

## ANALISIS EXPERIMENTAL DE UN PERFIL DE BAJO REYNOLDS EN CONDICIONES DE PERDIDA DINAMICA CON TURBULENCIA

Algozino, Santiago<sup>a,b</sup>, Marañon Di Leo, Julio<sup>a,b</sup>, Delnero, Juan S.<sup>a,b</sup>, Capittini, Guillermo M.<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>UIDET-LaCLyFA, Dpto. Aeronáutica, Fac. Ing., U.N.L.P – Calle 116 e/ 47 y 48 – CP: 1900 – La Plata, Buenos Aires, Argentina.

<sup>b</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

santiago.algozino@ing.unlp.edu.ar

**Palabras Claves:** Pérdida Dinámica; Perfil aerodinámico; Turbulencia; Bajo Reynolds

### Resumen

Para la caracterización del campo fluidodinámico de un perfil con flujo incidente turbulento, se llevaron a cabo ensayos experimentales de un perfil Wortmann FX 63-137 en el túnel de viento de la UIDETLaCLyFA. Estos ensayos fueron realizados para caracterizar dicho campo en condiciones estáticas y dinámicas utilizando técnicas de anemometría de hilo caliente y mediciones de presión sobre la superficie del perfil. Para la caracterización en condiciones dinámicas, se construyó un mecanismo electro-neumático el cual permite cambios abruptos en el ángulo de ataque del perfil. En primera medida, se realizaron los ensayos de anemometría de hilo caliente, utilizando tres sensores dobles (medición de velocidad longitudinal “u” y transversal “v”), dos sobre el extradós del perfil (1/4 y 3/4 del valor de la cuerda medido desde el borde de ataque) y uno en la estela de forma simultánea. Se procesaron las señales adquiridas a 2 kHz, que fueron filtrados mediante filtro pasa bajo a 1kHz, obteniéndose la escala de velocidad, escalas temporales, escalas espaciales y espectros de potencia para los casos estáticos y dinámicos. Como segundo estudio, se realizaron las mediciones de la distribución de presión a lo largo de la cuerda para los mismos ángulos de incidencia estáticos, así como las mismas velocidades de cambio de ángulo de ataque (45, 75 y 90 °/s) que para los ensayos de anemometría, pero adquiriendo a 450Hz. Se procesó la información adquirida de igual manera que con la anemometría, y los resultados muestran los fenómenos dinámicos involucrados en la pérdida dinámica así como también las escalas de velocidad, temporales y espectros de potencia. Además, con la distribución de presiones, se calcularon los coeficientes de sustentación para cada ángulo en ambas condiciones. Los resultados encontrados muestran diferencias en el patrón de flujo final comparando a 22° en forma estática y a 22° pero llegando a este de forma dinámica desde los 10° a tres velocidades distintas de rotación.

### Introducción

Los perfiles de bajo número de Reynolds y su fenómeno de entrada en pérdida son de gran interés para la aerodinámica, entre otros, por su aplicación en aerogeneradores y pequeños vehículos aéreos no tripulados (MUAV). Utilizando teorías que se conocen como “aerodinámica de grandes ángulos de ataque”, se pueden aproximar los conocimientos a los fenómenos que ocurren en la zona de entrada en pérdida de los distintos perfiles, pero esto dependerá de la geometría del perfil y del perfil de viento incidente, principalmente. Además, distintos mecanismos de entrada en pérdida se pueden encontrar para un mismo perfil cambiando la forma en la que varía el ángulo de ataque (estáticamente, o a distintas velocidades cambio). Distintos estudios desde décadas pasadas se han realizado para poder comprender estos fenómenos de entrada en pérdida dinámica que se pueden encontrar en distintos campos de aplicación, como palas de helicóptero, palas de aerogeneradores, giros escarpados de aeronaves, turbinas, etc. En la actualidad, los fenómenos no estacionarios que comprenden la separación de flujo siguen siendo unos de los problemas más importantes aún no resueltos para la fluidodinámica, en particular, considerando flujos incidentes turbulentos.

