a - \bar{e}_b) \cos \beta + (x - \bar{e}_a) \cos \beta \cos \zeta \right] \vec{j}_2 + \\ & + \left[\mu \cos \psi \sin \beta - \lambda \cos \beta - (x - \bar{e}_a) \sin \beta \sin \zeta \right] \vec{k}_3 + \\ & + \frac{d\beta}{d\psi} \left[(\bar{e}_a - \bar{e}_b) + (x - \bar{e}_a) \cos \zeta \right] \vec{k}_3 - \frac{d\zeta}{d\psi} (x - \bar{e}_a) \vec{j}_3 \end{aligned} \quad (4.1.16)$$

Finalmente:

$$\begin{aligned} \vec{i}_2 &= \cos \zeta \vec{i}_3 - \sin \zeta \vec{k}_3 \\ \vec{k}_2 &= \sin \zeta \vec{i}_3 + \cos \zeta \vec{k}_3 \end{aligned} \quad (4.1.17)$$

$$\begin{aligned} \frac{\vec{V}_p}{\Omega R} = & \left\{ -\mu (\cos \psi \cos \beta \cos \zeta + \sin \psi \sin \zeta) - \lambda \sin \beta \cos \zeta - \right. \\ & - \left[\bar{e}_b + (\bar{e}_a - \bar{e}_b) \cos \beta \right] \sin \zeta \Big\} \vec{i}_3 + \left\{ -\mu (\cos \psi \cos \beta \sin \zeta + \sin \psi \cos \zeta) - \right. \\ & - \lambda \sin \beta \sin \zeta + \left. \left[\bar{e}_b + (\bar{e}_a - \bar{e}_b) \cos \beta \right] \cos \zeta + (x - \bar{e}_a) \cos \beta - \right. \\ & - \left. (x - \bar{e}_a) \frac{d\zeta}{d\psi} \right\} \vec{j}_3 + \left\{ \mu \cos \psi \sin \beta - \lambda \cos \beta - (x - \bar{e}_a) \sin \beta \sin \zeta + \right. \\ & + \left. \left[(\bar{e}_a - \bar{e}_b) + (x - \bar{e}_a) \cos \zeta \right] \frac{d\beta}{d\psi} \right\} \vec{k}_3 \end{aligned} \quad (4.1.18)$$

Llamando U_R , U_T , U_P a las velocidades relativas del aire respecto al perfil en ejes $(P.X_3, -Y_3, Z_3)$ (figura tal), será:

$$\frac{\vec{V}_p}{\Omega R} = -\frac{U_R}{\Omega R} \vec{i}_3 + \frac{U_T}{\Omega R} \vec{j}_3 - \frac{U_P}{\Omega R} \vec{k}_3 \quad (4.1.19)$$

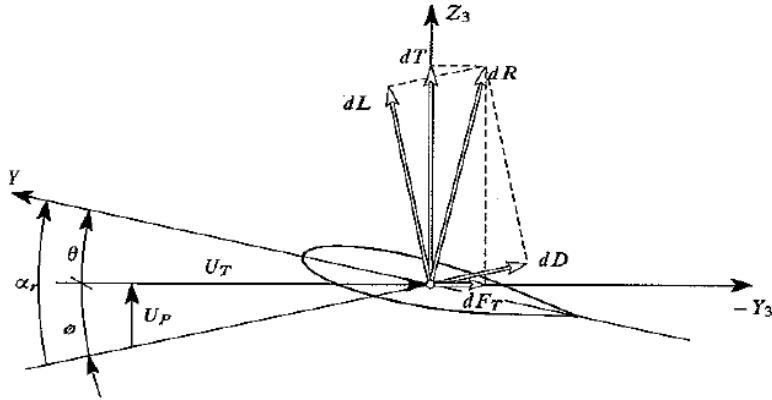


Figura 29

Con lo cual:

$$\begin{aligned}
 \frac{U_R}{\Omega R} &= \mu(\cos\psi \cos\beta \cos\zeta + \sin\psi \sin\zeta) + \\
 &\quad + \lambda \sin\beta \cos\zeta + [\bar{e}_b + (\bar{e}_a - \bar{e}_b) \cos\beta] \sin\zeta \\
 \frac{U_T}{\Omega R} &= -\mu(\cos\psi \cos\beta \sin\zeta + \sin\psi \cos\zeta) - \lambda \sin\beta \sin\zeta + \\
 &\quad + [\bar{e}_b + (\bar{e}_a - \bar{e}_b) \cos\beta] \cos\zeta + (x - \bar{e}_a) \cos\beta - (x - \bar{e}_a) \frac{d\zeta}{d\psi} \\
 \frac{U_P}{\Omega R} &= \mu \cos\psi \sin\beta - \lambda \cos\beta - (x - \bar{e}_a) \sin\beta \sin\zeta \\
 &\quad + [(\bar{e}_a - \bar{e}_b) + (x - \bar{e}_a) \cos\zeta] \frac{d\beta}{d\psi}
 \end{aligned} \tag{4.1.19}$$

En los casos normales los ángulos \$\beta\$ y \$\zeta\$ son muy pequeños, por lo tanto puede hacerse:

$$\cos\beta \approx 1 ; \sin\beta \approx \beta ; \cos\zeta \approx 1 ; \sin\zeta \approx \zeta \tag{4.1.19}$$

y las relaciones (4.1.19) se reducen a:

$$\begin{aligned}
 \frac{U_R}{\Omega R} &\approx \mu(\cos\psi + \zeta \sin\psi) + \lambda\beta + \bar{e}_a\zeta \approx \mu \cos\psi \\
 \frac{U_T}{\Omega R} &\approx -\mu(\zeta \cos\psi + \sin\psi) - \lambda\beta\zeta + \bar{e}_a + (x - \bar{e}_a) - (x - \bar{e}_a) \frac{d\zeta}{d\psi} \approx \\
 &\quad \approx x + \mu \sin\psi - (x - \bar{e}_a) \frac{d\zeta}{d\psi}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{U_p}{\Omega R} &\approx -\mu\beta \cos\psi + \lambda + (x - \bar{e}_a) \beta \varsigma - (x - \bar{e}_b) \frac{d\beta}{d\psi} \approx \\
 &= \lambda - \mu\beta \cos\psi - (x - \bar{e}_b) \frac{d\beta}{d\psi}
 \end{aligned} \tag{4.1.20}$$

4.2 Fuerzas aerodinámicas en el elemento de pala.

La resultante dR de las fuerzas aerodinámicas sobre el elemento de pala se descompone en la sustentación dL , normal a la corriente relativa incidente, y la resistencia dD paralela a ella, dadas por:

$$\begin{aligned}
 dL &= \frac{1}{2} \rho (U_T^2 + U_p^2) c_t c d r \\
 dD &= \frac{1}{2} \rho (U_T^2 + U_p^2) c_d c d r
 \end{aligned} \tag{4.2.1}$$

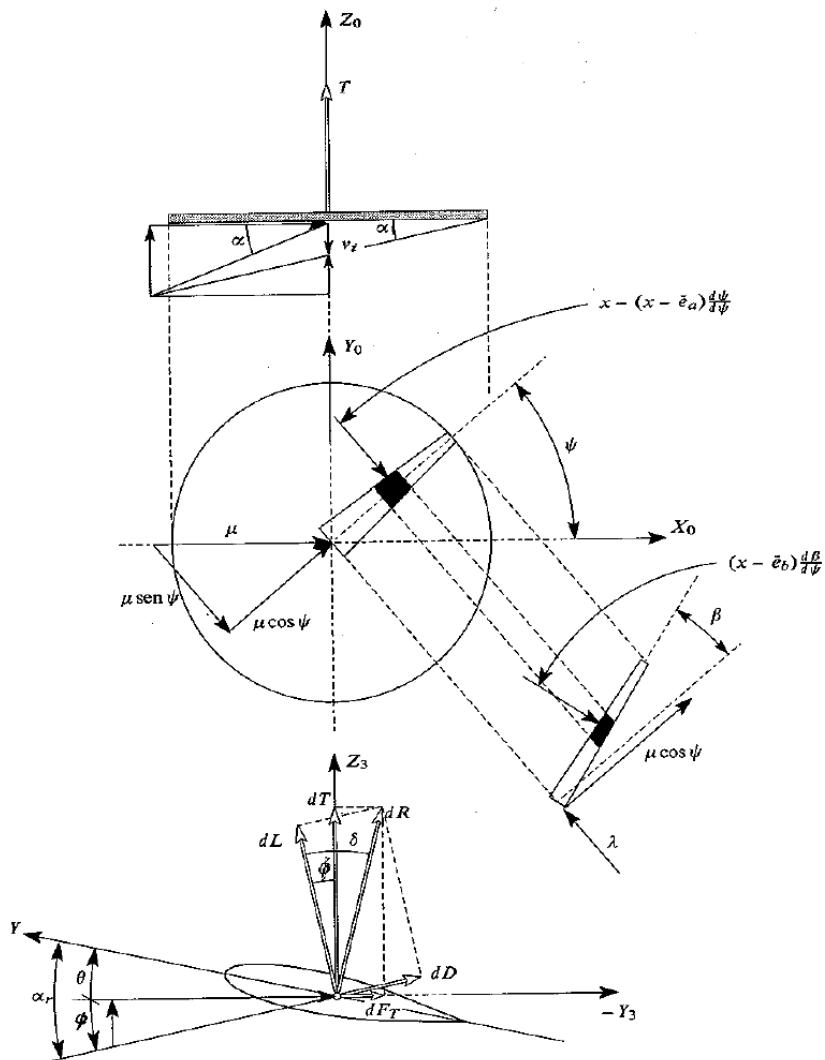


Figura 30

Al proyectar esta fuerza sobre los ejes $(P.X_3, -Y_3)$ tenemos:

$$\begin{aligned} dT &= \cos \phi dL + \sin \phi dD \\ dF_T &= \cos \phi dL - \sin \phi dD = dF_{T_0} - dF_{T_i} \end{aligned} \quad (4.2.2)$$

La parte dF_{T_0} es la fuerza tangencial parásita, debida a la fuerza de resistencia aerodinámica del perfil, mientras que dF_{T_i} es la fuerza tangencial inducida.

Estas fuerzas tangenciales producen unos momentos:

$$\begin{aligned} dQ_o &= r dF_{T_0} = r \cos \phi dD \\ dQ_i &= r dF_{T_i} = r \sin \phi dL \end{aligned} \quad (4.2.3)$$

cuya resultante debe ser compensada por el par aplicado al rotor para mantener su rotación.

En estas fórmulas es el ángulo ϕ de entrada de la corriente:

$$\phi = \operatorname{arctg} \frac{U_p}{U_T} \quad (4.2.4)$$

que junto con el ángulo de paso θ determinan el ángulo de ataque de la sección:

$$\alpha_r = \theta + \phi \quad (4.2.5)$$

4.2.1 Simplificación para pequeños ángulos de entrada de corriente:

Para $\phi \ll 1$ puede hacerse:

$$\cos \phi \approx 1 ; \sin \phi \approx \tan \phi \approx \phi \approx \frac{U_p}{U_T} \quad (4.2.1.1)$$

y además:

$$U_T^2 + U_p^2 \approx U_T^2 \quad (4.2.1.2)$$

Para perfiles aerodinámicos en ángulos de ataque pequeños es:

$$dD \ll dL \quad (4.2.1.3)$$

por lo cual las fórmulas (4.2.2) y (4.2.3) quedan:

$$dT \approx dL \approx \frac{1}{2} \rho U_T^2 c_l c dr$$

$$\begin{aligned} dF_{T_o} &\simeq dD \simeq \frac{1}{2} \rho U_T^2 c_d cdr & dQ_o &\simeq \frac{1}{2} \rho U_T^2 c_d cr dr \\ dF_{T_i} &\simeq \phi dL \simeq \frac{1}{2} \rho U_T U_p c_l cdr & dQ_i &\simeq \frac{1}{2} \rho U_T U_p c_l cr dr \end{aligned} \quad (4.2.1.4)$$

4.2.2 Adimensionalización:

Dividiendo las relaciones anteriores por las unidades de tracción y par:

$$T_u = \rho(\pi R^2)(\Omega R)^2 \quad y \quad Q_u = \rho(\pi R^2)R(\Omega R)^2 \quad (4.2.2.1)$$

y llamando:

$$x = \frac{r}{R} \quad y \quad \sigma_1 = \frac{c}{\pi R} \text{ (solidez local)} \quad (4.2.2.2)$$

queda:

$$\begin{aligned} dC_T &= \frac{\sigma_1 c_l}{2} \left(\frac{U_T^2}{\Omega R} \right) dx \\ dC_{Q_o} &= \frac{\sigma_1 c_d}{2} \left(\frac{U_T^2}{\Omega R} \right) x dx \\ dC_{Q_i} &= \frac{\sigma_1 c_l}{2} \left(\frac{U_p}{\Omega R} \right) \left(\frac{U_T}{\Omega R} \right) x dx \end{aligned} \quad (4.2.2.3)$$

para las distribuciones en cada elemento de pala de la tracción del rotor y del par que hay que aplicarle para mantener la rotación.

