

ASPECTOS DEL CONTROL DE FLUJO CON UN FLAP GURNEY ROTANTE SOBRE UN PERFIL NACA 4412

Mauricio E. Camocardi^{a,b}; Juan S. Delnero^{a,b}; Julio Marañón Di Leo^{a,b}; Jorge L. Colman Lerner^a;
Federico Muñoz^{a,c} y Mariano O. García Sainz^{a,c}

^aLaboratorio de Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental, Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería (UNLP), Calle 116 e/47 y 48, (1900) La Plata, Argentina.

^bConsejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Av. Rivadavia 1917, (1033) Ciudad de Buenos Aires, Argentina.

^cComisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC), Calle 526 entre 10 y 11 CP1900, La Plata, Argentina.
jmaranon@ing.unlp.edu.ar

Palabras Clave: flap Gurney, control activo de flujo, capa límite, perfil alar

En el Laboratorio de Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental, Dto. de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería (UNLP), se realizaron ensayos con un modelo de ala con perfil NACA 4412, provisto de un miniflap Gurney móvil en el intradós, ubicado al 8%*c* desde el borde de fuga (*c*: cuerda del perfil). El modelo de ala, sin torsión, tiene 50cm de cuerda y 80cm de envergadura. El miniflap, de longitud 79.5cm y altura 2%*c*, posee movimiento de rotación alrededor de su eje, a través de un sistema electromecánico ubicado dentro del modelo. Los ensayos consistieron en la medición de la distribución de velocidades instantáneas en la estela cercana del perfil y en la estela lejana, a los efectos de la respectiva comparación. Todo esto para tres frecuencias de rotación del miniflap: 26Hz, 33Hz y 40Hz. Las mismas se midieron con un tacómetro laser. El objetivo principal fue el de alcanzar un mayor conocimiento de los efectos del mini-flap dinámico, moviéndose a diferentes frecuencias, sobre la estela vorticosa asimétrica cercana al borde de fuga y sobre la estela lejana, comparando con los efectos que produce dicho mini-flap fijo. Las mediciones de las velocidades de la estela se efectuaron aguas abajo al 2%*c* (estela cercana, Posición 1) y 75%*c* (estela lejana, Posición 2). En la Posición 1 se midió en 20 puntos en la vertical y en la Posición 2 en 30 puntos en la vertical, separados cada uno una distancia vertical de 0.4%*c*. La velocidad media aguas arriba fue de 10m/s. Los resultados mostraron que el mini-flap en movimiento cambia las características de la estela respecto al caso fijo. El pico de alrededor de los 100 Hz en los espectros de densidad de potencia, vinculado a la estructura de la turbulencia, propia del mini-flap fijo (dispositivo pasivo de control), desaparece en la estela generada por el dispositivo en movimiento (sistema activo de control), dando lugar a picos prácticamente coincidentes con la frecuencia de oscilación del dispositivo y picos de frecuencias múltiplos de ésta. Estos últimos se atenúan cada vez más a medida que aumenta la frecuencia de oscilación del dispositivo (mini-flap). Estos resultados ameritan la realización de más experimentos, incorporando la determinación de los coeficientes aerodinámicos y, de esta manera, poder llegar a estudiar cómo afectan a éstos las frecuencias del mini-flap.

INTRODUCCIÓN

Todos los cuerpos que generan sustentación implican que están produciendo circulación, a medida que se desplazan en el seno de un fluido. Por ejemplo, en el caso de un avión, la circulación producida da lugar a una capa vorticosa inmediatamente detrás del ala, cuyo eje es aproximadamente en la dirección de la corriente, constituyendo la estela del avión. Las estructuras vorticosas que integran dicha estela se enrollan en vórtices que se propagan lejos del ala. La estela cercana es asimétrica debido a la interacción entre el flujo externo y la capa límite, entre las superficies superior (baja presión) y la inferior (alta presión). Además dicha estela cercana está influenciada por las cargas aerodinámicas y las características del perfil. Desde hace años los diseñadores, en su búsqueda de alcanzar mayores sustentaciones, han recurrido a distintos dispositivos de hipersustentación. La carga transportable, el alcance y la autonomía de los aviones subsónicos de gran porte están, en muchos casos, limitadas por la performance de dichos dispositivos. Los mismos son

complejos, en general, consistiendo en dispositivos de borde de ataque (slats) y uno o más de borde de fuga (Fowlers simples y múltiples, por ejemplo). Los costos de mantenimiento y su peso impulsaron a los diseñadores a buscar dispositivos más livianos y mecánicamente menos complejos, buscando mantener o mejorar la performance de los dispositivos clásicos ya mencionados. En ese contexto, para alcanzar altos C_L durante el despegue, la aproximación y el aterrizaje, serán necesarios nuevos desarrollos para incrementar la sustentación y controlar la separación de la capa límite. Uno de esos desarrollos modernos es el flap de Gurney. El mismo consiste en una placa cuya altura es del orden del 1-2% c , ubicada en el intradós, lo más cercana posible al borde de fuga. Las aplicaciones del mismo van desde el incremento del $C_{l_{máx}}$ en las palas de los rotores eólicos, reducción de la resistencia, el ruido y las vibraciones en perfiles subsónicos y transónicos, mejorar la performance de los rotores de helicópteros y el control de flujo en vehículos aéreos no tripulados, etc.

