

ESTUDIO NUMERICO Y EXPERIMENTAL DE UN PERFIL EPPLER 205 CON FLAP SIMPLE Y UN FLAP GURNEY EN EL BORDE DE FUGA

Federico Bacchi¹, Julio Marañon Di Leo^{1,2}, Ana Scarabino¹, Sebastián Delnero¹

¹Grupo Fluidodinámica Computacional, GFC, Depto. Aeronáutica,
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Argentina
Calles 1 y 47, 1900 La Plata, Argentina
Email: fbacchi@ing.unlp.edu.ar

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Avda. Riva davia 1917, CP C1033AAJ,
Cdad. de Buenos Aires, Argentina.

RESUMEN

En este trabajo se determinan experimental y numéricamente las variaciones de los coeficientes de sustentación y resistencia con el ángulo de ataque, analizando en particular el comportamiento cerca de la entrada en pérdida, del perfil de bajo Reynolds Eppler 205. El flujo en el túnel de viento alrededor del perfil, se modela empleando un dominio 2-D para un número de Reynolds de $2 \cdot 10^5$, típico para este tipo de análisis. La simulación se efectúa con una malla híbrida, no estructurada en el entorno del perfil, empleando un modelo de turbulencia de dos ecuaciones SST (Shear Stress Transport). Los resultados se comparan con las curvas características obtenidas experimentalmente en el túnel de viento del Área Departamental Aeronáutica de la Facultad de Ingeniería de la UNLP.

Palabras clave: modelo SST, perfiles de bajo Reynolds, flap Gurney

INTRODUCCIÓN

La performance de los perfiles diseñados para bajo número de Reynolds ha sido objeto de investigación creciente en las últimas décadas, con los objetivos de mejorar las prestaciones de aeronaves a baja velocidad y mejorar el rendimiento de hélices y turbinas eólicas. Los “flaps Gurney”, que actúan como dispositivos pasivos de control de flujo, son pequeñas extensiones del borde de fuga del perfil (1-2 % de la cuerda), perpendiculares a la superficie del intradós. Fueron usados primero en alerones de autos de carrera por Dan Gurney, su inventor, y estudiados por Liebeck [1], quien observó los importantes incrementos, tanto en sustentación (L) como en relación sustentación/resistencia (L/D), que introducía el miniflap en el perfil ensayado. La explicación de este efecto está asociada a los cambios en el flujo en la región del miniflap, cuya configuración fue visualizada en experimentos por Neuhart y Pendergraft [2]. En experimentos en túnel de agua se demostró que el flap Gurney produce detrás del mismo una región de recirculación, extendiendo la zona de flujo adherido en el extradós del perfil. Este hecho reduce la resistencia “de forma” a altos ángulos de ataque y ha sido confirmado en trabajos posteriores [3,4]. Por otra parte, la forma del borde de fuga tiene una gran influencia en la sustentación de un perfil. La presión estática antes del flap Gurney es mucho mayor que la presión de la corriente al abandonar el perfil por el intradós [5], contribuyendo a aumentar la sustentación. La contribución total aumenta la circulación del campo de velocidades alrededor del perfil. El uso de estos miniflaps como un mecanismo de control pasivo de flujo pueden también mejorar las características del perfil en flujos no estacionarios como procesos de pérdida dinámica [6] y entornos turbulentos.

Los flaps Gurney han sido estudiados y utilizados no sólo en aeronáutica [7,8] y automovilismo, sino también en turbinas eólicas [9] y otras aplicaciones.

El objetivo de este trabajo es estudiar la influencia en las características aerodinámicas de un miniflap Gurney en el borde de fuga de un perfil Eppler 205 provisto de un flap convencional del 25% de cuerda, con métodos numéricos y experimentales. En particular interesa evaluar las capacidades predictivas del modelo numérico usado, para el problema específico del comportamiento de perfiles de bajos Reynolds en el rango normal de operaciones y en la entrada en pérdida, y comparar los resultados con nuestros datos experimentales.

