

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UN PERFIL CON PLAIN FLAP Y UN MINIFLAP GURNEY EN EL BORDE DE FUGA

Julio Marañon Di Leo^{a,b}, Juan Sebastián Delnero^{a,b}, Mauricio Camocardi^{a,b}, Jorge Colman^a y Mariano Garcia Sainz^a

^aLaboratorio de Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental, Dto. de Aeronáutica, Fac. de Ingeniería (UNLP). Calle 116 e/47 y 48 – (1900) La Plata – Pcia. Bs. As. - Argentina

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

Palabras Clave: Perfiles de bajo Reynolds, flap Gurney, plain flap, aerodinámica

Resumen. En este trabajo se determinan experimentalmente la influencia en los coeficientes aerodinámicos, de un plain flap junto con un flap Gurney en el borde de fuga del mismo y al 10% de cuerda medido desde el borde de fuga. Hay muchos trabajos sobre los efectos aerodinámicos de los plain flaps y de los Gurney, en calidad de dispositivos pasivos de control de flujo, en perfiles y alas. El objetivo del presente trabajo es el estudiar los efectos de ambos sistemas de control pasivo de flujo actuando de manera conjunta, comparando su desempeño individual en cada caso. Así buscamos analizar la entrada en pérdida, los ángulos de pérdida, de sustentación nula y la performance aerodinámica del conjunto. Los ensayos se realizaron en túnel de viento con un modelo de un perfil Eppler 205 modificado (perteneciente a los denominados perfiles de bajo Reynolds). De los estudios podemos inferir que, el plain flap actuando junto con el Gurney en el borde de fuga, permite alcanzar mayores C_L que cada uno independientemente, si bien la acción conjunta de ambos disminuye el ángulo de entrada en pérdida respecto del perfil solo. Asimismo, la acción conjunta de ambos dispositivos en ciertas configuraciones disminuye la resistencia respecto del perfil con el plain flap o el perfil con Gurney. La eficiencia aerodinámica del modelo con los dos dispositivos actuando simultáneamente resulta menor que la del modelo limpio, pero mejor que la de éste en el rango de ángulos de ataque desde -5° hasta $+3^\circ$. Los comportamientos de ambos dispositivos, por separado, exhiben características similares y, actuando conjuntamente, permitirían un mejor control del avión en las proximidades de la pérdida, sobre todo, con el Gurney en el borde de fuga. Estos hechos son interesantes pues estamos hablando de dispositivos pasivos que, como el Gurney, son sencillos de implementar.

1 INTRODUCCIÓN

El control del flujo sobre un cuerpo incluye todo tipo de mecanismo o proceso a través del cual el flujo en el entorno del cuerpo es llevado a un comportamiento diferente del que exhibiría si se desarrollara normalmente en la ausencia de dichos mecanismos y/o procesos. Los objetivos del control de flujo en general consistirán, 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 del tipo 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 los autores estudiaron los efectos aerodinámicos de un plain flap y de un mini-flap tipo Gurney, como dispositivos pasivos de control de flujo, actuando de manera separada y combinada. Los plain flaps son parte del borde de fuga del ala con capacidad de girar alrededor de un eje según la envergadura alar, capaces de efectuar un movimiento descendente aumentando la curvatura del perfil (o ala en el caso del avión). Al girar no generan una ranura entre la parte fija del ala y el flap, como sí lo hacen otros dispositivos. Los plain flap incrementan la sustentación del ala por aumento de su curvatura, produciendo también un incremento en términos absolutos del ángulo de ataque de sustentación nula y disminuyendo el ángulo de ataque para máxima sustentación (ángulo de pérdida). Incrementa, también, la resistencia aerodinámica. De esta manera el plain flap se comporta como un dispositivo pasivo de control de flujo, llamémoslo, clásico. Sus características y desempeño son muy bien conocidos en aeronáutica, desde las primeras décadas de la misma. Por otra parte, el Gurney flap, más moderno que el plain flap, es una pequeña placa a lo largo de la envergadura, ubicada sobre el intradós en el borde de fuga o cerca de él, perpendicular a la cuerda del perfil. Son conocidos los trabajos pionero de Liebeck (1978), Neuhart y Pendergraft (1988), Bloy y Durrant (1995), Storms y Jang (1994), quienes mostraron que dichos flaps incrementaban el coeficiente de máxima sustentación, disminuían el ángulo de ataque de sustentación nula, pero aumentaban algo la resistencia. Los efectos favorables de dichos flaps atrajeron el interés de numerosos investigadores. Giguère y otros (1995), en sus pruebas en perfiles aerodinámicos, encontraron que los efectos benéficos del Gurney, desde el punto de vista de un incremento de la performance aerodinámica, se daban si la altura del mismo no excedía el espesor local de la capa límite (mini-flaps en este caso). Traub y Gall (1999), en sus investigaciones acerca del uso de Gurney flaps en alas delta, mostraron que ellos mejoraban la eficiencia aerodinámica para el mismo C_L , mientras que Jang y otros (1992), basados en trabajos computacionales, sugirieron que los Gurney cambiaban el gradiente adverso de presiones cerca del borde de fuga, mejorando la succión en el extradós. Myose y otros (1998) probaron Gurney flaps con varias alturas en perfiles simples, perfiles multielementos y alas, encontrando que adecuadamente posicionados, los Gurney flaps mejoraban la performance aerodinámica. Buchholz (2000) comparó los efectos de Gurney flaps y placas de borde de ataque en alas delta con 60° de flecha positiva, encontrando que los Gurney incrementaban la performance pero producían un temprano rompimiento de la estela vorticosa. Jeffrey y otros (1996, 2000) estudiaron los Gurney flaps en general y en alas con elementos simples de control pasivo de flujo. Otros mecanismos de control de flujo, como el de la capa límite en particular, están bien descritos por Flatt (1961). Fiedler y Fernholz (1990) prefirieron llamar al control pasivo del flujo como manejo de flujo. En ese contexto, siguiendo a Fiedler y otros (1990), los plain flap y los mini-flaps Gurney serían manejadores de flujo. Jang y otros (1998) realizaron experimentos computacionales con perfiles con flaps Gurney y Li y otros (2007) estudiaron, experimentalmente, los efectos de un borde de fuga divergente y flaps Gurney en perfiles supercríticos. Más aún, en muchas situaciones de interés aeronáutico, las condiciones del flujo en el que están inmersos los perfiles son de naturaleza turbulenta. En ese contexto Delnero y otros (2005) estudiaron la influencia de las escalas turbulentas sobre los coeficientes de sustentación y resistencia de perfiles de bajo Reynolds. En otro trabajo, Colman y otros (2008) analizaron el comportamiento de los coeficientes aerodinámicos de un perfil de bajo Reynolds con un miniflap en el borde de fuga. En el presente trabajo, los autores proponen el estudio del comportamiento aerodinámico de un plain flap