La problemática propuesta incorpora estos fenómenos no estacionarios de separación asociados a soluciones múltiples, siendo de gran interés su conocimiento dado la gran aplicación en los distintos campos que fueron nombrados anteriormente. En lo que respecta al fenómeno característico en perfiles aerodinámicos, McCroskey[1-3] desarrolló, mediante gran cantidad de experimentos, la evolución del patrón del campo de flujo en las inmediaciones del perfil que produce este fenómeno particular. En la Figura 1 se muestran los principales eventos, reflejados en la evolución temporal de la distribución de presiones a lo largo del extradós de un perfil el cual sufre un brusco cambio en el ángulo de ataque. En ella se puede observar la formación de una burbuja de recirculación en el borde de ataque la cual se desprende y se va desplazando por todo el extradós hasta que sale por el borde de fuga. También se puede observar la formación de una segunda burbuja recirculatoria que de igual manera se desprende, pero esta es de menor intensidad.

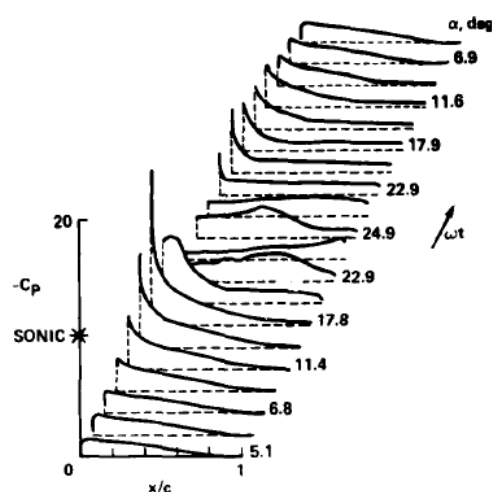


Figura 1. Evolución temporal de la distribución de presiones ante un cambio brusco del ángulo de ataque

En trabajos anteriores [4-6], se realizaron mediciones de fuerzas mediante balanzas aerodinámicas, caracterizando así la curva del perfil. Además se implementaron técnicas de visualización en el perfil Wortmann FX 63-137, al cual se lo sometió a cambios bruscos en el ángulo de ataque mediante un mecanismo electro-neumático, encontrando la formación de estas burbujas y cambios en el patrón de flujo estacionario final entre un ángulo en condición estática y otro el cual llegaba a ese mismo ángulo final pero de forma dinámica. También se midieron velocidades instantáneas de velocidad en las inmediaciones del perfil y en la estela, sin encontrar resultados sobresalientes cuando se comparaban los campos de flujo en torno al perfil.

En este trabajo se presentan nuevas mediciones de anemometría sobre la superficie del perfil así como también algunos resultados de ensayos realizando mediciones de presiones sobre la superficie tanto del extradós como el intradós. Estas nuevas mediciones anemométricas, como las presiones, se hicieron para las mismas condiciones de ensayo para poder tener valores comparativos de ambos experimentos.

## Metodología

Para este trabajo se llevó a cabo un estudio experimental en el túnel de viento de capa límite de la UIDETLaCLyFA de la Universidad Nacional de La Plata. El mismo es un túnel cerrado que cuenta con una sección de prueba de 1,4m x 1,0m x 7,5m y una  $V_{m\acute{a}x} = 20$  m/s. El perfil seleccionado para el estudio es un Wortmann FX 63-137, el cual es ampliamente utilizado en el diseño de palas de aerogeneradores; a partir del cual se construyó un modelo en fibra de vidrio de 0,75m de envergadura y 0,25m de cuerda. La disposición adoptada del modelo dentro del túnel es entre dos paneles verticales de sección simétrica y con flap posterior variable con el objeto de bidimensionalizar el flujo en toda la envergadura del modelo (Figura 2). El mismo montaje en túnel fue el utilizado en los trabajos previos, para poder obtener datos comparativos.

Para las mediciones presentadas en este trabajo, se utilizó el mismo mecanismo de cambios bruscos de ángulo de ataque el cual consiste en un pistón neumático controlado a través de un equipo DAQ Multifunción USB de National Instruments y con el software asociado

(Figura 3). Este mecanismo es capaz de variar la velocidad de cambio de ángulo de ataque y los límites del mismo (rango de ángulos que abarca el movimiento).