METODOLOGÍA

Metodología Experimental

Las mediciones se llevaron a cabo en el túnel de viento del Área Departamental Aeronáutica en la Facultad de Ingeniería de la UNLP, el que cuenta con una sección de prueba rectangular de 1.4 m de ancho por 1 m de altura. Para los experimentos en túnel de viento se construyó una planta alar con perfil Eppler 205, de 74 cm. de envergadura y 40 cm. de cuerda, dotado de un "plain flap" de cuerda igual al 25% de cuerda del perfil. En el borde de fuga se colocó un miniflap Gurney del 2% de cuerda del perfil. El flap es accionado mediante servomecanismos, igual que el ángulo de ataque del ala, con un sistema diseñado y construido por el Ing. Mauricio Camocardi. En estos experimentos se deflectó un ángulo de 10°. Para producir un flujo bidimensional sobre el ala, se colocaron en los extremos dos paneles verticales paralelos al flujo. El diseño de estos paneles permite rotar una aleta trasera, para disminuir el espesor de capa límite sobre los mismos.

La velocidad de la corriente fue medida con un termo-anemómetro Dantec Flowmaster. Para medir las fuerzas aerodinámicas se utilizó una balanza aerodinámica de dos componentes, con doble puente de Wheatstone. Las correspondientes señales son acondicionadas con amplificadores Vishay serie 2310 y adquiridas en una PC. Para este trabajo la velocidad de la corriente libre fue de 8 m/s, dando un número de Reynolds de 213000. La intensidad de turbulencia del túnel de viento es del orden del 2%. En base a las mediciones de sustentación (L) y resistencia (D), se calcularon los coeficientes respectivos,

$$C_l = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V^2 bc}; \quad C_d = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V^2 bc}$$

Metodología de Simulación Numérica:

La simulación se basó en las ecuaciones RANS (Random Average Navier Stokes) usando como modelo de cierre para la turbulencia al modelo de dos ecuaciones k- ω SST (Shear Stress Transport) [10].

Las ecuaciones que se resuelven en cada caso son:

La ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0$$

Las ecuaciones de cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\overline{u'_i u'_j} \right) + g_i$$

Donde u_j es la componente j de la velocidad, t es el tiempo, ρ es la densidad del aire, ν es la viscosidad cinemática del fluido y g_i es la fuerza debida a la gravedad, y

$$-\overline{u'_i u'_j} = \frac{1}{\rho} \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad \text{representa el tensor de tensiones turbulentas.}$$

Modelo de turbulencia:

K-omega SST (Shear Stress Transport), [11]

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_k - Y_k \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega \end{cases}$$

\tilde{G}_k representa la generación de energía cinética turbulenta debido al gradiente de velocidades medias, G_ω representa la generación de ε , Γ_k y Γ_ω representan la difusividad efectiva de k y ε , Y_k e Y_ω representan la disipación de k y ε debida a la turbulencia. D_ω representa el término de difusión cruzada

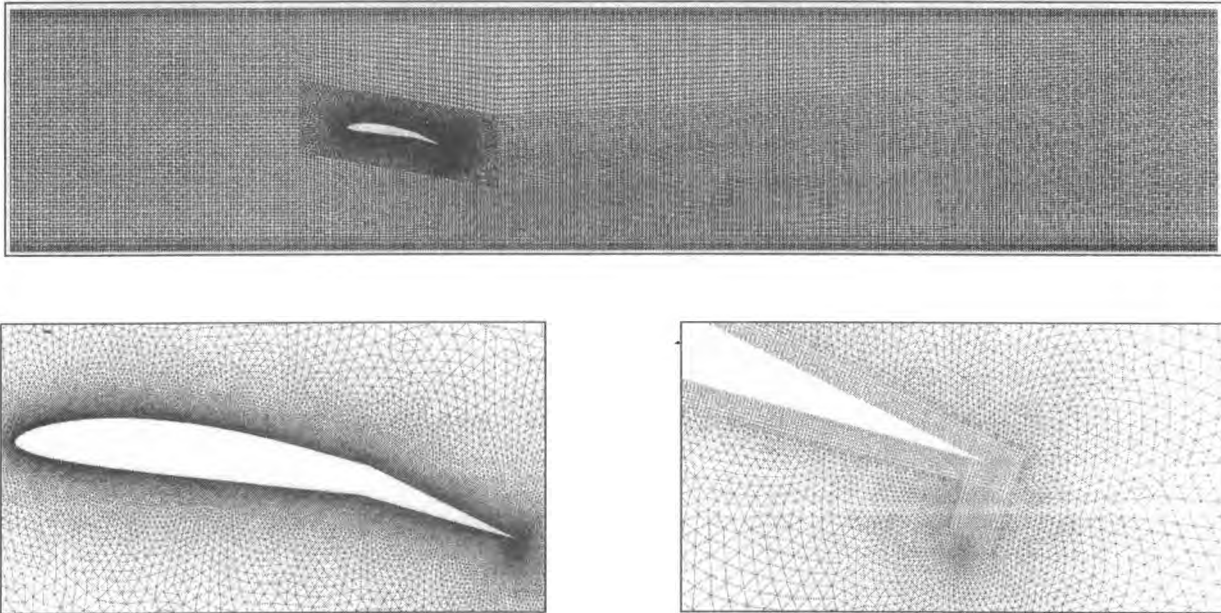


Figura 1: Arriba: dominio de cálculo y discretización. Abajo, detalle del mallado alrededor del perfil. (izquierda) y detalle del mallado alrededor del miniflap Gurney (derecha)