4.3 Simplificaciones de la teoría del elemento de pala las fuerzas aerodinámicas para vuelo axial.

En el caso de vuelo axial existe una simetría que hace que las velocidades y fuerzas en el elemento de pala sean independientes del azimut de la misma. Por lo tanto:

$$\beta = cte \quad ; \quad \frac{d\beta}{d\psi} = 0 \quad ; \quad \varsigma = cte \quad ; \quad \frac{d\varsigma}{d\psi} = 0 \quad ; \quad \alpha = \pm 90^\circ \quad ; \quad \mu = 0 \quad (4.3.1)$$

resulta:

$$\frac{U_T}{\Omega R} = x \quad ; \quad \frac{U_p}{\Omega R} = \lambda \quad ; \quad \frac{U_R}{\Omega R} = 0 \quad (4.3.2)$$

La simetría permite también agrupar las tracciones y pares producidos por los elementos de las b palas del rotor situados a la misma distancia r del eje, considerando la solidez total del rotor:

$$\sigma = \frac{bc}{\pi R} = b\sigma_1 \quad (4.3.3)$$

con lo cual las fórmulas () para la tracción y par quedan:

$$\begin{aligned} dC_T &= \frac{\sigma c_l}{2} x^2 dx \\ dC_{Q_o} &= \frac{\sigma c_d}{2} x^3 dx \\ dC_{Q_i} &= \frac{\sigma c_l}{2} \lambda x^2 dx = \lambda dC_T \end{aligned} \quad (4.3.4)$$

4.3.1 Ley de sustentación lineal.

Cuando se admite para el perfil una ley de sustentación lineal:

$$c_l = a\alpha_r = a(\theta + \phi) \approx a\left(\theta + \frac{U_p}{U_T}\right) = a\left(\theta + \frac{\lambda}{x}\right) \quad (4.3.1.1)$$

resulta:

$$\begin{aligned} dC_T &= \frac{a\sigma}{2} (x\theta + \lambda) x dx \\ dC_{Q_i} &= \frac{a\sigma}{2} (x\theta + \lambda) \lambda x dx \end{aligned} \quad (4.3.1.2)$$

4.3.2 Ley de resistencia parabólica.

Si se considera para el perfil una ley de resistencia parabólica:

$$c_d = \delta_0 + \delta_1 \alpha_r + \delta_2 \alpha_r^2 \approx \delta_0 + \delta_1 \left(\theta + \frac{\lambda}{x}\right) + \delta_2 \left(\theta + \frac{\lambda}{x}\right)^2 \quad (4.3.2.1)$$

se tiene:

$$dC_{Q_i} = \frac{\sigma \delta_0}{2} \left[x^2 + \frac{\delta_1}{\delta_0} x (x\theta + \lambda) + \frac{\delta_2}{\delta_0} x (x\theta + \lambda)^2 \right] x dx \quad (4.3.2.2)$$

4.4 Teoría de cantidad de movimiento.

La teoría de cantidad de movimiento permite una determinación muy simple de las fuerzas que actúan sobre un rotor por medio del análisis de la variación de la cantidad de movimiento de una masa de aire afectada por el mismo.

Consideremos una masa de aire en movimiento relativo respecto a un rotor que supones como un disco capaz de comunicar energía al aire. La acción de este disco afecta a todo el aire pero, desde un punto de vista práctico, la hipótesis de Glauert establece que la única masa de aire afectada es la que circula por un tubo de corriente cuya sección recta en la zona del disco es un círculo de radio igual al de rotor.

De acuerdo con esta hipótesis al ser el área de la sección recta del tubo de corriente en la zona del roto igual al área del rotor:

$$S = \pi R^2 \quad (4.4.1)$$

La masa de aire afectada por el rotor por unidad de tiempo será *Figura 31*:

$$m = \rho S V_1 = \rho S \left[V_x^2 + (V_z + v_i)^2 \right]^{1/2} \quad (4.4.2)$$

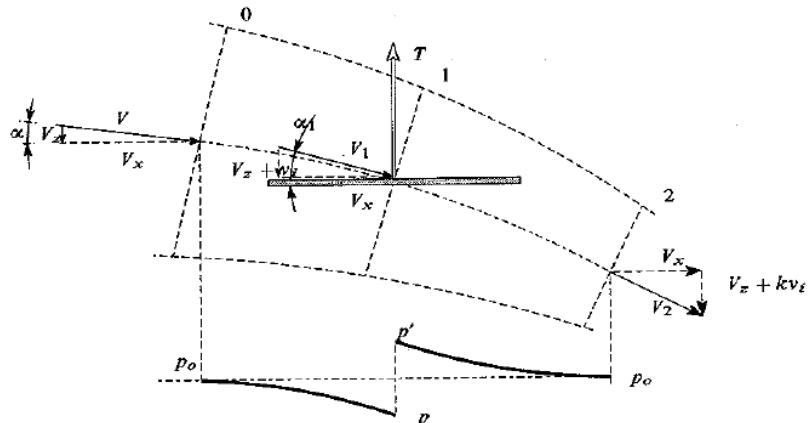


Figura 31

Para una situación estacionaria (independiente del tiempo) el cambio de cantidad de movimiento del aire al pasar del infinito aguas arriba al infinito aguas abajo será igual a la tracción (resultante de las acciones del aire sobre el rotor, igual y opuesta a las del rotro sobre el aire).

$$T = m k v_i = k \rho S v_i \left[V_x^2 + (V_z + v_i)^2 \right]^{1/2} \quad (4.4.3)$$

La potencia involucrada en este proceso ideal es:

$$P_{i_d} = T(V_z + v_i) = k\rho S v_i (V_z + v_i) \left[V_x^2 + (V_z + v_i)^2 \right]^{1/2} \quad (4.4.4)$$

Esta potencia produce un incremento de la energía cinética del aire afectado, de tal forma que:

$$\begin{aligned} P_{i_d} &= \frac{1}{2} m \left[V_x^2 + (V_z + kv_i)^2 - (V_z^2 + V_x^2) \right] \\ P_{i_d} &= \frac{1}{2} m kv_i (2V_z + kv_i) = T \left(V_z + \frac{1}{2} kv_i \right) \end{aligned} \quad (4.4.5)$$

De la igualdad de () y () se deduce que el factor k de velocidad inducida debe ser:

$$k = 2 \quad (4.4.6)$$

es decir que la velocidad inducida en el infinito aguas abajo es el doble de la inducida en la zona de rotor.

Con ello quedan las siguientes expresiones para la tracción y la potencia:

$$T = 2\rho S v_i \left[V_x^2 + (V_z + v_i)^2 \right]^{1/2} \quad (4.4.7)$$

$$P_{i_d} = 2\rho S v_i (V_z + v_i) \left[V_x^2 + (V_z + v_i)^2 \right]^{1/2} \quad (4.4.8)$$

4.5 Combinación de teorías de cantidad de movimiento y elemento de pala.

Una forma sencilla de determinar la velocidad inducida v_i en un elemento de pala consiste en suponer que la tracción producida por los b elementos de las palas situados a una distancia r del eje del rotor es debida al cambio de cantidad de movimiento en el tubo de corriente diferencial afectado por dichos elementos de pala.

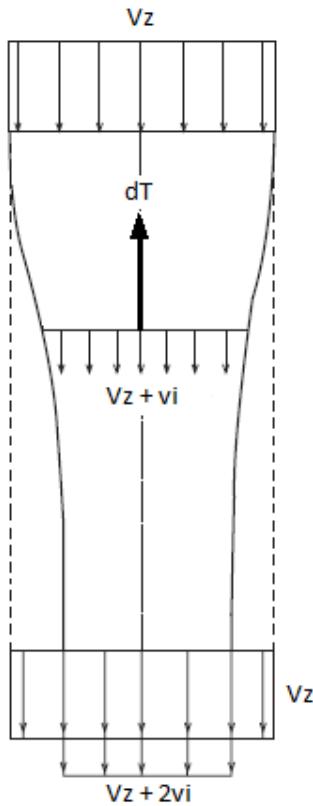


Figura 32

Según la teoría del elemento de pala:

$$dC_T = \frac{a\sigma}{2} (x\theta + \lambda) \quad (4.5.1)$$

Según la teoría de cantidad de movimiento:

$$\begin{aligned} dT &= 2\rho(2\pi r dr)v_i(V_z + v_i) = \\ &= 4\rho(\pi R^2)(\Omega R)^2 \left(\frac{v_i}{\Omega R} \right) \left(\frac{V_z + v_i}{\Omega R} \right) x dx \end{aligned} \quad (4.5.2)$$

es decir:

$$dC_T = 4\lambda \left(\lambda + \frac{V_z}{\Omega R} \right) x dx \quad (4.5.3)$$

ya que:

$$\lambda = - \left(\frac{V_z + v_i}{\Omega R} \right) ; \quad \frac{v_i}{\Omega R} = - \left(\lambda + \frac{V_z}{\Omega R} \right) \quad (4.5.4)$$

Al igualar (4.5.1) y (4.5.3) resulta:

$$\lambda \left(\lambda + \frac{Vz}{\Omega R} \right) = \frac{a\sigma}{8} (x\theta + \lambda) = \frac{a\sigma}{8} x\alpha_r \quad (4.5.5)$$

La ecuación anterior conduce a:

$$\lambda^2 - \frac{a\sigma}{8} \left(1 - \frac{8}{a\sigma} \frac{Vz}{\Omega R} \right) \left(\lambda + \frac{Vz}{\Omega R} \right) \lambda - \frac{a\sigma}{8} x\theta = 0 \quad (4.5.6)$$

o sea:

$$\lambda = - \left(\frac{a\sigma}{16} \right) \left[\pm \sqrt{\left(1 - \frac{8}{a\sigma} \frac{Vz}{\Omega R} \right)^2 + \frac{32}{a\sigma} x\theta} - \left(1 - \frac{8}{a\sigma} \frac{Vz}{\Omega R} \right) \right] \quad (4.5.7)$$

La ecuación (4.1.2.8) para $Vz = 0$ (vuelo axial):

$$\lambda = - \frac{v_{i_o}}{\Omega R} = - \left(\frac{a\sigma}{16} \right) \left[\pm \sqrt{1 + \frac{32}{a\sigma} x\theta} - 1 \right] < 0 \quad (4.5.8)$$

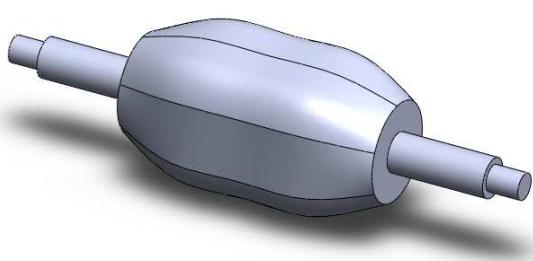
5 Descripción del proceso de simulación y análisis.

La representación gráfica del rotor se va a trabajar en el programa SolidWorks así como un ensamblaje provisional, ya que la interfaz del programa es mucho más fácil de manejar. Posteriormente se exportará del SolidWorks a una base de datos de MSC Adams. En el MSC Adams se ajustarán las restricciones del ensamblaje, se simularán las distintas fuerzas y se procederá al estudio y análisis del rotor.

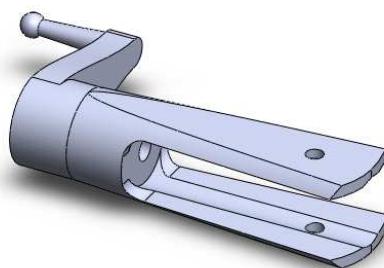
5.1 Simulación gráfica de las piezas en SolidWorks.

En primer lugar, y con la ayuda de las instrucciones de montaje del aeromodelo T-REX 550, empecé a modelar aproximadamente en el SolidWorks las diferentes piezas del rotor, ya que el aeromodelo aún no estaba en mi poder.

