

Desarrollo de Balanza Externa para Túnel de Viento

Resumen: El presente trabajo trata sobre el desarrollo de un prototipo de balanza externa para el túnel de viento mayor del LAyF. Se indican los detalles de diseño de la balanza, así como su proceso constructivo y de calibración. Finalmente se evalúa su comportamiento mediante ensayos en túnel de viento de un ala de referencia. Los resultados mostraron que la balanza funciona correctamente dentro de las limitaciones previstas. La experiencia permitió recolectar valiosa información de diseño que será utilizada para el desarrollo de la balanza definitiva.

Palabras Claves: Balanza externa, aerodinámica experimental, túnel de viento

Abstract: This paper deals with the development of the prototype of one external scale for the LAyF's main wind tunnel. Balance design details are indicated as well as its manufacturing and calibrating process. Its behavior is finally evaluated by means of wind tunnel testing of a benchmark wing. The scale was found to work properly within the foreseen limitations. This experience allowed to obtain valuable design information which will be used for the developing of the definitive scale.

Keywords: External scale, experimental aerodynamics, wind tunnel

Miguel Ángel Aguirre, Víctor Astiz, Helios Marcio Ferrandez, Matias Meroniuc

LayF (Laboratorio de Aerodinámica y Fluidos) - Departamento de Ingeniería Aeronáutica
Facultad Regional Haedo - Universidad Tecnológica Nacional
Paris 532 – Haedo - CP1706 - Bs. As - Argentina
Mail: www.frh.utn.edu.ar - aguirre.utn@gmail.com

INTRODUCCIÓN

Una de las partes más importantes de una campaña de ensayos en túnel de viento es la medición de cargas aerodinámicas por medio de una balanza. Este es un ensayo simple y rápido que permite determinar las curvas características de una maqueta.

Con vistas a incrementar sus capacidades metrológicas, LAYF se enfocó en la concepción de una balanza de ese tipo. Sin embargo, estas balanzas aerodinámicas tienen asociadas un diseño complejo debido a las diversas restricciones propias de un ensayo en túnel de viento. Es necesario entonces enfocar su diseño por etapas. En primera instancia conviene concebir un prototipo de balanza en donde se implementen ciertos conceptos de diseño y luego, con esa experiencia, poder construir una balanza definitiva.

El objetivo de este trabajo entonces es diseñar, construir y calibrar un prototipo de balanza externa para el túnel de viento mayor del LAYF

ESPECIFICACIONES Y REQUERIMIENTOS

La balanza se prevé utilizar principalmente para ensayos aeronáuticos a bajos números de Reynolds (UAV, etc.) y especialmente en el rango de grandes ángulos de ataque. En consecuencia, se adoptaron las siguientes especificaciones para el diseño de la balanza:

- A) Rango de ángulo de ataque: $-60^{\circ} < \alpha < +60^{\circ}$
- B) Rango de ángulo de guiñada: $-45^{\circ} < \Psi < +45^{\circ}$
- C) Rango de medición de sustentación: $-30\text{Kg} < L < +30\text{Kg}$ (Ensayo de maquetas en posición normal e invertida).
- D) Rango de medición de resistencia: $-10\text{Kg} < D < +10\text{Kg}$ (aplicable para maquetas propulsadas).
- E) Envergadura máxima de maquetas: $b_{\text{max}} = 1\text{m} = 0.8 W_t$ ("Wt" es el ancho del túnel de viento = 1.28m).

Asimismo, el diseño debe satisfacer los siguientes requerimientos:

- A) Mecanismo simple de vinculación de la maqueta con la balanza.
- B) Capacidad de recibir maquetas de diverso tipo y tamaño.
- C) Bajo costo y fácil de construir (minimizar cantidad de piezas tercerizadas).
- D) Posicionamiento manual de la maqueta.
- E) Debe utilizarse el sistema de procesamiento de datos existente.

DISEÑO CONCEPTUAL

Habitualmente los ensayos de maquetas a grandes ángulos de ataque se realizan con soportes tipo lanza como el de la Figura 1, pues garantizan una mínima interferencia aerodinámica entre la maqueta y el soporte incluso a grandes ángulos de ataque (AGARD, 1996).

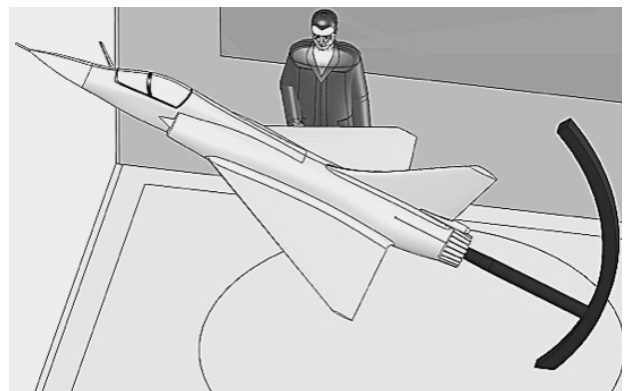


Figura 1 – balanza interna.

