

ENSAYOS EN TÚNEL AERODINÁMICO DE MODELOS DE DECELERADORES AERODINÁMICOS DE ALAS ROTATORIAS

Vicente Nadal Mora^a, Ángel Sanz Andrés^b, Joaquín Piechocki^a y Santiago Pezzotti^a

^a*Grupo de Ingeniería Aplicada a la Industria, Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Calle 116 e/47 y 48, (1900) La Plata, Argentina, giai@ing.unlp.edu.ar, <http://www.ing.unlp.edu.ar/aeron/giai>*

^b*Instituto de Microgravedad "Ignacio Da Riva", Universidad Politécnica de Madrid, IDR /UPM, España, angel.sanz.andres@upm.es, <http://www.idr.upm.es>*

Palabras clave: Pararrotor, decelerador, túnel aerodinámico, sonda.

Resumen. Diversos estudios experimentales en túnel aerodinámico se han llevado a cabo para estudiar el comportamiento dinámico de deceleradores aerodinámicos basados en el concepto del pararrotor. El pararrotor desciende en la atmósfera rotando en un régimen de autorrotación, generando una resistencia aerodinámica que frena la caída del cuerpo. Sus potenciales aplicaciones están vinculadas con la desaceleración de cuerpos en la baja atmósfera, como la recuperación de vehículos espaciales y el transporte de sensores para la medición de parámetros atmosféricos, entre otros. El objetivo de esta línea de investigación es conocer el desempeño de este tipo de deceleradores, a través de la identificación de los parámetros que rigen su comportamiento y de la cuantificación de esta influencia.

Los modelos ensayados están compuestos por un cilindro y dos palas planas rectangulares vinculadas al cilindro. Se han realizado ensayos experimentales en túneles aerodinámicos horizontal y vertical. La primera serie de ensayos se ha realizado sobre un modelo que rota alrededor de un eje fijo; se han medido la resistencia aerodinámica y la velocidad de rotación, para diferentes ángulos de paso de las palas y velocidades de la corriente. Se han probado palas con diferentes rugosidades. La segunda serie de ensayos se ha realizado en un túnel aerodinámico vertical. En este caso se han medido la velocidad de rotación del modelo, la velocidad de la corriente, el ángulo de nutación y el ángulo de paso de las palas. Se ha observado la estabilidad de modelos con diferentes relaciones entre los valores de los momentos de inercia principales. Finalmente, se han realizado ensayos sobre un modelo montado en un rodamiento basculante; en este caso se han medido la resistencia aerodinámica, la velocidad de rotación y el ángulo de nutación, para diferentes ángulos de paso de las palas y velocidades de la corriente. Se han analizado los resultados de los ensayos, y se compararon los diferentes ensayos entre sí.

1 INTRODUCCIÓN

El pararrotor es un dispositivo decelerador basado en la autorrotación de alas rotantes. La autorrotación es la rotación continua de un cuerpo inmerso en un flujo axial sin otras fuentes externas de energía más que la propia acción de la corriente de fluido y de la gravedad. Cuando el cuerpo se desplaza en un fluido, las palas rotan y, como consecuencia de este movimiento, se generan fuerzas aerodinámicas que actúan en oposición a su movimiento de translación principal. Su desempeño y utilización práctica está supeditada al conocimiento de su dinámica del vuelo en función de los parámetros aerodinámicos y geométricos del dispositivo.

El propósito de esta investigación es conocer las capacidades de este tipo de dispositivo para ser aplicado como decelerador aerodinámico.

Se han hallado trabajos en la literatura que tienen alguna relación con el tema (Crimi, 1988; Karlsen, Borgström and Paulsson, 1991; Pepper, 1986; Shpund and Levin, 1991, 1997; Levin and Shpund, 1995, 1997; Rosen and Seter, 1991; Seter and Rosen, 1992; Stahl, 1979; Pelletier and Mueller, 2000), aunque no ofrecen información sobre el comportamiento del tipo de pararrotor aquí estudiado (alas rotatorias de pequeño alargamiento).

Por otra parte, la publicación (Nadal Mora and Sanz Andrés, 2006) trata de la estabilidad de un pararrotor en caída libre. En las referencias (Nadal Mora, Sanz Andrés and Cuerva, 2006; Nadal Mora, 2005) se desarrolla un modelo semi-empírico del comportamiento aerodinámico de un pararrotor con palas de pequeño alargamiento en autorrotación para pequeños números de Reynolds. Este último presenta la investigación experimental de un pararrotor que gira alrededor de un eje fijo.

En el presente trabajo se exponen las investigaciones experimentales realizadas en el tema, a saber: a) Ensayos en túnel aerodinámico sobre un modelo que rota alrededor de un eje fijo, b) Ensayos en túnel aerodinámico vertical sobre un modelo en vuelo libre, c) Ensayos en túnel aerodinámico sobre un modelo que rota sobre un rodamiento basculante.

2 ENSAYOS EXPERIMENTALES

2.1 Ensayos en túnel aerodinámico sobre un modelo que rota alrededor de un eje fijo

Descripción del modelo y configuración experimental

El modelo consiste en un cuerpo principal cilíndrico y dos palas de planta rectangular, sobre la base del cilindro situada a sotavento.

Se ha ensayado una configuración aerodinámica, aquí denominada “Configuración básica”, consistente en un ala de planta rectangular, de dimensiones fijas y ángulo de paso variable. Sobre esta configuración se han estudiado los efectos de la velocidad de la corriente y del ángulo de paso de las palas sobre la tracción y la velocidad de rotación.

En una segunda etapa, se han ensayado variaciones a la configuración básica (introducción de varillas, placas, rugosidad, etc. sobre las palas). Estas variaciones fueron realizadas sobre las superficies de las palas; no se realizaron modificaciones sobre el cilindro, sobre el perfil ni sobre la forma en planta de las palas.

El modelo consiste en un cuerpo principal cilíndrico, de iguales dimensiones en diámetro y altura, 88 mm. Este cilindro se encuentra montado a un eje. En la base del cilindro, situada a sotavento, se encastran dos palas cortas planas rectangulares, de 88 mm de envergadura, 138

mm de cuerda y 1 mm de espesor; de paso ajustable. Las palas se fijan al cilindro por medio de varillas, situadas sobre el extradós.

Los ensayos se han realizado en el túnel aerodinámico del Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Argentina. Este es un túnel de circuito y cámara de ensayos cerrados, impulsado por una hélice accionada por un motor eléctrico de 37,3 kW. La sección transversal de la cámara de ensayos es rectangular, de 1,4 m de ancho x 1 m de altura x 7,2 m de longitud. La velocidad del aire puede variarse en forma continua hasta 18 m/s.

El eje que sostiene al modelo va montado a través de dos rodamientos a un soporte. Este soporte se halla fijado en el extremo de una balanza. La balanza es una viga adecuadamente mecanizada de aluminio, que tiene adheridos extensímetros en sus caras. El extremo inferior de la balanza va sujeto al suelo del túnel aerodinámico. La balanza posee un carenado para no ver afectadas las mediciones por la acción del viento sobre ella. El cilindro gira libremente por acción del viento. El cilindro está construido con un tubo y dos tapas de aluminio. Las palas son también de aluminio.

