

ANÁLISIS DE DETECCIÓN MÚLTIPLE MEDIANTE LA METODOLOGÍA DE PUNTO DE CAMBIO EN FLUJO TURBULENTO

Julio Maraño Di Leo^{a,c}, Maria V. Calandra^b y Juan S. Delnero^{a,c}

^aUIDET de Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental, Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, calle 116 entre 47 y 48, 1900, La Plata, Argentina, jmaranon@ing.unlp.edu.ar, delnero@ing.unlp.edu.ar, <http://www.laclyfa.ing.unlp.edu.ar>

^bUIDET Grupo de Aplicaciones Matemáticas y Estadísticas de la Facultad de Ingeniería, Departamento de Ciencias Básicas, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, calle 115 y 50, 1900, La Plata, Argentina, mava@mate.unlp.edu.ar

^cConsejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Avda. Rivadavia 1917, C1033AAJ, Ciudad de Buenos Aires, Argentina.

Palabras Clave: Turbulencia, Punto de cambio, Análisis de estela, Perfil aerodinámico.

Resumen. El presente trabajo resulta de una continuación en las investigaciones realizadas previamente sobre la aplicación de algoritmos de la metodología de punto de cambio en el análisis y detección de eventos turbulentos en una corriente de aire. A partir de los importantes resultados obtenidos previamente, se introduce en este caso el análisis de señales múltiples obtenidas de mediciones en las fluctuaciones de la velocidad en más de un punto en una estela. En este caso se analiza el comportamiento de una estela corriente abajo de un perfil aerodinámico, el cual incorpora un sistema activo de control de flujo, el mismo consiste un mini-flap que tiene la posibilidad de desplegarse fuera del perfil con una frecuencia definida. Se busca, en particular, el análisis de la corriente del flujo para lo cual se introduce una detección secuencial del tipo de fase II. Este tipo de análisis permite la detección de cambios en la señal a medida que los valores de la medición son adquiridos. La medición de velocidad se realiza por la metodología de anemometría de hilo caliente, se consideran datos de las componentes fluctuantes de la velocidad medidas en túnel de viento en varios puntos del campo fluidodinámico, corriente abajo del perfil en la estela resultante, buscando correlaciones entre las variaciones detectadas.

1 INTRODUCCIÓN

Hasta el momento en trabajos previos (Marañón Di Leo et al.; 2011, 2013) se ha introducido por primera vez la aplicación de la metodología de punto de cambio al análisis de señales derivadas de la medición de la velocidad fluctuante en campos fluidodinámicos turbulentos. En un principio se buscó la posibilidad del empleo de la misma como un algoritmo incluido en el software de medición con el objeto de optimizar las mediciones con la metodología de anemometría de hilo caliente. Debido a los hallazgos realizados en dichos trabajos se tomó la decisión de avanzar en la aplicación de esta metodología como elemento de análisis complementario a los aplicados en estos tipos de estudios. Se pretendió, de esta manera, emplear a los modelos de punto de cambio (CPM-Change Point Models) (Ross y Adams, 2012) como nuevos instrumentos para determinar de forma más detallada el estudio de estelas turbulentas en la aplicación de las metodologías experimentales. Como fue mencionado en Marañón Di Leo et al. (2013), esta metodología se ha aplicado en muchas áreas de estudio (Jensen et al., 2006), pero en particular no ha sido desarrollada para las temáticas estudiadas aquí.

