

ANÁLISIS DEL PATRÓN DE FLUJO EN LA ESTELA DE UN PERFIL AERODINÁMICO CON SISTEMA ACTIVO DE CONTROL DE FLUJO

Colman J.¹, Delnero J.^{1,2}, Marañón Di Leo J.^{1,2}, García Sainz M.^{1,3}, Alasia G.¹, Ortiz P.¹ y Garnica A.¹

¹Laboratorio de Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental, Universidad Nacional de La Plata, Calle 116 e/ 47 y 48, 1900, La Plata.

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Av. Rivadavia 1917, C1033AAJ, CABA.

³Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, Calle 526 entre 10 y 11 1900, La Plata.

jcolman@ing.unlp.edu.ar

Palabras Clave: Control de Flujo, miniflap Gurney, turbulencia, frecuencias, escalas.

Introducción

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar el desarrollo de las estructuras fluidodinámicas en la estela lejana de un perfil Clark-Y 18, como así también el desarrollo de las mismas cuando se aplican técnicas de control de flujo mediante un miniflap Gurney móvil ubicado en el intradós del modelo en las cercanías del borde de fuga. El estudio de la estela turbulenta cercana a un perfil con sistemas de control nos muestra la configuración del flujo en esas condiciones y los mecanismos de arranque de vórtices. La estela lejana nos da información sobre la performance general del modelo. Precisamente, la conformación de la estela, esto es, su “estructura fluidodinámica”, están directamente vinculados con las modificaciones a la fuerza aerodinámica sobre el perfil debidas a la estructura de la estela cercana al mismo, la cual naturalmente tendrá influencia importante sobre la estela lejana del mismo.

Los objetivos del control de flujo en general consisten, de acuerdo con la conveniencia, en retrasar o adelantar la transición, suprimir o aumentar la turbulencia, prevenir o provocar la separación, con el propósito de reducir la resistencia aerodinámica, aumentar la sustentación, aumentar el mezclado del flujo, inducir la reducción del ruido por métodos fluidodinámicos. Los dispositivos a emplear pueden ser del tipo pasivo y/o activo. Los sistemas pasivos recurren a dispositivos con características geométricas particulares tales como puntas y bordes filosos con ondulaciones determinadas en la región en la que se origina el proceso de separación del flujo. Los sistemas de control activo están caracterizados por perturbaciones forzadas por algún mecanismo externo, por ejemplo flaps oscilantes, dispositivos vibrantes, ondas de sonido, succión periódica, soplado, calentamiento, etc. En el presente trabajo se propone el estudio de los efectos de un miniflap Gurney, capaz de oscilar “up-down” (arriba-abajo), ubicado en el intradós cerca del borde de fuga del perfil el cual, en su movimiento oscilante cambiará la estructura fluidodinámica de la estela del perfil, tanto en la zona cercana como en la media y la lejana, respecto de la que hubiera tenido el mismo sin la presencia del miniflap.

Al dejar el borde de fuga, las capas límites provenientes del extradós y del intradós se desprenden transformándose en capas de corte que se enrollan en vórtices constituyendo la estructura vorticiosa característica de la estela mencionada más arriba. 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 y ello también afectará a la lejana. Siguiendo corriente abajo al flujo descendente (downwash), provocado por el perfil detrás del borde de fuga, se observará la forma en que el dispositivo activo de control cambiará la estructura vorticiosa, volviéndola más asimétrica que el caso del perfil limpio. En un estudio experimental y numérico de la estela de un perfil con sustentación en una corriente libre laminar, Hah and Lakshminarayana [1] encontraron que la estela alcanza la simetría tan solo a una longitud de cuerda corriente abajo del borde de fuga.

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. Distintos tipos de miniflaps fueron estudiados 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 miniflap. La referencia [6] describe resultados experimentales del comportamiento aerodinámico de estos flaps. Estos autores suponen 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 el punto de estagnación posterior virtual libre (condición de Kutta). Una descripción más detallada de las estructuras del patrón de flujo de estela generado por un miniflap en base a experimentos con anemometría laser Doppler (LDA) fue comunicada en las referencias [7] y [8]. La influencia del empleo de miniflaps 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. 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], [12]). Otros autores efectuaron experimentos computacionales con generadores de vórtices que actúan dentro de la capa límite del perfil, cerca del borde de fuga [13].