Este tipo de mecanismo admite habitualmente un rango de ángulos de ataque de $-30^{\circ} < \alpha < +30^{\circ}$. En el caso de que se requiera ensayar maquetas a mayores ángulos de ataque, es necesario reemplazar

la lanza recta por otra lanza especial en forma de “Z”. Sin embargo, el verdadero problema de este tipo de diseño es la balanza propiamente dicha. Se trata de un bloque metálico con strain-gages, que va montado en la punta de la lanza y que soporta directamente la maqueta (Bret and Vieira, 2013). El desarrollo de este tipo de balanza excedía las capacidades del laboratorio al momento del iniciar el proyecto.

Existen otros problemas adicionales como la deformación del soporte con las cargas aerodinámicas, y la complejidad de su mecanismo de posicionamiento. Es por estos motivos que se descarta el uso de esta arquitectura y se decide utilizar una balanza externa.

La balanza externa es un mecanismo complejo que se ubica por fuera de la cámara de ensayos, y que se comunica con la maqueta por medio de soportes, según se muestra en la Figura 2. Estos soportes transfieren las cargas aerodinámicas desde la maqueta hacia la balanza externa.

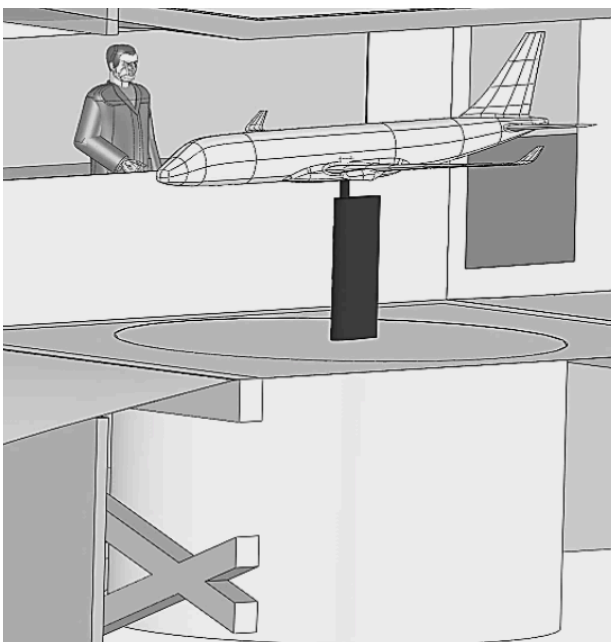


Figura 2 – balanza externa.

Habitualmente las balanzas externas no se utilizan para realizar ensayos a grandes ángulos de ataque debido a la gran interacción que aparece entre la maqueta y los carenados de los soportes. Esto obliga a introducir fuertes correcciones en las mediciones durante los ensayos. Sin embargo esta arquitectura tiene grandes ventajas frente al sistema tipo lanza:

- A) Mayor rigidez de la vinculación de la maqueta cuando se utilizan tres soportes.
- B) No se requieren balanzas internas. Pueden utilizarse celdas de carga convencionales
- C) para la medición de fuerzas y momentos en la maqueta (solución económica).
- D) Pueden controlarse fácilmente los ángulos de ataque y de guiñada desde el exterior del túnel mediante mecanismos manuales.
- E) Los soportes de la balanza son fácilmente desmontables. Esto permite despejar rápidamente la cámara de ensayos para realizar otras pruebas en el túnel de viento.

Este sistema tiene una ventaja adicional y es que las capacidades del LAyF permitían la construcción de la balanza por medios propios con una mínima necesidad de tercerizado de piezas. Por estos motivos se decidió diseñar una balanza externa de tres soportes.

Si bien existen diversos tipos de balanzas externas (Gorlin and Slezinger, 1966), la mayoría requiere de mecanismos muy complejos y difíciles de alinear. La solución más simple es la denominada balanza de plataforma, la cual se distingue por la descomposición ortogonal de las fuerzas y momentos. Su diseño esquemático se observa en la Figura 3.

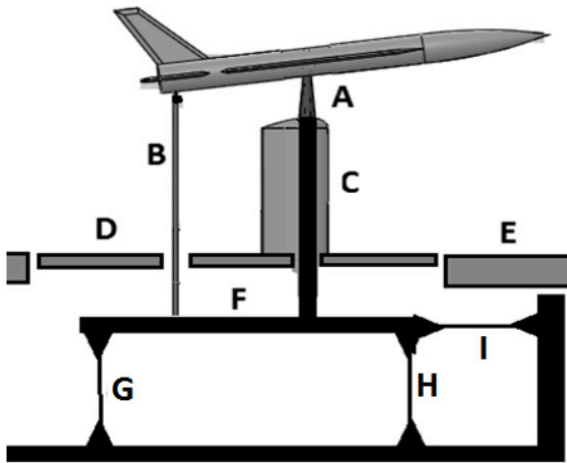


Figura 3 – balanza tipo plataforma

Se caracteriza por tener tres soportes: dos soportes principales “A” que sostienen la maqueta en sus semialas y un soporte trasero “B” que sostiene a la maqueta desde el fuselaje. Este soporte trasero es móvil de modo que permite regular el ángulo de ataque (la maqueta pivota en sus soportes alares).

Los tres soportes tienen sus propios carenados “C” con el fin de mejorar la medición de resistencia pues se evita medir la resistencia de los soportes junto con la resistencia de la maqueta. En algunos diseños el soporte trasero no se carena por la complejidad de su sistema de movimiento.