y un flap Gurney actuando de manera simultánea en un perfil. A tal fin se han efectuado ensayos experimentales en un modelo de ala (sin torsión geométrica) con el perfil de bajo Reynolds Eppler 205, equipado con un plain flap y un miniflap Gurney en el intradós del borde de fuga del plain flap. El objetivo principal es el de analizar los efectos de ambos dispositivos, actuando de manera conjunta, sobre los coeficientes aerodinámicos y la eficiencia aerodinámica del perfil, comparando asimismo con el desempeño de cada dispositivo por separado sobre el perfil. Se evaluaron los incrementos de sustentación y resistencia, así como también las eficiencias aerodinámicas involucradas. Uno de los puntos importantes es verificar la pérdida y encontrar para que ángulos es más eficiente alguno de los dispositivos actuando en conjunto o separadamente.

2 METODOLOGÍA

2.1 Metodología Experimental

Las mediciones se llevaron a cabo en el túnel de viento del Departamento de 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, sobre el intradós, 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 para tal fin. 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 y de esta manera conseguir una distribución homogénea de presiones sobre la zona de prueba.

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 media 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, con ayuda de las siguientes expresiones:

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

Para determinar la sustentación y resistencia del modelo se adquieren los valores de carga de la balanza para diferentes ángulos de ataque del perfil, que va desde -10° hasta más allá de la entrada en pérdida, que es alrededor de 20° . Para cada valor de ángulo de ataque, se releven valores de temperatura, velocidad, sustentación y resistencia. El primer ensayo se realiza con el perfil solo, o sea sin desplegar ningún dispositivo de hipersustentación. Luego se desplego el flap plain a 10° y se realizaron nuevamente las mediciones, con el ala sola y con el Gurney en el borde de fuga del plain flap y también con el Gurney ubicado al 10% de cuerda desde el borde de fuga sobre el intradós. Este ensayo se repitió también para el plain flap desplegado a 20° . También se realizó el ensayo de cargas midiendo solamente el Gurney en ambas posiciones pero sin desplegar el plain flap. Esto hace un total de 8 ensayos diferentes para comparar y extraer conclusiones respecto al efecto que estos dispositivos producen sobre el perfil.

3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

La Figura 1 nos muestra el coeficiente de sustentación C_L en función del ángulo de ataque, para el perfil solo y para el perfil con posiciones del miniflap Gurney en el intradós, sobre el borde de fuga y al 10%c, contado desde el borde de fuga. Del análisis de la misma surge que el caso del perfil, con el miniflap en el borde de fuga, incrementa el coeficiente de sustentación en todo el rango y no exhibe cambio apreciable respecto de la entrada en pérdida. En cambio, cuando el miniflap se ubica al 10%c, sobre el intradós, si bien incrementa el C_L , este incremento es menor que el del caso anterior y, por

otra parte, el ángulo de entrada en pérdida se ve disminuido respecto del perfil solo o con el miniflap en el borde de fuga.