La interrelación entre los diversos éxitos del control de flujo es especialmente importante cuando se forman burbujas de separación en el extradós de los perfiles, dando lugar a la formación de capas de corte (shear layers). Se han efectuado muchos trabajos relativos al empleo de dispositivos pasivos, como los miniflaps fijos, que actúan influenciando la capa de corte ([11], [12]). En ellos se analizó la influencia de las dimensiones de dichos miniflaps sobre los coeficientes de sustentación y resistencia y, por ende, en la eficiencia C_L/C_D . En los mismos se establece que el miniflap debe tener dimensiones iguales o menores que el espesor de la capa límite en la zona donde actúan los mismos. El miniflap, tanto como elemento pasivo o activo, produce perturbaciones que influyen la generación de estructuras en las capas de corte que se van desprendiendo y enrollando en una calle de vórtices. Desde ambos extremos de un miniflap 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* [14]. Ensayos realizados en otro trabajo [15] 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 mencionada más arriba. Otro trabajo [16] se refiere a la influencia del control del flujo en el borde de fuga, en la performance aerodinámica del mismo.

Trabajos más recientes [17] se refieren a la reducción de la resistencia aerodinámica de miniflaps a través de modificaciones tridimensionales (a lo largo de la envergadura de los mismos) y al uso de miniflaps mecánicos y chorros de aire, comparando sus efectos [18]. En el trabajo experimental de Boldes et al [19] se efectuó un análisis primario sobre la asimetría de la estela de un perfil con miniflap y su correlación con el incremento de sustentación.

Resulta importante remarcar que hay pocos trabajos relacionados con el comportamiento aerodinámico de perfiles inmersos en corrientes libres turbulentas, como asimismo sobre el análisis cuidadoso de la estructura vorticiosa de la estela de dichos perfiles equipados con dispositivos activos de control de flujo como por ejemplo los miniflaps oscilantes “up-down”.

Las capas de corte vinculadas a los miniflaps activos, en la estela de los perfiles, dependerán de manera importante de las características del flujo libre aguas arriba del perfil como asimismo de las frecuencias de oscilación del miniflap. Ello implica la necesidad de una medición, más detallada que las efectuadas al presente, de la estructura fluidodinámica de la estela, al menos hasta una cuerda detrás del perfil, lo cual motivó la realización del presente trabajo.

Metodología

En el túnel de viento de circuito cerrado del LaCLyFA, cuya sección transversal es de 1,4m por 1m y una velocidad máxima de 20m/s, se efectuaron los ensayos experimentales con un modelo de ala con el perfil Clark Y-18, de 80cm de envergadura y 40cm de cuerda (c), sin torsión geométrica (Figura 1). Los ensayos se efectuaron para un número de Reynolds (Re), basado en la velocidad de la corriente libre y la cuerda del modelo, de 266.666, esto es, para una velocidad media de la corriente libre aguas arriba de 10m/s (V_∞). La intensidad de la turbulencia de la corriente libre fue del 1,8%. El modelo de ala cuenta con un sistema electromecánico que provee de movimiento oscilante vertical a un miniflap tipo Gurney de 6mm de altura (1,5%c), localizado a lo largo de la envergadura a una distancia de 4%c del borde de fuga, en el intradós del modelo de ala. El miniflap se movió con frecuencias de 16Hz, 20Hz y 25Hz, correspondiendo a un valor del número de Strouhal ($Str = f \cdot c / V_\infty$) de: 0.64; 0.8 y 1, respectivamente. En esas condiciones se midieron las velocidades instantáneas con tres sensores (X-wire probes—ver Figura 1) del anemómetro de hilo caliente (Streamline-Dantec). Los sensores se ubicaron uno por encima del otro con una separación vertical de 1cm entre cada uno. La frecuencia de adquisición de datos fue de 2000Hz filtrándose a 1000Hz. Las posiciones-x detrás en la estela (adimensionalizadas según la cuerda “c” del modelo de ala), con el sensor central a nivel del borde de fuga, fueron 0.015; 0.03; 0.045; 0.06; 0.075; 0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9 y 1.0. Las determinaciones de las velocidades instantáneas se realizaron para un ángulo de 0° .



Figura 1. Modelo en túnel de viento

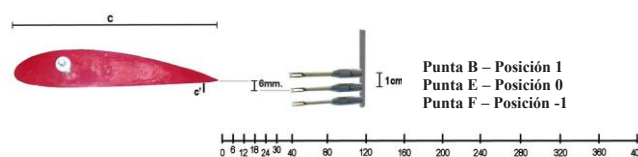


Figura 2. Esquema de medición.

Las configuraciones analizadas fueron: el perfil solo, el Gurney fijo al 4% de C y el Gurney móvil con frecuencias de accionamiento de: $F1= 16 \text{ Hz}$; $F2= 20 \text{ Hz}$; $F3= 25 \text{ Hz}$.