2 METODOLOGÍAS

2.1 Experimental

Para el análisis propuesto se tomaron las mediciones realizadas en el estudio de la estela cercana y lejana corriente abajo de un perfil aerodinámico Clark Y-18, dotado de un mecanismo eléctrico de accionamiento de un miniflap Gurney en las inmediaciones del borde de fuga. Dicho modelo se montó y ensayó en túnel de viento a diferentes números de Reynolds en diferentes condiciones de accionamiento del sistema de control y para diferentes ángulos de ataque del modelo. El modelo tiene una envergadura de 80 cm y 40 cm de cuerda (c) sin torsión geométrica (ver 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 270000 y 135000, correspondientes a una velocidad media de la corriente libre (V_∞) aguas arriba de 10m/s y 5 m/seg respectivamente. La intensidad de la turbulencia de la corriente libre fue del 1,8% (Hinze, 1975). Las mediciones se llevaron a cabo en un túnel de viento de circuito cerrado, cuya sección transversal es de 1,4m por 1m, y una velocidad máxima de 25m/s. 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) (ver Figura 2), localizado a lo largo de la envergadura a una distancia de 10% c desde el borde de fuga, en el intradós del modelo de ala (Delnero et al., 2007). Dicho dispositivo es controlado mediante un sistema que permite el movimiento del flap con una frecuencia de accionamiento de hasta 30Hz. Los ensayos se realizaron para 3 frecuencias diferentes de movimiento del flap (16Hz, 20Hz y 25Hz), que se corresponden con un valor del número de Strouhal de: 0,64; 0,8 y 1, para la velocidad de la corriente libre de 10m/s. (número de Strouhal = $Str = \text{frecuencia} * c / V_\infty$)

En esas condiciones se midieron las velocidades instantáneas con tres sensores X-wire probes del anemómetro de hilo caliente Streamline (Dantec Measurement Technology). 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 del modelo), con el sensor central a nivel del borde del miniflap, 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 (ver Figura 3). Las determinaciones de las velocidades instantáneas se realizaron para un ángulo de 0° .

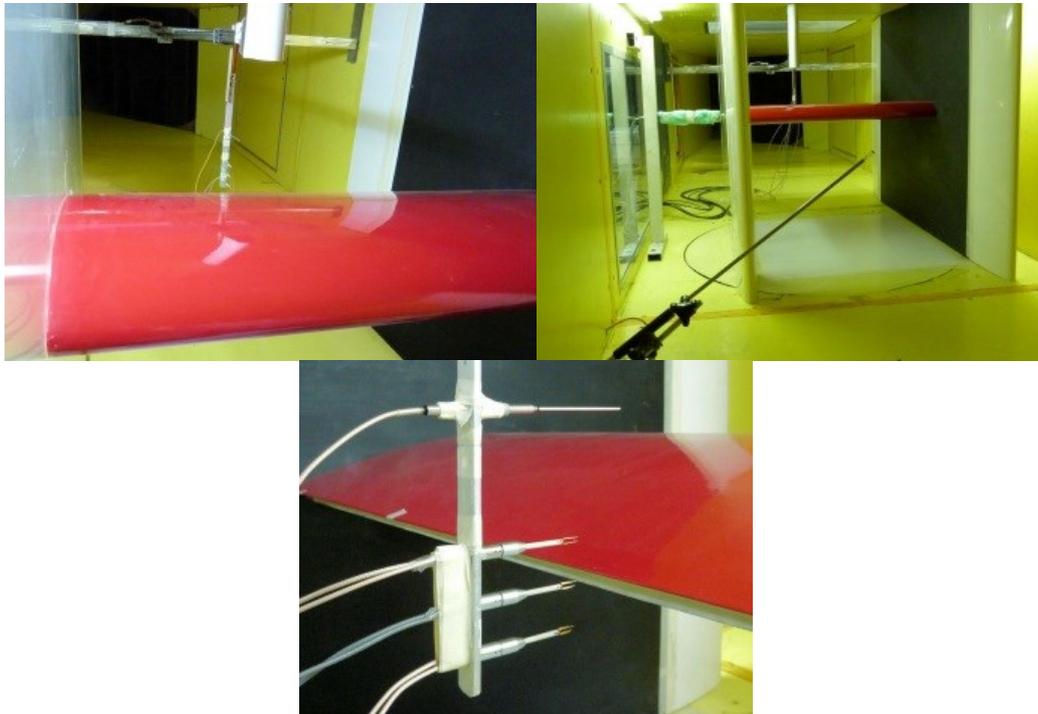


Figura 1. Modelo en el túnel de viento con la ubicación de los sensores.