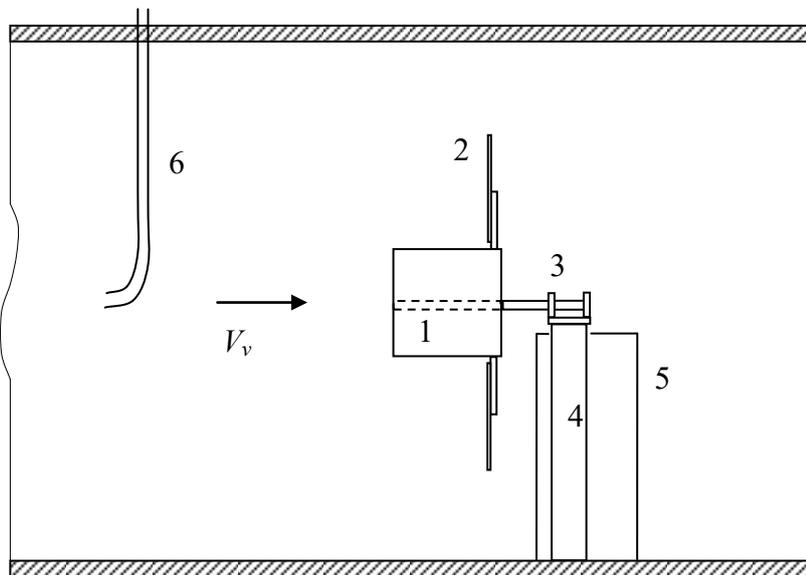


Figura 1: Esquema de la instalación experimental. Los números indican: 1, Cuerpo principal; 2, Pala; 3, Eje de rotación; 4, Balanza; 5, Carenado de la balanza; y 6, Tubo Pitot

En los ensayos se han medido los siguientes parámetros: ángulo de incidencia de las palas, velocidad del aire, velocidad de rotación y resistencia aerodinámica del modelo. La velocidad de rotación del modelo se ha medido con un tacómetro láser; los ángulos de paso de las palas, con un goniómetro; la velocidad del aire, con un tubo Pitot y un micromanómetro de alcohol; y la resistencia aerodinámica, con una balanza.

También se han realizado visualizaciones del flujo, mediante una lámpara estroboscópica e hilos pegados sobre las caras de las palas. Se han tomado algunas fotografías, pero, para facilitar la interpretación, los resultados que se presentan son esquemas de lo visualizado en las fotografías y en directo.

Definiciones, parámetros medidos e instrumentación

Se determina el coeficiente de resistencia del modelo, c_{DM} , tomando como área de

referencia a la superficie de las dos palas: $S_p = 2bc$. Entonces, el coeficiente de resistencia del modelo es:

$$c_{DM} = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho V_v^2 S_p} \quad (1)$$

Para calcular el número de Reynolds del fenómeno se utilizó como longitud característica la cuerda de las palas, siendo, entonces:

$$Re_p = \frac{V_v c}{\nu} \quad (2)$$

Se define k a la relación de velocidades:

$$k = \frac{V_v}{\omega R} \quad (3)$$

Se ha considerado $R = 0,138$ m.

Configuraciones ensayadas

Inicialmente, se ha ensayado la configuración básica, para determinar sus características. A continuación se han probado diferentes configuraciones con el objetivo de estudiar la influencia de los parámetros y, principalmente, reducir la velocidad de rotación y aumentar la tracción en el modelo, con el objetivo de no imprimir una excesiva velocidad de rotación al cuerpo, y para frenar su caída lo más posible, respectivamente. Las configuraciones ensayadas se presentan en la Tabla 1.

| Configuración | Código | Ángulo de paso (grados) |
|---|--------|-------------------------|
| Básica | C01 | -2, -4, -6 y -8 |
| Una varilla sobre intradós | C02 | -4 y -6 |
| Cilindro solo, sin las palas | - | - |
| Básica. Modelo frenado, sin giro | - | - |
| Dos varillas sobre intradós | C03 | -6 y -8 |
| Básica. Ángulo de guiñada de 10 y 20 grados | C01 | -4 |
| Borde de ataque redondeado | C04 | -4 |
| Palas con placas en los cantos | C05 | -2, -4 y -6 |
| Diámetro mayor | C06 | -2 |
| Con mayor rugosidad en intradós | C07 | -2, -4, -6 y -8 |
| Con dos varillas sobre intradós | C08 | -2, -4, -6 y -8 |

Tabla 1: Configuraciones ensayadas.

Análisis de los resultados

Los parámetros tomados para comparar los resultados de los ensayos son el coeficiente de resistencia aerodinámica del modelo, c_{DM} , y el parámetro de relación de velocidades, k .

En primer lugar, se ha analizado la influencia de la velocidad de la corriente, V_v , y del ángulo de paso, β , en los parámetros c_{DM} y k .

Seguidamente, se han comparado las actuaciones de las diferentes configuraciones con las de la configuración básica.

En virtud de ser las velocidades de interés para la aplicación del dispositivo mayores que 8 m/s y que, en general, c_{DM} y k presentan tendencias asintóticas para las velocidades grandes, se han tomado, como valor para los análisis, los correspondientes a la máxima velocidad ensayada, o bien el valor de c_{DM} o k , a la máxima velocidad ensayada, dado por una curva de ajuste. Dichos valores se presentan en la Tabla 2.

Asimismo se han repetido algunos ensayos a fin de comprobar la reproducibilidad.

| Configuración | Ensayo N° | k | | | | c_{DM} | | | |
|------------------|-----------|------------------|------|------|------|------------------|-----|-----|-----|
| | | β , grados | | | | β , grados | | | |
| | | -2 | -4 | -6 | -8 | -2 | -4 | -6 | -8 |
| C01 | 030827 | 0,39 | 0,32 | - | - | 3,4 | 3,2 | - | - |
| | 040428-1 | 0,45 | 0,35 | 0,31 | 0,29 | 3,4 | 3,3 | 3,2 | 2,9 |
| | 040503-1 | 0,42 | 0,35 | 0,32 | 0,28 | 3,5 | 3,4 | 3,5 | 3,1 |
| | 040504-1 | - | 0,33 | - | - | - | 3,5 | - | - |
| C02 | 040420-1 | - | 0,49 | - | - | - | 3,9 | - | - |
| | 040423 | - | 0,51 | 0,43 | - | - | 3,4 | 3,3 | - |
| C03 | 040426-1 | - | - | 0,59 | 0,50 | - | - | 3,5 | 3,1 |
| C01, guiñada 10° | 040428-2 | - | 0,36 | - | - | - | 3,1 | - | - |
| C01, guiñada 20° | 040428-2 | - | 0,37 | - | - | - | 2,9 | - | - |
| C04 | 040428-3 | - | 0,34 | - | - | - | 3,3 | - | - |
| C05 | 040430 | 0,65 | 0,48 | 0,45 | - | 3,4 | 3,3 | 3,1 | - |
| C06 | 040503-2 | 0,46 | - | - | - | 3,8 | - | - | - |
| C07 | 040504-2 | 0,38 | 0,33 | 0,31 | 0,30 | 3,6 | 3,4 | 3,3 | 3,2 |
| | 040506-1 | 0,41 | 0,35 | 0,32 | 0,30 | 3,6 | 3,4 | 3,3 | 3,2 |
| C08 | 040506-2 | 0,55 | 0,45 | 0,38 | - | 3,5 | 3,4 | 3,3 | - |
| C09 | 040426-2 | - | 0,76 | 0,59 | 0,53 | - | 3,1 | 3,1 | 2,8 |

Tabla 2: Valores asintóticos de los parámetros k y c_{DM} .