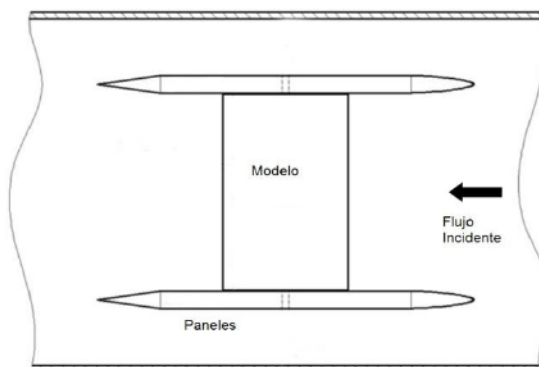


Figura 2. Esquema de paneles y modelo en el túnel de viento.

Los ensayos de anemometría de hilo caliente se realizaron colocando sensores en zonas estratégicas donde se pretendía encontrar diferencias entre la condición estática y dinámica. La medición del campo de velocidades instantáneas se realizó mediante un sistema de anemometría de hilo caliente a temperatura constante (Streamline de DantecMeasurementTechnology). Se emplearon sensores dobles (fiber film probes 55R51). Se midieron las componentes fluctuantes de la velocidad corriente abajo del perfil (sensor 1) y sobre el perfil en dos posiciones, a 1/4 de la cuerda (sensor 3) y 3/4 de la cuerda (sensor 2) medido desde el borde de ataque (Figura 4), con el fin de obtener una detallada descripción y análisis de las conformaciones fluidodinámicas generadas. Para su análisis se emplearon métodos estadísticos, como herramientas de trabajo, mediante las mismas se pueden establecer las características de las escalas turbulentas espaciales y temporales (utilizando 3 sensores en diferentes puntos se pueden realizar correlaciones espaciales), además de las frecuencias de aparición, involucradas en los vórtices que abandonan el perfil corriente abajo.

Además se hicieron mediciones de presiones, midiendo en 25 puntos sobre el extradós y 7 sobre el intradós. Estas mediciones se hicieron con 2 módulos Scanivalve DSA3216 piezoeléctricos adquiriendo a 450 Hz para poder caracterizar todos los fenómenos temporales que ocurren en la pérdida dinámica. De estos resultados, y del conocimiento de la geometría del perfil y la ubicación de las tomas, se calculó el coeficiente de sustentación analizando su variación temporal y su comportamiento en función del ángulo de ataque, el cual fue obtenido a partir de filmaciones de alta calidad.

En estos ensayos se realizaron mediciones en condiciones estáticas de ángulo de ataque, partiendo desde  $-7^\circ$  hasta  $22^\circ$  con un paso de  $1^\circ$ . Además se realizaron mediciones de cambio brusco de ángulo de ataque desde  $10^\circ$  hasta  $22^\circ$  a 3 velocidades de rotación distintas: 45, 75 y  $95^\circ/\text{s}$ , que por practicidad se denominarán en lo siguiente como mínima, media y máxima respectivamente. Estos ensayos se realizaron a 3 velocidades de corriente libre incidente distintas: 6, 9 y 12 m/s correspondiendo con 100.000, 150.000 y 200.000 en número de Reynolds aproximadamente. Las condiciones de ensayo detalladas anteriormente se realizaron de igual manera para los ensayos de anemometría de hilo caliente como para las mediciones de presiones.



Figura 3. Mecanismo de cambio de ángulo de ataque brusco.

