

INFLUENCIA EN LA SUSTENTACIÓN, DE LOS VÓRTICES DE LA ESTELA DE UN PERFIL CON MINIFLAP TIPO GURNEY

Boldes, U.^a; Delnero, S.^a; Marañón Di Leo, J.^{a,b}; Colman, J.^a; Camocardi, M.^a; François, D.^a

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

^bConsejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Avda. Rivadavia 1917, CP C1033AAJ, Cdad. de Buenos Aires, Argentina.
delnero@ing.unlp.edu.ar

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolla la idea de que induciendo un enrollamiento desigual de las capas de corte detrás del miniflap se influye favorablemente la sustentación. Las experiencias se llevaron a cabo en el túnel de viento sobre modelos de ala con el perfil de bajo Reynolds HQ17 con y sin miniflap Gurney con longitudes del 1%, 1.5%, 2% y 2.5% de la cuerda alar. Las cargas se midieron mediante una balanza aerodinámica de dos componentes y las velocidades con un anemómetro de hilo caliente. Se realizaron análisis espectrales y por ondeletas (wavelets). Los estudios se concentraron a la búsqueda de asimetrías entre los vórtices a sotavento del miniflap, generados por un diferente enrollamiento de las capas de corte provenientes de las superficies del extradós e intradós del ala en una región de estela cuya extensión era de dos cuerdas de miniflap. Se describe y se presenta evidencia experimental sobre la forma en que un apartamiento de la simetría del proceso de enrollamiento de capas de corte contra rotantes detrás del miniflap contribuye a un aumento de la circulación media alrededor del perfil y, por ende, de la sustentación.

Palabras clave: Aerodinámica; vorticidad; control de flujo; hipersustentación

NOMENCLATURA

C	=	Cuerda alar
C_L	=	Coefficiente de Sustentación.
C_D	=	Coefficiente de Resistencia.
f	=	Frecuencia [Hertz]
H	=	Longitud del miniflap de Gurney.
$S(f)$	=	Distribución espectral de densidad de potencia [m^2/s]
v	=	Componente de velocidad vertical
α	=	Angulo de ataque [grados]

INTRODUCCIÓN

La estela cercana, inmediatamente detrás de un perfil alar común operando normalmente con una incidencia que genere sustentación es asimétrica. Esta asimetría es debida a las apreciables diferencias entre la capa límite proveniente de la superficie expuesta a baja presión del extradós con respecto a la capa límite de la superficie con sobrepresión del intradós. Al dejar el borde de fuga estas diferentes capas límites se desprenden transformándose en capas de corte que se enrollan en vórtices constituyendo la estructura vorticiosa característica de la estela cercana al borde de fuga. A mayor sustentación las capas límites y las mencionadas capas de corte provenientes del intradós y extradós se diferenciarán aun más. Por lo que la estructura vorticiosa de la estela cercana será influenciada por la carga aerodinámica y las características del perfil. Siguiendo corriente abajo al flujo descendente (downwash) provocado por el perfil detrás del borde de fuga se observará inicialmente un aumento de esa velocidad seguido por una rápida disminución de la misma. La asimetría del flujo de estela es grande en la región de apreciable downwash disminuyendo y tendiendo a la simetría a medida que disminuye el downwash.