Análisis de la configuración básica

Analizados los promedios de los valores de c_{DM} y k de los ensayos realizados con la configuración básica (ver Tabla 2), se observan las siguientes tendencias generales:

- k decrece (aumenta la velocidad de rotación) al aumentar el ángulo de paso y/o la velocidad de la corriente.
- c_{DM} disminuye al aumentar el ángulo de paso, y presenta poca variación con la velocidad de la corriente, excepto para $V_v = 5,4$ m/s y $\beta = 8$ grados, donde cae abruptamente.

Análisis de las diferentes configuraciones

Respecto de las diferencias observadas para cada configuración ensayada con respecto a la básica, C01, en los parámetros k y c_{DM} , y dentro de las limitaciones del estudio, se observa

que:

- En general, las variaciones en la rugosidad afectan más al parámetro k que al c_{DM} , es decir, afectan a la velocidad de giro, que, en general, cae, y producen poca variación en la tracción.
- A medida que aumenta el ángulo de guiñada, aumenta k y disminuye c_{DM} .
- Redondear el borde de ataque no genera cambios (C04).
- La configuración con diámetro mayor genera aumento en c_{DM} , si bien no pudo ser ensayada en un rango más amplio.
- La mayor rugosidad sobre el intradós, generada por el papel de lija (C07), aumenta ligeramente c_{DM} cuando el ángulo de paso es pequeño o grande.
- La disposición con dos varillas sobre el intradós (C09) presenta el mayor aumento del parámetro k (125 %, para $\beta = 4^\circ$). El c_{DM} presenta una disminución del 7 %.
- Las restantes configuraciones, con varillas, C02, C03, C08, y placas en los cantos, C05, presentan aumento de k entre el 21 y 87 %, y poca variación en el c_{DM} .

Como conclusión, se ve que, si se desea aumentar el parámetro k (disminuir la velocidad de giro) son apropiadas las configuraciones con varillas sobre el intradós y placas en los cantos, aunque debe observarse que el c_{DM} puede disminuir.

El aumento más importante en el c_{DM} se observa en la configuración con diámetro mayor.

Se ha estudiado la reproducibilidad de los resultados a través de las desviaciones estándar de las muestras. Se ha tomado este parámetro como idea del error máximo producido entre ensayos realizados en similares condiciones. El análisis de estos resultados muestra que la reproducibilidad de los ensayos es aceptable (el máximo valor de la desviación estándar dividida por el valor medio es un 7 %).

En general se concluye que, para obtener menores velocidades de rotación (mayores valores del parámetro k), aumentar la rugosidad en las palas es beneficioso, al igual que trabajar con ángulos de paso pequeños. Para obtener mayor frenado en la caída del pararrotor es conveniente trabajar con ángulos de paso pequeños.

Incertidumbre de las mediciones

La incertidumbre en las mediciones ha sido evaluada teniendo en cuenta la reproducibilidad de los ensayos realizados en condiciones similares y la incertidumbre de los instrumentos. En la Tabla 3 se presentan los valores absolutos de las incertidumbres combinadas (combinación de las desviaciones estándar) en las determinaciones de k y c_{DM} , $U_{c_{DM}}$ y U_k , respectivamente, para la Configuración Básica. Para las restantes configuraciones ensayadas los valores de las incertidumbres son del mismo orden que los correspondientes a la Configuración Básica. Como puede observarse, $U_{c_{DM}} > U_k$; esto principalmente debido a variaciones en la calibración de la balanza.

| V_v , m/s | $U_{c_{DM}}$ | | | | U_k | | | |
|-------------|------------------|------|------|------|------------------|-------|-------|-------|
| | β , grados | | | | β , grados | | | |
| | -2 | -4 | -6 | -8 | -2 | -4 | -6 | -8 |
| 5,4 | 0,24 | 0,26 | 0,55 | 0,24 | 0,040 | 0,010 | 0,012 | 0,010 |
| 7,3 | 0,14 | 0,16 | 0,33 | 0,24 | 0,018 | 0,008 | 0,008 | 0,005 |
| 9,0 | 0,17 | 0,13 | 0,27 | 0,18 | 0,031 | 0,008 | 0,006 | 0,005 |
| 12,8 | 0,08 | 0,09 | 0,17 | 0,13 | 0,025 | 0,009 | 0,005 | 0,005 |
| 14,0 | 0,09 | 0,10 | - | - | 0,017 | 0,008 | - | - |

Tabla 3: Incertidumbres combinadas en las mediciones para la Configuración Básica.

Visualización del flujo

Debido a que el flujo es aproximadamente estacionario cuando se describe en ejes cuerpo, y debido a la dificultad de montar un sistema de visualización fijo a dichos ejes, se ha optado por emplear un registro en fase con la rotación del cuerpo, por medio del empleo de iluminación estroboscópica. El estudio se ha centrado en observar el flujo en las palas para determinar el grado de adherencia o desprendimiento de la capa límite, como elemento más significativo de la descripción del flujo sobre las palas. Para ello, se han dispuesto hilos de lana sobre las palas, se ha empleado una lámpara estroboscópica y se ha recogido la imagen con una cámara digital.

Se ha observado que, independientemente de cuál fuera la configuración observada, el patrón general de flujo no varía con el ángulo de paso de las palas ni con la velocidad de la corriente. El flujo es estacionario, según un sistema de referencia fijo al modelo (ejes cuerpo).

Configuración básica, C01

Se ha observado flujo adherido tanto en extradós como en intradós, excepto a lo largo del borde de ataque del extradós, donde se ha apreciado la presencia de un vórtice, que crece en dirección de la envergadura. En el intradós, en el extremo del borde de ataque próximo al radio interno, se ha observado un exiguo flujo que se dirige hacia el extradós. El flujo es predominantemente radial en la zona del borde de ataque, se orienta según la cuerda en la zona del borde de salida y en la zona central de la pala forma un ángulo de unos 45 grados con la dirección radial. Este comportamiento se ve en la Figura 3 y está representado en el esquema de la Figura 4.