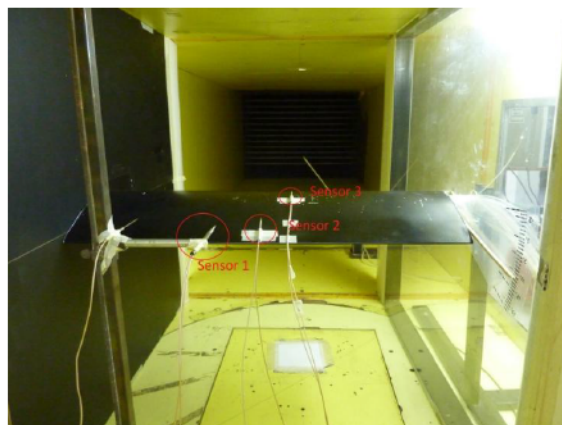


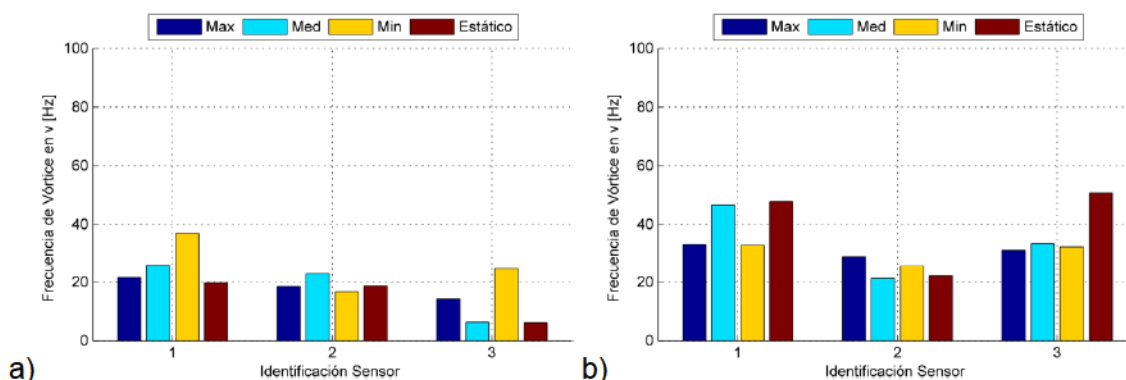
Figura 4. Disposición de los sensores de anemometría de hilo caliente.

## Resultados

### Anemometría de Hilo Caliente

Con las señales anemométricas, se obtuvieron valores estadísticos característicos de eventos turbulentos, como las escalas espaciales, escalas de velocidades, frecuencias de vórtices, y con estos valores se generaron ciertas figuras comparativas para visualizar la presencia de cambios en el campo fluidodinámico considerando cambios estáticos y distintas velocidades de cambio en el ángulo de ataque. La Figura 5 muestra una comparación entre las frecuencia de vórtices para los distintos casos estudiados. De la misma forma se analizaron y compararon las Tensiones de Reynolds, velocidades medias, energía puesta en juego para cada frecuencia de vórtice, escalas temporales y espaciales.

Si se analiza la frecuencia de los vórtices obtenida a partir de las autocorrelaciones, se puede observar un aumento de la frecuencia (estrechamiento de los vórtices) a medida que aumenta la velocidad de la corriente libre, Figura 5 a, b y c. Si se analiza en detalle el sensor 3 (1/4 cuerda), este aumento conforme aumenta la velocidad es mayor que el medido por el sensor 2, para todas las condiciones. Además se pueden observar variaciones en las frecuencias modificando las velocidades de cambio de ángulo de ataque, pero no se aprecia un patrón que se repita sucesivamente. Dados estos resultados, no se permite identificar el patrón de flujo en función del cambio de velocidad del cambio de ángulo de ataque pero si se puede asegurar que hay diferencias en el patrón entre el caso estático y el dinámico.





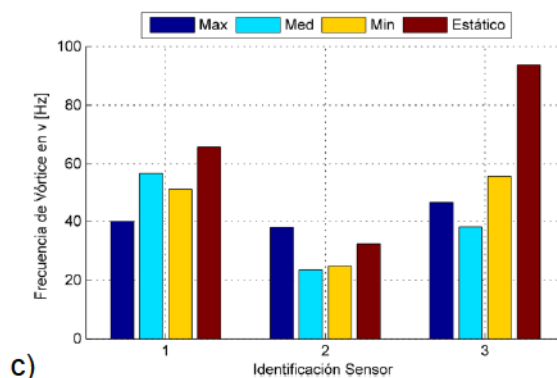


Figura 5. Frecuencia de Vórtice en Hz para componente “v”. En abscisas la identificación de los sensores. a) 6 m/s, b) 9 m/s y c) 12 m/s.