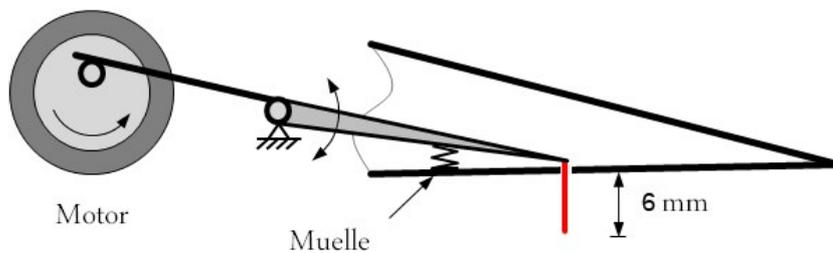


Figura 2. Esquema del sistema de accionamiento del miniflap.

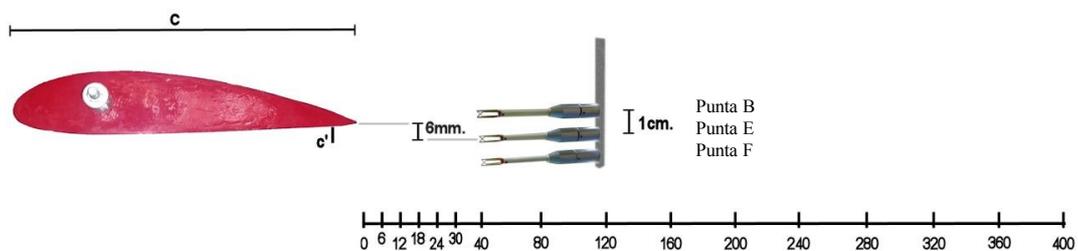


Figura 3. Esquema de las posiciones de medición de los sensores anemométricos.

2.2 Cálculo por CPM

Se empleó, para la detección de los cambios en la señal la metodología presentada precedentemente (Marañón Di Leo et al., 2013). Se utilizó el modelo de punto de cambio (CPM) basado en el test de Cramer von Mises (CvM), el cual se puede aplicar para los casos en que los datos no siguen una distribución conocida. Este test fue aplicado anteriormente a este tipo de datos, arrojando buenos resultados en la detección de cambios en la señal.

En este caso se plantea la aplicación de la detección utilizando el monitoreo fase II, mediante el cual se puede realizar un análisis secuencial de detección de cambios en la señal a medida que se va obteniendo cada dato de la medición. A medida que una nueva observación X_t es recibida, se puede tratar a $\{X_t, \dots, X_t\}$ como si fuera una muestra de tamaño fijo y utilizar la metodología descrita en Marañón Di Leo et al. (2013) para testear si algún cambio ha ocurrido. De esta forma el problema del monitoreo secuencial se reduce a desarrollar una secuencia de test de tamaño fijo.

Para lograr esto se planteó un código en lenguaje R, que realice el testeo de señales simultáneas, buscando detectar los cambios en las mismas. Como ejemplo del algoritmo, el cual es muy sencillo, presentamos un extracto del mismo donde se plantea la detección y almacenamiento del tiempo de ocurrencia del cambio, en el caso de que lo hubiere.

```

rm(list=ls())
dato1 = read.table("v10g0B006.txt")
dato2 = read.table("v10g0E006.txt")
dato3 = read.table("v10g0F006.txt")
t <- dato1[,1]
u1 <- dato1[,3]
u2 <- dato2[,3]
u3 <- dato3[,3]
x1 <- u1[1:5001]
x2 <- u2[1:5001]
x3 <- u3[1:5001]
y1 <- t[1:5001]
z <- numeric(length(x1)-1)
tiempodetecciones1 <- numeric()
puntodecambio1 <- numeric()
tiempodetecciones2 <- numeric()
puntodecambio2 <- numeric()
tiempodetecciones3 <- numeric()
puntodecambio3 <- numeric()
cpm1 <- makeChangePointModel(cpmType="Cramer-von-Mises", ARL0=500, startup=10)
cpm2 <- makeChangePointModel(cpmType="Cramer-von-Mises", ARL0=500, startup=10)
cpm3 <- makeChangePointModel(cpmType="Cramer-von-Mises", ARL0=500, startup=10)
for (i in 1:length(x1)) {
  cpm1 <- processObservation(cpm1,x1[i])
  if (changeDetected(cpm1) == TRUE) {
    print(sprintf("Change %d", i))
    tiempodetecciones1 <- c(tiempodetecciones1,i)
    Ds1 <- getStatistics(cpm1)
    tau1 <- which.max(Ds1)

    res1 <- dato1[puntodecambio1,1]