Para el estudio de la estela se analizaron velocidades medias e instantáneas, intensidades de turbulencia, escalas espaciales y temporales y espectros de frecuencia, para las diferentes configuraciones. En las Figuras 3, 4 y 5 se muestran las velocidades medias para ambas componentes, así como también las intensidades de turbulencia para los casos del perfil solo, el Gurney fijo y a una frecuencia de excitación del flap.

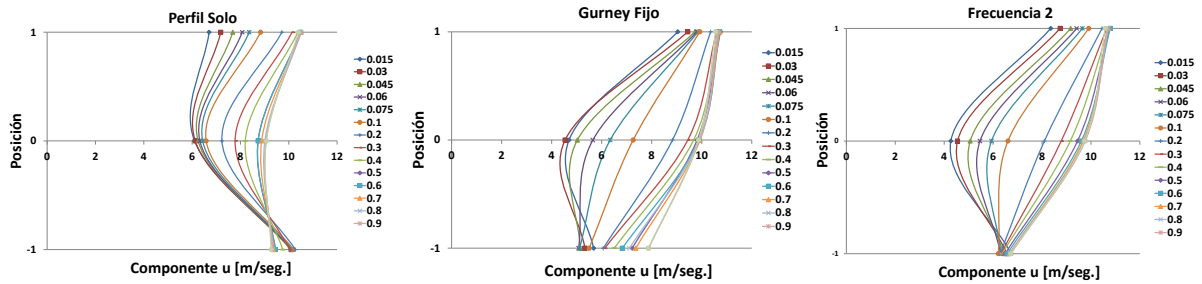


Figura 3. Velocidades en la componente U.

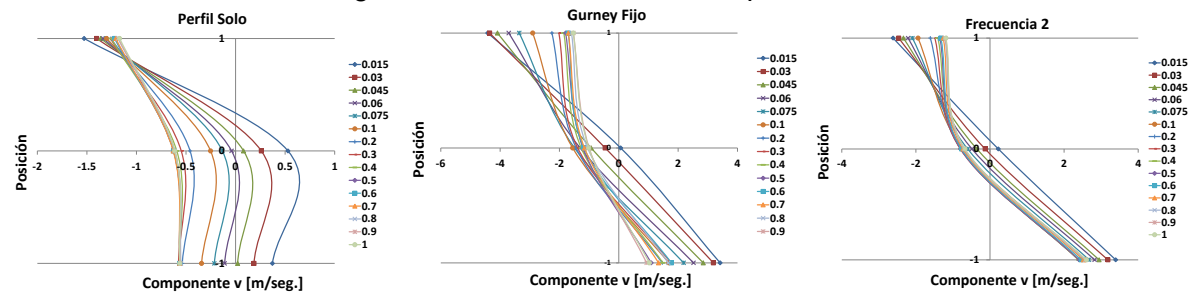


Figura 4. Velocidades en la componente V.

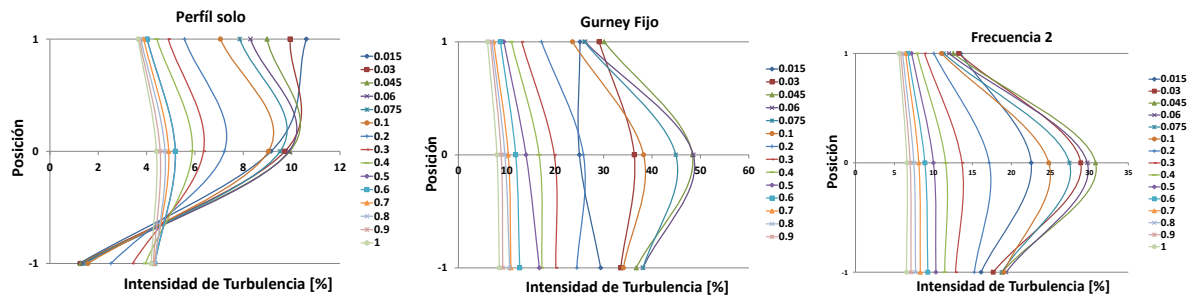


Figura 5. Intensidad de la Turbulencia.

En la Figura 6 se muestran los espectros de densidad de potencia para los casos del perfil solo, el Gurney fijo y una frecuencia de excitación, respectivamente, todos evaluados en el mismo punto y con el mismo sensor.