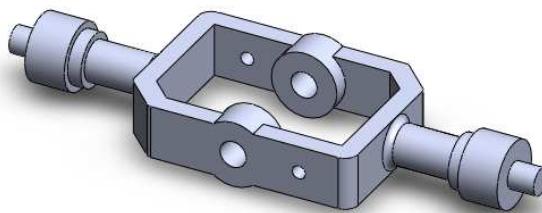
En las siguientes figuras se pueden ver todas las piezas diseñadas del rotor:



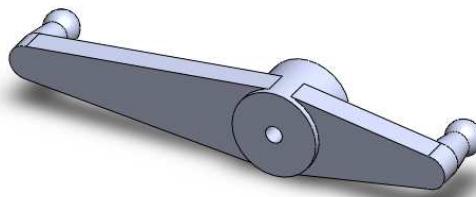
hub1



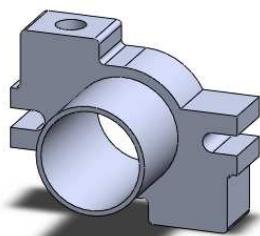
hub2



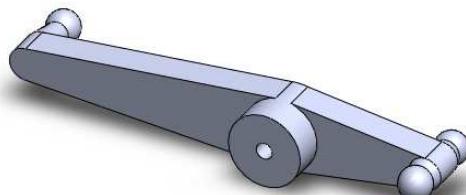
hub3



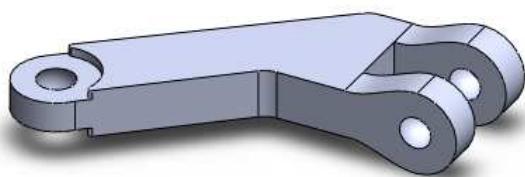
hub4



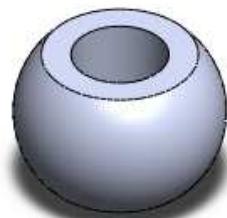
hub5



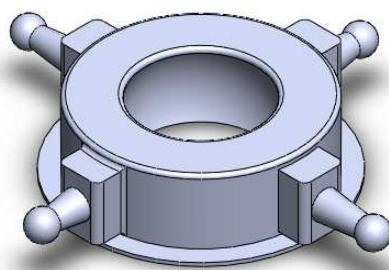
hub6



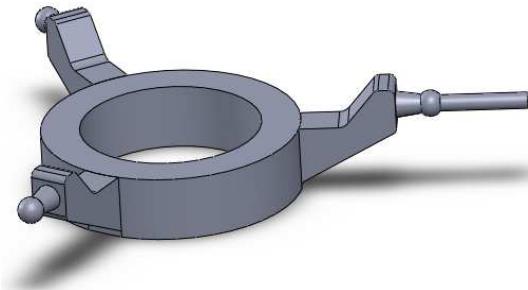
hub7



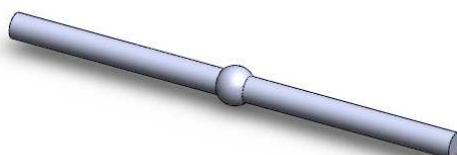
swashplate1



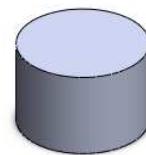
swashplate2



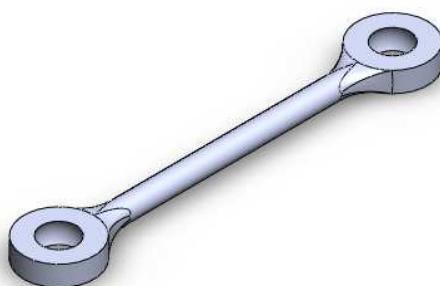
swashplate3



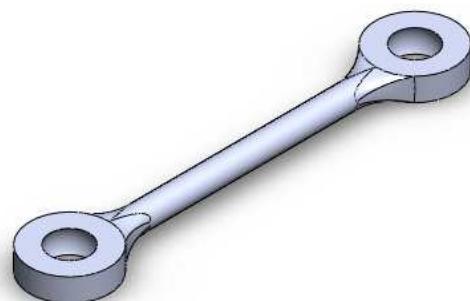
bar



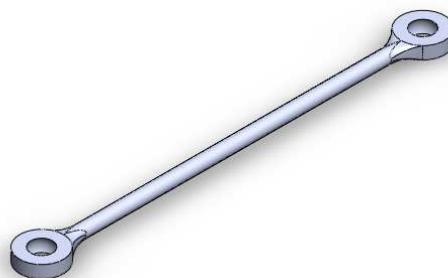
ground



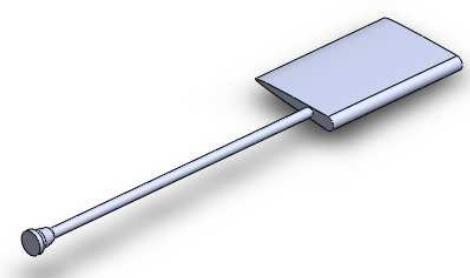
linkage1



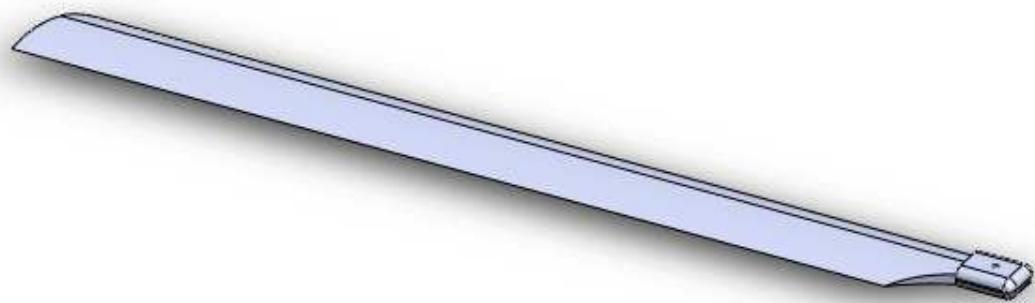
linkage2



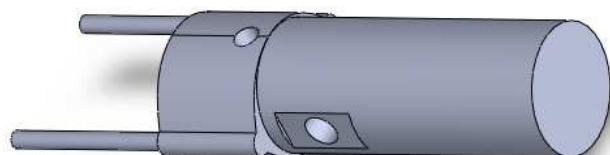
linkage3



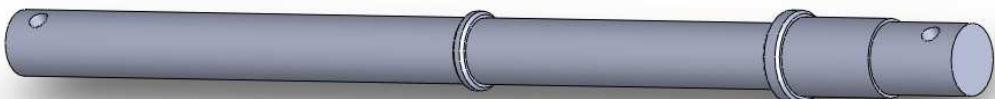
stabilizer



blade



shaft1



shaft2

Figura 33

5.2 *Mediciones.*

Una vez que tuve el aeromodelo, medí con un calibre las dimensiones de las piezas y ajusté las cotas en el SolidWorks para tener un modelo lo más parecido al rotor real posible.

Después, pesé cada pieza del rotor en una báscula de precisión, junto con las pequeñas piezas que llevaban incorporadas que no simulé, pero que su peso para el modelo también es importante, como son juntas elásticas, tornillos, tuercas, rodamientos, etc.

A continuación procedí a introducir los pesos en las propiedades físicas de cada pieza en el SolidWorks, así como su centro de gravedad, que fue previamente calculado. Los cálculos en algunos casos fueron aproximados, del centro de gravedad por la complejidad de la pieza y de los pesos porque había piezas que venían montadas de fábrica y no pude desmontar para pesarlas por separado.

PIEZA	PESO (g)
hub1	36,135
hub2	42,600
hub3	18,065
hub4	9,033
hub5	5,600
hub6	4,470
hub7	2,230
swashplate1	18,200
swashplate2	18,200
swashplate3	18,200
bar	6,300
linkage1	0,800
linkage2	0,800
linkage3	1,600
blade	103,000
shaft1	36,135
shaft2	66,300

Aquí está la lista de las piezas junto con su peso correspondiente. Estas propiedades de la pieza en el SolidWorks, junto a otras, se encuentran en la pestaña *Calcular* y en la tercera opción empezando por la izquierda, *Propiedades físicas*.

5.3 *Ensamblaje de las piezas del rotor en SolidWorks.*

Antes de comenzar con el ensamblaje, se van a describir las *relaciones de posición estándar* que han sido utilizadas del programa SolidWorks.

- *Coincidente*: Permite que sean coincidentes dos puntos, dos líneas orientadas en la misma dirección, dos superficies que se encuentren en planos paralelos, etc.
- *Paralela*: Mantiene el paralelismo entre dos superficies o dos líneas rectas.
- *Perpendicular*: Mantiene la perpendicularidad entre dos superficies o dos líneas rectas.
- *Concéntrica*: Posiciona dos circunferencias que estén en planos paralelos o superficies circulares cuyos ejes de revolución tengan la misma dirección para que queden concéntricas, etc.

- *Bloquear*: Bloquea en la posición en la que estén en ese momento dos piezas del ensamblaje. Con esta opción, las dos piezas que se bloquean pasan a ser una sola.
- *Distancia*: Permite introducir una distancia determinada entre dos superficies paralelas.

❖ **Ensamblar *hub1 – shaft1*:**

Estos dos componentes en el rotor real eran una misma pieza, así que la restricción utilizada será *Bloquear*. Pero antes de bloquear se necesita tener las piezas en la posición deseada. Para ello utilizaré dos restricciones que posteriormente se borrarán.

- *Concéntrica* entre el cuerpo del *shaft1* y la superficie curva de la cavidad que se representa en el corte longitudinal del *hub1*.
- *Coincidente* entre la superficie plana de la cavidad de *hub1* y la superficie plana superior del *shaft1*.
- *Bloquear* los dos cuerpos.
- Borrar las dos primeras restricciones.

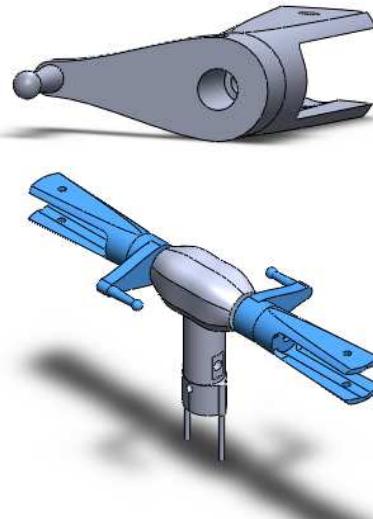


(Figura 34)

❖ **Añadir al ensamblaje *hub2*:**

Estas dos piezas tienen que tener un movimiento respecto del eje que atraviesa longitudinalmente el *hub1*.

- *Concéntrica*: entre el eje saliente del *hub1* y el orificio del *hub2* que se ve en la figura adjunta.
- *Distancia*: debido a que en el rotor original hay una serie de juntas y arandelas, el *hub2* y el *hub1* deben estar separados una distancia de 2mm.

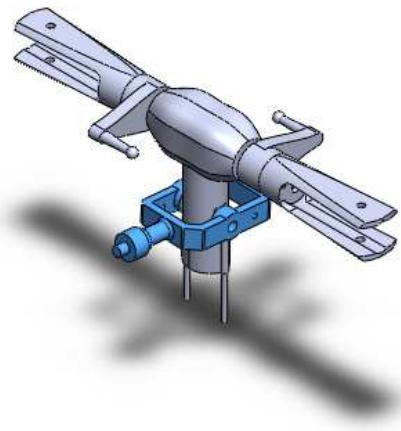


(Figura 35),

❖ **Añadir al ensamblaje *hub3*:**

Esta pieza puede girar respecto al eje que pasa por los centros de los dos orificios más grandes.

- *Concéntrica*: entre el eje orificio del *shaft1* y el orificio más grande del *hub3*.
- *Distancia*: eliminé material (la parte rectangular que se puede observar, con la circunferencia del orificio en su interior) para así crear una superficie plana para poder utilizar alguna relación de posición. No he usado la relación *Coincidente* ya que entonces las dos superficies estarían en el mismo plano y la pieza quedaría descentrada respecto del eje longitudinal del *shaft1*. Por ello he optado por introducir una distancia, de 0.50 mm para ser exactos, para que la pieza esté en la posición correcta.

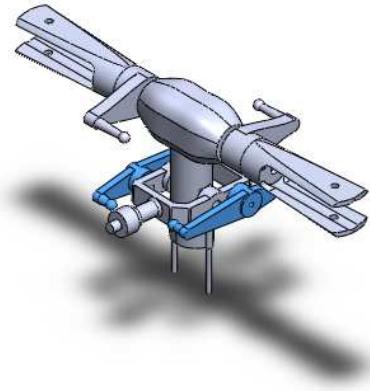


(Figura 36)

❖ **Añadir al ensamblaje *hub4*:**

Son dos piezas ensambladas al *hub3*.

- *Concéntrica*: entre el orificio pequeño de cada una de las caras del *hub3* y el orificio del *hub4*.
- *Coincidente*: entre la superficie circular del *hub4* y la superficie exterior del *hub3*.

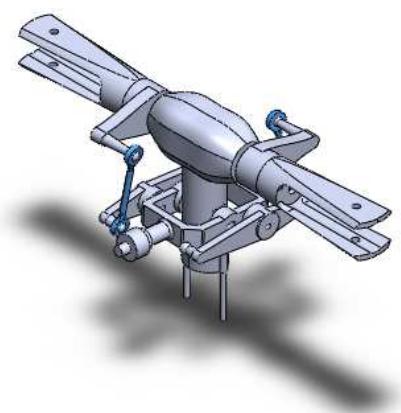


(Figura 37)

❖ **Añadir al ensamblaje *linkage2*:**

Estas dos varillas unen las piezas *hub2* y *hub4*. Sus dos cavidades en los extremos tienen forma esférica.

- *Concéntrica*: cavidad esférica de *linkage2* con esfera de *hub2*.
- *Concéntrica*: cavidad esférica de *linkage2* con esfera de *hub4*.

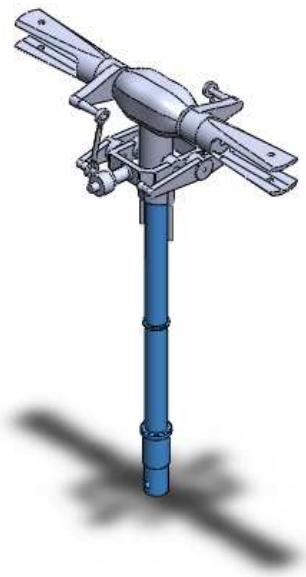


(Figura 38)

❖ Añadir al ensamblaje *shaft2*:

El *shaft1* y el *shaft2*, en el modelo real van unidos por un tornillo, así que en el modelo virtual estarán bloqueados. Se han utilizado dos relaciones *Concéntricas* para situar la pieza en su posición correcta.