Desde los trabajos pioneros de Liebeck en 1978, varios investigadores exploraron la viabilidad y eficiencia de los flap Gurney para incrementar los coeficientes de sustentación de sección (Neuhart y Pendergraft, 1988). Liebeck realizó experiencias con flaps Gurney de 1.25% c de altura, ubicados perpendicularmente sobre el intradós en el borde de fuga de un perfil Newman. Así obtuvo un incremento del ángulo de ataque para cero sustentación (en términos absolutos) y también en la resistencia. Neuhart y Pendergraf (1988) realizaron experimentos con visualización de flujo en agua, encontrando que el flap de Gurney producía un desplazamiento del punto de remanso posterior en el borde de fuga hacia el borde del flap. Más aún, este efecto fue mejorado incrementando la altura del flap. Storms y Jang (1993) investigaron fenómenos similares en experiencias en túnel de viento con un perfil NACA 0012, con un Gurney flap de 0.5% c de altura. Ellos hallaron que tal flap (o mini-flap) incrementaba el coeficiente de sustentación pero, en menor proporción, también el coeficiente de resistencia. También obtuvieron una mejora en la eficiencia aerodinámica con dicho mini-flap Gurney. Giguère y otros (1995) observaron en sus experimentos, que la eficiencia aerodinámica puede ser mantenida, con poco incremento de la resistencia, si la altura del mini-flap permanece dentro del espesor de la capa límite (ver también Wang y otros, 2006).

Todos los trabajos han llevado a la conclusión de que, si bien el mini-flap fijo en el borde de fuga o muy cerca sobre el intradós, incrementaba la sustentación, también incrementaba la resistencia. Se observó que dicho mini-flap generaba una capa vorticosa que interactuaba en la estela cercana, con el flujo proveniente del extradós, descendiendo el punto de remanso posterior y con ello aumentando la circulación y, por ende, la sustentación, y en otros instantes producía efectos contrarios. Es así que comenzó a pensarse en el empleo de dichos mini-flaps como dispositivos activos de control de flujo, buscando frecuencias de movimiento que dieran lugar a capas vorticosas que, al interactuar con el flujo externo del extradós, incrementaran la circulación alrededor del perfil. Algunos investigadores del control activo de flujo ensayaron el empleo de dispositivos derivados del campo de las micro y nano electromecánica, ciencias de los materiales y control, destinados a vehículos aéreos no-tripulados de pequeño porte (UAVs), sin el empleo de los métodos clásicos de control (Patel y otros, 2006), Mayda y otros (2005) y van Dam y otros (2007), propusieron el uso de micro-placas, con capacidad de movimiento, para efectuar control activo de flujo en palas de rotores de aerogeneradores. Matalanis y otros (2007), en un amplio informe, sugirieron el uso de mini-flaps Gurney activos, para disminuir la intensidad y desarrollo de la estela de los aviones. Geissler y otros (1998) efectuaron un amplio estudio computacional acerca de los efectos aerodinámicos positivos, como el aumento de sustentación y de la eficiencia aerodinámica de un perfil provisto de un flap oscilante. Deman y otros (2007) realizaron ensayos con un perfil dotado de un miniflap rotante, alrededor de un eje según su envergadura, para frecuencias entre 1 y 10 Hz. Ellos encontraron que las cargas aerodinámicas crecían a medida que aumentaba la frecuencia del mini-flap. No obstante, los beneficios en el incremento de sustentación eran menores que cuando el mini-flap estaba quieto. Asimismo observaron que las frecuencias de los desprendimientos provenientes del mini-flap oscilante eran más altas que las propias de oscilación del mismo. En este punto hay que tener cuidado en el análisis de la estela, de "separar" los desprendimientos propios

del perfil a medida que aumenta el ángulo de ataque y los de la estela del mini-flap móvil. Por ello, trabajos como éste, motivaron a los autores de este trabajo a comenzar a investigar la estela de un perfil con un mini-flap oscilante, para frecuencias de oscilación más altas que las empleadas por Deman y otros (2007), con el propósito de investigar con más detalle si otras frecuencias afectan y cómo la conformación de la estela y, por ende, las cargas aerodinámicas. En este primer trabajo se incursionó en las mediciones de la estela y, en futuros trabajos, se medirán las fuerzas aerodinámicas buscando su relación con las distintas estelas generadas por las diferentes frecuencias.