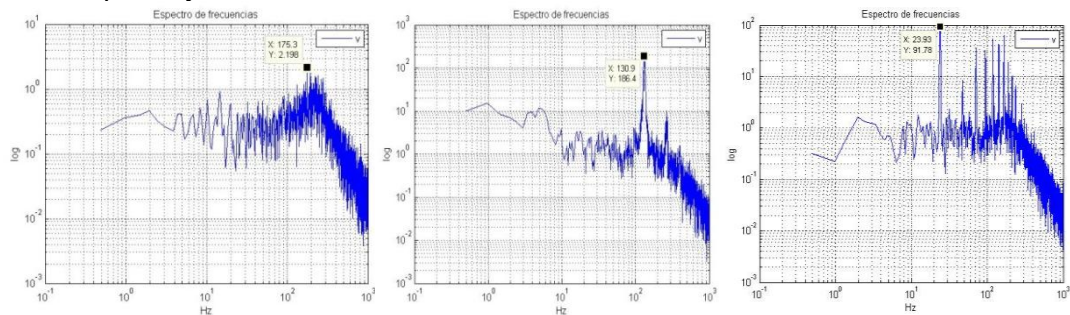


Figura 6. Espectros de densidad de Potencia.

En la Tabla 1 se resumen las escalas espaciales de la turbulencia en la estela del perfil para los diferentes casos, para los 3 sensores y en todas las posiciones corriente abajo.

Análisis de resultados

Respecto de la velocidad en la estela, la componente u de la misma en el perfil solo se incrementa a medida que nos alejamos del mismo (sensor superior – Punta B), el inferior (Punta F) muestra valores prácticamente constantes. Para el Gurney fijo y móvil las velocidades se incrementan. En los Gurney móviles el sensor inferior muestra valores casi constantes, se tienden a emparejar los valores. El flap Gurney genera más downwash en la

Tabla 1. Escalas Espaciales.

Perfil solo

	mm.	6	12	18	24	30	40	80	
Punta B	x	155.8	183.6	162.6	50.78	6.348	117.7	191.9	
	y	4.657	3.693	3.437	3.445	3.478	2.542	2.718	
Punta E	x	33.69	190.4	23.44	18.55	33.2	174.8	212.4	
	y	1.985	2.849	3.232	2.663	2.253	2.494	2.346	
Punta F	x	43.46	49.8	0.9776	49.8	49.8	49.8	49.8	
	y	0.1068	0.2328	0.2367	0.2958	0.4644	0.8061	0.7271	
	120	160	200	240	280	320	360	400	
Punta B		151.4	235.8	49.8	219.7	219.9	238.8	211.4	49.8
		1.869	1.942	1.728	1.492	1.784	1.38	1.403	1.723
Punta E		187.5	247.1	175.3	206.5	223.6	228.5	211.4	247.1
		2.415	2.417	2.198	1.979	2.064	2.082	2.276	1.973
Punta F		187.5	247.1	243.7	233.4	243.7	228.5	211.4	197.8
		0.8511	1.165	1.241	1.85	1.663	1.784	1.873	1.527

Gurney Fijo

	mm.	6	12	18	24	30	40	80
Punta B	x	120.6	122.6	127	125.5	126.5	128.9	129.4
	y	620.2	977.2	820.6	787.8	750.2	532.8	360
Punta E	x	120.6	122.6	122.6	125.5	126.5	128.9	129.4
	y	71.66	484.2	838.8	1422	1562	1240	893.3
Punta F	x	120.6	122.6	126.5	125.5	126.5	128.9	129.4
	y	650.7	786	463.9	663.2	745.8	531.8	436.7
	120	160	200	240	280	320	360	400
Punta B		131.8	134.8	130.9	130.9	134.3	133.8	132.8
		171.9	160.2	81.19	65.21	37.21	49.84	25.77
Punta E		131.8	134.8	130.9	133.8	130.9	134.3	134.3
		436.3	391.2	186.4	158.6	110.7	69.76	60.2
Punta F		132.3	134.8	130.9	133.8	130.4	133.8	130.9
		186.9	213.1	103.7	80.86	57.16	90.4	46.12