- *Concéntrica*: entre la superficie curva de la cavidad en la parte inferior del *shaft1* y la superficie curva de la parte superior del *shaft2*.
- *Concéntrica*: En estas dos superficies, existen dos orificios. La relación de posición es entre las superficies curvas de los dos orificios.
- *Bloquear shaft1 y shaft2*.
- Borrar relaciones *Concéntricas*.

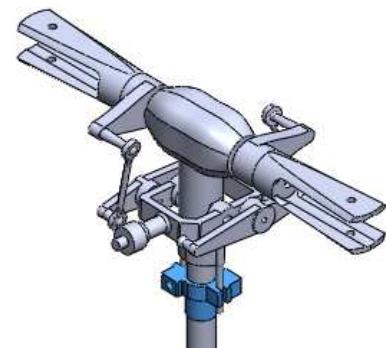


(Figura 39)

❖ Añadir al ensamblaje *hub5*:

El movimiento de esta pieza es translacional, moviéndose exclusivamente verticalmente a lo largo del *shaft2*:

- *Concéntrica*: entre el orificio central del *hub5* y la superficie cilíndrica del *shaft2*.
- *Concéntrica*: entre unas de las pequeñas varillas salientes del *shaft1* y su correspondiente cavidad en el *hub5*.

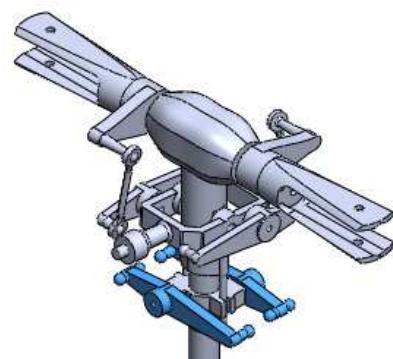


(Figura 40)

❖ Añadir al ensamblaje *hub6*:

Son dos piezas que pueden girar únicamente respecto el eje que pasa por el centro de su orificio.

- *Concéntrica*: entre el orificio lateral de cada una de las caras del *hub5* y el orificio del *hub6*.
- *Coincidente*: entre la superficie circular del *hub6* y la superficie plana que rodea al orificio del *hub5*.

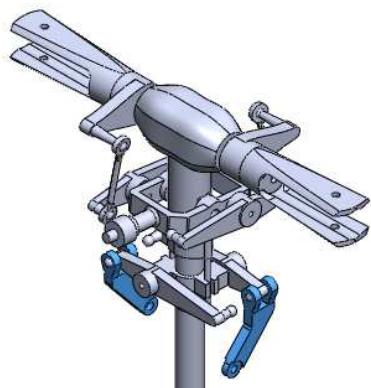


(Figura 41)

❖ Añadir al ensamblaje *hub7*:

Son dos piezas unidas a los *hub6*, en la parte de las dos esferas. El *hub7* debe poder girar únicamente respecto del eje que pasa por los dos centros de las esferas.

- *Concéntrica*: Debido a que es un ensamblaje provisional como se ha comentado en el inicio del apartado, sólo uniremos las piezas a una esfera para dejarla colocada y en el Adams completaremos las relaciones de posición. El *hub7* se unirá a una esfera del *hub6* con el correspondiente orificio esférico.

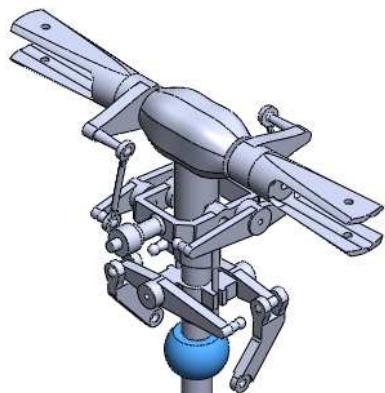


(Figura 42)

❖ Añadir al ensamblaje *swashplate1*:

Esta pieza tiene permitida la translación a lo largo del eje del rotor así como la rotación respecto de su propio eje.

- *Concéntrica*: entre la cavidad interior del *swashplate1* y la superficie cilíndrica del *shaft2*.

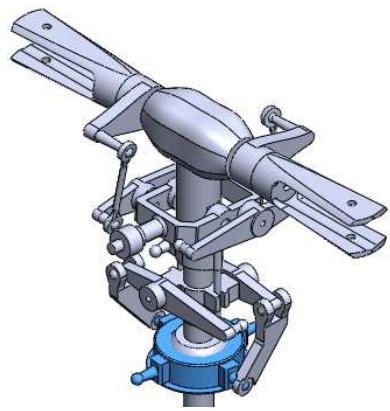


(Figura 43)

❖ Añadir al ensamblaje *swashplate2*:

El *swashplate2* puede girar en cualquier dirección y desplazarse verticalmente, siempre solidario al *swashplate1*.

- *Concéntrica*: entre el centro de la esfera hueca de *swashplate1* y el centro del orificio esférico del *swashplate2*.
- *Concéntrica*: entre la esfera que menos sobresale del *swashplate2* y el orificio del *hub7*.

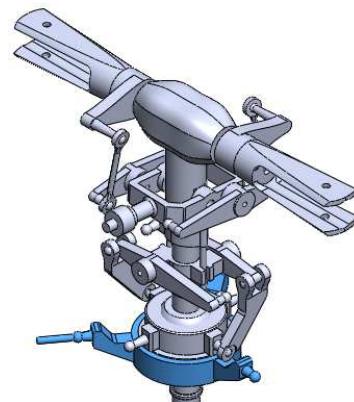


(Figura 44)

❖ Añadir al ensamblaje *swashplate3*:

Esta pieza no gira respecto del eje del rotor como las demás y va solidaria al *swashplate2*.

- *Concéntrica*: entre la superficie circular inferior del *swashplate2* y la superficie circular superior del *swashplate3*.
- *Coincidente*: entre la superficie inferior del *swashplate2* y la superficie superior del *swashplate3*.

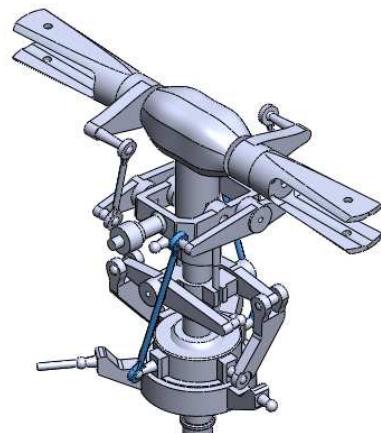


(Figura 45)

❖ Añadir al ensamblaje *linkage3*:

Estas dos varillas unen las piezas *hub4* y *swashplate2*. Sus dos cavidades en los extremos tienen forma esférica.

- *Concéntrica*: cavidad esférica de *linkage3* con esfera de *swashplate2*.
- *Concéntrica*: cavidad esférica de *linkage3* con esfera de *hub4*.

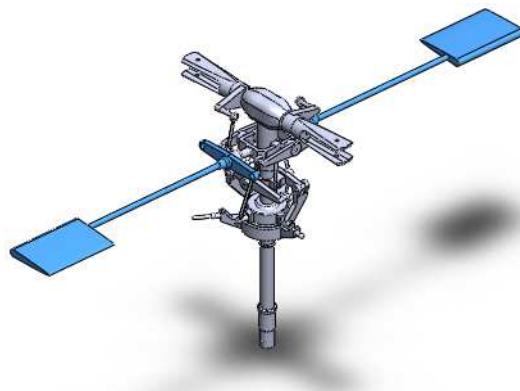


(Figura 46)

❖ Añadir al ensamblaje *stabilizer*:

Son dos piezas, unidas a los extremos de los salientes del *hub3*.

- *Concéntrica*: entre una superficie cilíndrica del saliente del *hub3* y la superficie cilíndrica del orificio del portapalas que su centro coincide con el eje de la varilla del *stabilizer*.
- *Coincidente*: entre la superficie circular del saliente del *hub3* y la superficie circular del orificio del *stabilizer*.

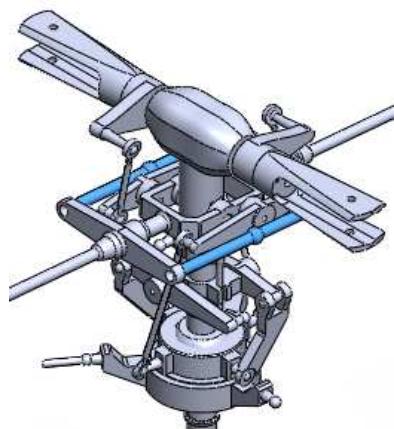


(Figura 47)

❖ Añadir al ensamblaje *bar*:

Estas barran unen los dos *stabilizer*, para que sea todo una única pieza que se mueva al unísono.

- *Concéntrica*: entre los dos extremos de *bar* y los orificios correspondientes de cada *stabilizer*.
- *Distancia*: en uno de los dos extremos se fijará una distancia entre el círculo del extremo de *bar* y una superficie del *stabilizer* paralela a ésta.

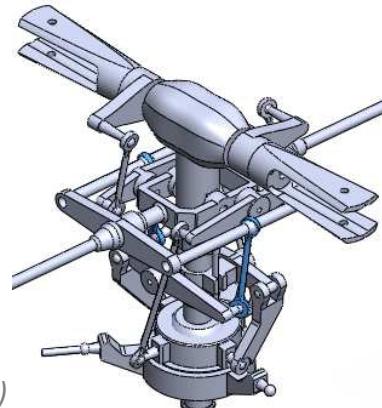


(Figura 48)

❖ Añadir al ensamblaje *linkage1*:

Estas dos varillas unen las piezas *hub6* y *bar*. Sus dos cavidades en los extremos tienen forma esférica.

- *Concéntrica*: cavidad esférica de *linkage1* con esfera de *bar*.
- *Concéntrica*: cavidad esférica de *linkage1* con esfera de *hub6*.

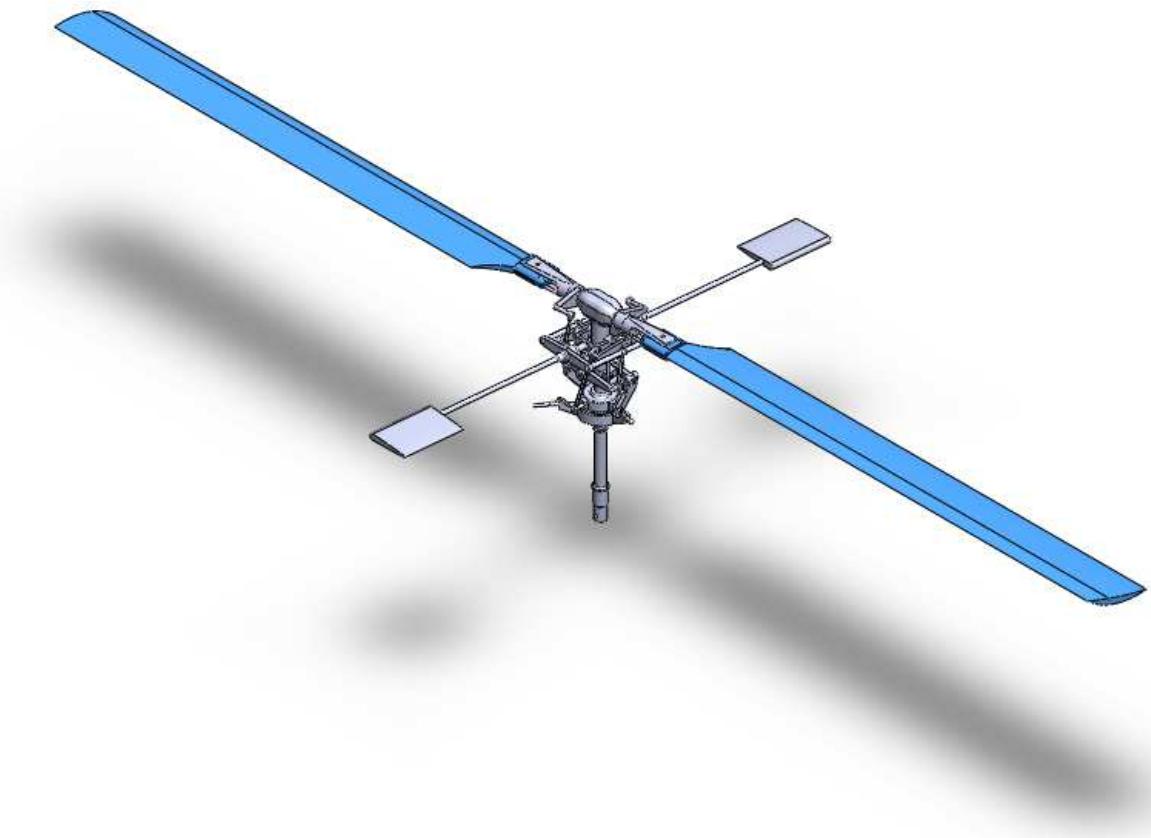


(Figura 49)

❖ Añadir al ensamblaje *blade*:

Son las palas del rotor y van unidas al *hub2*. Para la simulación se va a considerar que no existe ni articulación de ni alabeo ni de retraso, por lo tanto la restricción correspondiente es *Bloquear*. Como en ocasiones anteriores, primero se sitúan las palas en la posición deseada, mediante las relaciones de posición:

- *Concéntrica*: entre los orificios de *hub2* y *blade*.
- *Coincidente*: entre una superficie plana del interior del *hub2* con la superficie exterior plana de *blade*.
- *Bloquear*: *hub2* y *blade*.
- Borrar *Concéntrica* y *Coincidente*.