Los carenados de los soportes a su vez están montados en un disco rotante “D” contenido en el piso de la cámara de ensayos “E”. Estos carenados en ningún momento tienen contacto mecánico con los soportes. Los tres soportes van montados en un marco flotante “F”.

El marco flotante está vinculado al piso por medio de articulaciones “G”, “H” y “I” que descomponen sus grados de libertad y permiten medir cada componente de fuerza por separado. Con este sistema pueden medirse 3 fuerzas y 3 momentos, es decir, se tiene un sistema de 6 grados de libertad.

DISEÑO PRELIMINAR

Basado en el concepto de “balanza externa de plataforma” se propuso un diseño preliminar que se muestra en la Figura 4.

Se trata de un marco flotante “A” montado mediante cuatro articulaciones sobre un marco soporte fijo “B”. Estas articulaciones son del tipo “pushrod” y restringen los movimientos del marco flotante de modo que solo disponga de 3 grados de libertad: dos traslaciones y una rotación (contenidas en el mismo plano). Estos movimientos se restringen mediante 3 celdas de carga, cuyas reacciones de vínculo permiten determinar la resistencia, sideforce y momento de guiñada.

Sobre el marco flotante hay un disco rotante “C” que permite controlar la posición de guiñada de la maqueta. Este disco contiene el sistema de medición de los 3 grados de libertad restantes. Esto se logra gracias a los soportes “E”, “F” y “G” que permiten medir las fuerzas verticales axiales a los mismos mediante celdas de carga. Combinando estas mediciones es posible determinar la sustentación, momento de cabeceo y momento de rolido de la maqueta.

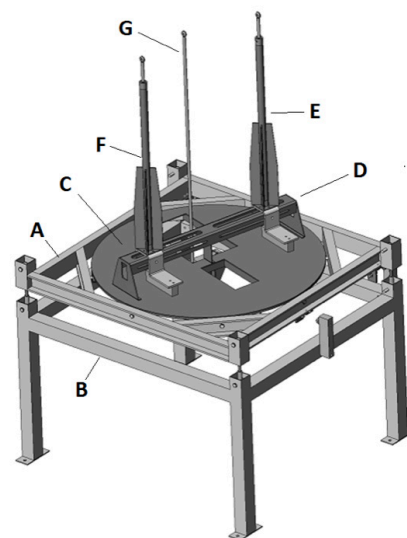


Figura 4 – balanza externa del LAYF

Los dos soportes principales van montados sobre un riel transversal “D” que permite regular la separación entre los soportes para poder montar diferentes maquetas.

En las Figuras 5 y 6 se muestra el detalle del mecanismo de los soportes principales.

El soporte principal consta de un tubo exterior que contiene en su interior una varilla de acero. Esta varilla puede moverse axialmente gracias a dos rodamientos lineales montados en los extremos del tubo. Esto se aprecia en la Figura 5.

En la Figura 6 se observa como ese movimiento axial de la varilla es restringido por una celda de carga. De esta forma es posible medir la fuerza axial que actúa sobre la varilla, independientemente de las cargas transversales.

En síntesis, los tres soportes principales permiten medir únicamente las cargas verticales que actúan sobre la maqueta, mientras que el marco flotante mide las cargas contenidas en el plano horizontal. Todas estas fuerzas son medidas con celdas de carga de tipo viga de 10Kg de capacidad, excepto por la celda de resistencia, que es una celda de 5Kg.

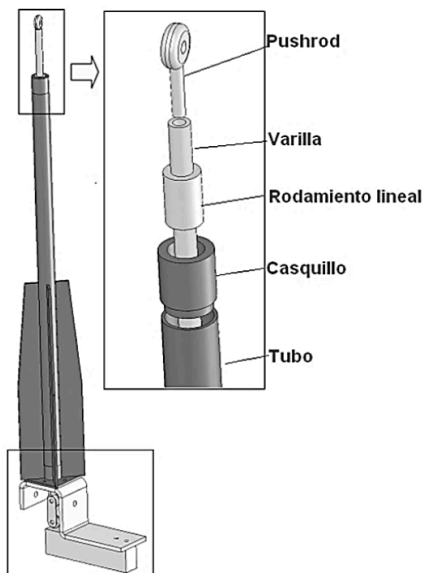


Figura 5 – mecanismo del soporte principal

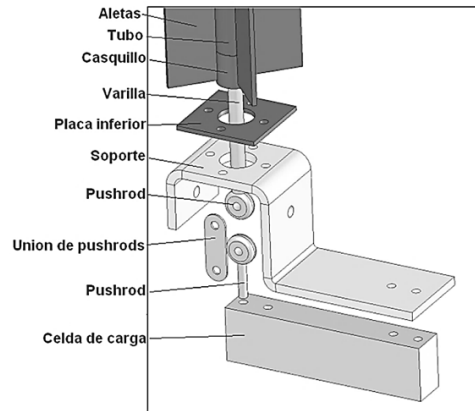


Figura 6 – vinculación a la celda de carga.

CONSTRUCCIÓN

Una vez finalizado el diseño preliminar, se procedió a su diseño de detalle y posterior construcción. En esta etapa se utilizaron productos standard disponibles en el mercado como por ejemplo celdas de carga, caños estructurales, rodamientos y guías lineales. Se tercerizó la construcción de muy pocas piezas como el corte laser del disco rotante o el plegado del riel transversal.