La simulación numérica se efectuó con el software FLUENT. Se utilizó una malla híbrida, no estructurada en la zona próxima al perfil, de 110000 elementos, densificada entorno al perfil y especialmente al flap con Gurney. La menor dimensión del problema, definida por la frontera del Gurney en el borde de fuga del plain flap, se discretiza, a través de sucesivas densificaciones de malla, en 64 elementos. El mallado se muestra en la **Figura 1**. La malla fue refinada sucesivamente hasta que los resultados fueron independientes del tamaño de elemento. Se empleó un dominio de cómputo bidimensional rectangular, reproduciendo la sección transversal de prueba del túnel de viento del Área Departamental Aeronáutica. Como condiciones de frontera se consideraron una entrada de velocidad

constante y salida de presión constante, además de condiciones de pared en el techo y piso del túnel. Se realizó un análisis no estacionario. En experimentos previos con miniflaps Gurney [12] y números de Reynolds similares, se midió la frecuencia de desprendimientos periódicos en el miniflap, resultando en el orden de 200 Hz. Por ello se tomó un intervalo de tiempo para el cómputo de $2.5 \cdot 10^{-4}$ s, es decir, una fracción de 1/20 del periodo aproximadamente esperado para estos desprendimientos. Para completar el modelo de turbulencia, se propuso para la corriente libre el valor inicial medido en el túnel, que es del 2%, y la escala espacial de la misma, que fue determinada en 0.09 m. a partir de la correlación de mediciones anemométricas [13]. Se utilizó una metodología de cálculo no estacionario con formulaciones de segundo orden, a fin de evitar los errores numéricos inherentes a los métodos de primer orden [14]. El algoritmo PISO, "Pressure Implicit with Splitting of Operators", adecuado para flujos no estacionarios, se empleó para resolver el acoplamiento velocidad-presión [10]. Finalmente, los residuos para verificar la convergencia de la solución se definieron en el orden de 10^{-8} .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La **Tabla 1** muestra los valores de C_l y C_d medidos y obtenidos numéricamente en los distintos ensayos y simulaciones para el perfil Eppler 205 con el plain flap deflectado un ángulo de 10 grados. La **Figura 2** muestra las curvas $C_l-\alpha$ y C_l-C_d . Se realizaron mediciones sobre el perfil con y sin Gurney en el borde de fuga del flap, aunque esta última condición no fue simulada numéricamente.

Tabla 1: Coeficientes de sustentación y resistencia a distintos ángulos de ataque

α	Flap-10° C/G Numérico		Flap-10° C/G Experimental		Flap-10° S/G Experimental	
	C_l	C_d	C_l	C_d	C_l	C_d
2	2.04	0.06	1.77	0.07	1.22	0.05
4	2.13	0.06	1.99	0.08	1.46	0.06
6	2.22	0.08	2.13	0.11	1.66	0.07
8	2.31	0.09	2.26	0.13	1.76	0.09
10	2.39	0.11	2.32	0.16	1.89	0.11
12	2.44	0.23	2.35	0.20	1.95	0.14
14	2.33	0.27	2.27	0.26	1.88	0.19
16	2.11	0.46	2.02	0.49	1.78	0.38

Por razones de tiempo de cómputo, no se alcanzó a simular el flujo en el perfil sin flap Gurney. Puede verse que el uso del Gurney aumenta sustancialmente el coeficiente de sustentación del perfil con flap en los valores experimentales, llevando el máximo C_l de 1.95 a 2.35. La resistencia aumenta aproximadamente en la misma proporción, por lo que el aumento de sustentación no se acompaña con una disminución en la eficiencia del perfil. Por otra parte, la simulación numérica del perfil con flap y Gurney arrojó valores de sustentación superiores aproximadamente en un 5% para todos los ángulos de ataque, excepto a 2 grados, en que la diferencia alcanza al 10%. Los valores de C_d obtenidos numéricamente son menores que los experimentales, por lo que la polar C_l-C_d calculada se desplaza hacia el eje de C_l .