(Figura 50)

Por último se añade al ensamblaje la pieza *ground* que va a ser una pieza fija, con la cual se va a restringir que el rotor lo único que pueda hacer es girar respecto de su eje, sin ninguna traslación.

Desde el SolidWorks se exporta el archivo del ensamblaje a una base de datos de MSC Adams, un archivo.bin, desde el cual se trabajará a partir de ahora.

5.4 Simulación en Adams.

5.4.1 Joints.

Las *relaciones de posición estándar* del SolidWorks aquí pasan a ser *joints* (*uniones*). Estas *joints* vienen definidas por los grados de libertad que le restringimos (*constraints*) al objeto en cuestión. Los grados de libertad se restringen sobre unos *markers* (sistemas de coordenadas) definidos previamente en cada parte a unir. Al fin y al cabo es lo mismo que pasaba en el SolidWorks internamente, pero en este programa no se mencionaban estos tecnicismos.

A continuación se adjuntan dos tablas con equivalencias entre las *relaciones de posición estándar* y las *joints*, además de los grados de libertad que restringen cada una.

		Rotacionales			
		0	1	2	3
Traslacionales	0			Parallel Axes	
	1	In Plane		Planar	
	2			Cylindrical	Translational
	3	Spherical		Revolute	Fixed

Grados de libertad restringidos en el MSC Adams.

		Rotacionales			
		0	1	2	3
Traslacionales	0				
	1			Coincidente (superficie)	
	2			Concéntrica / Distancia	
	3	Coincidente (punto)			Bloquear

Grados de libertad restringidos en el SolidWorks.

Bueno, pues una vez explicado esto, hay que corregir la nueva base de datos del Adams para conseguir que el modelo funcione correctamente. Si le damos a verificar la simulación nos da muchos errores, que eran esperados y que así ayudarán para dejar el modelo en perfectas condiciones.

El primer problema aparente son todas las uniones de las piezas que se han unido con *Coincidente* y *Concéntrica*, ya que si sumamos los grados traslacionales nos da 3 (correcto ya que no se precisa que esa pieza se traslade de su posición) pero los grados rotacionales nos dan 4. Lo primero solo existen 3 grados de libertad rotacionales en 3D, y lo segundo se precisa que esa pieza pueda rotar sobre un eje, con lo cual se necesita una *joint* que restrinja 3 grados traslacionales y 2 rotacionales, es decir, *Revolute*. Con lo cual las relaciones *Coincidentes* de este tipo de uniones se borrarán y las *Concéntricas* se cambiarán a *Revolute*. Como la *Concéntrica* y la *Distancia* restringen los mismos grados de libertad, también se aplicará a éstas.

Todas las relaciones de posición *Coincidentes* de las uniones esféricas han sido cambiadas automáticamente a la *joint Spherical*, así como las *Bloquear* han pasado a ser *Fixed*.

Las piezas *hub7* están unidas a *hub6* solamente mediante una unión esférica cada una. Si uniéramos las otras esferas con uniones esféricas nos encontraríamos otra vez con el problema de que hay más grados de libertad restringidos de los deseados. Por ello y con la ayuda de la *joint parallel axes* obligamos a que dos ejes de dos *markers*, uno del *hub7* y otro del *hub6*, situados en el mismo punto, tengan esos dos ejes siempre en la misma dirección. La dirección a restringir es la que crea una línea que pasa por los dos centros de los orificios del *hub7*.

El *hub5* está restringido con dos concéntricas, dónde también sobran grados de libertad restringidos. Esto es debido a las *joints* que unen el plato oscilante con el *hub7* y a su vez las de éste con el *hub6*. Por lo tanto sólo será necesario dejar una *joint Concéntrica* que pasará automáticamente a ser *Cylindrical*.

El conjunto de los *stabilizer* y las *bar* se ha dejado simplemente posicionado, así que hay que poner las *joints* definitivas. Las *bar* con la parte del *stabilizer* que está en contacto con el *hub3* forman un rectángulo. Se colocarán dos restricciones *Fixed* entre barra y *stabilizer* en esquinas opuestas. En una de las dos que quedan libres se coloca una *joint Inplane* para restringir que la dirección longitudinal de la barra esté siempre alineada con el eje del orificio del *stabilizer*.

Y por último el plato oscilante. La pieza *swashplate1* tiene la relación de posición *Concéntrica*, pero no es correcta porque le permite girar sobre su eje, así que habrá que cambiarla a *Translational* para que sólo se pueda desplazar a lo largo del *shaft2*. El *swashplate2* se unía al *swashplate1* mediante una coincidente de dos puntos (los centros de cada pieza) y se ha transformado automáticamente en *Spherical*. Y el *swashplate3* se ha unido al *swashplate2* mediante una *Revolute* (el caso comentado anteriormente de unión *Coincidente* y *Concéntrica*). Esta pieza no gira con el resto del modelo, así que hay que fijarla. Para ello no se han utilizado *joints*, se han utilizado directamente *constraints*. Consiste en coger pares de markers (uno de cada pieza) y asignarles la restricción que se desea. En este caso se van a crear las *constraints* con el *marker* del centro de la pieza y un *marker* situado en el *ground*. Se van a crear 4 para poder manejar el plato oscilante a nuestro antojo y poder simular cualquier movimiento que haría en la realidad. Tres de ellas serán para en principio restringirle cualquier giro (hacer coincidir en todo momento las direcciones de los tres ejes del *marker* del *swashplate3* con los correspondientes del *ground*, llamadas *GCON2*, *GCON3* y *GCON4*) y la cuarta sería para fijar una posición en el eje (en la dirección *z*, llamada *GCON1*).

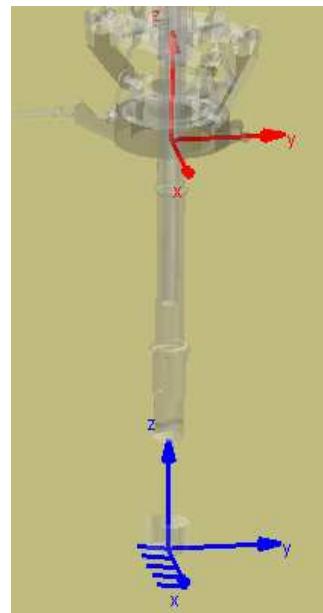


Figura 51

5.4.2 Motor.

Se va a insertar uno (*MOTION_1*) en la *joint Revolute* que une el *shaft2* y el *ground*. En éste se debe especificar su velocidad angular, que son 2000 rpm, que pasadas a radianes por segundo son 209,44.

5.4.3 Fuerzas.

La primera fuerza a definir es la gravedad (*ACCGRAV_1*), para que el modelo funcione correctamente y se ajuste lo más posible a la realidad.

A continuación están las fuerzas aerodinámicas, de sustentación y de resistencia, que ya han sido definidas en el apartado 3.3 de este proyecto.

5.4.3.1 Fuerzas de sustentación en las palas.

Integrando la ecuación de la sustentación (4.2.1):

$$\int dL = L = \frac{1}{2} \rho (U_T^2 + U_P^2) c_l cr = \frac{1}{2} \rho S V_P^2 c_l \quad (5.4.3.1.1)$$

La densidad del aire es: $\rho_{aire} = 1,225 \text{ kg/m}^3$

Para hacer el estudio se ha decidido dividir cada pala en 4 partes iguales y a cada sección asignarle una fuerza en su centro.

$$Envergadura = 0,507 \text{ m}$$

$$w = \frac{0,507}{4} = 0,12675 \text{ m}$$

$$c = 0,048 \text{ m}$$

Cada parte tiene una superficie $S = cw$.

La velocidad V_P^2 en el programa Adams será $V_x^2 + V_z^2$, la resultante de la velocidad en el plano de rotación, y para cada fuerza estará asociada a un *marker* que estará en su misma posición.

Para el coeficiente de sustentación se va a tener en cuenta la simplificación de la ley de sustentación lineal del apartado 3.4.1.

$$c_l = a\alpha_r = a(\theta + \phi) \approx a \left(\theta + \arctg \frac{U_P}{U_T} \right) = a \left(\theta + \frac{\lambda}{x} \right) \quad (5.4.3.1.2)$$

El perfil de la pala se asemeja al NACA0012 y por lo tanto se han escogido sus características a baja velocidad.

$$a = 5,73 \quad (5.4.3.1.2)$$

De las ecuaciones (4.5.8) y (4.1.11) desarrolladas anteriormente tenemos:

$$\lambda = -\left(\frac{a\sigma}{16}\right) \left[\pm \sqrt{1 + \frac{32}{a\sigma} x\theta} - 1 \right]$$

$x = \frac{r}{R}$ donde r es la distancia del eje de rotación al punto de aplicación de cada fuerza.

Y por último:

$$\sigma = \frac{bc}{\pi R} \text{ donde } b \text{ es el número de palas y } R \text{ el radio del rotor.}$$

θ es el ángulo de paso. En el Adams se mide con dos markers, uno donde está la fuerza situada y otro situado en la cabeza del rotor. En este se han tenido que hacer unos pequeños reajustes, ya que el modelo se exportó con una pequeña inclinación en los estabilizadores, lo que implica que los ángulos de paso de cada pala son diferentes.

Reajuste blade1: - ángulo de paso - 0.07571 = θ

Reajuste blade2: ángulo de paso + 0.005391 = θ

De todo esto se obtiene

$$L = \frac{1}{2} \rho (cw) (V_x^2 + V_z^2) a \left(\theta + \frac{\left(\frac{abc}{16\pi R} \right) \left[\sqrt{1 + \frac{32\pi R}{abc} \frac{r}{R} \theta} - 1 \right]}{\frac{r}{R}} \right) \quad (5.4.3.1.3)$$

que ha sido la fórmula utilizada en el Adams en las ocho fuerzas de sustentación de las palas.

5.4.3.2 Fuerzas de sustentación en los estabilizadores.

De la ecuación (5.4.3.1.1):

$$L = \frac{1}{2} \rho S V_p^2 c_l$$

La superficie de los estabilizadores es $S = cw$ con:

$$c = 0,042m$$

$$w = 0,065m$$

La velocidad V_p^2 se calcula de la misma manera que en las palas: $V_x^2 + V_z^2$.

En este caso, c_l no sigue la ley de sustentación lineal, por ello:

$$c_l = a\alpha_r = a(\theta + \phi) \approx a \left(\theta + \arctg \frac{U_p}{U_T} \right) \quad (5.4.3.2.1)$$

que para el Adams se transforma en:

$$c_l = a \left(\theta + \arctg \frac{V_y}{\sqrt{V_x^2 + V_z^2}} \right) \quad (5.4.3.2.2)$$

En este caso se ha despreciado el valor de θ , ya que lo realmente importante y lo que interesa en este caso es el término $\arctg \frac{V_y}{\sqrt{V_x^2 + V_z^2}}$ que proporciona el movimiento armónico amortiguado necesario para estabilizar el sistema.

Por la fórmula de la sustentación en los estabilizadores es:

$$L = \frac{1}{2} \rho (cw)(V_x^2 + V_z^2) a \left(\arctg \frac{V_y}{\sqrt{V_x^2 + V_z^2}} \right) \quad (5.4.3.2.3)$$

5.4.3.3 Fuerzas de resistencia en las palas.

Integrando la ecuación de la resistencia (4.2.1):

$$\int dD = D = \frac{1}{2} \rho S (U_T^2 + U_p^2) c_d = \frac{1}{2} \rho S V_p^2 c_d \quad (5.4.3.3.1)$$

Este apartado es similar al de sustentación, con única diferencia del coeficiente de resistencia. Según la ley de resistencia de parabólica:

$$c_d = \delta_0 + \delta_1 \alpha_r + \delta_2 \alpha_r^2 \quad (5.4.3.3.2)$$

Para el perfil NACA0012 se tiene:

$$c_d = 0,0085 + 0,263 \alpha_r^2 = 0,0085 \left[1 + (0,97 c_l)^2 \right] \quad (5.4.3.3.3)$$

$$c_l = a \left(\theta + \frac{\left(\frac{abc}{16\pi R} \right) \left[\sqrt{1 + \frac{32\pi R}{abc} \frac{r}{R} \theta} - 1 \right]}{\frac{r}{R}} \right); \alpha_r = \left(\theta + \frac{\left(\frac{abc}{16\pi R} \right) \left[\sqrt{1 + \frac{32\pi R}{abc} \frac{r}{R} \theta} - 1 \right]}{\frac{r}{R}} \right)$$

(5.4.3.3.4)

Por lo tanto la ecuación definitiva usada en Adams queda así:

$$D = \frac{1}{2} \rho (cw) (V_x^2 + V_z^2) \left[0,0085 \left(1 + \left(0,97a \left(\theta + \frac{\left(\frac{abc}{16\pi R} \right) \left[\sqrt{1 + \frac{32\pi R}{abc} \frac{r}{R} \theta} - 1 \right]}{\frac{r}{R}} \right)^2 \right) \right) \right]$$

(5.4.3.3.5)

6 Objetivos y resultados.

6.1 Objetivo 1.

Se pretende conseguir la relación entre la resultante de la sustentación, el ángulo de paso, y la distancia a la que se encuentra el plato oscilante en el eje. Para ello se van a tomar ángulos desde 0° a 12° ($0,209$ rad), ya que es el rango en el que habitualmente se encuentran las palas.