Figura 3: Flujo sobre el intradós durante un ensayo

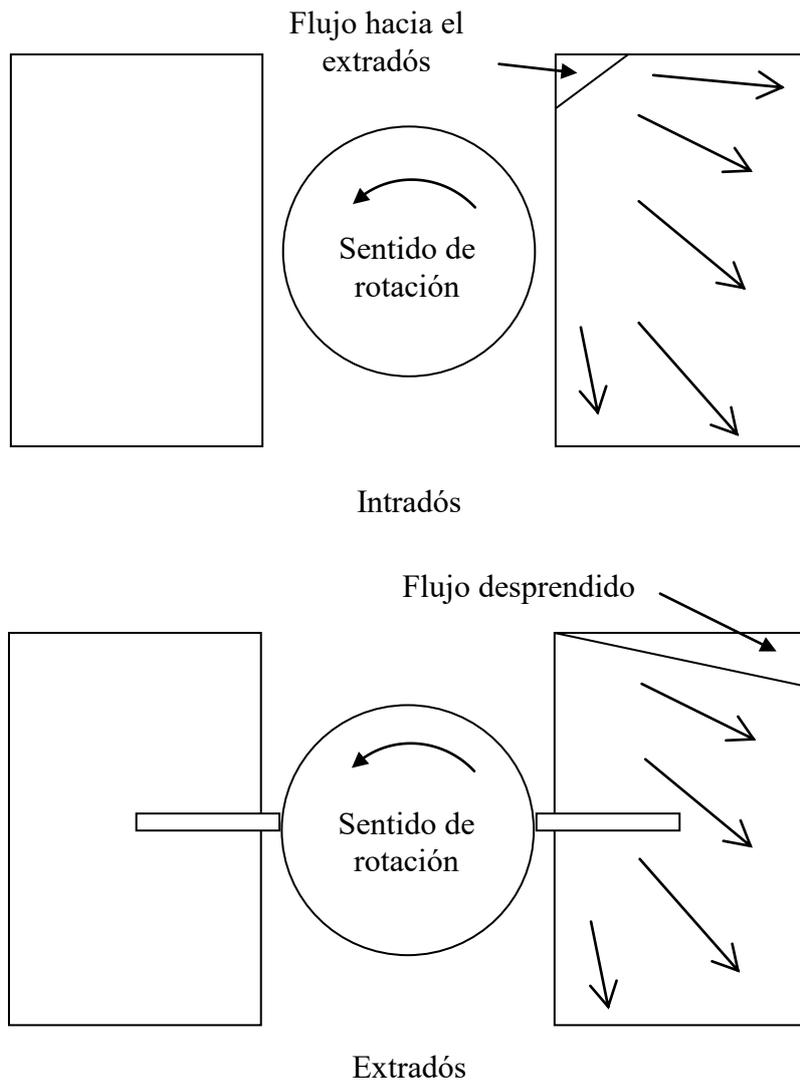


Figura 4: Esquema del flujo en intradós y extradós para la configuración C01

2.2 Ensayos en túnel aerodinámico vertical sobre un modelo en vuelo libre

Descripción del modelo y configuración experimental

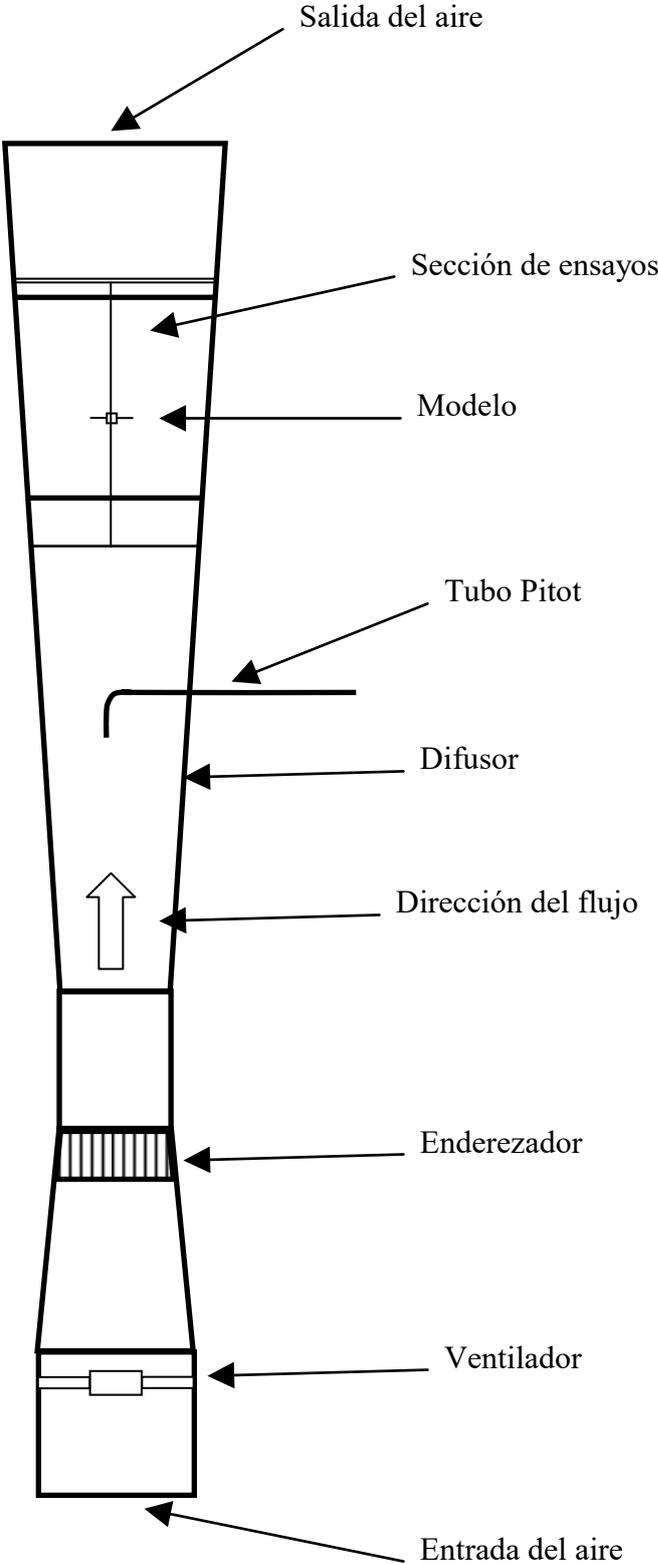


Figura 5: Esquema del túnel aerodinámico vertical

El túnel aerodinámico vertical se muestra en la Figura 5. El aire está impulsado por un ventilador axial de 5500 m³/h situado en la parte inferior del túnel. El aire descarga a un difusor, a través de un enderezador del flujo. La sección de prueba está dentro del difusor. La forma del difusor ha sido diseñada para obtener estabilidad vertical del modelo. El difusor tiene una profundidad constante de 0,28 m; sus restantes dimensiones son: ancho mínimo 0,24 m, ancho máximo 0,57 m y largo 2,25 m. Las dimensiones de la sección de prueba son: ancho mínimo 0,4 m, ancho máximo 0,46 m y largo 0,5 m.

Los modelos ensayados consisten de un cilindro hueco y dos palas planas rectangulares de aluminio. Dentro del cilindro una guía situada en el centro de masas permite al modelo deslizarse a lo largo de un cable guía. Para el presente análisis se utilizaron dos juegos de cilindros y tres juegos de palas (Figura 6). Las combinaciones de juegos de palas y cilindros dan diferentes relaciones entre los valores de los momentos de inercia principales del modelo completo.