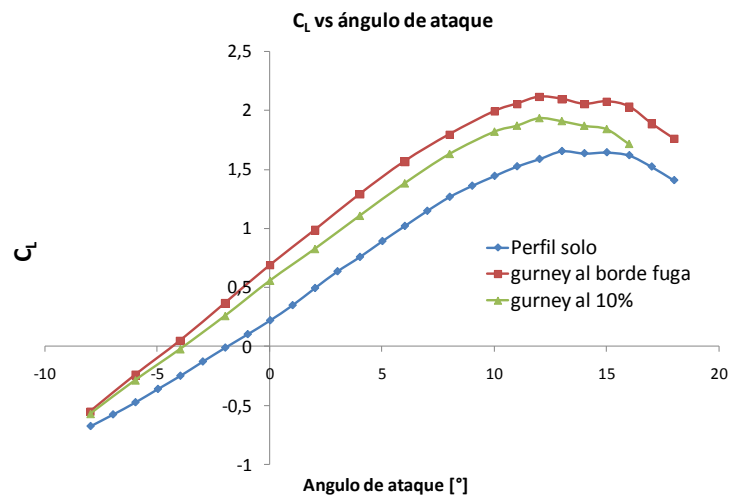


Figura 1: Curvas C_L vs. Ángulo de ataque sin flap.

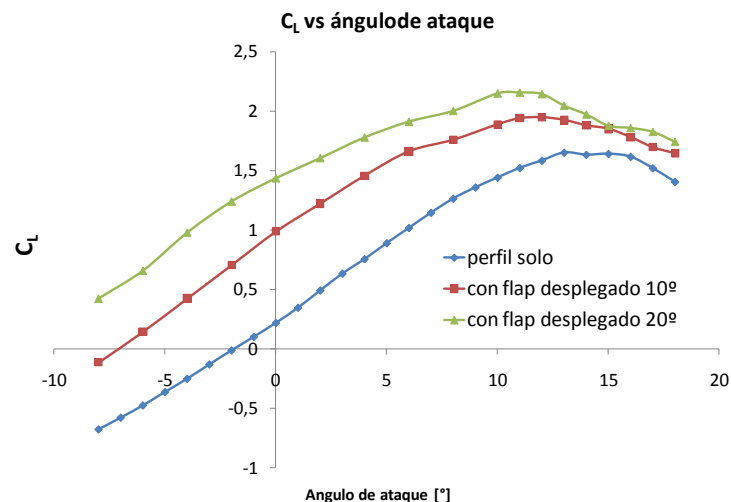


Figura 2: Curvas C_L vs. Ángulo de ataque con flap.

Si nos fijamos en la Figura 2 (C_L vs ángulo de ataque para el caso del plain flap), vemos que el incremento del C_L es mayor en gran parte del rango de ángulos de ataque, comparando con el miniflap Gurney, si bien el $C_{Lm\acute{a}x}$ en ambos casos es similar. No obstante en este caso del plain flap, para las dos configuraciones de despliegue, disminuye el valor del ángulo de entrada en pérdida.

La Figura 3 nos muestra al perfil solo y al mismo con los dos dispositivos (plain flap y Gurney), con el Gurney en el borde de fuga. Con el plain flap desplegado 20° y el Gurney en el borde de fuga del mismo, el $C_{Lm\acute{a}x}$ es algo mayor que en las configuraciones con los dispositivos independientes (ver Figuras 1 y 2), pero la entrada en pérdida es a menores ángulos de ataque (tanto con el plain flap a 10° como a 20°). De hecho, la forma de las curvas es similar al caso de plain flap solo, pero los C_L son mayores en el caso combinado (Figura 3). La Figura 4 nos muestra el perfil solo y los casos combinados, pero con el Gurney al 10% de distancia del borde de fuga. En este caso no hay diferencias significativas entre el plain flap a 10° y a 20°, dado que prácticamente se superponen en casi todo el rango de ángulos de ataque. El incremento en los C_L es algo mayor que en los casos independientes, si bien el $C_{Lm\acute{a}x}$ que se alcanza es muy similar al de los casos independientes, aunque algo menor que en la configuración con el Gurney en el borde de fuga (Figura 3). También podemos indicar de lo observado en la Figura 4 que, si bien en principio, se podría suponer que la diferencia entre los C_L del caso con el plain flap a 10° y 20° de deflexión con el Gurney flap a 10% “deberían” tener un valor mayor, la gráfica muestra otra situación. Los autores consideran que este

comportamiento amerita un estudio posterior detallado del campo fluidodinámico en el entorno y corriente abajo de la estela generada por la combinación de dispositivos, particularmente en la estela cercana.