Para ello se ha utilizado el *Plotting* (la representación gráfica) del Adams y la herramienta *Measure* (medida).

La herramienta *Measure-Function* se ha utilizado para poder representar gráficamente la distancia *GCON1* y los ángulos de paso de las palas.

La *GCON1* impone la distancia entre los *markers* representados en al final del apartado 5.4.1, es decir:

$$\text{posición}_Z\text{marker}_\text{swashplate3} - \text{posición}_Z\text{marker}_\text{ground} - \text{distanciaGCON1} = 0$$

y dado que el *marker* del *ground* está fijado, ya que el *ground* lo está, el marker que se desplazará será el del *swashplate3*, es decir, se modificará el paso colectivo del rotor, y con ello variarán los ángulos de paso de las palas y la sustentación.

Para los ángulos de paso se han utilizado dos *markers*, uno en la *blade* y otro en el *hub1*. El *hub1* girará únicamente respecto del eje de rotación únicamente, y así o hará su marker, mientras la *blade*, además gira respecto de su eje longitudinal, y así lo hará su marker. En las siguientes figuras se muestra cómo se mide el ángulo de pala. Se ha desplazado el marker unido al *hub1* verticalmente para poder apreciarlo mejor. En la primera figura el ángulo de paso es nulo y por tanto ambos markers tienen las direcciones paralelas. En la segunda figura el ángulo de paso ya no es nulo, y se puede apreciar un desfase entre las direcciones de los *markers*.

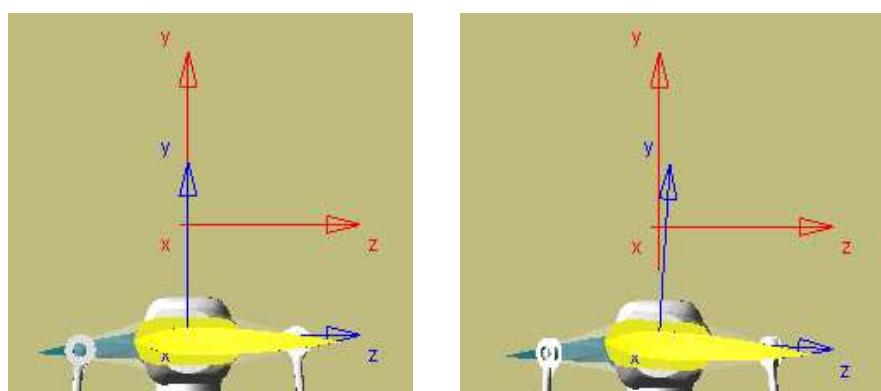


Figura 52

Para la *Measure* en el Adams se toma un *marker* de origen o referencia (*marker_hub1*) a partir del cual se mide el ángulo girado por el *marker* de la pala. A esto habrá que añadirle el reajuste del que se ha hablado anteriormente, debido a que cuando se exportó los *stabilizer* estaban inclinados respecto al plano horizontal.

Ajustando el valor de distancia *GCON1* y con la ayuda de la herramienta *Plotting*:

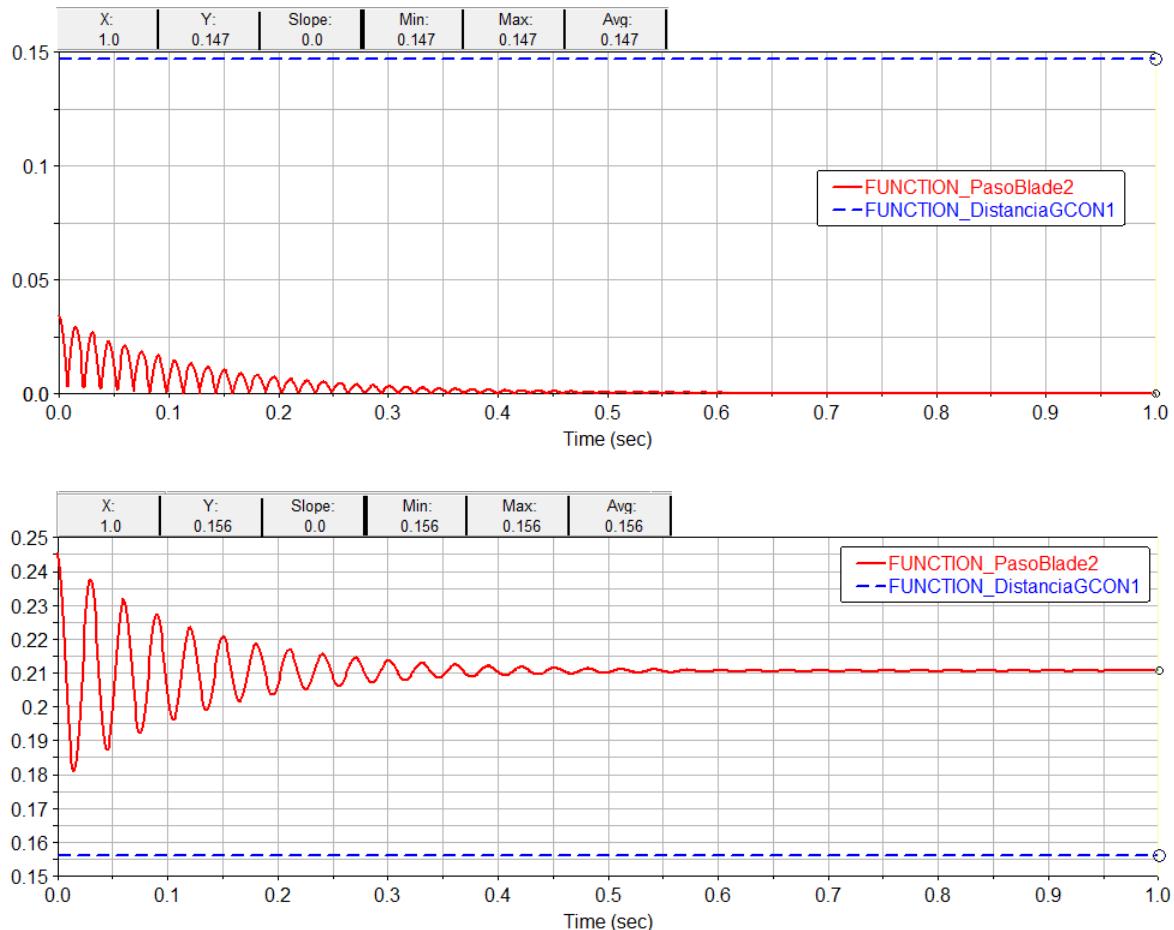
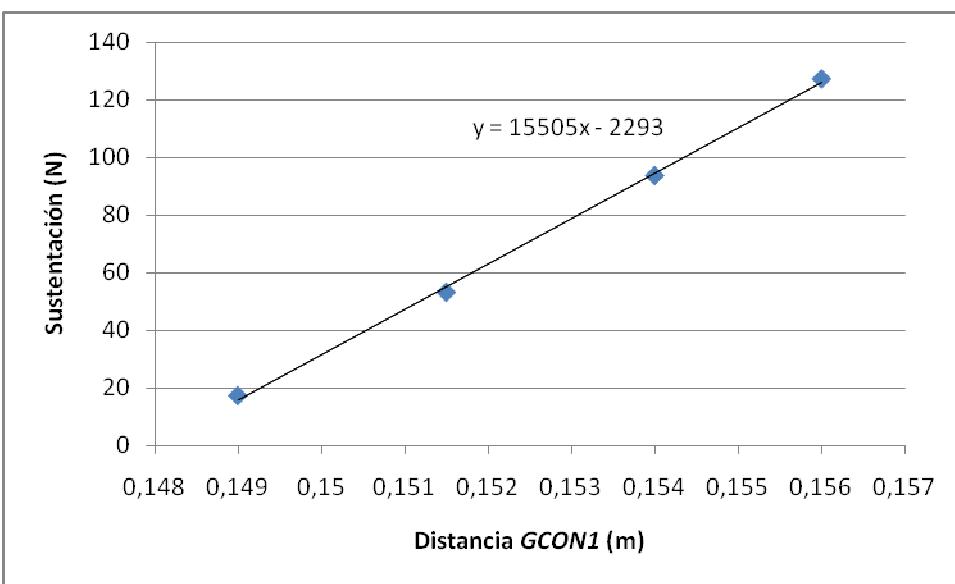
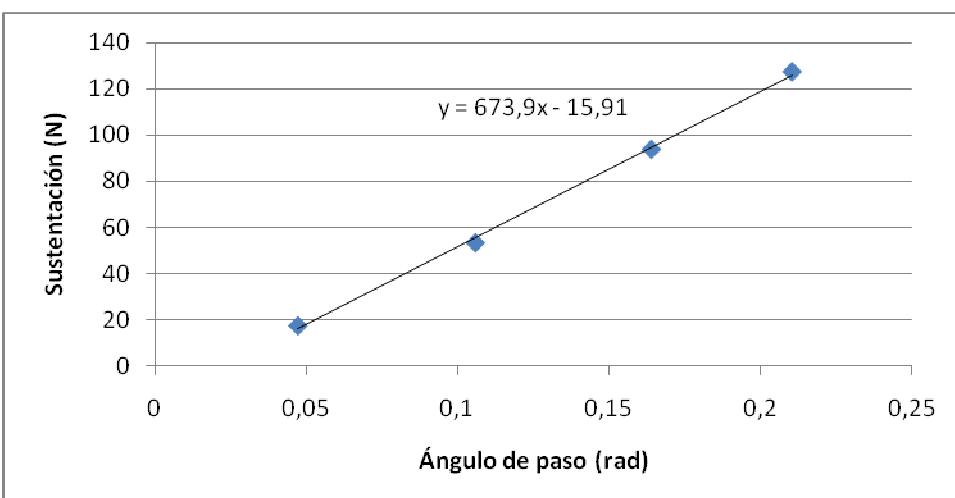


Figura 53

Con el valor 0,147 en la distancia *GCON1* se consigue que el ángulo de paso sea nulo, y para el valor 0,156 se consigue un ángulo de paso de 0,2106, que aproximadamente son los 12º pedidos en el enunciado del objetivo.

A continuación se han escogido cuatro valores de distancia *GCON1* entre ese rango y se ha hecho un estudio para cada valor, extrayendo datos del Adams de la sustentación que crea cada una de las fuerzas en las palas y el ángulo de paso en cada caso, obteniendo:

DISTANCIA GCON1 (m)	0,156	0,154	0,1515	0,149
PASO (rad)	0,2106	0,1641	0,1059	0,0472
F1 (N)	34,5811	25,6942	14,8342	4,9959
F2 (N)	18,7366	13,8134	7,8478	2,5523
F3 (N)	7,9121	5,7622	3,1928	0,9858
F4 (N)	1,8578	1,3215	0,6984	0,1972
F5 (N)	1,9729	1,3975	0,7346	0,2063
F6 (N)	8,222	5,963	3,2867	1,0093
F7 (N)	18,9813	13,936	7,8761	2,5479
F8 (N)	35,0619	25,922	14,8881	4,9877
RESULTANTE SUSTENTACIÓN (N)	127,3257	93,8098	53,3587	17,4824



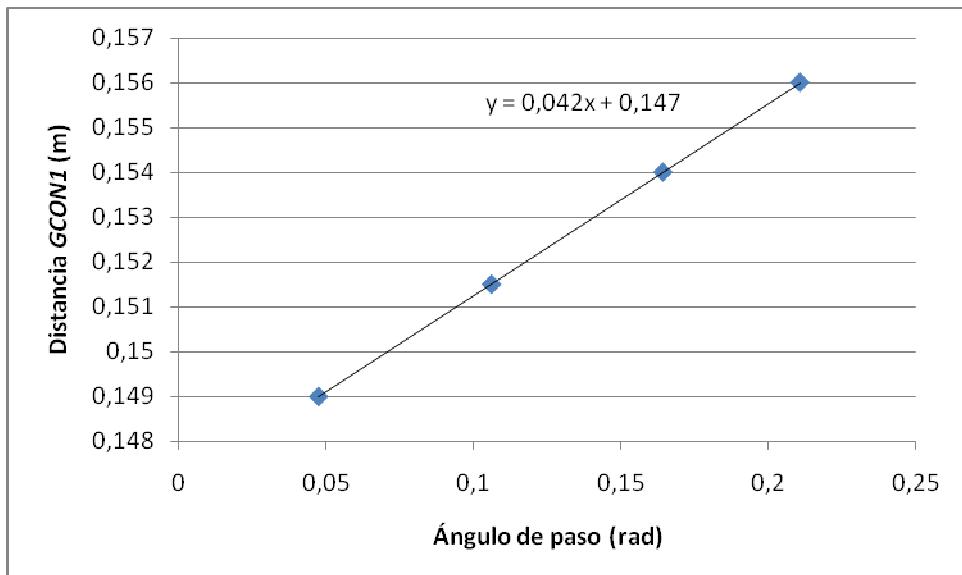


Figura 54

De los resultados de estas tres gráficas se puede deducir algo que ya sabíamos, que la sustentación depende del ángulo de paso, y que el ángulo de paso a su vez depende del paso colectivo del plato oscilante. Las tres variables están relacionadas entre sí y esta relación es lineal en los tres casos. Si aumentamos la distancia *GCON1*, aumenta el ángulo de paso y por lo tanto la sustentación, y viceversa.