En un estudio experimental y numérico de la estela cercana de un perfil con sustentación, Hah and Lakshminarayana [1] confirmaron este comportamiento encontrando que la estela alcanza la simetría tan solo a una longitud de cuerda corriente abajo del borde de fuga. Estos autores confirmaron asimismo que la estructura lejana de la estela de un perfil sustentador es prácticamente simétrica no siendo ya influenciada ni por las características aerodinámicas del perfil ni por la carga aerodinámica. El downwash principal ocurre precisamente en la región de estela cercana al borde de fuga distanciada alrededor de una cuerda del mismo. La ingeniería aeronáutica posee una larga experiencia en la concepción de la teoría de sustentación clásica debida al sistema vorticoso ligado a un ala. Sin embargo estos conocimientos no alcanzan aun para comprender la naturaleza física de los procesos aerodinámicos que provocan el incremento de sustentación en un perfil alar equipado con un flap de Gurney. Ello se debe a la complejidad introducida por la naturaleza eminentemente no estacionaria de los vórtices contra rotantes generados en la estela por ese flap. Escenarios de flujo no estacionario asociado a desprendimiento de estructuras vorticosas conforman un muy complejo cuadro aerodinámico aún no bien entendido. Al respecto resulta útil recordar que para modelos elementales como por ejemplo cilindros circulares hasta la fecha no se encontraron teorías capaces de predecir el coeficiente de resistencia en función del número de Reynolds en condiciones de flujo con desprendimiento de vórtices. El flap de Gurney fue estudiado por numerosos investigadores ([2] a [6]) confirmando un apreciable incremento de sustentación, de la relación sustentación-resistencia y una reducción de la resistencia de forma para condiciones de gran sustentación con respecto a los mismos valores obtenidos para las mismas alas sin ese flap. No se entiende bien aún el proceso físico mediante el cual las estructuras vorticosas de la estela cercana inmediatamente detrás de un flap de Gurney interactúan con el patrón de flujo alrededor de un ala y su conexión con el incremento de sustentación provocado por estos miniflaps. La referencia [6] describe resultados experimentales del comportamiento aerodinámico de estos flaps. Estos autores hipotetizan que los vórtices contra rotantes que se desprenden del borde de fuga inducen líneas de corriente semejantes a las que hubiera provocado una curvada y suave prolongación de la cuerda del perfil aerodinámico introduciendo una curvatura virtual desviando hacia abajo un punto de estagnación trasero virtual libre (condición de Kutta).

Una descripción más detallada de las estructuras del patrón de flujo de estela generado por un flap de Gurney en base a experimentos con anemometría laser Doppler (LDA) fue comunicada en las referencias [7] y [8]. La influencia del empleo de flaps de Gurney de diferentes longitudes fue tratada en la referencia [9], en la cual se describen asimismo aspectos de la influencia de la turbulencia del flujo incidente de la corriente libre. Los modelos fluidodinámicos usuales de perfiles con flap de Gurney describen un cambio en el patrón de flujo semejante al que produciría un aumento de curvatura y un punto de estagnación posterior más bajo. Pero al mismo tiempo asumen la existencia de una estela (simétrica) de calle de vórtices contra rotatorios de Von Karman sin considerar las mencionadas diferencias de flujo entre la estela cercana y el resto del flujo de estela. En algunos estudios de eficiencia aerodinámica de perfiles con flaps de Gurney es frecuente encontrar la hipótesis que presupone que la existencia de la estela de vórtices es siempre perjudicial a una buena relación sustentación-resistencia. A fin de lograr reducciones de resistencia “estabilizando la estela” algunos autores sugieren el uso de ranuras, agujeros, flaps aserrados y cuerpos de estela [10] mientras que otros recomiendan la directa eliminación de la calle de vórtices contra rotatorios detrás del miniflap [11]. Por el contrario nosotros hipotetizamos que una adecuada asimetría entre las capas de corte provenientes de las superficies de succión y presión generadoras de vórtices asimétricos en la estela cercana podría tener efectos favorables en términos de sustentación-resistencia. El flujo turbulento de un perfil con borde de fuga como provisto con un miniflap de Gurney involucra capas límites turbulentas que se desprenden formando capas de corte que se enrollan formando una calle de vórtices contra rotantes. La vorticidad positiva y negativa de ambas capas límite es empaquetada dentro de las capas de corte que se enrollan formando vórtices que se desarrollan y desprenden en una cierta secuencia conformando una frecuencia de desprendimiento. Obviamente la condición de Kutta no es satisfecha en el borde de fuga como. En lugar de esto aparece un punto de estagnación libre, móvil, ubicado corriente abajo y algo por debajo del borde de fuga del perfil. De acuerdo al teorema de Kelvin cada vez que un vórtice se genera y es inyectado en la estela se crea la correspondiente circulación. El desprendimiento periódico de vórtices contra rotatorios estará conectado la aparición de circulaciones de signos opuestos. Este proceso provocará variaciones en el tiempo de la circulación general alrededor del perfil alar produciendo variaciones en el ángulo de ataque instantáneo la velocidad incidente. Concentrémonos un momento en el flujo de estela de cuerpos romos. Por ejemplo