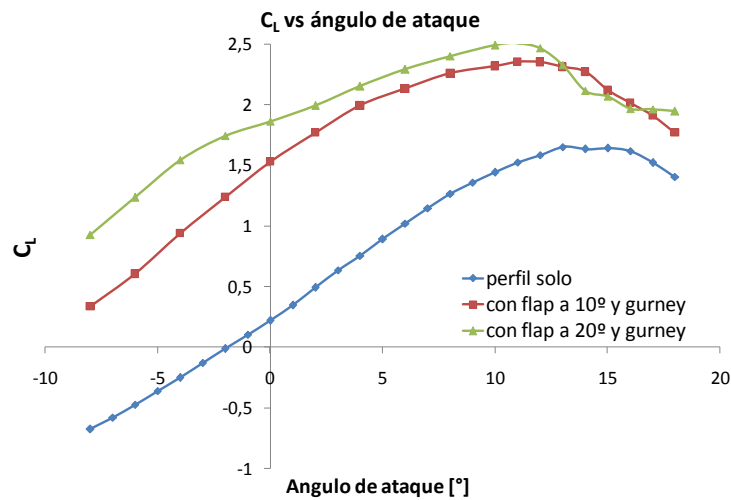


Figura 3: Curvas C_L vs. Ángulo de ataque con flap y Gurney al borde de fuga.

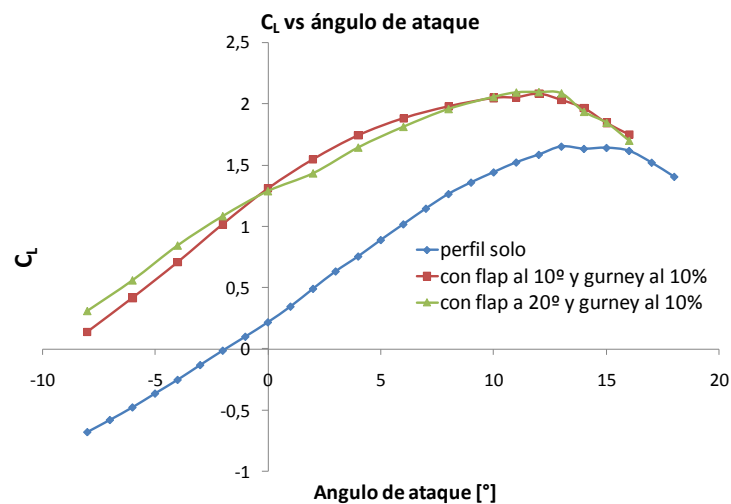


Figura 4: Curvas C_L vs. Ángulo de ataque con flap y Gurney al 10% c.

De estos análisis podemos inferir que, el plain flap actuando junto con el Gurney en el borde de fuga, permite alcanzar mayores C_L que cada uno independientemente, pero al actuar juntos disminuye el ángulo de entrada en pérdida.

En la Figura 5 se graficó C_D en función del ángulo de ataque, correspondiente al perfil solo y el perfil con el Gurney en las dos posiciones (borde de fuga y al 10% c). Se aprecia un incremento general de la resistencia del perfil con Gurney (en ambas posiciones) respecto del perfil solo, lo cual era esperable. Resulta interesante puntualizar que las curvas de resistencia correspondientes al Gurney en distintas posiciones son muy parecidas entre sí y, asimismo, los valores de C_D también. En cambio, en la Figura 6, donde se graficó C_D vs ángulo de ataque para el perfil solo y con el plain flap, en sus dos posiciones, vemos que para ángulos de ataque positivos, la resistencia correspondiente al plain flap en su despliegue de 20°, prácticamente duplica la correspondiente al plain desplegado 10°, siempre en referencia al perfil solo.

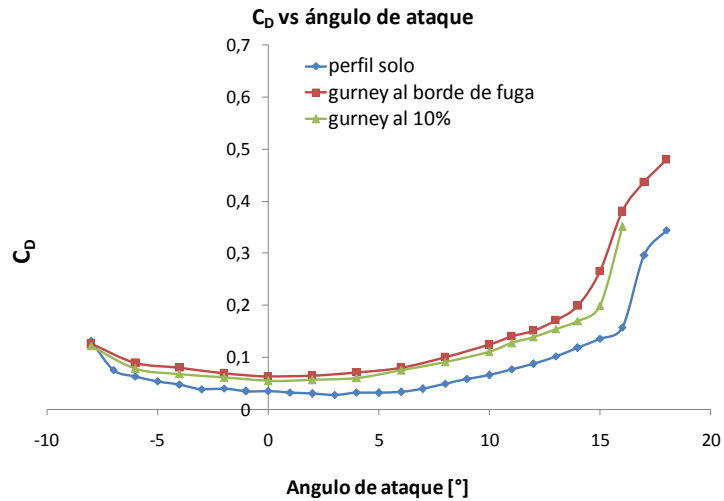


Figura 5: Curvas C_D vs. Ángulo de ataque sin flap.