METODOLOGÍA

En el túnel de viento de capa límite del Laboratorio de Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental (LaCLyFA) del Departamento de Aeronáutica de la Facultad de Ingeniería (UNLP), de circuito cerrado de 1.4m x 1m de sección transversal y 7.5m de longitud, fue ensayado un modelo de ala con el perfil NACA 4412. Dicho modelo poseía un mini-flap tipo Gurney, a lo largo del intradós al 8% c del borde de fuga (c = cuerda del perfil) con capacidad de efectuar un movimiento oscilante alrededor de su eje a lo largo de la envergadura. La frecuencia de oscilación podía variarse.

El modelo fue montado entre dos paneles laterales dobles, cuyos bordes de fuga son capaces de moverse a lo largo de la envergadura, con el propósito de mantener un flujo bidimensional en la zona de prueba. Los ensayos realizados consistieron en la medición de la estela en dos posiciones según el eje-x, al 2% c y al 75% c (Posiciones 1 y 2, respectivamente) corriente abajo desde el borde de fuga del perfil, en la primera posición se midió en 20 puntos en la dirección vertical y en 30 en la segunda posición, con una separación de 0.4% c entre cada uno. Elegimos tomar datos en más puntos según la vertical en la Posición 2 pues la estela va ampliándose a medida que se aleja del perfil.

El túnel de viento consta de deflectores y acondicionadores de flujo, corriente arriba de los modelos, a los efectos de la “reproducción” de los flujos turbulentos que se deseen, tanto en sus velocidades medias como en sus componentes fluctuantes. Las mediciones se realizaron, en todos los casos, con una configuración del túnel de viento correspondiente a una turbulencia menor o igual al 1.8%, sin la utilización de elementos de rugosidad o deflectores.

En la Figura 1 se observa un esquema en planta de la disposición del modelo dentro de la sección de prueba del túnel.

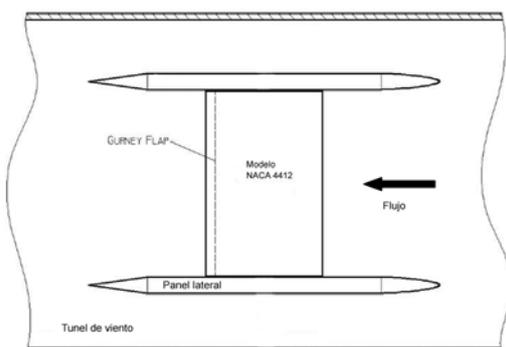


Figura 1: Esquema del modelo montado dentro del túnel de viento.

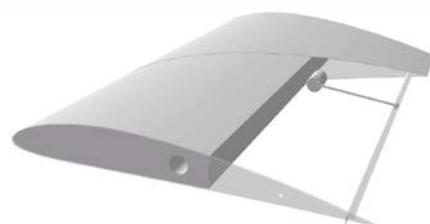


Figura 2: Diagrama, simplificado, del mecanismo implementado en el ala

Dicho modelo de ala, sin torsión geométrica, tenía 50cm de cuerda (c) y 80cm de envergadura, siendo el perfil utilizado un NACA 4412. El mini-flap tipo Gurney, de altura 2% c , espesor 1mm y longitud según la envergadura del modelo, se encontraba montado en el intradós a una distancia del 8% c desde el borde de fuga. Poseía capacidad de oscilación rotativa alrededor de un eje según la envergadura, accionado por un motor eléctrico de 28mm diámetro, con un cigüeñal, biela y acople al mini-flap, todo dentro del modelo, con capacidad de modificar la frecuencia de rotación del motor a través de un pequeño variador de frecuencia y, con ello, la de oscilación del mini-flap. Las Figura 2 muestra un diagrama básico del mecanismo del modelo.

PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES

Las experiencias se efectuaron para un número de Reynolds de 326000, basado en la cuerda del perfil y la velocidad media de la corriente libre aguas arriba del modelo (10 m/seg, a la altura del modelo, 1,5 metros adelante). La intensidad de la turbulencia fue del 1.8% (la mínima para este túnel de viento). Las experiencias se efectuaron en dos etapas: la primera consistió en los ensayos con el modelo "limpio" (esto es, con el mini-flap dentro del ala) y con el mini-flap sin movimiento saliendo del ala (actuando como dispositivo pasivo de control). La segunda etapa correspondió al mini-flap en movimiento, buscando analizar la influencia de la frecuencia del movimiento sobre la conformación de la estela. En esas condiciones, para ángulo de ataque cero, se midió el campo de velocidades instantáneas en dos posiciones detrás del borde de fuga, empleando un sistema de anemometría de hilo caliente de seis canales Dantec Streamline, con sensores tipo X-probe. Para cada posición "x" y una dada frecuencia del mini-flap, se efectuaron varias mediciones según "y", siendo "x" el eje horizontal e "y" el vertical. Las frecuencias de oscilación del mini-flap fueron 26, 33 y 40 Hz. Las posiciones "x" fueron dos, una a 2%*c* y la otra a 75%*c*, detrás del borde de fuga (ver Figura 3). La frecuencia de adquisición fue de 600Hz, filtrada a 300Hz. Se tomaron 8192 muestras por canal en cada punto de medición. Todas las frecuencias del mini-flap se midieron con tacómetro laser.