de un cilindro. Un desprendimiento periódico de vórtices contra rotantes de igual intensidad producirá variaciones de circulación que generaran variaciones periódicas de ángulo de ataque, de sustentación positiva y negativa y variaciones de resistencia. Un cuerpo que produzca una estela de vórtices de Von Karman experimentara fluctuaciones de este tipo. El promedio de las fuerzas de sustentación resultante será nulo porque esa estela es simétrica y los vórtices iguales y opuestos. La sustentación producida por un ala sin miniflap deberá estar asociada a una estela asimétrica que provoque las conocidas desviaciones preferenciales del flujo antes y después del ala (up and downwash). Si solo nos concentramos en la estela podrá apreciarse que una mayor sustentación está asociada a un mayor downwash. Esto requiere una mayor asimetría del flujo en la estela cercana. Por lo tanto no resulta realista la concepción de un modelo físico habitual del flujo detrás de un perfil con flap de Gurney basado en una estela simétrica de von Kármán la cual por ser simétrica es incapaz de provocar una desviación permanente del flujo en una dirección obviamente asociada al incremento permanente de sustentación medido en estos flaps. En la estela cercana de un perfil alar equipado con flap de Gurney en condiciones de sustentación los vórtices iniciales que se desprenden desde el extradós deben ser de intensidad diferente a los que se desprenden del intradós. Esta asimetría asegurará la desviación media del flujo asociada al incremento de sustentación provocado por estos miniflaps. En lo que sigue exploraremos la región inmediatamente a sotavento del flap de Gurney en la región cercana de la estela buscando asimetrías capaces de explicar el incremento de sustentación provocado por estos pequeños dispositivos.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los experimentos de Túnel de Viento se llevaron a cabo en el Laboratorio de Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental (LACLYFA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata, Argentina, operando a números de Reynolds menores a 5×10^5 . En lo que sigue se considerará al perfil alar ubicado con su extradós arriba y el intradós debajo, respecto de la dirección de la corriente incidente. Se midió la sustentación y resistencia de un perfil de bajo Reynolds HQ17 sin y con miniflaps de Gurney de 4 cuerdas (longitudes) diferentes: de 1%, 1.5%, 2% y 2.5% de la cuerda alar (C). Estos resultados se aprecian en las Figuras 1 y 2. Simultáneamente se exploró la región de estela cercana tratando de detectar la ubicación inicial de la zona en la cual los vórtices mencionados se desarrollan midiendo la intensidad y características de los vórtices.

Los modelos ensayados consistían en un ala de planta rectangular sin torsión, con una cuerda de 45 cm y una envergadura de 80 cm, equipados con diferentes miniflaps de Gurney. Cada modelo era ubicado horizontalmente en la sección de ensayo del túnel. Las alas se ensayaron con diferentes ángulos de ataque en un rango de valores de -12 grados a 24 grados. Cabe destacar que perfiles alares equipados con miniflaps de dimensiones semejantes a las de nuestro ensayo fueron estudiadas a través de simulaciones numéricas [12]. La Figura 3 ilustra el esquema de un ensayo típico y la ubicación del sensor anemométrico.

La sustentación y resistencia fueron medidas con una balanza aerodinámica de dos componentes con sensores del tipo strain-gage conformando un doble puente de Wheatstone, construida por los autores de acuerdo a lo ilustrado en [13]. Las cargas horizontales y verticales eran medidas simultáneamente [14]. Las velocidades eran medidas con un sistema anemométrico de hilo caliente de temperatura constante de 6 canales marca Dantec modelo Streamline. Se emplearon puntas de prueba X-wire Dantec 55R51 con una frecuencia de adquisición de datos de 2000 Hz por canal.