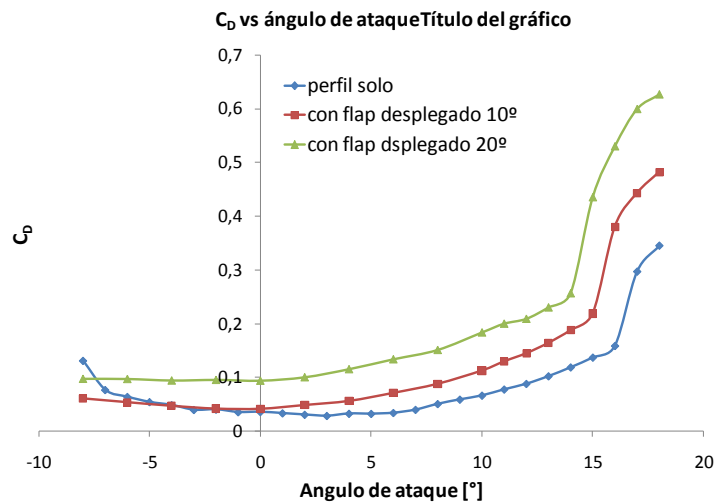


Figura 6: Curvas C_D vs. Ángulo de ataque con flap.

Las Figuras 7 y 8 nos muestran al perfil solo y al mismo con ambos dispositivos, con el Gurney en el borde de fuga (Figura 7) y al 10%c (Figura 8). En ambas situaciones no se observan cambios significativos entre sí, si bien el incremento de resistencia resulta claramente mayor cuando el plain flap está desplegado 20º, respecto del caso de 10º. Además, en prácticamente todo el rango de ángulos de ataque el incremento de resistencia del perfil con los dispositivos actuando simultáneamente es mayor que cuando actúan separadamente, sobre todo, en el caso del plain flap desplegado 20º.

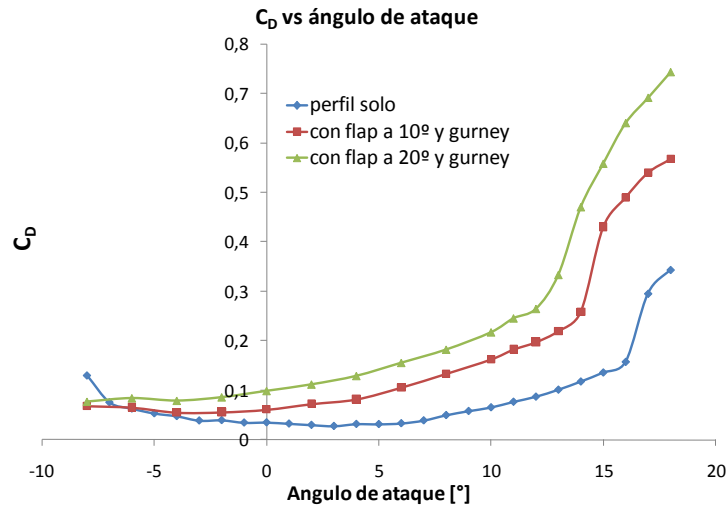


Figura 7: Curvas C_D vs. Ángulo de ataque con flap y Gurney al borde de fuga.

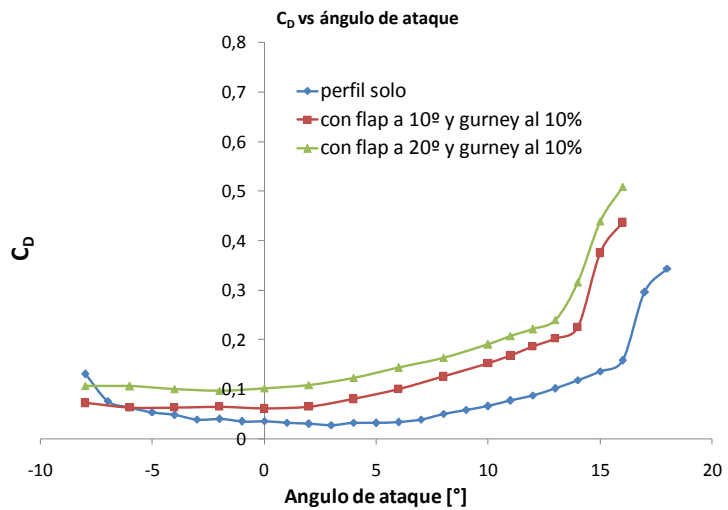


Figura 8: Curvas C_D vs. Ángulo de ataque con flap y Gurney al 10% c.