A partir de la simulación del campo fluidodinámico, se pueden analizar características del flujo alrededor del perfil, que permiten explicar las variaciones de sustentación y resistencia introducidas por el flap Gurney.

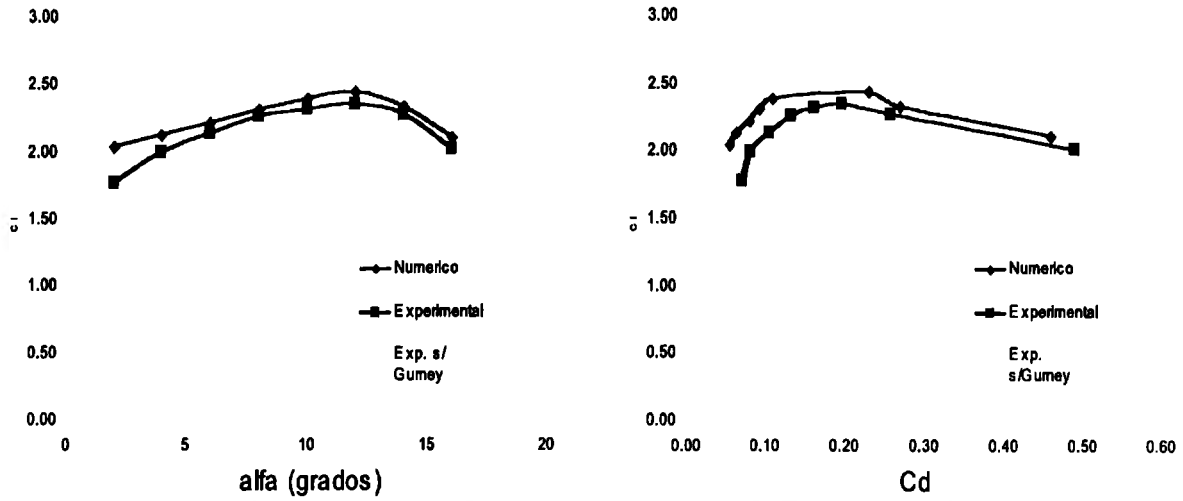


Figura 2: Curvas C_l - α (izquierda) y C_l - C_d (derecha) para el perfil E205 con plain flap a 10 grados. La condición "Numérico" corresponde sólo al flap con Gurney.

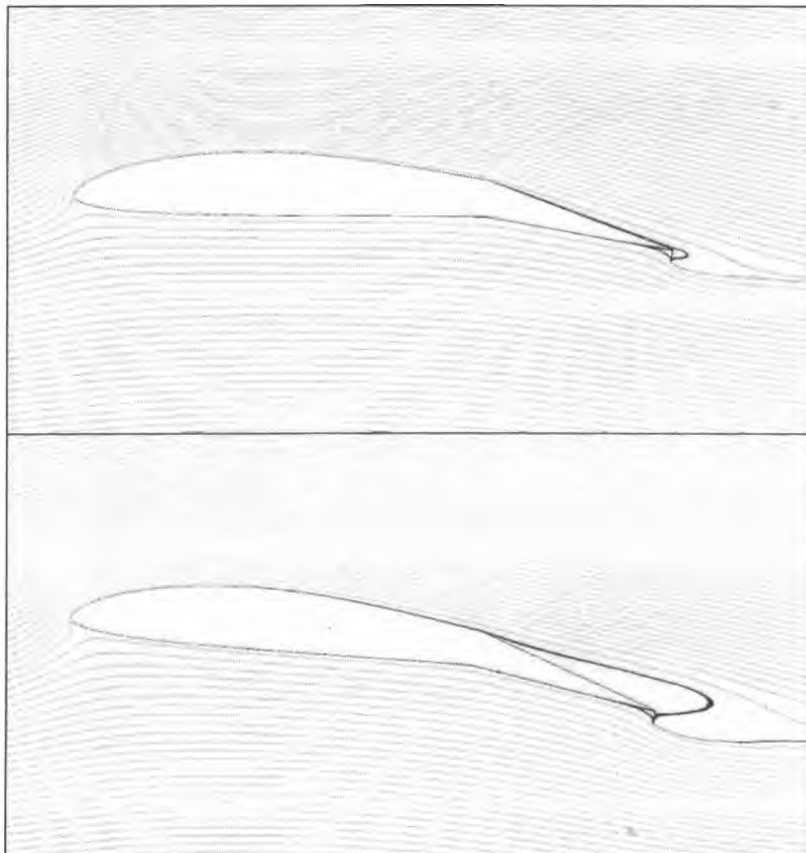


Figura 3. Instantáneas de líneas de trayectoria sobre el perfil, a 2 (arriba) y 6 (abajo) grados de incidencia. La zona de recirculación sobre el flap con el perfil a 6 grados es no estacionaria, con fluctuaciones periódicas