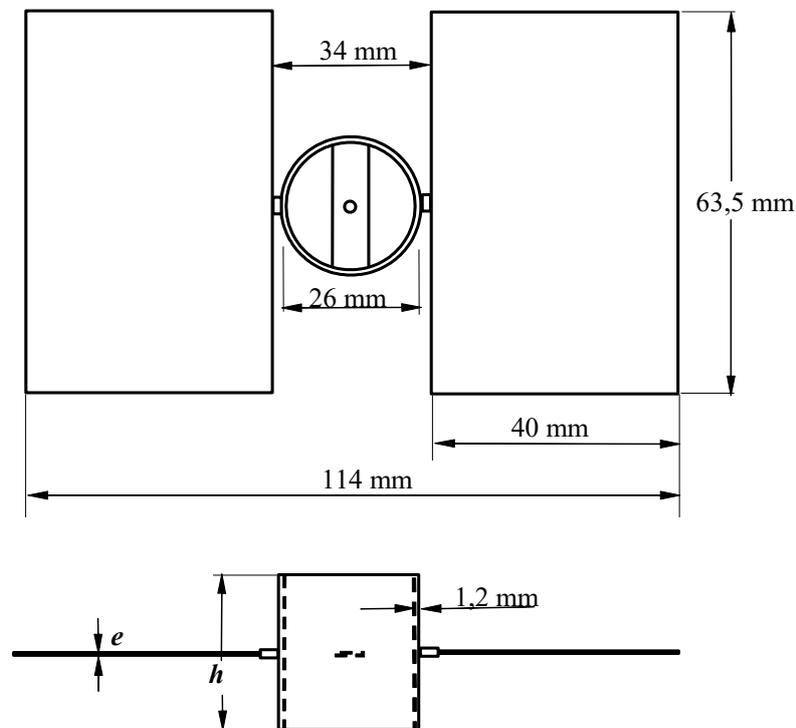


Figura 6: Dimensiones del modelo

Las restantes dimensiones de los modelos ensayados se muestran en las tablas siguientes.

| Configuración | h , mm |
|---------------|----------|
| C05 | 26 |
| C06 | 56 |

Tabla 4: Alturas de los cilindros.

| Configuración | e , mm |
|---------------|----------|
| P01 | 0.5 |

| | |
|------------|-----|
| <i>P02</i> | 0.8 |
| <i>P03</i> | 0.3 |

Tabla 5: Espesores de las palas.

En la tabla siguiente se presentan los pesos y los momentos de inercia principales de los modelos ensayados.

| Configuración | Peso, N | $A, 10^{-6} \text{ kg m}^2$ | $B, 10^{-6} \text{ kg m}^2$ | $C, 10^{-6} \text{ kg m}^2$ |
|------------------|---------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| <i>C05P01</i> | 0,15 | 3,5 | 8,9 | 11,6 |
| <i>C05P02</i> | 0,20 | 5,4 | 21,2 | 25,9 |
| <i>C05P03</i> | 0,11 | 1,9 | 5,8 | 6,9 |
| <i>C06P02</i> | 0,28 | 9,5 | 25,3 | 27,1 |
| <i>C06P03</i> | 0,19 | 5,9 | 9,8 | 8,1 |
| <i>C05P02M01</i> | 0,22 | 10,1 | 22,5 | 31,8 |

Tabla 6: Pesos y momentos de inercia de los modelos ensayados.

El modelo *C05P02M01* posee dos masas de 2,2 g situadas en las coordenadas ejes cuerpo: 17,-32,0 y -17,32,0 (mm). Su propósito ha sido variar la relación entre los momentos de inercia principales del cuerpo.

Definiciones, parámetros medidos e instrumentación

Los parámetros medidos son: la velocidad de rotación, por medio de una lámpara estroboscópica (resolución 50 rpm); el paso de las palas, con un goniómetro (resolución 1 grado); la velocidad de la corriente, por medio de un tubo Pitot estandarizado del tipo NPL y un micromanómetro (resolución 0,5 Pa); y el peso del modelo, con una balanza (resolución 0,01 g).

Se definen los parámetros adicionales: el ángulo del plano medio entre las palas: $\delta_\beta = \frac{\beta_1 - \beta_2}{2}$ y el ángulo relativo entre las palas: $\varepsilon = \beta_1 + \beta_2$.

Configuraciones ensayadas

Se han realizado diferentes ensayos sobre los modelos descritos en la Tabla 7 para los ángulos de paso de las palas mostrados en las dos tablas siguientes, donde también se presentan los valores medios de los parámetros k y c_{DM} .

| β_1 , grados | β_2 , grados | δ_β , grados | ε , grados | k | c_{DM} |
|-----------------------|-----------------------|----------------------------|---------------------------|------|----------|
| -12 | 8 | -10 | -4 | 0,39 | 3,06 |
| -12 | 10 | -11 | -2 | 0,46 | 3,38 |
| -10 | -10 | 0 | -20 | - | - |
| -10 | 4 | -7 | -6 | 0,32 | 3,30 |
| -10 | 6 | -8 | -4 | 0,36 | 3,25 |
| -10 | 8 | -9 | -2 | 0,43 | 3,38 |
| -8 | -8 | 0 | -16 | 0,21 | 2,99 |
| -8 | -8 | 0 | -16 | 0,32 | 2,13 |
| -8 | -4 | -2 | -12 | 0,22 | 3,24 |
| -8 | 0 | -4 | -8 | 0,24 | 3,39 |
| -8 | 2 | -5 | -6 | 0,34 | 3,41 |
| -8 | 4 | -6 | -4 | 0,37 | 3,48 |
| -8 | 6 | -7 | -2 | 0,40 | 3,61 |
| -8 | 10 | -9 | 2 | 0,49 | 3,19 |
| -6 | -8 | 1 | -14 | 0,25 | 2,41 |
| -6 | -6 | 0 | -12 | 0,24 | 3,18 |
| -6 | 2 | -4 | -4 | 0,38 | 3,36 |
| -6 | 4 | -5 | -2 | 0,45 | 3,40 |
| -4 | -8 | 2 | -12 | 0,25 | 2,85 |
| -4 | -6 | 1 | -10 | 0,26 | 3,01 |
| -4 | -4 | 0 | -8 | 0,26 | 3,24 |
| -2 | -2 | 0 | -4 | 0,27 | 3,44 |

Tabla 7: Ensayos realizados para la configuración C05P02.

| Configuración | β_1 , grados | β_2 , grados | δ_β , grados | ε , grados | k | c_{DM} |
|---------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|---------------------------|------|----------|
| C05P03 | -12 | 10 | -11 | -2 | 0,39 | 3,33 |
| C05P03 | -10 | 8 | -9 | -2 | 0,36 | 3,49 |
| C05P03 | -6 | -6 | 0 | -12 | 0,24 | 3,06 |
| C05P03 | -6 | 0 | -3 | -6 | 0,30 | 3,67 |
| C05P03 | -4 | -6 | 1 | -10 | 0,25 | 3,33 |
| C05P03 | -4 | -4 | 0 | -8 | 0,30 | 3,38 |
| C05P01 | -12 | 10 | -11 | -2 | 0,44 | 3,32 |
| C05P02M01 | -8 | -8 | 0 | -16 | 0,25 | 2,51 |
| C05P02M01 | -6 | -6 | 0 | -12 | 0,27 | 2,62 |
| C05P02M01 | -4 | -4 | 0 | -8 | 0,31 | 2,81 |
| C05P02M01 | -2 | -2 | 0 | -4 | 0,38 | 3,03 |
| C06P02 | -8 | -8 | 0 | -16 | 0,32 | 2,13 |
| C06P02 | -6 | -6 | 0 | -12 | 0,24 | 2,30 |
| C06P02 | -4 | -4 | 0 | -8 | 0,27 | 2,30 |
| C06P02 | -2 | -2 | 0 | -4 | 0,31 | 2,54 |
| C06P03 | -6 | -6 | 0 | -12 | - | - |
| C06P03 | -4 | -4 | 0 | -8 | - | - |
| C06P03 | -2 | -2 | 0 | -4 | - | - |

Tabla 8: Ensayos realizados para otras configuraciones.