Las Figuras 9 y 10 nos muestran las eficiencias aerodinámicas (C_L/C_D) del perfil solo, con Gurney en el borde de fuga y combinados plain flap c/Gurney en el borde de fuga (Figura 9) y combinados c/Gurney al 10% c (Figura 10). Analizando la Figura 9, apreciamos que la curva para el perfil solo tiene pendientes más pronunciadas con un pico de eficiencia para un estrecho margen de ángulos positivos de ataque entre 5° y 7°. Las otras curvas tienen pendientes menos pronunciadas. La correspondiente al Gurney en el borde de fuga tiene menor eficiencia que el perfil solo, pero sus pendientes son menos pronunciadas. La eficiencia del sistema combinado, para deflexión del plain flap de 20° es sensiblemente menor, sobre todo en los ángulos de ataque positivos, que la del flap a 10°. No obstante, para ángulos de ataque mayores a 5°, la eficiencia de ambos casos decae sensiblemente respecto del caso del perfil solo. El comportamiento cualitativo de las eficiencias para los casos combinados con el Gurney a 10° (Figura 10), es semejante al caso con el Gurney en el borde de fuga, pero con pendientes más suaves en los ángulos de ataque positivos.

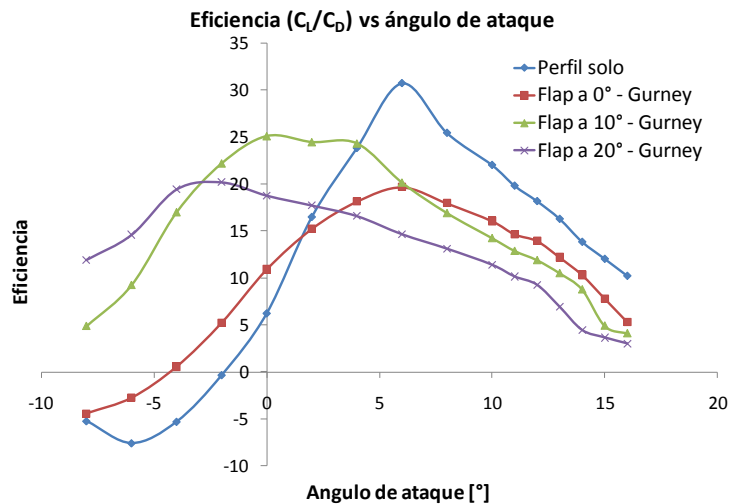


Figura 9: Curvas de Eficiencia vs. Ángulo de ataque con flap y Gurney al borde de fuga.

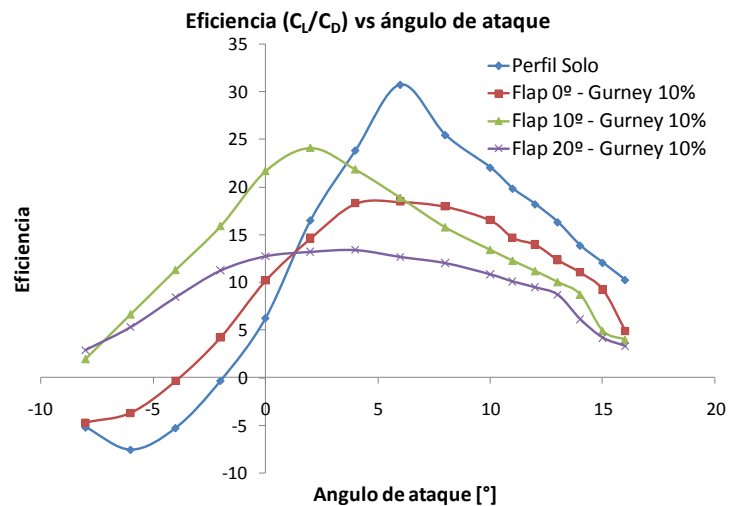


Figura 10: Curvas de Eficiencia vs. Ángulo de ataque con flap y Gurney al 10%.

Con el propósito de avanzar más y alcanzar conclusiones más precisas acerca del desempeño conjunto de ambos dispositivos de control de flujo, hemos procedido a analizar la variación de C_D en función del ángulo de ataque, siendo dicha variación la diferencia entre el C_D del perfil con ambos dispositivos actuando simultáneamente y la suma de los C_D del perfil con cada dispositivo por separado. Igual procedimiento se efectuó con el C_L . De esta manera buscamos detectar el comportamiento de los coeficientes aerodinámicos del perfil con ambos dispositivos, relativos a dichos comportamientos, cuando el perfil tiene uno u otro dispositivo independientemente, permitiéndonos conocer las ventajas y/o desventajas del conjunto en función de los ángulos de ataque y/o ante la actitud de vuelo. Precisamente, la Figura 11 nos muestra la variación de C_D en función del ángulo de ataque. Nos focalizaremos en las situaciones en las cuales dicha variación de C_D no es nula o muy pequeña, pues en ese caso prácticamente no habría diferencias entre los comportamientos del perfil con los dispositivos combinados y por separado, sino en aquellos en donde las diferencias son apreciables. Vemos que en el rango de ángulos de ataque positivos, las variaciones de C_D se vuelven claramente negativas en los casos del perfil con el plain flap a 20° y el Gurney en el borde de fuga y los del perfil con el flap a 20° y el Gurney al 10%c, que nos permite inferir que en el primer caso, la disminución global de la resistencia es mayor que en el segundo caso.