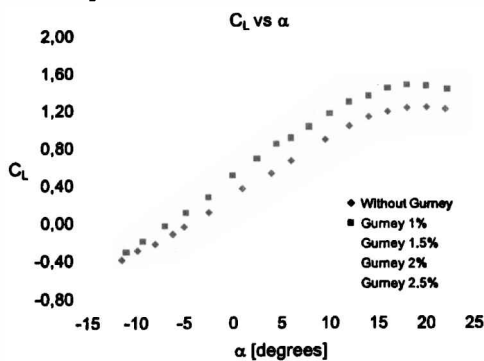


Figura 1. Curva C_L vs α

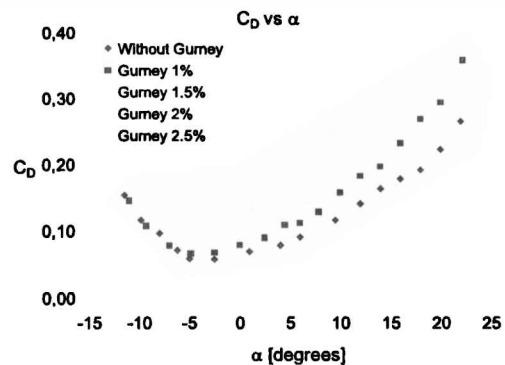


Figura 2. Curva C_D vs α

Los datos fueron procesados por acondicionadores de señales y amplificadores Vishay serie 2310. En virtud de la mínima área frontal del ala ensayada no se aplicaron correcciones de bloqueo a los resultados. La temperatura era continuamente medida a fin de ajustar la densidad del aire. Las velocidades turbulentas fueron medidas corriente arriba y corriente abajo del modelo, en la región de la estela cercana al borde de fuga como con flap de Gurney, a lo largo de una grilla con puntos distanciados horizontalmente a longitudes del 2% y 4% de la cuerda alar y 12 intervalos verticales distanciados 2 mm.

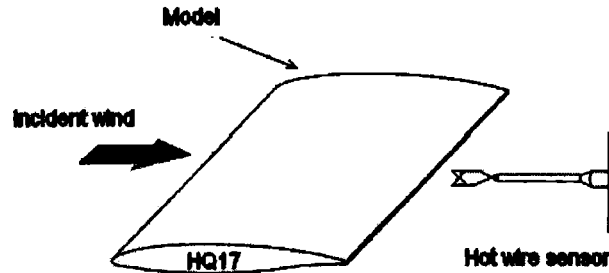


Figura 3. Esquema de la disposición experimental en el túnel de viento

Por analogía con el flujo detrás de cuerpos romos, el ancho del borde de fuga romo que es coincidente con el largo del miniflap H , fue asumido como escala significativa del movimiento en la región de estela cercana. El borde de ataque del miniflap apoya sobre el borde de fuga del perfil. En la Figura 4 se aprecia con más detalle el esquema de mediciones detrás de la estela.

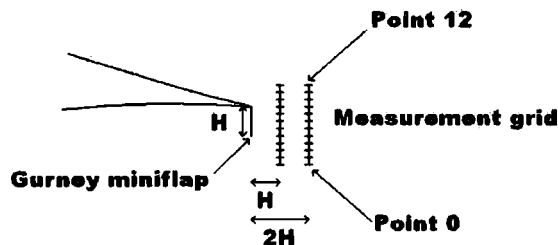


Figura 4. Detalle del esquema de mediciones en la estela

A fin de obtener más información acerca de las escalas de las estructuras turbulentas que aparecen en forma intermitente en el flujo a sotavento del borde de fuga se efectuó un análisis de wavelets. Esta metodología retiene información de los dominios temporales y de frecuencia. Permite el análisis por wavelets de las velocidades y la identificación de aspectos de las estructuras turbulentas normalmente involucradas en los procesos de transporte. La transformación de wavelet continua, utilizada en este trabajo, es considerada adecuada para el análisis de datos de flujo turbulento ([15] y [16]).

Nuestro objetivo incluía la comparación de escalas temporales, intensidad y frecuencias en un mapa wavelet de las estructuras turbulentas a sotavento del miniflap. Se utilizaron criterios de interpretación a partir del diagrama y escalas de wavelets ya utilizados por Mahrt ([17]) para estimar la extensión temporal y la frecuencia asociadas a una estructura turbulenta particular.