En la Figura 7 se puede ver la balanza construida y en la Figura 8 ya montada en el túnel de viento mayor del LAYF.

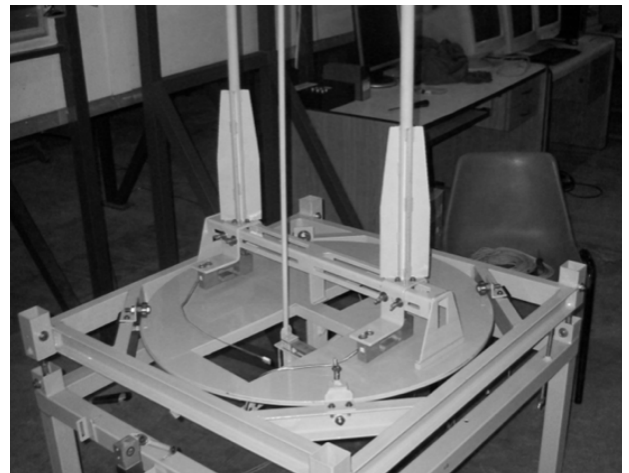


Figura 7 – balanza construida

SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Al momento del inicio del proyecto, el laboratorio ya contaba con un sistema de adquisición de datos para la balanza de 3 grados de libertad existente. El objetivo fue entonces adaptar ese sistema para poder operar la balanza de 6 grados de libertad.

El único componente que se debió diseñar y construir fue el amplificador de 6 canales, que permite adaptar la señal de salida de las celdas de carga al rango de medición de tensión de la placa adquisidora. El plano del circuito se observa en la Figura 9



Figura 8 – balanza montada en el túnel de viento.

Se trata de un amplificador diferencial que utiliza dos amplificadores operacionales para incrementar la magnitud de la señal de tensión de la celda de carga en unas 50 veces. En este diseño se utilizó el esquema de amplificación diferencial ya que tiene alta inmunidad al ruido externo, atenuándolo a niveles imperceptibles. Esta elección se debe a que el laboratorio es un ambiente particularmente ruidoso: la presencia del variador de frecuencia y los motores eléctricos del túnel de viento suelen generar perturbaciones electromagnéticas importantes.

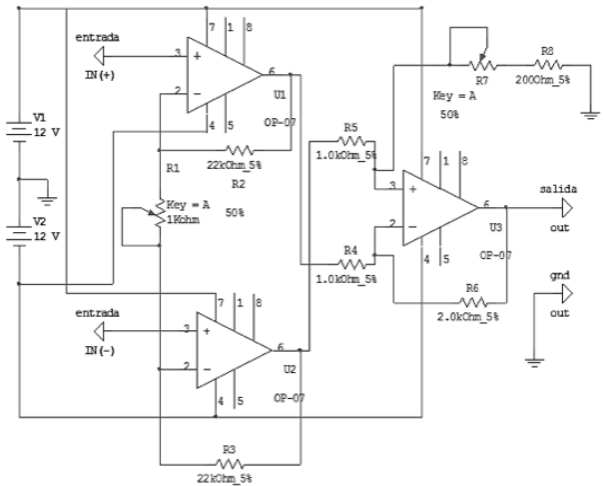


Figura 9 – circuito de los amplificadores.

CALIBRACIÓN

Esta es la etapa más crítica en el desarrollo de la balanza ya que permite obtener la matriz que relaciona las cargas aplicadas en la balanza con las cargas medidas por el sistema de adquisición de datos (Rae and Pope, 1984).

La primera etapa de este proceso consta en la calibración de cada una de las celdas de carga. Para ello se la desmonta de la balanza y se le aplican una familia de cargas conocidas “Pe”

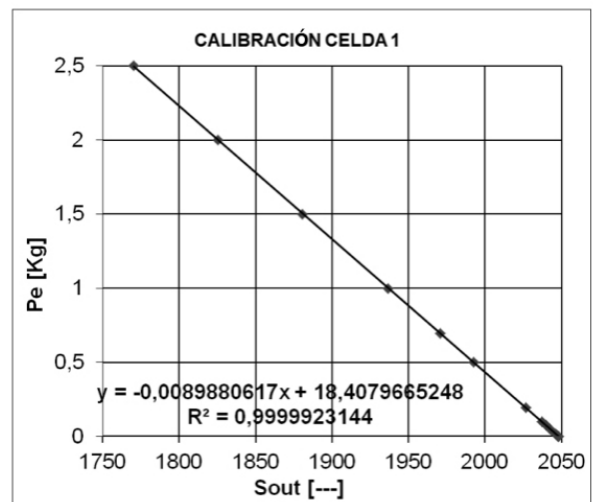


Figura 10 – calibración de celdas de carga.

(masas de calibración). Para cada carga aplicada se mide la señal de salida del sistema de medición "Sout".

Finalmente se determina su recta de regresión lineal como se muestra en la Figura 10, y luego se carga la pendiente de la misma en el software del sistema de adquisición. Con esto ya queda calibrada la celda de carga.

Para verificar que la calibración fue correcta, se aplica nuevamente una carga conocida y se observa que el sistema de adquisición indique el valor correcto (En [Kg]). Este proceso se repite con cada celda de carga conectada a su canal de adquisición correspondiente (No se deben intercambiar las caldas y los canales de adquisición durante este proceso).