Gurney Movil

	mm.	6	12	18	24	30	40	80
Punta B	x	24.41	23.93	23.93	23.93	23.93	23.93	23.93
	y	578.2	572.5	495.2	370	360.7	256	146.6
Punta E	x	24.41	23.93	23.93	23.93	23.93	23.93	23.93
	y	91.81	184.9	224.7	211.7	234.1	266.8	148.9
Punta F	x	24.41	23.93	23.93	23.93	23.93	23.93	23.93
	y	213.4	143.6	79.8	56.83	61.75	96.88	118.9
	120	160	200	240	280	320	360	400
Punta B		23.93	23.93	23.93	23.93	23.93	23.93	23.44
		168.8	150.5	17.4	141.6	128.7	120.2	125.5
Punta E		23.93	23.93	23.93	23.93	23.93	23.93	23.44
		138.1	113.3	91.78	113.5	108.6	108	119.8
Punta F		23.93	23.93	23.93	23.93	23.93	23.93	23.44
		82.36	49.22	33.7	29.05	28.03	29.59	22.56

estela cercana, mientras que el Gurney móvil genera más downwash en la estela lejana. El perfil solo mueve flujo hacia arriba en la estela lejana. Para las diferentes frecuencias, este comportamiento, es similar.

En todos los casos las intensidades de la turbulencia de la estela lejana disminuyen y se emparejan. En el caso del Gurney móvil esta disminución es más importante que el caso del Gurney Fijo. La estela del Gurney móvil es menos turbulenta que la estela del Gurney Fijo.

En el caso de los espectros de frecuencia, no se aprecian cambios importantes en la energía de la estela para el caso del perfil solo. Salvo por una pequeña distorsión seguramente provocada por una inestabilidad en el flujo. Se observa para el caso del Gurney fijo una disminución en la energía de la estela. Los espectros del Gurney móvil muestran que la energía se mantiene más estable sobre la estela.

Del análisis de las funciones de autocorrelación, tomando el criterio del decrecimiento exponencial y la hipótesis de flujo congelado, se determinaron las escalas temporales y espaciales de la turbulencia (como ejemplo ver Tabla 1). Para todos los casos se observa que las escalas aumentaron en la estela lejana. Para el caso de Gurney móvil y fijo las escalas son muy similares. Comparando con el perfil solo las escalas son de aproximadamente la mitad que las correspondientes al Gurney móvil. En el caso del Gurney móvil se observa un comportamiento atípico en las distribuciones de energías medidas con el sensor central. Para las otras frecuencias se dan comportamientos similares.

Conclusiones:

El Gurney móvil genera una estela menos turbulenta que la del perfil con Gurney Fijo. El Gurney móvil genera más downwash que el Gurney fijo en la estela lejana. Las escalas espaciales de la turbulencia aumentan en el caso del Gurney fijo y Gurney móvil con respecto al perfil solo. La energía de la estela del Gurney fijo va disminuyendo a diferencia del Gurney móvil el cual no tiene un comportamiento determinado.

Bibliografía

1. Hah C., Lakshminarayana B., "Measurement and prediction of mean velocity and turbulence structure in the near wake of an airfoil," *Jr. Fluid Mechanics*. Vol.115, 1982 pp. 251-282.
2. Liebeck, R.H., "Design of subsonic airfoils for high lift," *Jr. 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 Trailing 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. 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, USA, 2004.
13. Zulkefli, N.F.; Hussin, F.; Abdullah, M.Z. & Ahmad, K.A. "Numerical investigations of flow field induced by sub-boundary layer vortex generators". *Int. Rev. of Aerospace Eng. (IREASE)*. Praise Worthy & Prize. Feb. 2010
14. Huerre, P., Monkewitz, P., "Absolute and convective instabilities in free shear layers," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 159, 1985, pp. 151-168.
15. Boldes, U.; Delnero, J.; Marañón Di Leo, J.; Colman, J.; Camocardi, M. & François, D. "Influencia en la sustentación, de los vórtices de la estela de un perfil con miniflap tipo Gurney". *Actas 1er Congreso Nacional de Ingeniería Aeronáutica*. La Plata. Dic. 2008.
16. Gai, S.L.; Palfrey, R. "Influence of trailing-edge flow control on airfoil performance". *Journal of Aircraft* 40, Nro. 2. 2003.
17. Meyer, R; Hage, W.; Bechert, D; Schatz, M.; Frank Thiele. "Drag Reduction on Gurney Flaps by Three-Dimensional Modifications". *Journal of Aircraft* 43 Nro.1. 2006
18. Traub, L.; Miller, A.; Rediniotis, O. "Comparisons of a Gurney and jet flap for hinge-less control". *J. of Aircraft* 41, Nro. 2. 2004.
19. Boldes, U; Delnero, J.S.; Marañón Di Leo, J; Colman, J; Camocardi, M. "The wake asymmetry of an airfoil with a Gurney flap and their connection with the observed lift increase". *International Review of Aerospace Engineering* Vol. 3, #2 (2010).