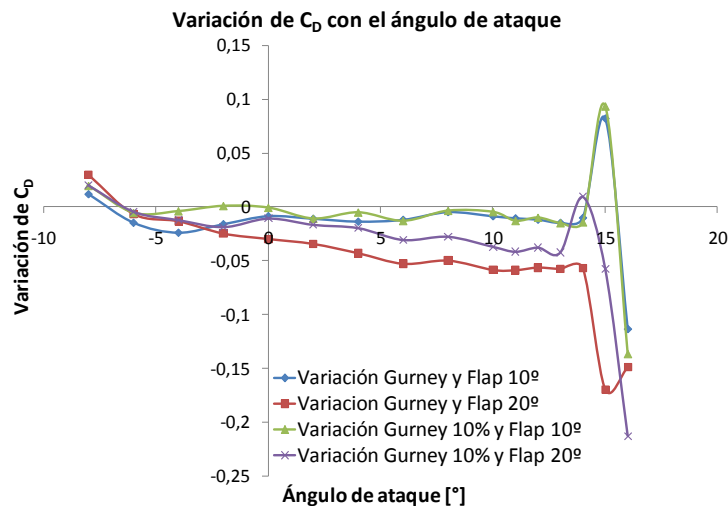


Figura 11: Curvas de la variación de C_D en las distintas condiciones.

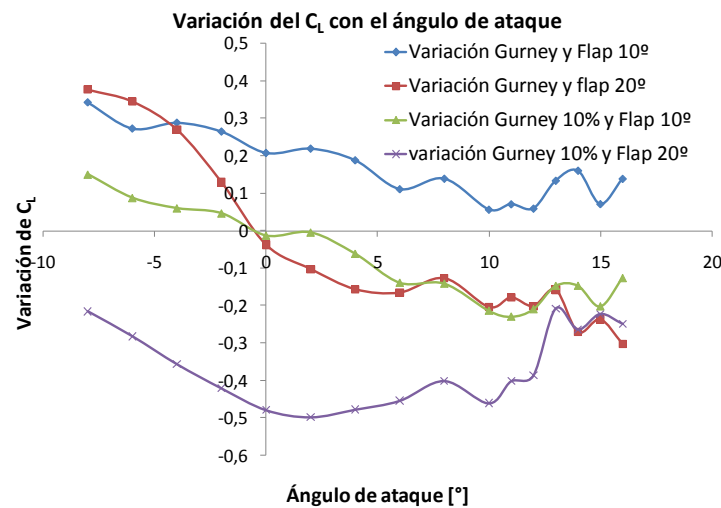


Figura 12: Curvas de la variación de C_L en las distintas condiciones.

La Figura 12 nos muestra la variación de C_L mediante las curvas correspondientes a los casos mencionados más arriba, en referencia al comportamiento de los C_D , allí observamos caídas en ambos casos del C_L , siendo más pronunciadas las correspondientes al perfil con el plain a 20° y el Gurney al 10%. En consecuencia, para dichas configuraciones tendríamos una disminución de la resistencia pero también una pérdida en la sustentación, sobre todo, en un amplio rango de ángulos de ataque.

Del análisis de las Figuras 1 y 2 podemos inferir, también, que en el ala con cada dispositivo actuando independientemente, se incrementa (en términos absolutos) el ángulo de sustentación nula. Este incremento es mayor en el ala con el plain flap que en la misma con el Gurney. Asimismo, del análisis de las Figura 3 y 4 surge que no hay diferencia detectable entre los ángulos de sustentación nula producidos por ambos dispositivos independientemente y actuando en conjunto, si bien el comportamiento conjunto es muy semejante al del ala con el plain solo.

4 CONCLUSIONES

De los estudios podemos inferir que, el plain flap actuando junto con el Gurney en el borde de fuga, permiten alcanzar mayores C_L que cada uno independientemente, si bien la acción conjunta de ambos disminuye el ángulo de entrada en pérdida respecto del perfil solo. Por otra parte, la acción conjunta de ambos dispositivos disminuye la resistencia respecto del perfil con cada dispositivo actuando independientemente. La eficiencia aerodinámica del modelo, con cada dispositivo independientemente o actuando simultáneamente, resulta menor que la del modelo limpio. Los comportamientos de ambos dispositivos, por separado, exhiben características similares. Ambos dispositivos, actuando