En la Figura 3 pueden verse una instantánea de líneas de trayectoria sobre el perfil a 2 y 6 grados de incidencia. A 2 grados se observan las dos zonas de recirculación, anterior y posterior, que genera el

miniflap. La pequeña zona de recirculación que se genera detrás del flap Gurney-introduce cambios en el flujo externo similares a una extensión de la superficie del plain flap, aumentando así su eficiencia. Para un ángulo de ataque de 6 grados, en el que la capa límite en el extradós del plain flap se ha desprendido, la recirculación detrás del Gurney se une a la del alerón, y esto induce el descenso de las líneas de trayectoria. Si bien esta condición no es estacionaria, con oscilaciones periódicas, el efecto global mejora sustancialmente la contribución del flap en esta condición de flujo.

Por último, en la condición de máxima sustentación (12 grados) vórtices de gran escala se desprenden periódicamente del extradós, alternando la condición del flujo entre adherido al perfil y totalmente desprendido, como se muestra en las instantáneas de la **Figura 4**. Detrás del Gurney se genera recirculación de sentido opuesto que es rápidamente disipada en la estela. La resistencia media del perfil aumenta rápidamente como consecuencia del campo de baja presión introducido por estos vórtices, aunque tanto el C_l como el C_d presentan fluctuaciones importantes alrededor de su valor medio, en sintonía con la frecuencia de desprendimientos de flujo.

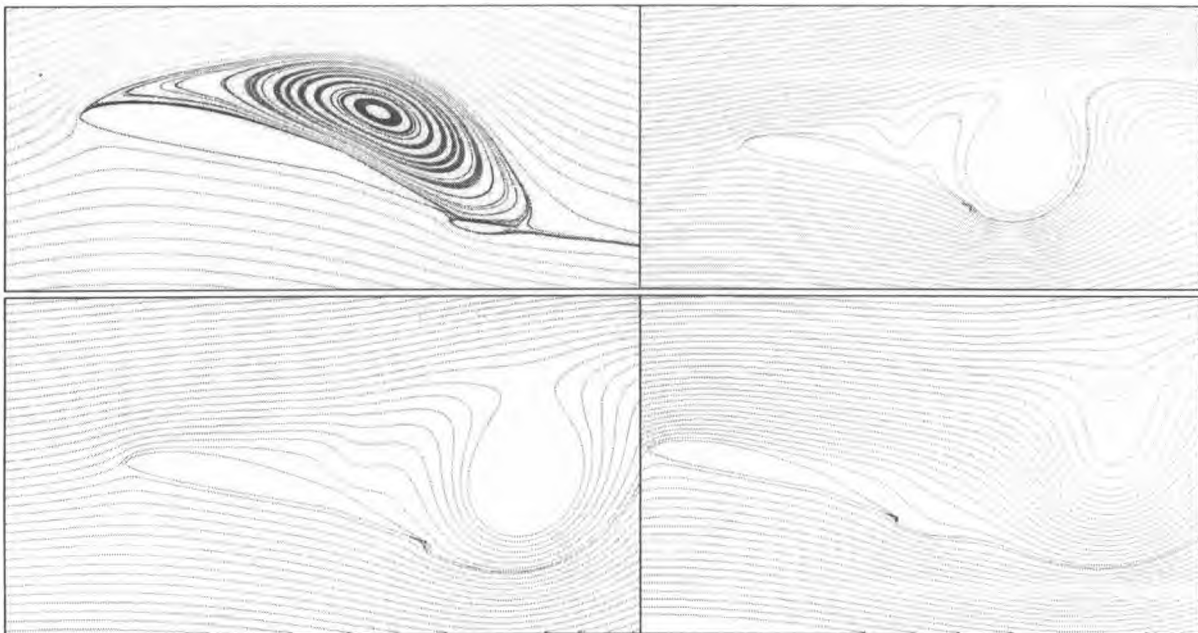


Figura 4: Instantáneas sucesivas del flujo alrededor del perfil a 12 grados de incidencia. Salvo en la primera imagen, por simplicidad se eliminaron las líneas de trayectoria de los vórtices desprendidos, que se visualizan como las regiones blancas de forma aproximadamente circular.