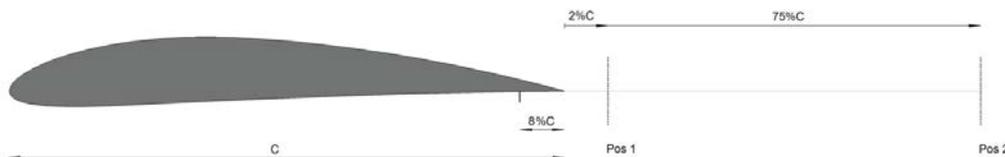


Figura 3: Diagrama de las posiciones de medición para el modelo

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Las mediciones de la estela se efectuaron al 2%*c* (Posición 1) y al 75%*c* (Posición 2) según la línea de la cuerda del perfil, para 20 puntos verticales en la primera y 30 puntos verticales en la segunda posición, siendo la separación entre puntos verticales de 0.4%*c*. El ángulo de ataque fue de 0° y la velocidad media de la corriente aguas arriba, 10 m/s. Todas las mediciones se efectuaron para el perfil sin el dispositivo, el perfil con el Gurney desplegado fijo y el perfil con el Gurney en movimiento para las tres frecuencias mencionadas. Dada la importante cantidad de datos involucrados, hemos seleccionado dos puntos en cada posición de medición, a saber, en una línea horizontal a nivel de la altura del mini-flap y otra a 6 puntos por debajo de la primera según la correspondiente vertical. Dichos puntos nos parecen adecuados a la hora de caracterizar, en una primera aproximación, la estela detrás del Gurney y del perfil. En consecuencia, nos referiremos en lo que sigue a los espectros de densidad de potencia en dichos dos puntos de cada posición (es decir, cuatro puntos de la estela entre ambas posiciones), de la componente lateral de la velocidad.

a) Perfil sin dispositivo: La Figura 4 (Posición 1) y la Figura 5 (Posición 2) nos muestran los espectros de densidad de potencia correspondientes a ambos puntos. Son concordantes con lo esperable para perfil solo (Bacchi y otros, 2006; Wassen y otros, 2007).

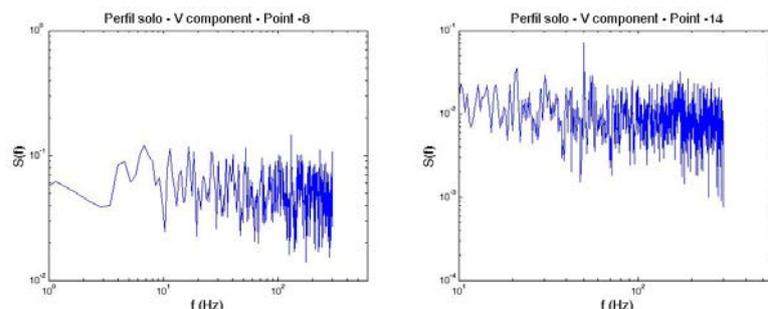


Figura 4: Espectros de la componente v de la velocidad en la estela en la posición 1, para el perfil solo.

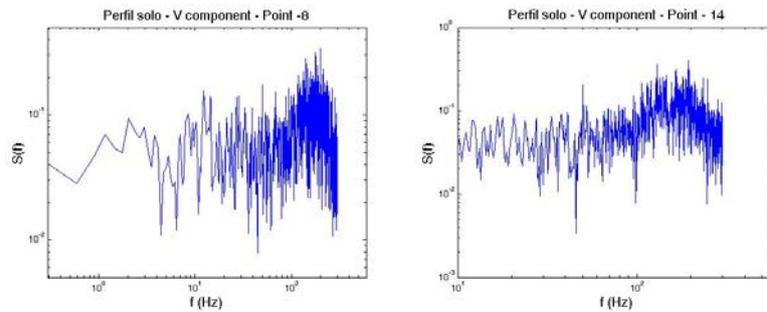


Figura 5: Espectros de la componente v de la velocidad en la estela en la posición 2, para el perfil solo.

- b) Perfil con Gurney fijo (desplegado): La Figuras 6 y la Figura 7 nos muestran los espectros de densidad de potencia para las Posiciones 1 y 2, respectivamente, en los puntos de medición mencionados. En la estela cercana y en la lejana más pronunciado, se observa el pico alrededor de los 100 Hz debido a las estructuras vorticosas que genera el mini-flap, concordante con los datos propios y de otros autores (Bacchi y otros, 2006; Wassen y otros, 2007).