Se han agregado las rectas de regresión lineal y sus ecuaciones para tener parametrizadas estas relaciones. Así por ejemplo si queremos saber el ángulo de paso y la distancia *GCON1* que lo produce para una sustentación dada se puede hacer una aproximación de la siguiente manera:

Para calcular el ángulo que produce 29,43N de fuerza sustentación total se va a utilizar la ecuación de la recta de regresión lineal de la gráfica Sustentación (N) – Ángulo de paso (rad).

$$L = 673,9\theta - 15,91 = 29,43N$$

$$\theta = \frac{29,43 + 15,91}{673,9} = 0,06728 \text{ rad}$$

Para calcular la distancia *GCON1*, que hay que introducir en el Adams, podemos utilizar cualquiera de las dos ecuaciones restantes.

$$L = 15505 \text{ distGCON1} - 2293 = 29,43N$$

$$\text{distGCON1} = \frac{29,43 + 2293}{15505} = 0,1498 \text{ m}$$

6.2 Objetivo 2.

Se pretende conseguir la relación entre la resultante de la sustentación, el ángulo de paso, y la potencia consumida por el rotor. Para ello se van a tomar ángulos de paso desde 2º a 12º.

Al igual que en el objetivo anterior, se seleccionarán distintas distancia *GCON1* entre el rango establecido de ángulos, se harán los estudios introduciendo las distintas distancias escogidas y se extraerán del programa los datos, a los 2 segundos de simulación, que a continuación se detallan:

PASO (rad)	0,0355	0,0708	0,1175	0,1641	0,2106
POTENCIA (W)	115,4284	213,0247	597,1386	1250,4319	2231,3625
F1 (N)	3,298	8,7316	16,9735	25,6942	34,581
F2 (N)	1,6605	4,5443	9,0187	13,8134	18,7366
F3 (N)	0,6281	1,8037	3,6942	5,7623	7,9121
F4 (N)	0,1214	0,377	0,8188	1,3215	1,8578
F5 (N)	0,1268	0,396	0,8621	1,3975	1,9729
F6 (N)	0,6423	1,8508	3,8096	5,963	8,222
F7 (N)	1,6556	4,5461	9,0609	13,9361	18,9813
F8 (N)	3,2886	8,7356	17,0534	25,9222	35,0319
RESULTANTE SUSTENTACIÓN (N)	11,4213	30,9851	61,2912	93,8102	127,2956

La potencia desarrollada por el motor viene dada por la siguiente fórmula:

$$P = M \omega$$

donde *M* es el par motor y ω es la velocidad angular del conjunto. El par motor es el momento que ejerce un motor sobre el eje de trasmisión de potencia.

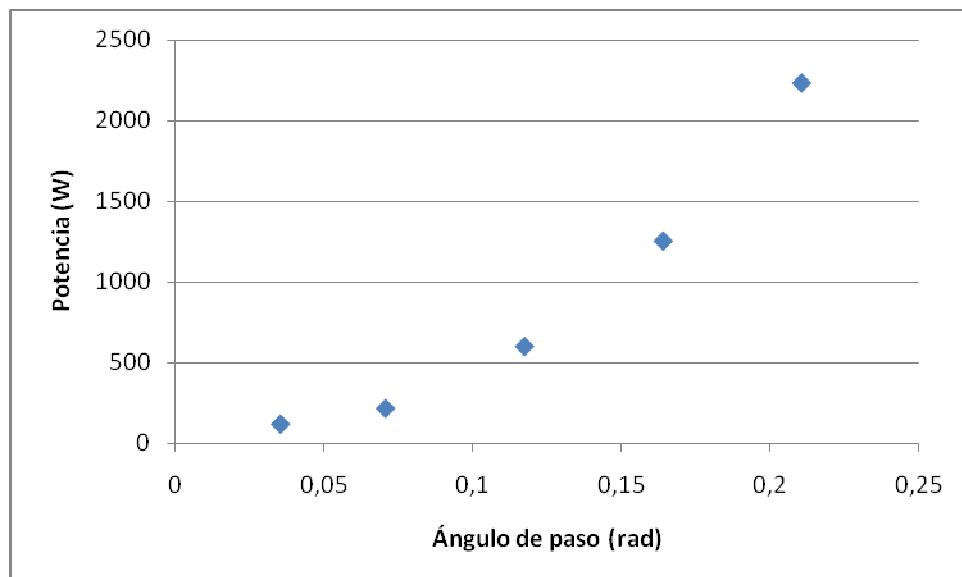


Figura 55

Esta gráfica corrobora lo dicho anteriormente en los comandos de vuelo, que cuando el ángulo de paso aumenta al elevar el *pitch* en el despegue, hay que incrementar el par motor para que la rotación de las palas mantenga una velocidad angular constante.

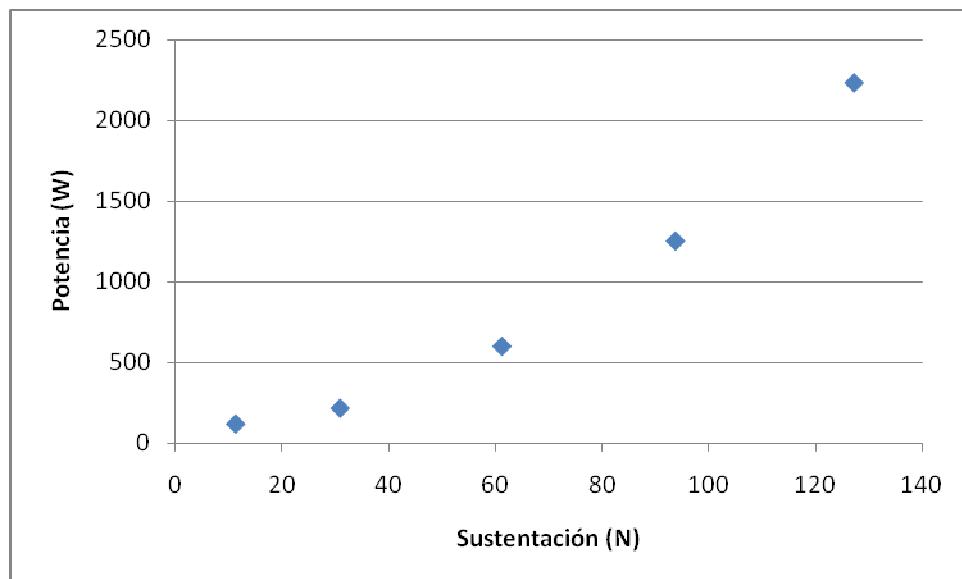


Figura 56

En el objetivo anterior ya se ha podido ver en las gráficas, que la sustentación total y el ángulo de paso están relacionados linealmente y son directamente proporcionales. Por ello, si se desea más sustentación es necesario aumentar el ángulo de paso de las palas y por tanto el par motor para mantener las revoluciones por minuto de las palas constantes.

6.3 Objetivo 3.

Se pretende conseguir el diagrama de sólido libre del *linkage2_2* durante los primeros 0,24 segundos de simulación.

Los resultados dados por el Adams de las reacciones en los extremos de la varilla están en base a al sistema de coordenadas (*marker*) asociado a la restricción (*joint*). En vista de futuras necesidades, como por ejemplo querer representar gráficamente los esfuerzos de la varilla, es requisito escoger un sistema de coordenadas en el que un eje sea coincidente con el eje longitudinal de la varilla, para así obtener directamente la reacción su dirección axil. Y los otros dos ejes orientados como se muestra en la siguiente figura (*marker* azul oscuro), de los que obtendremos las otras dos reacciones.

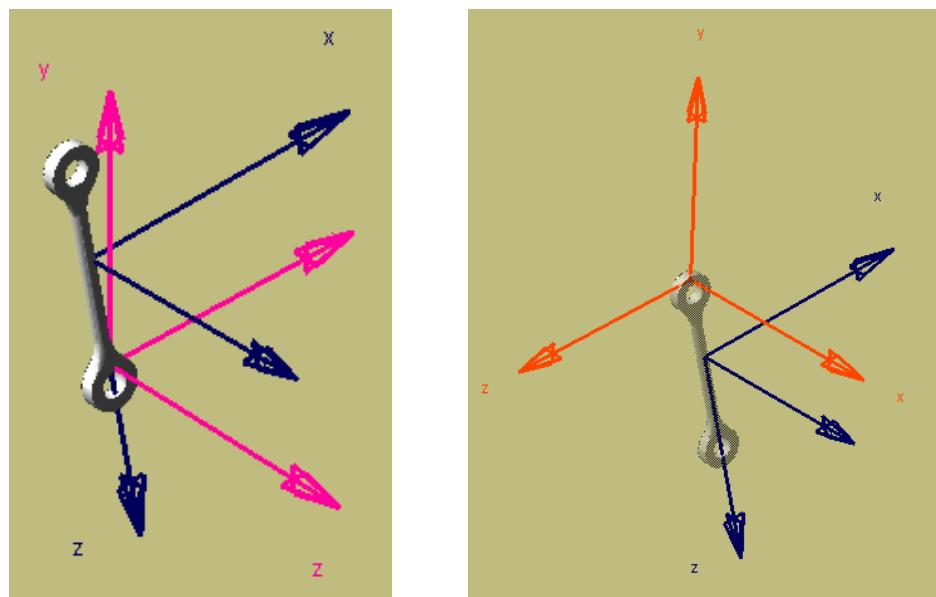


Figura 57

Los markers rosa y naranja son los que tienen relación con las *joint spherical* que unen a esta pieza con el *hub2* y el *hub4*. Esta unión deja libres los tres grados de libertad rotacionales, por lo tanto no existirán momentos en los puntos de unión de la pieza.

Con ayuda del Adams y de una *Measure_Function* se crea el cambio de base de un *marker* a otro. He aquí los resultados:

➤ Para un ángulo de paso de 3º:

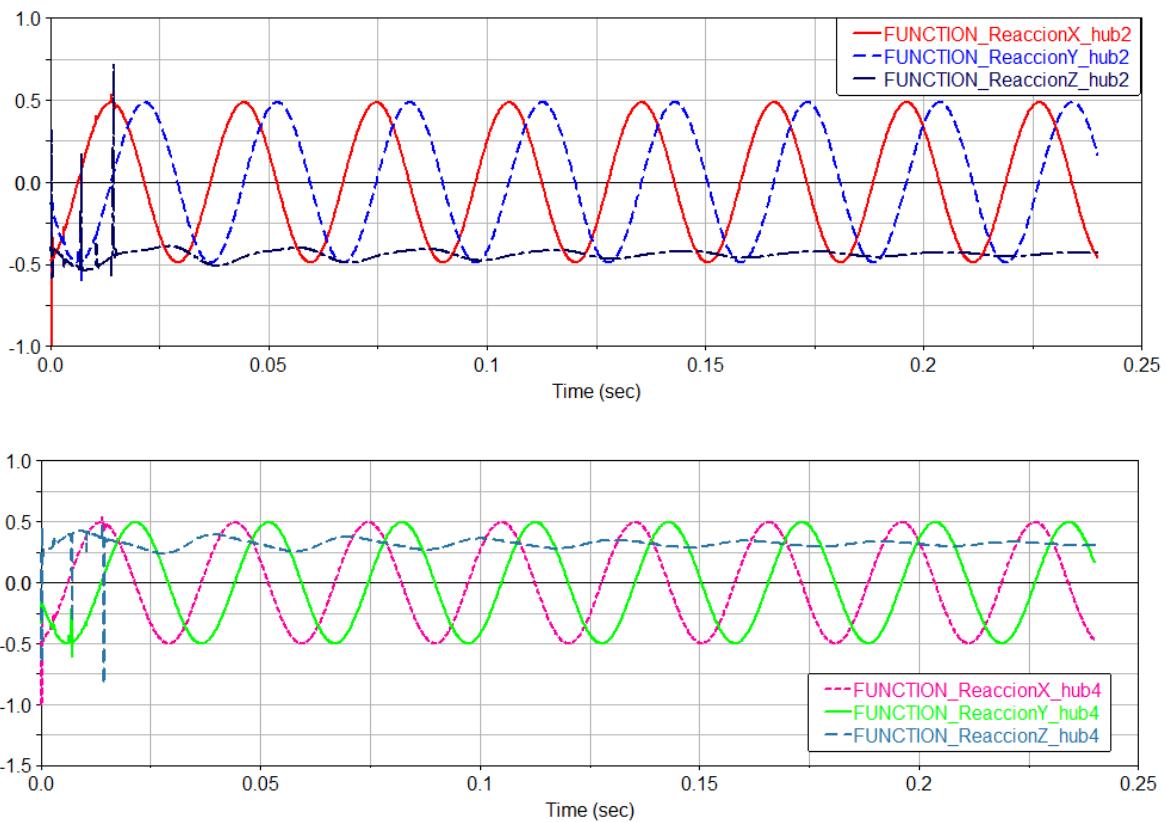
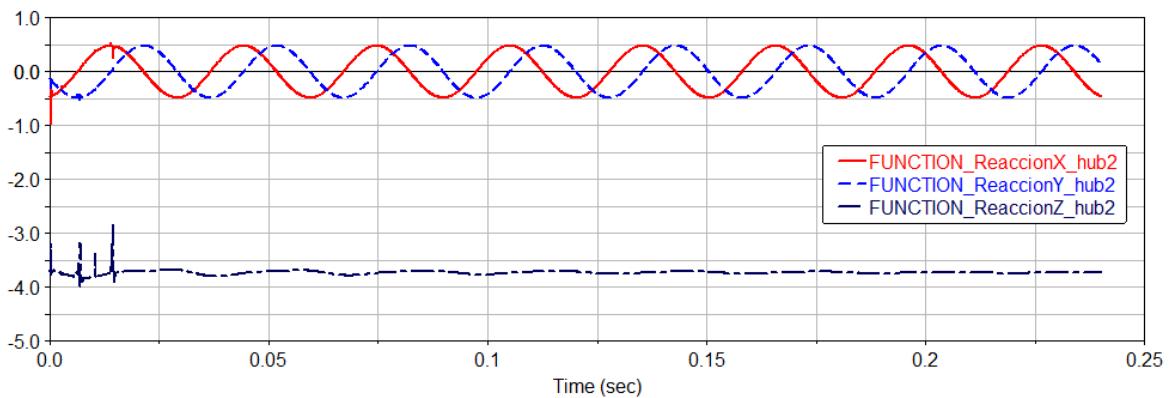