Asimismo se han realizado filmaciones y tomado fotografías con y sin iluminación estroboscópica, con el fin de estudiar la actitud de los modelos.

Análisis de los resultados

De las pruebas se ha observado que:

Para las configuraciones con ángulos de paso de ambas palas iguales (-2, -4, -6, y -8 grados), tanto la relación de velocidades k como el coeficiente de resistencia del modelo c_{DM} decrecen al aumentar el ángulo de paso de las palas, como se ve en las Figuras 7 y 8.

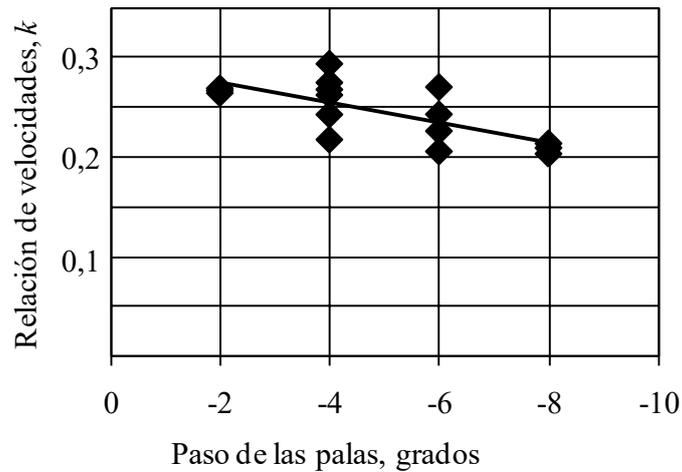


Figura 7: Relación de velocidades vs. Paso de las palas. Configuración C05P02

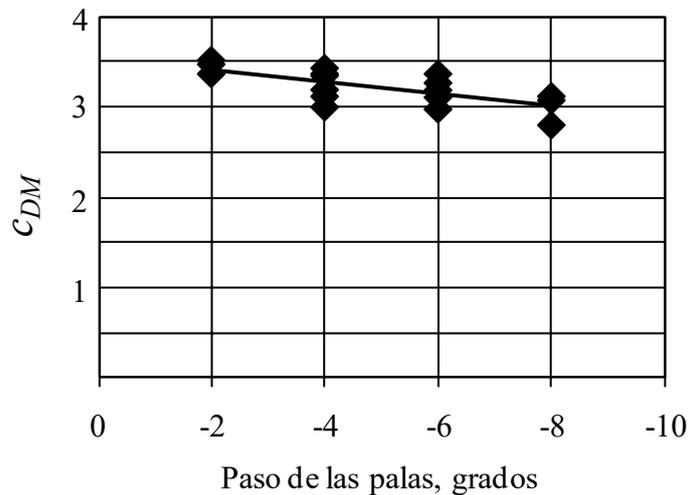


Figura 8: Coeficiente de resistencia del modelo vs. Paso de las palas. Configuración C05P02

Respecto al ángulo relativo entre las palas, ε , se puede observar que k decrece al aumentar $|\varepsilon|$ (el modelo gira más rápido). Por otra parte, c_{DM} aumenta al disminuir $|\varepsilon|$.

Finalmente, k decrece al disminuir el ángulo medio de paso entre las palas δ_β .

Actitud y estabilidad del modelo

Como predicen los modelos teóricos, los modelos aquí ensayados mostraron un comportamiento estable cuando la relación entre los momentos de inercia principales es $C > A, B$ (Figura 9), e inestable cuando $B > C > A$ (Figura 10).

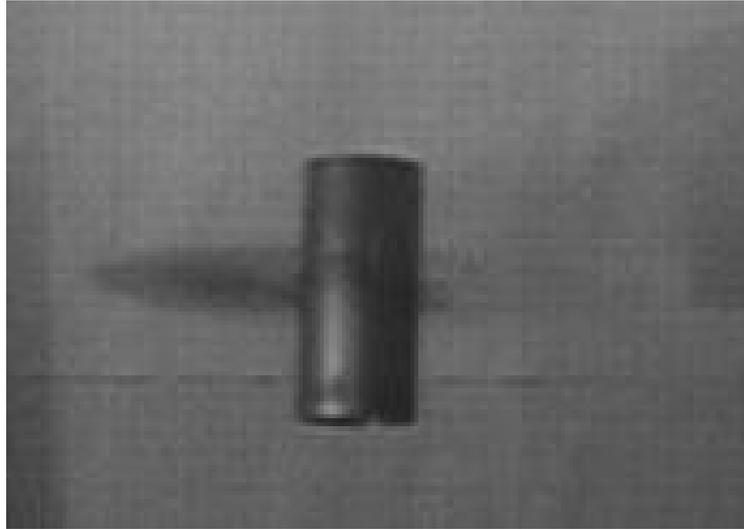


Figura 9: Actitud del modelo C06P02, para $\beta_1 = \beta_2 = -4^\circ$. $C > B > A$. Movimiento estable.

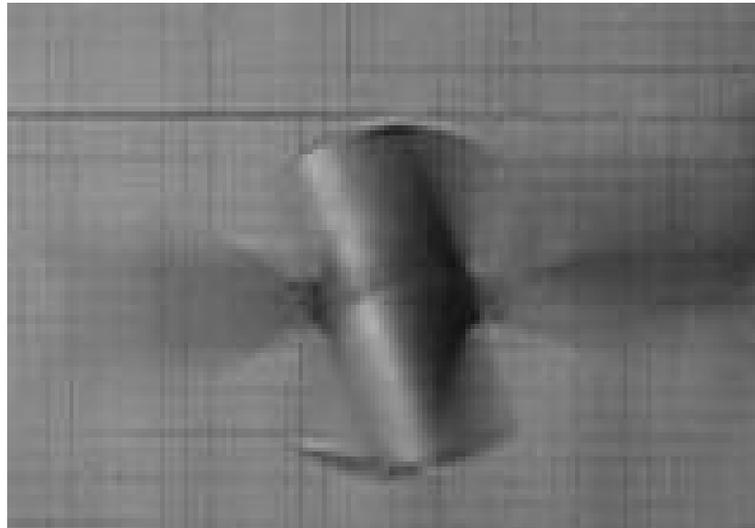


Figura 10: Actitud del modelo C06P03, para $\beta_1 = \beta_2 = -4^\circ$. $B > C > A$. Movimiento inestable.