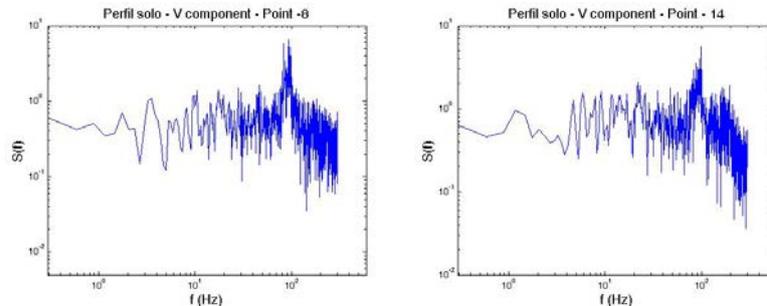


Figura 6: Espectros de la componente v de la velocidad en la estela en la posición 1, para el perfil con el Gurney fijo.

En la Posición 1 (estela cercana), se detectaron picos en el espectro de densidad de potencia correspondientes, el primero al orden de magnitud de la frecuencia de oscilación del mini-flap, y los otros a frecuencias que aproximadamente duplicaban, triplicaban y cuatuplicaban la misma. Lo que no se detectó es el pico de los 100 Hz que muestra el caso con mini-flap fijo. Más aún, estos picos secundarios de los espectros van perdiendo energía a medida que nos alejamos del borde de fuga, mientras que la frecuencia principal conserva la energía, al menos, hasta una distancia de 75%*c*. Ello indicaría que el mini-flap en movimiento cambia significativamente la estela del perfil respecto de cuando está fijo y desplegado. La Figura 10 y la Figura 11 representan, en un esquema como el anterior, el caso en que el mini-flap está oscilando a 33 Hz.

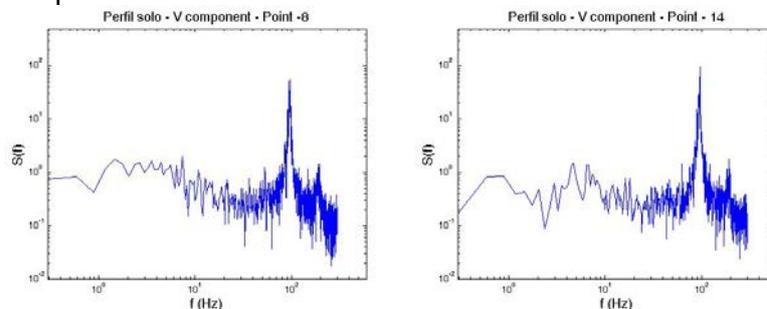


Figura 7: Espectros de la componente v de la velocidad en la estela en la posición 2, para el perfil con el Gurney fijo.

- c) Perfil con mini-flap oscilando: La Figura 8 y la Figura 9 corresponden a los espectros de la componente v de la velocidad para las Posiciones 1 y 2 a una frecuencia de oscilación de 26 Hz, respectivamente.

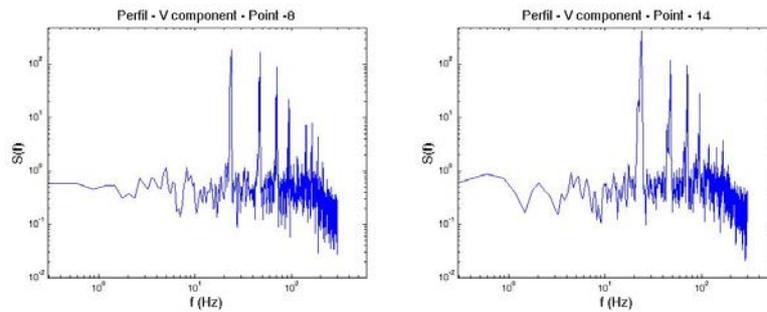


Figura 8: Espectros de la componente v de la velocidad en la estela en la posición 1, para el perfil con el Gurney en movimiento a una frecuencia de 26 Hz.

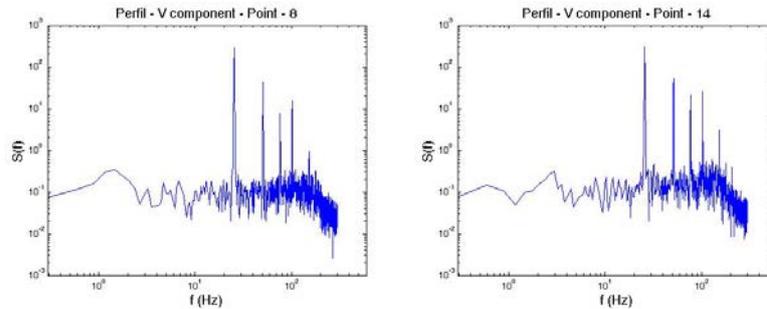


Figura 9: Espectros de la componente v de la velocidad en la estela en la posición 2, para el perfil con el Gurney en movimiento a una frecuencia de 26 Hz.