Los registros velocidad-tiempo fueron explorados a fin de detectar indicios relacionados con la segunda derivada de una Gaussiana g_2 . Asumiendo una hipótesis de flujo congelado es posible deducir la escala turbulenta espacial para una componente de velocidad instantánea buscando su máximo en el mapa de wavelets.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los valores de sustentación medidos muestran cualitativa consistencia con los obtenidos por otros autores en simulaciones numéricas y experimentales, si bien las efectuaron a números de Reynolds tres veces mayores que el empleado en las experiencias de este trabajo ([12]). Resulta interesante destacar que algunas conclusiones de estos autores refuerzan nuestra percepción acerca de considerar importante la

influencia de eventos del flujo de estela sobre la aerodinámica alar al mencionar que características particulares de la estela demostraron tener una influencia directa en el incremento del coeficiente de resistencia". Desde ambos extremos de un flap de Gurney emergen dos capas de corte que se enrollan en un patrón de vórtices alternantes y contra rotantes estableciendo lo que se denomina una *inestabilidad absoluta de estela* [18].

Los ensayos mostraron que en las regiones de la estela cercana detrás del miniflap en donde comienzan su desarrollo los vórtices, se aprecia un importante pico en el espectro de las velocidades fluctuantes indicando claramente la inestabilidad absoluta ilustrada en las Figuras 5a y 5b.

En lo que sigue asumimos que los principales picos espectrales ocurren en regiones en donde el enrollamiento de las capas de corte desemboca en la formación de vórtices que completan su desarrollo en ese sitio antes de desprenderse y fluir corriente abajo. Durante su formación estos vórtices se desplazan muy lentamente corriente abajo pero permaneciendo durante algún tiempo mientras se desarrollan en las cercanías del borde de fuga. Una sonda anemométrica ubicada en estas regiones estará frecuentemente embestida e inmersa en estos vórtices, pudiendo extraer información de los mismos. La altura de un pico espectral medida en un punto fijo reflejará la intensidad del vórtice pasante, pero también el período en que las capas de corte, que se van enrollando, permanecen cerca del punto de medición antes de alejarse corriente abajo.

Cabe destacar que el objetivo de este trabajo no es localizar la posición exacta de la región en que comienzan a desarrollarse los vórtices. Nosotros exploramos el flujo detrás del miniflap en regiones que exhiben un muy intenso pico espectral tratando de encontrar evidencias de una asimetría permanente en el tiempo capaz de desviar permanentemente el flujo incrementando el downwash.

Sumergimos las puntas anemométricas en regiones en las cuales se enrollaban las capas de corte provenientes de las capas límites del extradós e intradós encontrando las siguientes diferencias: para condiciones de sustentación, el proceso de enrollado de capas de corte era diferente para el vórtice generado por fluido proveniente del extradós que para el vórtice generado por fluido proveniente del intradós. La capa de corte proveniente del intradós comenzaba su enrollado inmediatamente detrás del miniflap conformando un vórtice más intenso que el vórtice generado por fluido proveniente de la zona de succión que iniciaba su enrollado más corriente abajo del miniflap generando un vórtice más débil.