Incertidumbre de las mediciones

La incertidumbre en las mediciones ha sido evaluada teniendo en cuenta la reproducibilidad de los ensayos realizados en condiciones similares y la incertidumbre de los instrumentos. En la Tabla 3 se presentan los valores absolutos de las incertidumbres combinadas (combinación de las desviaciones estándar) en las determinaciones de k y c_{DM} , $U_{c_{DM}}$ y U_k , respectivamente, para la Configuración C05P02.

| $U_{c_{DM}}$ | | | | U_k | | | |
|------------------|------|------|------|------------------|-------|-------|-------|
| β , grados | | | | β , grados | | | |
| 2 | 4 | 6 | 8 | 2 | 4 | 6 | 8 |
| 0,18 | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,005 | 0,015 | 0,015 | 0,005 |

Tabla 9: Incertidumbres combinadas en las mediciones para la Configuración C05P02.

2.3 Ensayos en túnel aerodinámico sobre un modelo que rota sobre un rodamiento basculante.

Descripción del modelo y configuración experimental

El modelo consiste en un cuerpo principal cilíndrico y dos palas de planta rectangular. El modelo está montado sobre un rodamiento basculante a una celda de carga, y esta, mediante un soporte, a la base del túnel. Las dimensiones del cilindro son diámetro 90 mm y altura 92 mm. Las palas planas rectangulares tienen dimensiones 91 mm de envergadura, 141 mm de cuerda y 1 mm de espesor; de paso ajustable. Las palas se fijan al cilindro en tres posiciones del eje de las palas respecto al centro de masas del cuerpo: a) coincidente con el centro de masas, b) a una distancia de 20 mm corriente arriba del centro de masas, y c) a una distancia de 20 mm corriente abajo del centro de masas. Esto para analizar la influencia de la posición de las palas respecto al centro de masas en el comportamiento dinámico del pararrotor. Ver Figuras 11 y 12.



Figura 11: Pararrotor montado sobre el rodamiento basculante, sin la tapa sobre el cilindro



Figura 12: Pararrotor montado sobre el rodamiento basculante durante un ensayo. $\beta_1 \neq \beta_2$

Los ensayos se han realizado en el túnel aerodinámico del Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Argentina.

En los ensayos se han medido los siguientes parámetros: ángulo de incidencia de las palas, velocidad del aire, velocidad de giro y resistencia aerodinámica del modelo. La velocidad de giro del modelo se ha medido con un tacómetro láser; los ángulos de paso de las palas, con un goniómetro; la velocidad del aire, con un tubo Pitot y un transductor de presiones; y la resistencia aerodinámica, con una celda de carga. También se midió el ángulo de nutación del modelo, mediante la filmación con dos cámaras situadas a 90° entre sí.

Definiciones, parámetros medidos e instrumentación

Adicionalmente a los anteriores, se define el parámetro k_{31} como la relación entre la distancia del plano de las palas al centro de masas y coordenada según el eje de las palas del centro de presiones de la pala, siendo este parámetro positivo cuando las palas están situadas corriente arriba del centro de masas.

Configuraciones ensayadas

En la Tabla 10 se presentan las configuraciones ensayadas, así como también los valores medios de los parámetros k , C_{DM} , y del ángulo de nutación, θ .

| κ_{31} | β_1 , grados | β_2 , grados | δ_β , grados | ε , grados | $10^{-3}Re$ | k | C_{DM} | θ , grados |
|---------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|---------------------------|-------------|------|----------|----------------------|
| 0 | -4 | -4 | 0 | -8 | 250 | 0,27 | 3,22 | 0,18 |
| 0 | -4 | -8 | 2 | -12 | 293 | 0,25 | 3,44 | 1,65 |
| 0 | -4 | -12 | 4 | -16 | 286 | 0,27 | 3,44 | 2,06 |
| -0,17 | -4 | -4 | 0 | -8 | 207 | 0,31 | 3,47 | - |
| -0,17 | -4 | -8 | 2 | -12 | 262 | 0,30 | 3,32 | 4,75 |
| -0,17 | -4 | -12 | 4 | -16 | 252 | 0,26 | 3,43 | 6,22 |
| 0,17 | -4 | -4 | 0 | -8 | 296 | 0,26 | 3,55 | 0,51 |
| 0,17 | -4 | -8 | 2 | -12 | 265 | 0,24 | 3,36 | 3,08 |
| 0,17 | -4 | -12 | 4 | -16 | 300 | 0,26 | 3,19 | 6,37 |

Tabla 10: Configuraciones ensayadas y resultados de los ensayos.

En las Figuras 13 y 14 se ve la variación del ángulo de nutación con la posición de las palas, el ángulo de paso y la relación de velocidades.

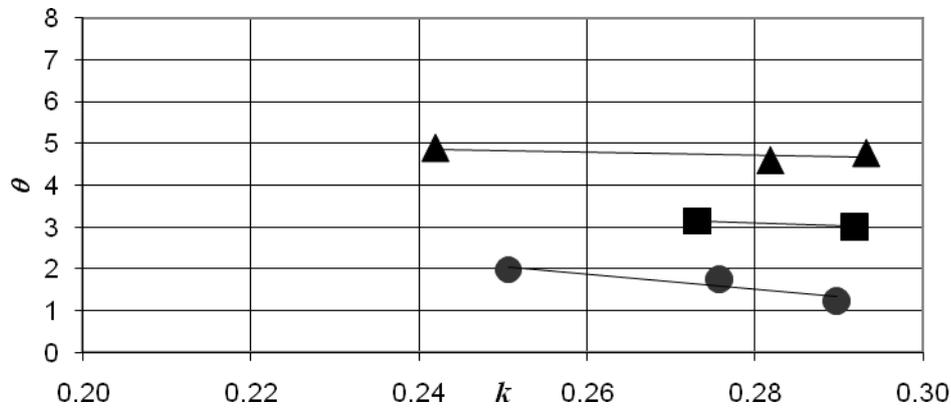


Figura 13: Ángulo de nutación para $\beta_1=-4^\circ$ y $\beta_2=-8^\circ$. Los círculos corresponden a $k_{31}=0$; los cuadrados, a $k_{31}=0,17$; y los triángulos, a $k_{31}=-0,17$

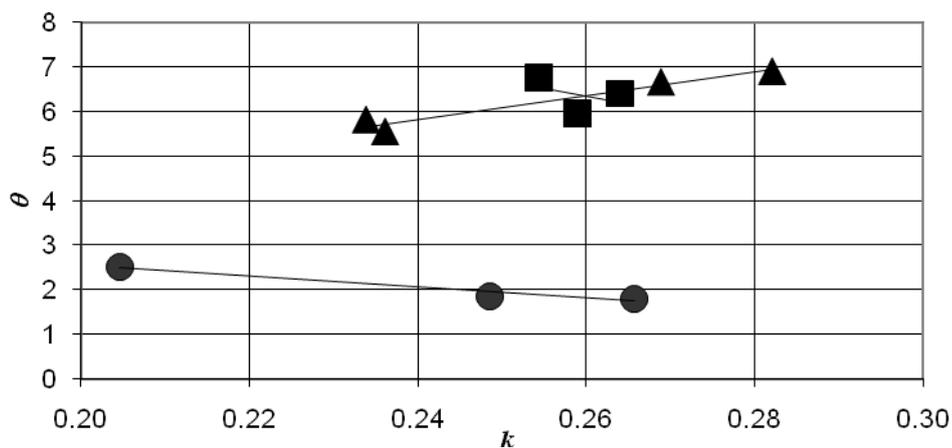


Figura 14: Ángulo de nutación para $\beta_1=-4^\circ$ y $\beta_2=-12^\circ$. Los círculos corresponden a $k_{31}=0$; los cuadrados, a $k_{31}=0,17$; y los triángulos, a $k_{31}=-0,17$

Análisis de los resultados

Respecto a los valores de la relación de velocidades se observa que el modelo gira algo más rápido para el caso en que las palas se ubican corriente abajo del centro de masas.