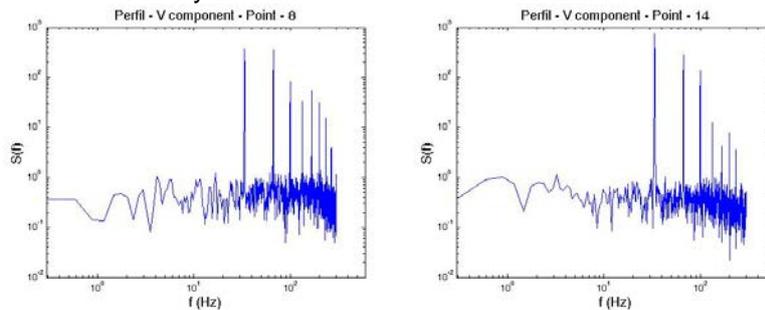


Figura 10: Espectros de la componente v de la velocidad en la estela en la posición 1, para el perfil con el Gurney en movimiento a una frecuencia de 33 Hz.

Para la frecuencia de 33 Hz, mayor que la anterior, comienza a detectarse que, si bien tanto en ambas Posiciones de medición aparecen la principal y los picos de mayor frecuencia, el debilitamiento de estos últimos en la estela lejana es cualitativamente más pronunciado que para la anterior frecuencia. La Figura 12 y la Figura 13 se refieren a los espectros de densidad de potencia en la Posiciones 1 y 2, respectivamente, pero a una frecuencia mayor de 40 Hz.

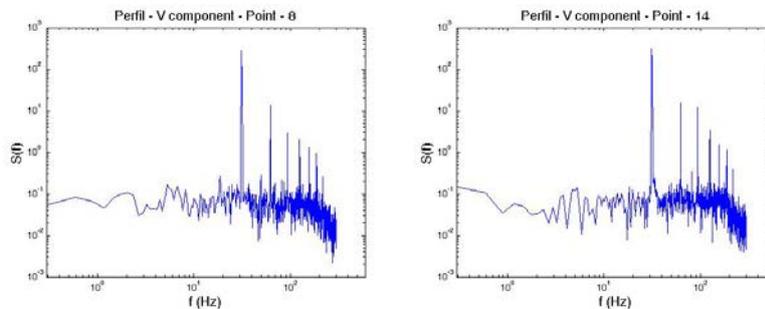


Figura 11: Espectros de la componente v de la velocidad en la estela en la posición 2, para el perfil con el Gurney en movimiento a una frecuencia de 33 Hz.

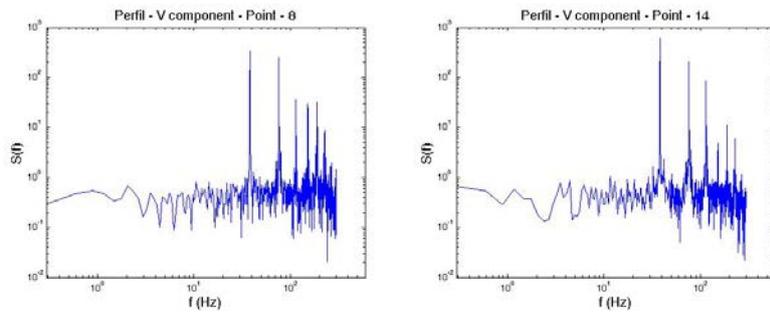


Figura 12: Espectros de la componente v de la velocidad en la estela en la posición 1, para el perfil con el Gurney en movimiento a una frecuencia de 40 Hz.

Del análisis general de dichas Figuras surge que los picos de frecuencias mayores que la de oscilación del mini-flap se amortiguan apreciablemente a medida que aumenta la frecuencia del dispositivo. A los efectos de buscar interpretar la relación entre los picos de frecuencia observados y la oscilación del mini-flap, hemos procedido a graficar (Figura 14) la velocidad instantánea vertical en la estela cercana a una altura por debajo del borde de fuga a nivel del borde del miniflap, para la primera frecuencia (26 Hz), para un corto intervalo de tiempo, esto es, entre los 10 seg y los 10.2 seg.

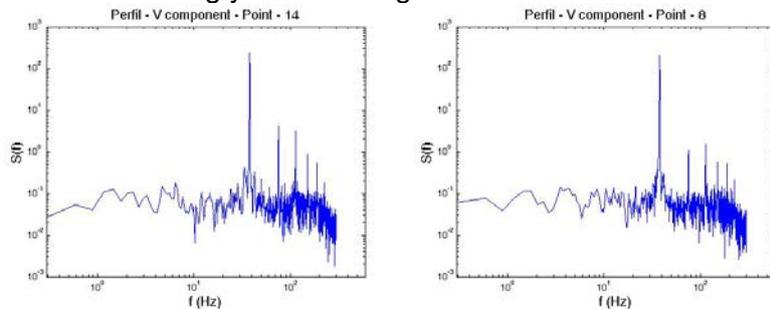


Figura 13: Espectros de la componente v de la velocidad en la estela en la posición 2, para el perfil con el Gurney en movimiento a una frecuencia de 40 Hz.