Figura 58

➤ Para un ángulo de paso de 10º:



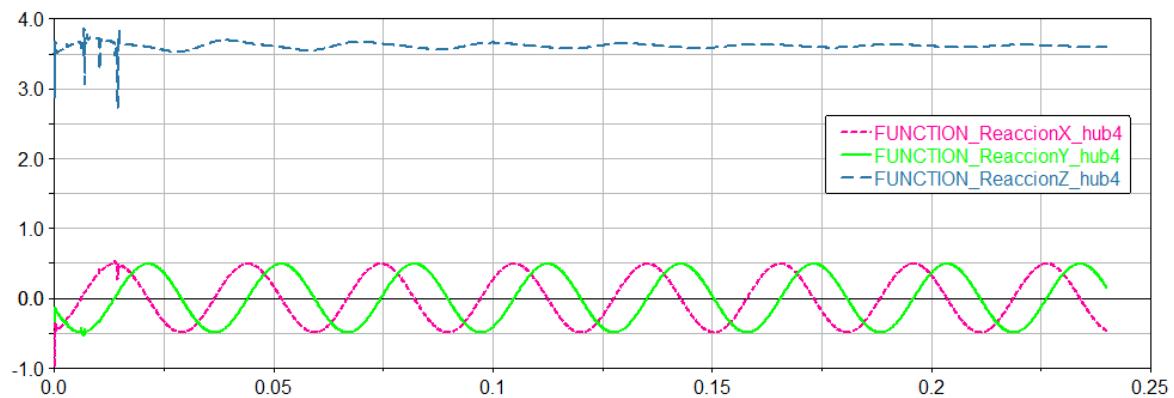


Figura 59

Comparando las gráficas anteriores, se puede ver claramente que las reacciones en la dirección X e Y no varían en función del ángulo de paso, se mantienen en un rango de (0,5, -0,5), mientras que la reacción en la dirección Z, la dirección axil, sí que tiene un cambio significativo. He de aclarar que en las gráficas la reacción en el eje Z es oscilante, pero ello es debido a que el conjunto no se ha estabilizado todavía y continúa en régimen transitorio. Cuando entra en vigor el régimen estacionario los valores de esta reacción son constantes. El esfuerzo axil aumenta si se incrementa el ángulo de paso. Cuando el modelo se estabilice por completo unos segundos más tarde, para 3º se obtendrá un valor aproximado de 0,44 N, mientras que para un ángulo de 10º será de unos 3,6 N.

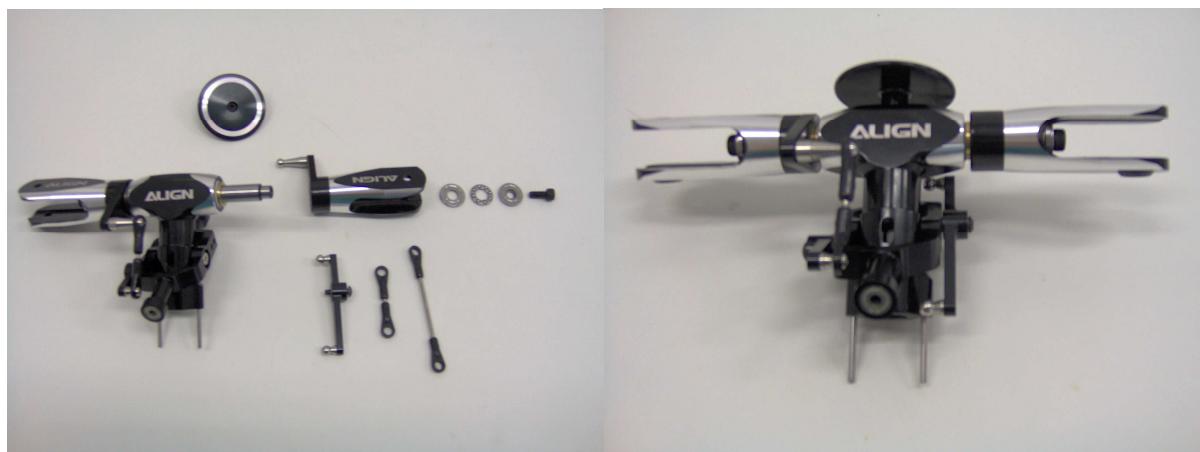
Por otra parte, el esfuerzo axil es de tracción. En la unión con el *hub2* la reacción es negativa, y en la unión con el *hub4* positiva. Mirando en las figuras anteriores la orientación del nuevo sistema de coordenadas se puede ver que la reacción en la unión del *hub4* al ser positiva, llevará la dirección de Z representada, mientras que la reacción de la unión con *hub2* llevará la opuesta, ya que la reacción es negativa.

En conclusión, cuanto más aumente el ángulo de paso más aumentará el esfuerzo axil en el *linkage2_2*.

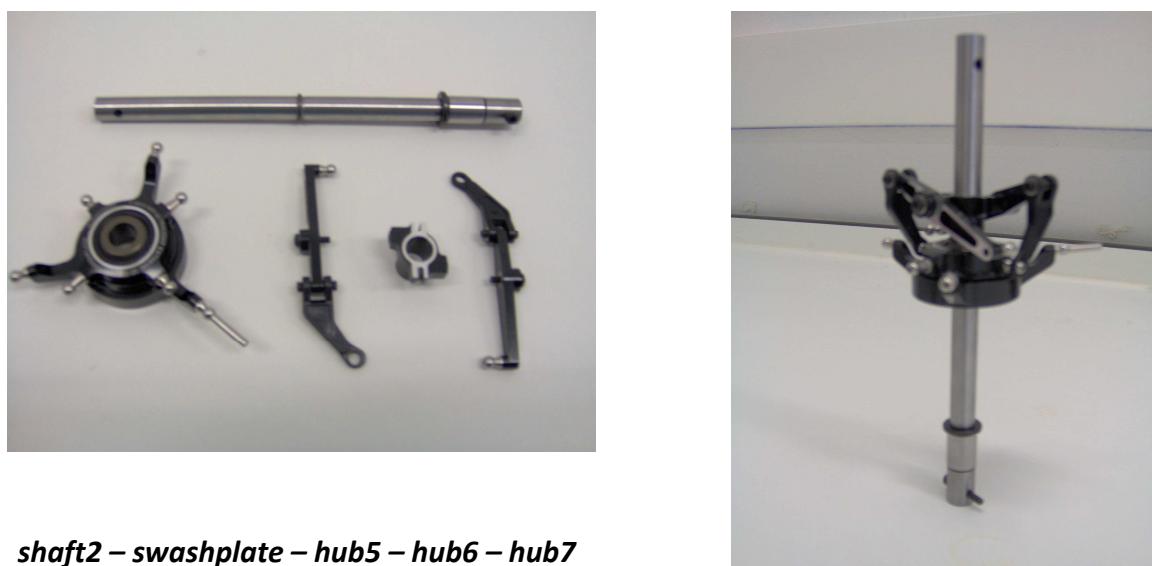
7 Montaje del rotor del T-REX 550

Tuve la magnífica oportunidad de poder montar el rotor del que se trata en este proyecto, lo que fue de gran ayuda para, después de tener las piezas simuladas del rotor ensambladas, poder comprobar que la simulación se comportaba como el rotor real.

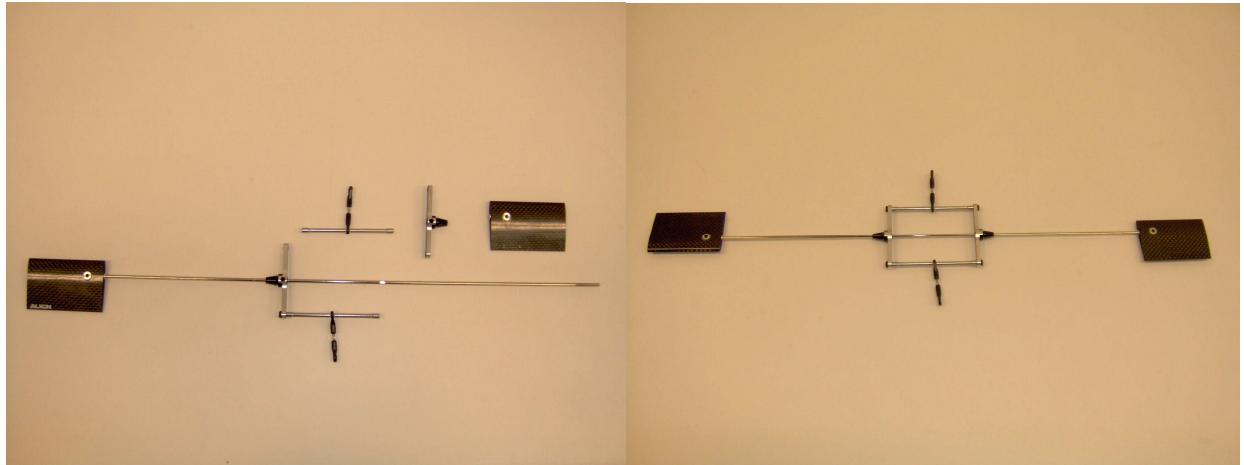
Adjunto unas fotografías de distintas piezas, partes ya ensambladas y una foto del conjunto.



hub1 – hub2 – hub3 – hub4 – shaft1 – linkage2



shaft2 – swashplate – hub5 – hub6 – hub7



stabilizer – bar – linkage



Rotor a falta de montar las palas.

Figura 60

8 Conclusiones

Realizar este proyecto me ha parecido muy interesante, principalmente por el aprendizaje de una pequeñísima parte de la aeronáutica y por el diseño del modelo virtual de la máquina.

Sobre el *software* SolidWorks decir que no lo había manejado hasta el momento, pero, en mi opinión, es un programa con una interfaz intuitiva y descriptiva desde el punto de vista del diseño gráfico y es fácil de utilizar.

Mi primera impresión sobre el *software* MSC Adams fue que tiene una interfaz primitiva y poco accesible. En mis primeros días utilizándolo tuve problemas porque nunca había trabajado con un programa así, no sabía cómo funcionaba internamente y obtenía errores a cada paso que daba. Pero con el transcurso de los días fui aprendiendo a utilizar sus herramientas y es un programa muy útil y muy potente para analizar mecanismos. Y digo esto solo habiendo manejado unas pocas opciones de las que proporciona el programa.

Los objetivos de este proyecto se han limitado a tres, de los cuales, resumidamente, se han obtenido las siguientes conclusiones:

- El ángulo de paso, la sustentación total y la altura a la que se encuentre el plato oscilante en el eje se relacionan linealmente y son directamente proporcionales.
- Si el ángulo de paso aumenta, hay que incrementar el par motor para que la rotación de las palas mantenga una velocidad angular constante.
- Si el ángulo de paso aumenta, también lo hará el esfuerzo axial en el *linkage2_2*, no afectando a los esfuerzos cortantes que se mantienen constantes.

Y para concluir, quiero dejar constancia de que este modelo, cambiando la *joint* de las palas si se estudia otro tipo de rotor y las fuerzas si se estudia en otro régimen distinto a vuelo axial, puede ser apto para hacer diversidad de estudios y análisis.

9 Bibliografía

- *Helicópteros. Teoría y diseño conceptual.* J.L. López Ruiz.
- www.wikipedia.com
- Ayuda del programa MSC Adams.
- Ayuda del programa SolidWorks.