El criterio para validar la precisión de la calibración es que el valor del coeficiente de correlación lineal "R2" sea muy elevado. En particular se tomaron

como válidas las calibraciones de las celdas cuando el número decimal diferente de 9 aparecía recién en la sexta cifra significativa (Yen and Bräuchle, 2000).

Una vez calibradas las celdas de carga, se las volvió a montar en la balanza y se procedió a calibrar la balanza propiamente dicha. Para la calibración de la balanza se utilizó un sistema de poleas que permite aplicar las cargas según direcciones ortogonales. Esto se observa en la Figura 11 para el caso de calibración en sustentación en el soporte izquierdo.

El objetivo de la calibración de la balanza es determinar su matriz característica, la cual relaciona las cargas aplicadas con las cargas medidas según se indica en la expresión (1):

$$\{F_m\} = [M_b]\{F_a\} \tag{1}$$

En donde $\{F_m\}$ es el vector de cargas medidas, $\{F_a\}$ es el vector de cargas aplicadas y $[M_b]$ es la matriz de la balanza.

$$\{F_m\} = \{F_{m1}, F_{m2}, F_{m3}, F_{m4}, F_{m5}, F_{m6}\} \tag{2}$$

$$\{F_a\} = \{F_{a1}, F_{a2}, F_{a3}, F_{a4}, F_{a5}, F_{a6}\} \tag{3}$$

$$[M_b] = \begin{bmatrix} \theta_{11} & \theta_{12} & \theta_{13} & \theta_{14} & \theta_{15} & \theta_{16} \\ \theta_{21} & \theta_{22} & \theta_{23} & \theta_{24} & \theta_{25} & \theta_{26} \\ \theta_{31} & \theta_{32} & \theta_{33} & \theta_{34} & \theta_{35} & \theta_{36} \\ \theta_{41} & \theta_{42} & \theta_{43} & \theta_{44} & \theta_{45} & \theta_{46} \\ \theta_{51} & \theta_{52} & \theta_{53} & \theta_{54} & \theta_{55} & \theta_{56} \\ \theta_{61} & \theta_{62} & \theta_{63} & \theta_{64} & \theta_{65} & \theta_{66} \end{bmatrix} \tag{4}$$

Donde los coeficientes θ_{ii} (Con $i=1,6$) de la matriz representan los coeficientes de sensibilidad de la balanza. Para determinar estos coeficientes, se



Figura 11 - utilaje de calibración de la balanza.

aplican cargas secuencialmente en cada grado de libertad manteniendo nula la carga en los grados de libertad restantes.

Por ejemplo para el caso de F_{a1} distinto de cero y $F_{a2}=F_{a3}=F_{a4}=F_{a5}=F_{a6}=0$ obtenemos la expresión (5):

$$\begin{Bmatrix} F_{m1} \\ F_{m2} \\ F_{m3} \\ F_{m4} \\ F_{m5} \\ F_{m6} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_{11} \\ \theta_{12} \\ \theta_{13} \\ \theta_{14} \\ \theta_{15} \\ \theta_{16} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_{a1} \\ F_{a1} \\ F_{a1} \\ F_{a1} \\ F_{a1} \\ F_{a1} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \theta_{11} \\ \theta_{12} \\ \theta_{13} \\ \theta_{14} \\ \theta_{15} \\ \theta_{16} \end{bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{m1}/F_{a1} \\ F_{m2}/F_{a1} \\ F_{m3}/F_{a1} \\ F_{m4}/F_{a1} \\ F_{m5}/F_{a1} \\ F_{m6}/F_{a1} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

En síntesis, los coeficientes de sensibilidad representan la relación entre las cargas aplicadas y las cargas medidas. Específicamente, representan el valor de la pendiente de la curva de F_{mi} vs F_{ai} . Un ejemplo de esta curva se observa en la Figura 12.

Esta curva se determinó aplicando cargas de down-force en el soporte 2 (soporte principal derecho). Para cada carga aplicada se midió la fuerza en la celda de carga de ese soporte. La recta de regresión muestra un alto valor de coeficiente de correlación lineal "R2", lo cual indica que la respuesta es muy lineal. Asimismo se observa que la pendiente de la recta de regresión lineal (el coeficiente de sensibilidad) es muy próximo a 1. Esto significa que el sistema de medición, a pesar de su simpleza, genera muy poco enmascaramiento de la medición.

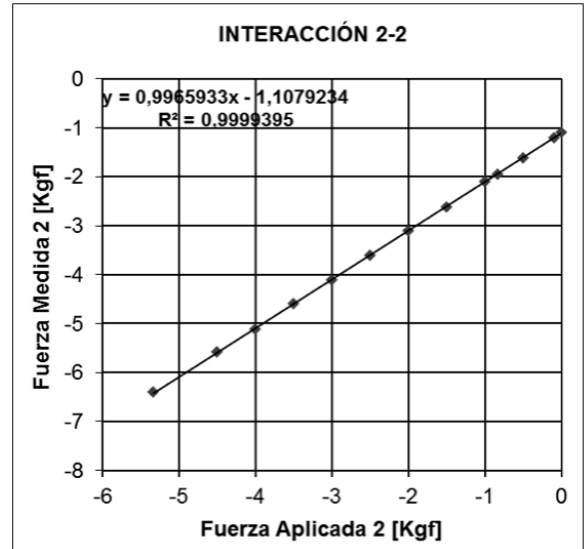


Figura 12 - coeficiente de sensibilidad θ_{22} .