Es interesante verificar que la condición de máxima sustentación corresponde a una situación de flujo no estacionario. Sin embargo, para poder determinar hasta qué punto influye el Gurney flap en esta configuración, son necesarias simulaciones numéricas del perfil sin este dispositivo, las que se llevarán a cabo próximamente.

CONCLUSIONES

Se estudió en forma numérica y experimental el comportamiento de un perfil Eppler 205 con un plain flap deflectado 10 grados y un miniflap Gurney en el borde de fuga del mismo. El incremento de sustentación logrado con el flap Gurney es de alrededor de 0.4 en todo el rango estudiado, sin modificar la relación C_l/C_d . El ángulo de pérdida tampoco se ve afectado por el Gurney. El modelo numérico de turbulencia "Shear Stress Transport" predice los resultados razonablemente, aunque sobreestimando la sustentación en un 5% aproximadamente. El modelo numérico permite estudiar la configuración en la estela del perfil y especular sobre los mecanismos aerodinámicos que producen el incremento de sustentación debido al miniflap. El modelo numérico permite estudiar sucesivas

instantáneas del flujo e identificar las estructuras coherentes que dominan su dinámica en condiciones de flujo desprendido. En particular se observa el mayor desvío promedio hacia abajo de las líneas de trayectoria en el borde de fuga, lo que contribuye a mejorar la eficiencia del plain flap o alerón deflectado.

Futuros trabajos incluyen probar distintos modelos numéricos de turbulencia, buscando el que mejor represente los resultados experimentales, y el análisis del efecto del flap con Gurney en otras posiciones.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los Ing. Matías Giannecchini y Daniela François por su colaboración en la parte experimental de este trabajo.

REFERENCIAS

1. Liebeck, R.H., "Design of subsonic airfoils for high lift," *Journal of Aircraft*, 1978, 15, No. 9, pp. 547-561.
2. Neuhart, D.H. y O.C. Pendergraft, "A water tunnel study of Gurney flaps". Memorandum 4071 (1988).
3. Bloy, A.W. y M.T. Durrant, "Aerodynamic Characteristics of an aerofoil with Small Trailing Edge Flaps," *Wind Engineering* 19, (1995) 167-172.
4. Storms, B.L. and C.S. Jang, "Lift Enhancement of an Airfoil Using a Gurney Flap and Vortex Generators" *Journal of Aircraft* 31, (1994) 542-547
5. Henne, P.A. "Innovation with computational aerodynamics: The divergent trailing edge airfoil". *Progress in Aeronautics and Astronautics Series V-125, AIAA* (1990).
6. Price, Jennifer Lou: "Unsteady Measurements and Computations on an Oscillating Airfoil with Gurney Flaps", Thesis for MSc. Degree. North Carolina State Un, 2001.
7. Schatz, M.; B. Gunther and F. Thiele, "Computational Modeling of the Unsteady Wake Behind Gurney-Flaps". 2nd AIAA Flow Control Conference, Portland, Oregon, USA (2004).
8. Thiele, F., E. Wassen, B. Guenther, J. S. Delnero, J. Marañón Di Leo, U. Boldes, J. Colman, F. Bacchi, and M. Martinez, "A combined numerical and experimental study of miniflaps at varying positions on an airfoil," 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada, USA (2007).
9. Kentfield, J.A.C. "Theoretically and experimentally obtained performances of Gurney flap equipped wind turbines", *Wind Engineering*, 18, 63-74 (1994).
10. J. L. Ferziger and M. Peric: "Computational Methods for Fluid Dynamics.", Springer-Verlag, Heidelberg, 1996.
11. Menter F. R, "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications", *AIAA Journal*, (1994), Vol. 32, pp. 1598-1605
12. Colman J., Marañón Di Leo J., Delnero J. S., Martinez M., Boldes U. y Bacchi F., "Lift and drag coefficients behaviour at low Reynolds number in an airfoil with miniflaps Gurney submitted to a turbulent flow. Part 1", *Latin American Applied Research*, (2008) Vol. 38 N. 3, pp. 195-200
13. Bruun, H. H., "Hot Wire Anemometry. Principles and signal analysis," (1955), Oxford university Press Inc., New York.
14. Blazek J., "Computational Fluid Dynamics: Principles and applications", Elsevier Science, Oxford UK, 2001