No se observan patrones definidos en el comportamiento del coeficiente de resistencia del modelo para estos ensayos.

En relación al ángulo de nutación se ha observado:

- Valores próximos a cero ($\theta < 0,5^\circ$), cuando los ángulos de paso de ambas palas son iguales.
- Para $k_{31}=0$, los ángulos de nutación son más pequeños que para los casos en que las palas están desplazadas del centro de masas.

- Cuando los ángulos de paso son más desiguales, el ángulo de nutación es mayor.
- También es posible observar que el sentido del desplazamiento (la posición retrasada o adelantada) del plano de las palas al respecto del centro de masas no resulta un parámetro influyente sobre la magnitud del ángulo de nutación.

El pararrotor se comportó en forma estable para todos los casos ensayados.

Incertidumbre de las mediciones

La incertidumbre en las mediciones ha sido evaluada teniendo en cuenta la reproducibilidad de los ensayos realizados en condiciones similares y la incertidumbre de los instrumentos. Los valores absolutos de las incertidumbres combinadas (combinación de las desviaciones estándar) en las determinaciones de k y c_{DM} , para el caso $\beta_1=\beta_2=-4^\circ$, $k_{31}=0$, son $U_{c_{DM}}=0,24$ y $U_k=0,002$, respectivamente.

La incertidumbre en las mediciones de ángulo de nutación ha sido evaluada a partir de la determinación de la incertidumbre de resolución de las imágenes capturadas de los ensayos sobre las que se mide θ , y la incertidumbre de las observaciones realizadas (la cual es consecuencia del análisis estadístico de las muestras tomadas), resultando la incertidumbre combinada de la medición del ángulo de nutación de $1,3^\circ$.

3 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS DIFERENTES ENSAYOS

Se han seleccionado los parámetros k y c_{DM} para la comparación de los resultados de los diferentes ensayos. Estos valores se presentan en la Tabla 11.

| Ensayo | Configuración | Solidez | $10^{-3}Re$ | k | | | | c_{DM} | | | |
|----------------|---------------|---------|-------------|------------------|------|------|------|------------------|------|------|------|
| | | | | β , grados | | | | β , grados | | | |
| | | | | -2 | -4 | -6 | -8 | -2 | -4 | -6 | -8 |
| Eje fijo | C01 | 0,45 | 57 - 300 | 0,42 | 0,34 | 0,31 | 0,28 | 3,43 | 3,35 | 3,35 | 3,00 |
| Túnel vertical | C05P02 | 0,52 | 40 - 75 | 0,27 | 0,26 | 0,24 | 0,21 | 3,44 | 3,24 | 3,18 | 2,99 |
| Basculante | - | 0,36 | 250 | - | 0,27 | - | - | - | 3,22 | - | - |

Tabla 11: Valores de k y c_{DM} para los diferentes ensayos.

Se observa que el pararrotor para los ensayos con eje fijo gira más lento que para los restantes ensayos; esto presumiblemente se debe a la fricción de los dos rodamientos que sostienen al modelo.

Respecto a los valores del coeficiente de resistencia, no se observan variaciones significativas.

4 CONCLUSIONES

Se ha estudiado experimentalmente el comportamiento dinámico de una configuración de decelerador aerodinámico. Se han realizado tres tipos diferentes de ensayos; cada uno ha permitido determinar una serie de parámetros, y otros parámetros, k y c_{DM} , son comunes a los tres tipos de ensayo.

El trabajo ha mostrado las capacidades del pararrotor como decelerador aerodinámico. Los parámetros medidos: relación entre la velocidad de la corriente y la velocidad de rotación, y el coeficiente de resistencia del modelo permiten, dada una carga a transportar, configurar el dispositivo para que descienda y rote a velocidades objetivo, dentro del rango de operación ensayado.

5 REFERENCIAS

- Crimi, P., "Analysis of samara-wing decelerator steady-state characteristics", *Journal of Aircraft*, Vol. 25, No. 1, 1988, pp. 41-47.
- Karlsen, L., Borgström, D. and Paulsson, L., "Aerodynamics of a rotating body descending from the separation position of an artillery munition shell", AIAA-91-0870-CP, April 1991.
- Levin, D. and Shpund, Z., "Dynamic investigation of the angular motion of a rotating body-parachute system", *Journal of Aircraft*, Vol. 32, No. 1, 1995, pp. 93-99.
- Levin, D. and Shpund, Z., "Canopy geometry effect on the aerodynamic behaviour of cross-type parachutes", *Journal of Aircraft*, Vol. 34, No. 5, 1997, pp. 648-652.
- Nadal Mora, V., "Comportamiento aerodinámico de sondas atmosféricas en entornos aeroportuarios", *Tesis doctoral*, Universidad Politécnica de Madrid, España, May 2005.
- Nadal Mora, V. and Sanz Andrés, A., "Stability Analysis of a Free Falling Pararotor", *Journal of Aircraft*, Vol. 43, No. 4, 2006, pp. 980-986.
- Nadal Mora, V., Sanz Andrés, A. and Cuerva, A. "Model of the aerodynamic behavior of a pararotor", *Journal of Aircraft*, Vol. 43, No. 6, 2006, pp. 1893-1903.
- Pelletier, A. and Mueller, T. J., "Low Reynolds Number Aerodynamics of Low-Aspect-Ratio, Thin/Flat/Cambered-Plate Wings", *Journal of Aircraft*, Vol. 37, No. 5, 2000, pp. 825-832.
- Pepper Jr, W., "A new rotating parachute design having high performance", *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 23, No. 2, 1986, pp. 222-224.
- Rosen, A. and Seter, D., "Vertical autorotation of a single winged samara", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 58, No. 4, Dec. 1991, pp. 1064-1070.
- Seter, D. and Rosen, A., "Stability of the vertical autorotation of a single winged samara", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 59, No. 4, Dec. 1992, pp. 1000-1008.
- Shpund, Z. and Levin, D., "Measurement of the static and dynamic coefficients of a cross-type parachute in subsonic flow", AIAA paper 91-0871-CP, April 1991.
- Shpund, Z. and Levin, D., "Forebody influence on rotating parachute aerodynamic properties", *Journal of Aircraft*, Vol. 34, No. 2, 1997, pp. 181-186.
- Stahl, W. H., "Aerodynamics of low aspect ratio wings", *Missile aerodynamics, AGARD Lecture Series*, No. 98, , 1979, pp. 1-64.