En la Figura 13 se repite el procedimiento: ahora se carga axialmente el otro soporte principal, siempre midiendo la fuerza en la celda de carga del soporte N°2.

Lógicamente, la pendiente de esta regresión lineal es prácticamente nula pues la celda de carga 2 solo mide las fuerzas axiales en el soporte 2. Como las cargas axiales se aplican ahora en el soporte 1 (izquierdo), la celda de

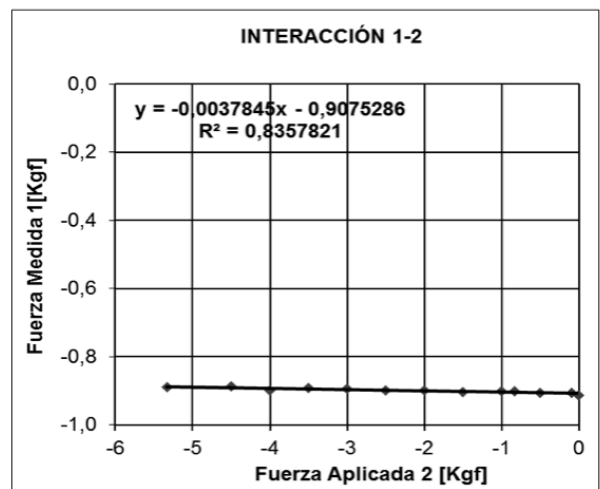


Figura 13 - coeficiente de sensibilidad θ_{12} .

carga del soporte 2 no acusa medición. Lo mismo ocurre si se aplican cargas axiales en el soporte 3.

La Figura 14 muestra el gráfico de la medición de fuerza en la celda de carga N°2 cuando se aplica una fuerza de resistencia en ese soporte. En teoría la curva debería tener pendiente nula, sin embargo se observa cierta tendencia lineal. Esto se debe a dos factores: por un lado el posible desalineamiento del sistema de aplicación de cargas mediante cables y poleas, y por otro lado la deformación del soporte frente a la carga de resistencia. Lo que ocurre es que el soporte se inclina hacia atrás por efecto de la carga de resistencia y por lo tanto una parte de esta carga es transferida axialmente a lo largo del soporte hacia la celda de carga.

Esto explica esa variación proporcional con la carga aplicada. Si bien este acoplamiento es indeseado, con esta calibración es posible eliminarlo de las mediciones. Un fenómeno similar ocurre con las cargas de sideforce y momento de guiñada (No se incluye aquí por simplicidad).

Todas las mediciones de las celdas de carga de los tres soportes mostraron comportamientos lineales durante su calibración, sin embargo, en las celdas de carga del marco flotante se observaron comportamientos no lineales.

Un ejemplo de esto se aprecia en la Figura 15, correspondiente al ensayo de calibración del marco flotante frente a cargas de sideforce. Se observa que cuando las cargas aplicadas son positivas el comportamiento es lineal. Sin embargo, si se invierte el sentido de las cargas aplicadas, aparece un comportamiento no lineal. Esta anomalía se debe que el marco flotante está apoyado sobre sus cuatro articulaciones de forma inestable: tiende a desplazarse hacia un lado u otro de su posición original, sin mostrar tendencia a volver a su posición inicial (articulaciones perfectamente verticales).

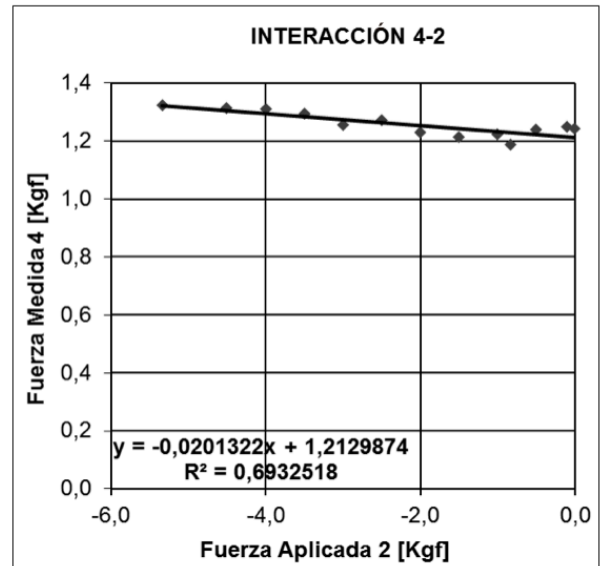


Figura 14 – coeficiente de sensibilidad θ42.

Esto se soluciona simplemente invirtiendo la vinculación del marco flotante con el marco estructural, es decir que el marco flotante debe quedar colgado de las articulaciones ya que el propio peso tendería a mantenerlas alineadas.