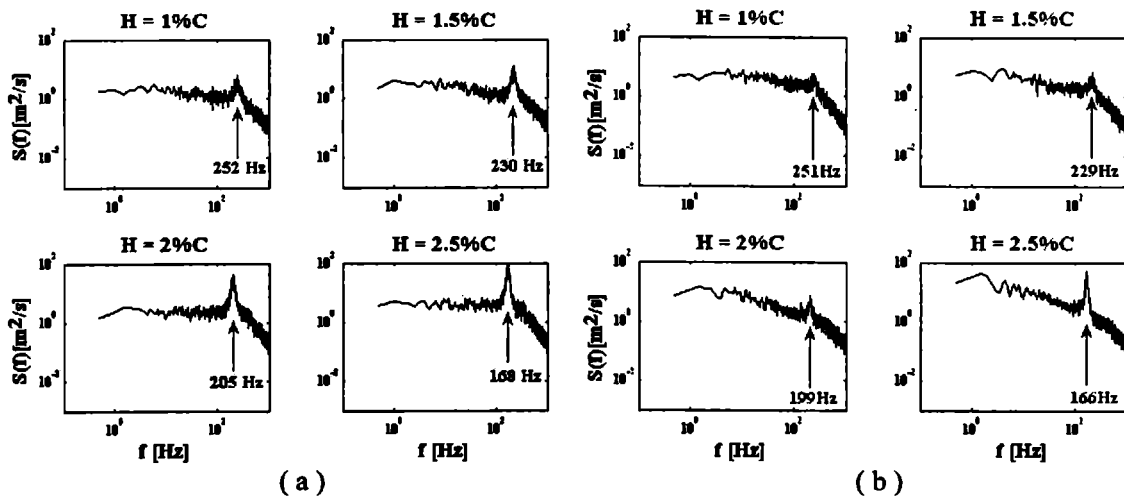


Figura 5a. Distribución del espectro de densidad de potencia para diferentes flaps Gurney, de escalas relativas a la cuerda del perfil (c) en el punto 2 de la estela a $2H$ corriente abajo (componente v).

Figura 5b. Distribución del espectro de densidad de potencia para diferentes escalas de flaps Gurney, basadas en la cuerda del perfil (c), en el punto 8 de la estela a $2H$ corriente abajo (componente v).

Estos resultados están expuestos en la Tabla 1. Un examen más detallado en base a los gráficos de wavelets ilustrados en Figuras 6a y 6b confirma las observaciones anteriores mostrando que el vórtice con fluido de la zona de succión (extradós) es más débil y más difuso ocupando una región de la estela mayor que el vórtice más intenso y concentrado con fluido proveniente de la zona de mayor presión (intradós).

Tabla 1. Picos del espectro de densidad de potencia correspondientes a flaps Gurney de distintas escalas a distancias H y 2H en la estela

1% - 1H			1% - 2H		
Punto	Frecuencia [Hz]	S(f)v [m ² /s]	Punto	Frecuencia [Hz]	S(f)v [m ² /s]
2	251	5,7	2	252	7,36
7	251	4,46	7	251	5,96
1,50% - 1H			1,50% - 2H		
Punto	Frecuencia [Hz]	S(f)v [m ² /s]	Punto	Frecuencia [Hz]	S(f)v [m ² /s]
2	215	7,32	2	230	13,6
8	229	6,15	8	229	6,39
2% - 1H			2% - 2H		
Punto	Frecuencia [Hz]	S(f)v [m ² /s]	Punto	Frecuencia [Hz]	S(f)v [m ² /s]
2	199	28,5	2	205	53,4
9	203	4,14	9	199	8,5
2,5% - 1H			2,5% - 2H		
Punto	Frecuencia [Hz]	S(f)v [m ² /s]	Punto	Frecuencia [Hz]	S(f)v [m ² /s]
2	167	146	2	168	117
10	169	45,3	10	166	55,7

La mayor intensidad del vórtice con fluido del intradós fue confirmada para todos las medidas de miniflap ensayadas como lo ilustran los espectros de las Figuras 5a y 5b. Análogo comportamiento está reflejado por el análisis de wavelets de Figuras 6a y 6b efectuado para H = 1.5% C en los puntos 2 y 8 inmersos en la ruta de los vórtices.

De acuerdo al Teorema de Kelvin el desprendimiento de vórtices de un perfil sustentador está conectado a variaciones en el tiempo de la circulación alrededor del mismo. Resulta evidente que en un perfil con flap de Gurney el desprendimiento de vórtices detrás del miniflap también está conectado con variaciones en la circulación. El vórtice más intenso alimentado con fluido proveniente del extradós está asociado a una mayor circulación promoviendo una mayor sustentación que no puede ser compensada por la menor circulación contraria inducida por el vórtice de sentido contrario más débil alimentado con fluido proveniente del intradós del perfil.