simultáneamente, disminuyen las pendientes de la curva correspondiente al perfil limpio, esto es, “planchan” la curva respecto del perfil limpio, y a su vez disminuyen el valor pico de dicha eficiencia que exhibe el perfil limpio alrededor de los 7° de ángulo de ataque. Pero dicho “planchado” permite alcanzar mejores eficiencias en el rango de los pequeños ángulos de ataque y asimismo en los negativos. Si nos fijamos en el rango de ángulos de ataque de pérdida, la acción de ambos dispositivos simultáneamente permite reducir la resistencia respecto del perfil limpio y asimismo incrementar la sustentación, sobre todo, en dicho rango de ángulos de ataque, a costas de una ligera disminución del ángulo de entrada en pérdida. Esta conclusión nos lleva a que, desde el punto de vista de la eficiencia, no sería aconsejable el empleo simultáneo de ambos dispositivos en actitudes o ángulos de ataque altos, y/o cercanos a la pérdida.

Para un caso de aproximación en aterrizaje, alrededor de los 3° de ángulo de ataque, el caso de flap desplegado a 10° y el Gurney en el borde de fuga muestra buenas prestaciones de eficiencia. Siendo esta condición la máxima para la eficiencia en cualquiera de las combinaciones estudiadas, presentando una adecuada condición de operación.

Analizando la entrada pérdida del perfil con los distintos dispositivos, y como era esperable se aprecia que la misma es suave. Esto se verifica en la curva de C_d vs ángulo de ataque, donde no se ve ningún salto que mostraría la existencia de una burbuja sobre el extradós, también se aprecia en la curva C_l vs ángulo de ataque. Esto nos lleva a decir que como en otros ensayos de este tipo de perfil en flujo turbulento (Delnero y otros, 2008), no presenta burbujas sobre el extradós que provocarían una pérdida brusca, aún con los dispositivos hipersustentadores utilizados.

REFERENCIAS

- Bloy, A.W., Durrant, M.T., Aerodynamic Characteristics of an aerofoil with Small Trailing Edge Flaps, *Wind Engineering*, 19/3:167-172, 1995.
- Buchholz, M. D., and Tso, J., Lift Augmentation on Delta Wing with Leading-Edge Fences and Gurney Flap, *Journal of Aircraft*, 37/6, 1050–1057, 2000.
- Colman, J.; Marañón Di Leo, J., Delnero, S., Martínez, M., Boldes, U. and Bacchi, F., Lift and drag coefficients behavior at low Reynolds number in an airfoil with miniflap Gurney submitted to a turbulent flow. Part 1, *Latin American Applied Research*, 38/3:195-200, 2008.
- Delnero, S., Marañón Di Leo, J., Bacchi, F., Colman, J. and Boldes, U., Experimental determination of the influence of turbulent scales on the lift and drag coefficients of low Reynolds number airfoils, *Latin American Applied Research*, 35/3:183-188, 2005.
- Delnero, J.S., Marañón Di Leo J., Camocardi, M.E., François, D.G.; Mariano A. M. Martinez, M.A.M., Colman, J. Vortex Generator Effect on Low Reynolds Number Airfoils in Turbulent Flow. BBAA VI (6th International Colloquium on Bluff Bodies Aerodynamics and Applications) – 20 al 24 de Julio de 2008 - Milan – Italia.
- Fiedler, H.E. & Fernholz, H., On Management and Control of Turbulent Shear Flows, *Prog. Aer. Sci.* 27:305 – 387, 1990.
- Flatt, J., The History of Boundary Layer Control Research in the United States of America, *Boundary Layer and Flow Control*, ed. G.V. Lachmann, 1:122 - 143, 1961.
- 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.
- Jang, C. S., Ross, J. C., and Cummings, R. M., Computational Evaluation of an Airfoil with a Gurney Flap, AIAA Paper 92-2708, June 1992.
- Jang C.S., Ross J.C. and Cummings R.M., Numerical investigation of an airfoil with a Gurney flap, *Aircraft Design*, 1/2:75-88, 1998.
- Jeffrey, D.R.M., Hurst, D.W., Aerodynamics of the Gurney Flap, AIAA Applied Aerodynamic Conference, AIAA 96-2418-CP, 1996.
- Jeffrey, D., Zhang, X., Hurst, D.W., Aerodynamics of Gurney Flaps on a Single-Element High-Lift Wing, *Journal of Aircraft*, 37:295-301, 2000.
- Myose, R., Papadakis, M., and Heron, I., Gurney Flap Experiments on Airfoils, Wings, and Reflection Plane Model, *Journal of Aircraft*, 35/2:206–211, 1998.
- Neuhart, D.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.

Storms, B.L., Jang, C.S., Lift Enhancement of an Airfoil Using a Gurney Flap and Vortex Generators, *Journal of Aircraft*, 31/3:542-547, 1994.

Traub, L. W., and Galls, S. F., Effects of Leading- and Trailing-Edge Gurney Flaps on a Delta Wing, *Journal of Aircraft*, 36/4:651-658, 1999.