Este fenómeno de no linealidad apareció en los 3 grados de libertad del marco flotante. Si bien esto

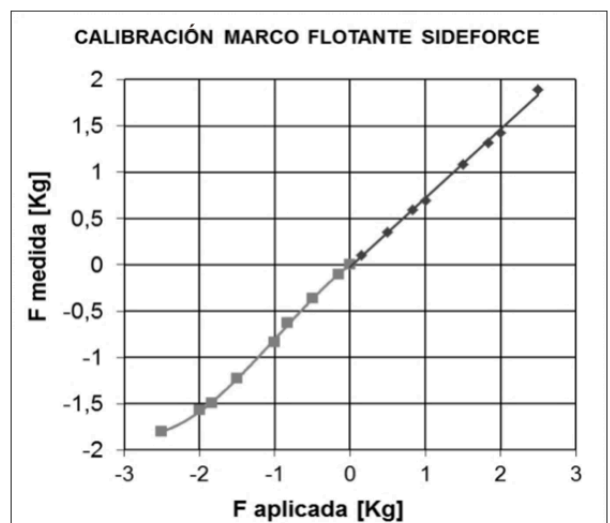


Figura 15 – no linealidad del marco flotante.

limita un poco la operación de la balanza, aún es posible medir en estos grados de libertad si se trabaja en la zona de linealidad.

EVALUACIÓN OPERACIONAL

En primera instancia se evaluó el efecto de los carenados. A tal fin se desmontó el soporte trasero y se midió la resistencia de los soportes principales con y sin los carenados. El resultado se observa en la Figura 16.

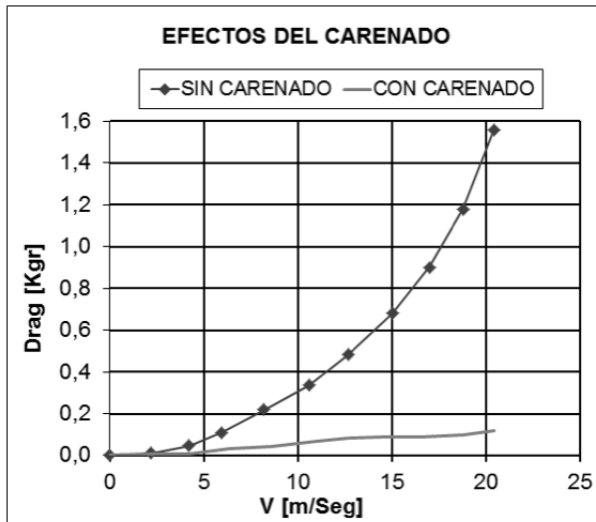


Figura 16 - efectos del carenado.

Se aprecia que los carenados ayudan a reducir drásticamente la magnitud de la resistencia propia de los soportes (tara de la balanza).

Asimismo, este ensayo permitió determinar el valor de la tara en función de la velocidad para los dos soportes principales. La tara del soporte trasero es variable ya que su longitud expuesta al aire cambia con el ángulo de ataque. No obstante, por tratarse de una varilla redonda, puede calcularse su resistencia con precisión. Estos valores de resistencia deben tenerse en cuenta para corregir las mediciones de la balanza.

Finalmente se procede a realizar el ensayo en túnel de viento de un ala de calibración. Se trata de un ala rectangular de alargamiento 3,6 con perfil simétrico NACA 0012 que se observa en la Figura 17. Si bien el ala tiene flaps y alerones ranurados, el ensayo se realizó sin deflexión de superficies y con las ranuras selladas. La velocidad de corriente libre del ensayo fue de 21m/Seg, correspondiente a un número de Reynolds de 350.000.



Figura 17 - ala de calibración.

Las mediciones se contrastaron con los resultados semiempíricos correspondientes a esta planta alar. A tal fin se utilizó el Método de Glauert, usando como dato de entrada las curvas experimentales del mismo perfil. Estas curvas bidimensionales fueron obtenidas con la otra balanza del laboratorio (de 3 grados de libertad) en el mismo túnel de viento, a igualdad de número de Reynolds e intensidad de turbulencia.

En los gráficos siguientes, los resultados analíticos se indican en línea continua mientras que los datos del ensayo de la balanza están indicados con puntos.

La curva de sustentación de la Figura 18 muestra una muy buena correlación entre los puntos experimentales y los semiempíricos en la zona lineal hasta la zona de cúspide. En la zona no lineal los valores medidos siguen la misma tendencia que los valores

de referencia salvo pequeñas diferencias en los valores absolutos. No obstante a grandes ángulos de ataque positivos ($+50^\circ$) aparece una sobre estimación de la sustentación producto de la proximidad del ala con los carenados. Las técnicas tradicionales no permiten corregir estos efectos por lo cual es una limitación operativa.

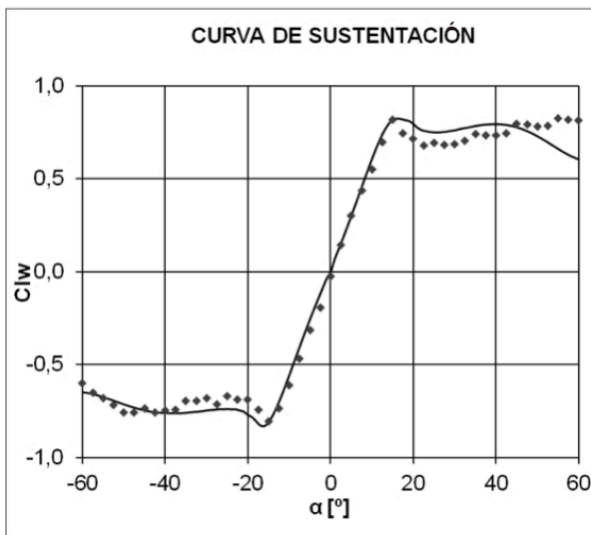


Figura 18 - curva de sustentación del ala.