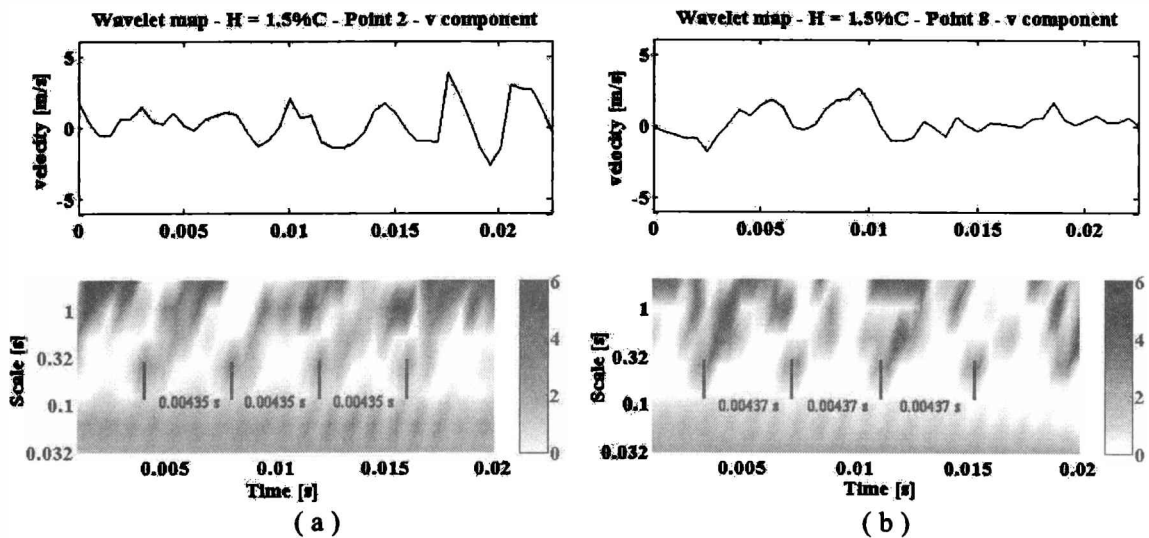


Figura 6a. Mapa de wavelets para el flap Gurney de 1.5% de la cuerda del perfil (C) en el punto 2 de la grilla a una distancia 2H corriente abajo dentro de la estela (componente v). Se aprecia la escala de las estructuras, de periodo 0.00435 seg

Figura 6b. Mapa de wavelets para el flap Gurney de 1.5% de la cuerda del perfil (C) en el punto 8 de la grilla a una distancia 2H corriente abajo dentro de la estela (componente v). Se aprecia la escala de las estructuras, de periodo 0.00437 seg.

Pareciera razonable inferir que esta diferencia en la intensidad de los vórtices iniciales provoca una asimetría en el flujo de estela cercana constituyéndose en el mecanismo que reubica, más atrás y más abajo, el punto de estagnación libre posterior y genera el incremento de sustentación propio de estos miniflaps. ¿Como puede explicarse el comportamiento asimétrico? Recientemente Troolin et al. [19] realizaron detalladas visualizaciones PIV en el tiempo en un flujo alrededor de un perfil con flap de

Gurney. Estos autores demostraron que en la región del intradós contigua a la zona de inserción del miniflap se generan pequeñas estructuras vorticosas “no descritas previamente” que van creciendo hasta rebalsar la longitud del miniflap perturbando el borde filoso del miniflap a lo largo del cual se genera la capa de corte que posteriormente se enrollará.

Es sabido que flujos de corte son muy sensitivos a pequeñas perturbaciones aplicadas durante la transición [20]. Tales perturbaciones pueden llevar a que la capa de corte genere estructuras vorticosas con características dependientes del tipo de perturbación [21].

En la investigación presentada en este trabajo intentamos aportar buenas razones para explorar mejoras en la eficiencia aerodinámica de perfiles con flap de Gurney controlando, mediante perturbaciones adecuadas, la generación de estructuras vorticosas favorables en la estela cercana.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Dra. Ana Scarabino por su colaboración en el procesamiento de los datos de las velocidades instantáneas.