### Presiones

Dentro de las mediciones realizadas con los sensores de presión se analizó el comportamiento del coeficiente de sustentación ( $C_L$ ) respecto al ángulo de ataque, midiendo este último a partir de las filmaciones de alta calidad realizadas, y también el comportamiento de este coeficiente a lo largo del tiempo.

En primer medida se realizó un barrido desde  $-7^\circ$  hasta  $22^\circ$  de forma estática, midiendo las presiones para cada ángulo y con ello se construyó la curva  $C_L$  vs  $\alpha$  que se observa en la Figura 6. Esta curva obtenida se corresponde de buena manera con la medida mediante balanza aerodinámica realizada en [5], sobre todo en el ángulo de sustentación nula, obteniendo una diferencia máxima del 15% aproximadamente en el valor de  $C_L$  máximo encontrado con las presiones respecto al de la balanza aerodinámica. Luego se analizó la variación del coeficiente de sustentación cuando el cambio en ángulo de ataque se realiza de forma dinámica (Figura 7), y se lo comparó respecto al estático, encontrando en todos los casos un incremento de dicho coeficiente de hasta un 125%, y observando que el mismo varía temporalmente, presentando picos en dicho coeficiente en función del desprendimiento de la burbuja de recirculación de borde de ataque. En dichas curvas también se puede observar la formación de más de una burbuja. En la Figura 8 se puede apreciar cómo cambia el coeficiente de sustentación a lo largo del tiempo, notando un incremento de la sustentación mientras el cambio de ángulo de ataque se está produciendo, pero en el estacionario posterior no se aprecian cambios significativos de dicho coeficiente. Si bien esto solo se está mostrando para un caso, en los demás casos estudiados ocurre en forma similar.

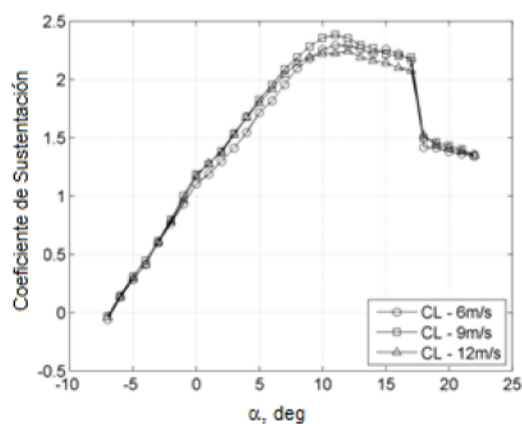


Figura 6.  $C_L$  vs.  $\alpha$  para las tres velocidades de referencia con variaciones estáticas del ángulo de ataque.

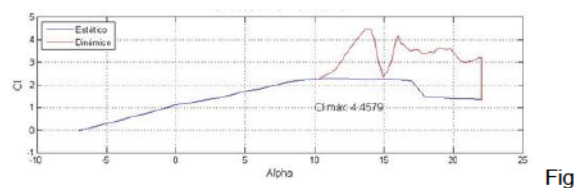


Figura 7. Comparación entre el  $C_L$  para el caso estático (azul) y el dinámico (rojo). Vel. Ref. 6 m/s y Máx. Vel. Cambio de ángulo de ataque.

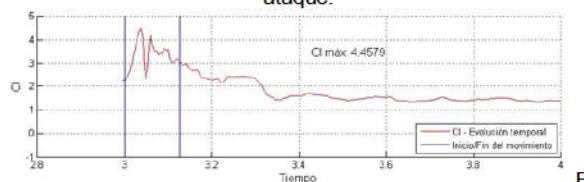


Figura 8. Evolución del  $C_L$  en el tiempo para el caso de Vel.

Ref. 6 m/s y Max. Vel. Rot. Las barras verticales indican

inicio y final del movimiento.