La curva de resistencia de la Figura 19 muestra una muy buena correlación entre las mediciones de balanza y los datos semiempíricos, salvo a grandes ángulos de ataque (por lo explicado anteriormente).

Finalmente, la curva de momento de cabeceo de la Figura 20 muestra nuevamente una muy buena correlación de resultados. Asimismo se aprecia la presencia de una zona de $C_m = cte$ (definición de centro aerodinámico) en la zona lineal.

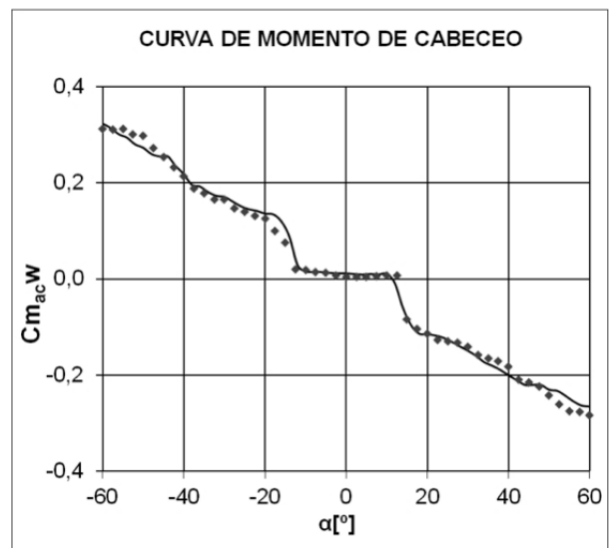


Figura 20 - curva de momento de cabeceo del ala.

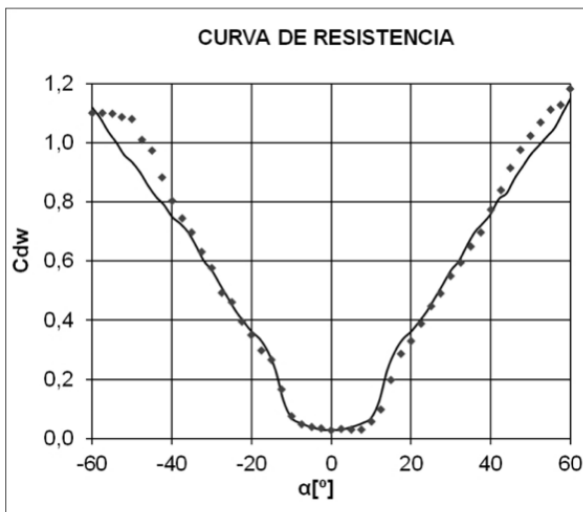


Figura 19 - curva de resistencia del ala.

CONCLUSIONES

El desarrollo de este prototipo de balanza externa ha resultado realmente satisfactorio. Permitió evaluar diferentes arquitecturas de elementos sensibles a fuerzas aerodinámicas, obteniéndose muy buena información cualitativa y cuantitativa de utilidad para proponer un diseño definitivo de mejor performance. Asimismo, se implementó exitosamente la técnica de calibración matricial, por excepción de la limitación generada por las no linealidades.

Los resultados de la evaluación del ala de calibración mostraron una muy buena correlación entre las mediciones y los valores semiempíricos.

El equipo actualmente se encuentra operativo y ha sido utilizado exhaustivamente en diversas campañas de ensayos en túnel de viento, tanto para actividades de I+D como académicas.

TRABAJOS FUTUROS

Para el diseño de la balanza definitiva se prevé evaluar la implementación de "Flexure pivots" como reemplazo de las articulaciones actuales tipo pushrod. Asimismo se

realizaran pruebas de calibración con el marco flotante suspendido (configuración estable). Estas dos medidas apuntan a mejorar la linealidad del sistema de medición. Por otro lado se tiene previsto incluir en las mediciones las correcciones por presencia de paredes y carenados. Asimismo se prevé proponer un nuevo diseño de utilaje de calibración para agilizar el procedimiento de determinación de la matriz de la balanza.

AGRADECIMIENTOS

Al estudiante Mariano Vicharelli, quien ha participado activamente en la construcción de la balanza.

REFERENCIAS

AGARD, "Cooperative Programme on Dynamic Wind Tunnel Experiments for Manoeuvring Aircraft", AGARD-AR-305, Chapter 2, 1996.

Bret, Vieira, "Les Balances Aérodynamiques", ONERA, 34-56, (2013).

Gorlin, Slezinger, "Wind Tunnel & Their Instrumentation", First edition, Wiener Bindery Ltd., Jerusale, 326-362, (1966).

Rae, Pope, "Low-Speed Wind Tunnel Testing", Second

edition, John Wiley & Sons, New York. 152-161, (1984).

Yen, Bräuchle, "Calibration and Uncertainty Analysis for the UC Davis Wind Tunnel Facility", UCD Wind Tunnel, 2-28, (2000).

Selig, "Low Reynolds Number Airfoil Design", NATO Research and Technology Organization (RTO) Applied Vehicle Technology (AVT) Panel, Germany, 24-28 November 2003, 1-43, 2003.