REFERENCIAS

1. Hah C., Lakshminarayana B., “Measurement and prediction of mean velocity and turbulence structure in the near wake of an airfoil,” *Journal of Fluid Mechanics* . Vol.115, 1982 pp. 251 -282.
2. Liebeck, R.H., “Design of subsonic airfoils for high lift,” *Journal of Aircraft* Vol. 15, No. 9, 1978, pp 547-561.
3. Neuhart, D.H., Pendergraft, O.C., “A water tunnel study of Gurney flaps,” NASA TM-4071, 1988.
4. Bloy, A.W., Durrant, M.T., “Aerodynamic Characteristics of an aerofoil with Small Trail ing Edge Flaps,” *Wind Engineering*, Vol. 19, No.3, 1995, pp 167-172.
5. Storms, B.L., Jang, C.S., “Lift Enhancement of an Airfoil Using a Gurney Flap and Vortex Generators,” *Journal of Aircraft* Vol. 31, No. 3, 1994, pp 542-547.
6. Giguère, P., Lemay, J., Dumas, G., “Gurney Flap Effects and Scaling for Low-Speed Airfoils,” AIAA Paper 95-1881, 13th AIAA Applied Aerodynamics Conference San Diego, 1995.
7. Jeffery, D.R.M., Hurst, D.W., “Aerodynamics of the Gurney Flap,” AIAA Applied Aerodynamic Conference, AIAA 96-2418-CP, 1996.
8. [8]-Jeffrey, D., Zhang, X., Hurst, D.W., "Aerodynamics of Gurney Flaps on a Single -Element High-Lift Wing," *Journal of Aircraft* , Vol. 37, 2000, pp. 295-301.
9. Bacchi, F., Marañón Di Leo, J., Delnero, J. S., Colman, J., Martinez, M., Camocardi, M., Boldes, U., “Determinación experimental del efecto de mini flaps Gurney sobre un perfil HQ-17” Fluidos-2006 IX Reunión Sobre Recientes Avances En Física de Fluidos y sus Aplicaciones, Mendoza, Argentina, 2006.
10. Van Dam, C.P. Yen, D.T., Vijgen, P.M.H.W. "Gurney Flap Experiments on Airfoil and Wings," *Journal of Aircraft* (0021-8669), Vol.36, No.2, 1999, pp. 484-486.
11. Bechert, D.W., Meyer, R., Hage, W., "Drag Reduction of Airfoils with Miniflaps. Can We Learn From Dragonflies?," AIAA-2000-2315, Denver, CO, 2000.
12. Schatz, M., Guenther, B., Thiele, F., “Computational Modeling of the Unsteady Wake behind Gurney-Flaps,” 2nd AIAA Flow Control Conference, AIAA-2417, Portland, Oregon, USA, 2004.
13. Tusche, S., “Interner Bericht: Beschreibung des Konstruktiven Aufbaus und Kalibrierung von 6-Komponenten-DMS Windkanalwaagen,” DLR, Goettingen, 1984.
14. Delnero, J.S.; Marañón Di Leo J.; Bacchi, F.; Colman, J. & Boldes, U., “Experimental determination of the influence of turbulent scale on the lift and drag coefficients of low reynolds number airfoils”, *Latin American Applied Research*. Vol 35 No.4 – pp. 183 – 188, 2005.
15. Farge, M., “Wavelet Transforms and their applications to Turbulence,” *Annual Rev. Fluid Mechanics*, 24, 395-457 (1992).
16. Farge M., “Transformee en ondelettes continue et application a la turbulence,” *Journ. Annu.Soc. Math.*, France, 17-62 (1990).
17. Mahrt, L., Eddy asymmetry in the sheared heated boundary layer. *J. Atmos. Sci.*, 48, 472-492, 1991.

18. Huerre, P., Monkewitz, P., "Absolute and convective instabilities in free shear layers," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 159, 1985, pp. 151-168.
19. Troolin D. R., Longmire E. K., Lai W. T., "Time resolved PIV analysis of flow over a NACA 0015 airfoil with Gurney flap," *Experiments in Fluids* Vol. 41, 2006, pp. 241-254.
20. Oster D. and Wygnanski I., "The forced mixing layer between parallel streams," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 123, 1982, pp. 91-130.
21. Ho C.M. & Huerre P., "Perturbed free shear layers," *Annual Review of Fluid Mechanics* Vol. 16, 1985, pp. 365-424.