## Conclusiones y Discusión

En trabajos previos, mediante técnicas de visualización se encontraron diferencias en el patrón de flujo de un perfil Wothmann FX 63-137 cuando este se lo ubicaba en un ángulo de pérdida de forma estática o llegando al mismo de una forma dinámica, con los ensayos realizados y presentados en este trabajo se verificaron estos ensayos previos.

Mediante las mediciones con anemometría de hilo caliente, y el posterior procesado de las mediciones de las dos componentes de la velocidad del aire en los distintos puntos medidos, se puede concluir que posiblemente la configuración del flujo en pérdida dinámica (luego del cambio brusco) resulta distinta que en la pérdida estática. Esta conclusión se obtiene en base al análisis de las escalas, tanto temporales como espaciales, de la configuración del flujo para ambas pérdidas, la energía contenida en los vórtices predominantes, y por la diferencia entre los valores de tensiones de Reynolds obtenidas también para ambas condiciones. Si bien se puede asegurar que hay cambios en el patrón de flujo, con estas mediciones no se puede obtener mucha más información al respecto, ni siquiera que estos cambios presentan un patrón de cambio, seguramente debido a los fenómenos turbulentos presentes.

Tras analizar las mediciones de la distribución de presiones a lo largo de la cuerda del perfil, se puede obtener un poco más de información respecto del fenómeno de pérdida dinámica estudiado en este trabajo.

En primera medida, los resultados obtenidos en el coeficiente de sustentación medido de forma estática es bueno respecto a las mediciones realizadas con balanza aerodinámica. Si bien se encuentran leves diferencias, el obtenido con presiones es mayor, esta diferencia puede estar radicada en que el ensayo realizado con balanza aerodinámica sufrió correcciones típicas de ensayos en túnel, mientras que en el caso de las presiones, todavía no fueron implementadas las correcciones en los cálculos. Luego, se puede afirmar que en todos los ensayos dinámicos se evidencia el fenómeno de doble pérdida, con la formación de uno, dos y hasta tres vórtices de borde de ataque, con su correspondiente aumento de sustentación debido a un aumento de la succión en extrados generados por estos, con la posterior caída abrupta de dicho parámetro. Junto con esto, se encontró que existen dos parámetros que influyen en la forma de entrada en pérdida dinámica de este perfil al generar un cambio abrupto de ángulo de ataque, y estos son el número de Reynolds al cual está operando el perfil, y la velocidad a la cual cambia el ángulo de ataque del mismo. Por otro lado, en cuanto a la histéresis que se puede presentar posterior al cambio abrupto de ángulo de ataque del perfil, no se puede apreciar la existencia de esta en los ensayos realizados.

## Bibliografía

1. McCroskey W. J., "The Phenomenon of Dynamic Stall", NASA TM 81264, 1981.
2. McCroskey, W.J., McAlister, K.W., and Carr, L.W., "Dynamic Stall Experiments on Oscillating Airfoils," AIAA Journal, Vol. 14, Jan. 1976, pp. 57-63.
3. McCroskey, W.J., McAlister, K.W., Carr, L.W., and Pucci, S.L., "An Experimental Study of Dynamic Stall on Advanced Airfoil Sections"; Vol. 1, "Summary of the Experiment"; Vol. 2, "Pressure and Force Data"; Vol. 3, "Hot-Wire and Hot-Film Measurements." NASA TM-84245, July 1982.
4. Cánchero, A.; Marañón Di Leo, J; Delnero, JS; Monteagudo, JP; Echapresto Garay, I; 2012, "Estudio Experimental de la doble pérdida en un perfil aerodinámico", Anales AFA - Volumen 23 No 3, Buenos Aires, Argentina.
5. Marañón Di Leo, J; Delnero, JS; Cánchero, A; 2014, "Experimental Dynamic Stall Study In An Airfoil", 32nd AIAA Applied Aerodynamics Conference, Atlanta, USA.
6. Algozino, Delnero, Marañón Di Leo, Cánchero; "Análisis experimental de la pérdida dinámica en un perfil aerodinámico", Actas de Congreso, 3er Congreso Argentino de Ingeniería Aeronáutica, La Plata, Buenos Aires, Argentina, 2014.