Se aprecian los picos de velocidad correspondiente a la excitación del flap móvil. Podemos inferir, de la gráfica, acerca del período de la estructura vorticosa generada, que sería del orden de 0.02 seg. La misma figura muestra cinco de éstas estructuras, que coincidirían con el segundo pico de frecuencia detectado (ver Figura 8). También puede inferirse que el Gurney móvil genera otras estructuras de menores períodos, entre 0.01 seg y 0.015 seg, que se corresponderían con los otros picos observados.

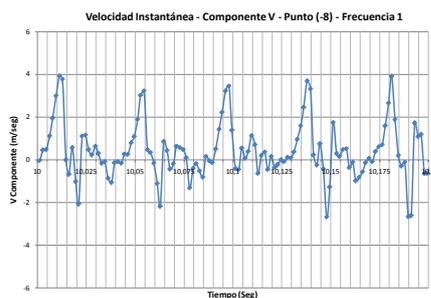


Figura 14: Señal de velocidad de la componente V Posición 1 a 26 Hz

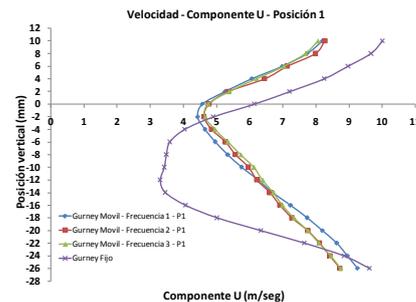


Figura 15: Distribución de la componente U de velocidad para la posición 1

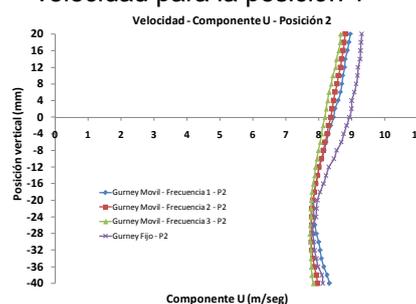
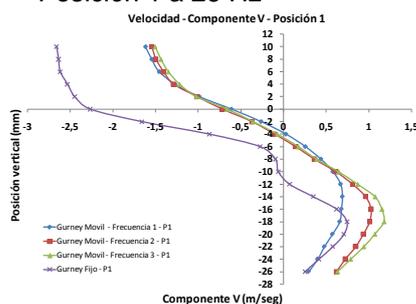


Figura 16: Distribución de la componente V de la velocidad, posición 1

Figura 17: Distribución de la componente U de la velocidad, posición 2

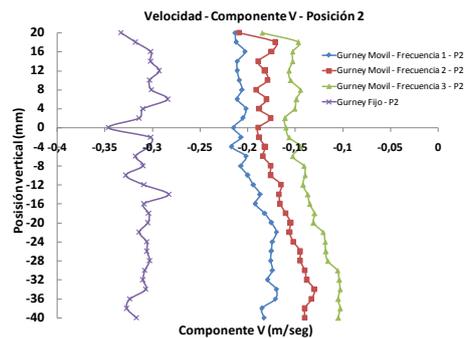


Figura 18: Distribución de la componente V de la velocidad para la posición 2.

Las Figuras 15, 16, 17 y 18 nos muestran las distribuciones, en forma separada, de las componentes longitudinal y vertical de la velocidad de la estela en ambas posiciones en la dirección de x y en todas las posiciones en la vertical. En las Figuras 15 y 16 se observa que las componentes, tanto longitudinal como vertical, de la velocidad no presentan cambios significativos ante la variación de la frecuencia de movimiento del mini-flap. En el caso de la componente longitudinal de la velocidad se puede observar claramente el cambio de dirección de la misma entre el intradós y el extradós, lo cual es coherente con los vórtices desprendidos por el mini-flap fijo. En el extradós la velocidad del caso fijo es inferior al móvil debido a que el vórtice en el extradós desaparece aumentando la velocidad del caso móvil respecto al fijo. Luego en el intradós se produce el caso contrario, siendo la velocidad del caso fijo superior al móvil.

CONCLUSIONES

Como conclusión general, podemos decir que el mini-flap móvil cambia sensiblemente la estela respecto del flap fijo. Se observa que el campo fluidodinámico corriente abajo del perfil provocado por el mini-flap Gurney fijo, el cual posee estructuras vorticosas periódicas que dependen de la velocidad del flujo incidente y del tamaño del mini-flap, es reemplazado por estructuras periódicas de diferente constitución, apareciendo configuraciones de menor energía y mayor frecuencia que conforman una nueva estructura fina de la turbulencia generada por dispositivo móvil. Por otra parte estas últimas se atenúan a medida que aumenta la frecuencia de oscilación del mini-flap. Según se observa en los espectros presentados, aparece un incremento de la energía respecto de la corriente incidente de aproximadamente 10 veces del Gurney fijo al móvil, mostrando el nivel de energía inyectado por el movimiento del dispositivo al campo del flujo. Resulta importante la diferencia de las componentes verticales de la velocidad entre el mini-flap fijo y el rotante, en ambas posiciones "x", a nivel del borde de fuga. Dichas componentes son de menor magnitud en el caso del mini-flap rotante (control activo) que cuando el mismo está fijo (control pasivo). La componente vertical de la velocidad está directamente relacionada con la resistencia y, por ello, la misma sería menor en el caso del mini-flap móvil que en el fijo. Pero es de suponer que al reducirse estas también será menor la circulación y por lo tanto la sustentación y su C_l . No obstante, será necesario realizar otras determinaciones (medición de las cargas aerodinámicas; distribución de presiones alrededor del perfil; etc) a los efectos de confirmar estos resultados previos. De esta forma se profundizarán nuestros estudios con los mini-flaps móviles actuando como dispositivos activos de control de flujo. De esta manera esperamos, midiendo con detalle la estela, en particular la estela cercana, entender mejor el comportamiento fluidodinámico de estos dispositivos, su vinculación con el incremento de la circulación y la frecuencia de rotación. Finalmente, esto nos permitirá relacionar las estelas y sus efectos en los correspondientes coeficientes aerodinámicos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen la colaboración de la Dra. Ana Scarabino, en el análisis y la interpretación de las señales anemométricas adquiridas para el estudio.

REFERENCIAS

- Bacchi F., Marañón Di Leo J., Delnero J.S., Colman J., Martinez M., Camocardi M. & Boldes U., Determinación experimental del efecto de miniflaps Gurney sobre un perfil HQ – 17, IX Reunión sobre Recientes Avances en Física de Fluidos y sus Aplicaciones. Mendoza, Argentina, 2006.
- Deman, T y Dowell, E., Aerodynamic loading for an airfoil with an oscillating Gurney flap, *AIAA Journal of Aircraft* 44/4:1245-1257, 2007.
- Geissler, W., Sobieczky, H., Vollmers, H., Numerical Study of the Unsteady Flow on a Pitching Airfoil with Oscillating Flap, *Proceedings of the 24th European Rotorcraft Forum*, Paper AE09, 1998.
- Giguère P., Lemay J. & Dumas G., Gurney Flap effects and scaling for low-speed airfoils, *AIAA 1995-1881*, 1995.
- Jang C.S., Ross J.C. & Cummings R.M., Numerical investigation of an airfoil with a Gurney flap, *Aircraft Design*, 1/2:75-88, 1998.
- Matalanis, C.G. & Eaton, J.K., Wake vortex alleviation using rapidly actuated segmented Gurney flaps, Report 102, Flow Physics and Computation Division, Department of Mechanical Engineering, University of Stanford, 2007.
- Mayda, E.A.; van Dam, C.P. & Yen Nakafuji, D., Computational investigation of finite width microtabs for aerodynamic load control, *AIAA-2005-1185*, 2005.
- Neuhart H. & Pendergraft O.C., A water tunnel study of gurney flaps, *NASA-TM-4071*, 1988.
- Li Y.C., Wang J.J. & Hua J., Experimental investigations on the effects of divergent trailing edge and Gurney flaps on a supercritical airfoil, *Aerospace Science and Technology*, 11/2-3:91-99, 2007.
- Liebeck, R.H., Design of subsonic airfoils for high lift, *Journal of Aircraft*, 15/9:547-561, 1978.
- Patel M.P., Kolacinski R.M., Patil S.K.R. & Terry T., Distributed Mechanical Actuators for Design of a Closed-loop Flow-control System, 3rd AIAA Flow Control Conference, June 5-8, San Francisco, CA, USA, 2006.
- Singh Manish K., Dhanalakshmi K. & Chakrabarty S.K., Navier-Stokes Analysis of Airfoils with Gurney Flap, 9th Proceedings of AeSI CFD symposium, 11-12 Aug, Bangalore, India, 2006.
- Storms B.L. & Jang C.S., Lift enhancement of an airfoil using a Gurney Flap and Vortex Generators, *AIAA 1993-0647*, 1993.
- van Dam, C.P.; Chow, R.; Zayas, J.R. & Berg, D.E., Computational investigations of small deploying tabs and flaps for aerodynamic load control, *J. of Physics: Conference Series* 75, 012027, 2007.
- Wang J.J., Zhan J.X., Zhang W. & Wu Z., Application of a Gurney Flap on a Simplified Forward-Swept Aircraft Model. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, *Journal of Aircraft*, 43/5, September–October, 2006.
- Wassen E., Guenther B. & Thiele F., Numerical and Experimental Investigation of Mini-Flap Positions on an Airfoil. Technical University Berlin, 10119 Berlin, Germany. Delnero J.S., Marañón Di Leo J., Boldes U., Colman J., Bacchi F. & Martinez M.A.M. Departamento de Aeronáutica, Universidad Nacional de La Plata, (1900) La Plata, Argentina. 2007.