```

```

write(res1, file="g0B006.txt", nc=1)
if (length(puntodecambio1) > 0) {
  tau1 <- tau1 + puntodecambio1[length(puntodecambio1)] }
puntodecambio1 <- c(puntodecambio1, tau1)
cpm1 <- cpmReset(cpm1)}

```

En el mismo se observa, una fase de lectura de los archivos de datos (en este caso se recurrió a los datos medidos, sin implementar un código de lectura online de los mismos), una asignación de vectores, en función de la variable a analizar, luego se aprecia una inicialización de vectores y la asignación del modelo CPM a emplear, con los dos parámetros característicos para el caso de test no paramétrico. Allí se identifica el modelo de CPM, en este caso el test de Cramer von Mises, luego el valor correspondiente del ARL y por último la cantidad de muestras previas al análisis para la detección de cambios. Usualmente, en cartas de control, se emplea la función de Longitud de Corrida Promedio (ARL – Average Run Length), donde ARL indica el número promedio de observaciones entre la detección de falsos positivos asumiendo que no ha ocurrido un cambio, esto es análogo a la idea clásica aplicada en el diseño de test de hipótesis de tener un error de Tipo I acotado.

Una vez definido esto se desarrolla un código de detección de forma tal que se analiza la muestra como si se tratase de una muestra de valores fijos, se testea la detección o no de un cambio, y de existir se lo archiva, luego se guarda el vector de datos del estadístico (DsI) de manera que al adquirirse un nuevo valor de la variable se realiza un nuevo análisis de detección.

El código de muestra presentado corresponde a la detección para una variable, el código completo incluye consecutivamente la detección de las otras dos variables consideradas.

3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Para el análisis de la estela se consideraron ubicaciones características de la medición, en particular se determinaron las características del campo del flujo en las posiciones a 0,6; 1,8; 3; 20 y 40 cm. desde el borde de fuga del perfil. Las tres primeras posiciones se corresponden, referidas a la altura del miniflap Gurney ($h = 0,6$ cm), a 1h, 3h y 5h respectivamente, mientras que las restantes se corresponden a 0,5c y c ($c =$ cuerda del perfil). El estudio se centra en la estela cercana al perfil (1h, 3h y 5h), y a su vez la estela lejana (0,5c y c); de esta manera se pueden analizar los efectos del dispositivo, tanto pasivo (miniflap fijo) como activo (miniflap oscilante), sobre la estela corriente abajo del perfil, considerándolo como un dispositivo de control de flujo (Gad-el-Hak, 2000). Los efectos generados a distancias mayores no son de interés para el análisis del comportamiento del perfil aerodinámico (Hah et al., 1982).

Para el análisis se presentan los resultados encontrados en los cálculos para la componente vertical de la velocidad (v) de la señal analizada. En la Figura 4 y en la Figura 5 se presentan sendos mapas de wavelets (Farge, 1992) de la aplicación de la transformada wavelet a la señal utilizando una onda del tipo *Mexican Hat* (*wavelet de Ricker*), mediante la cual se pueden rastrear máximos en una señal (Giacopinelli et al., 2010). Allí se observa la aparición de eventos turbulentos periódicos asociados al desprendimiento generado por el dispositivo en estudio.

En dichas figuras el valor de ordenadas correspondiente a Escala se define con la siguiente expresión:

$$Escala = \frac{\ln(\Delta t)}{\ln(10)} \quad (1)$$

donde Δt corresponde a la longitud en segundos de la onda correspondiente (“*Mexican hat*”) para dicha Escala.

En particular se observa en la Figura 4 el caso del mapa de wavelets para la señal de la Punta E a una distancia de 1h con el dispositivo en movimiento con una frecuencia de 25Hz, siendo la velocidad de referencia 10 m/s. Para el caso de la Figura 5 se observa una situación similar, pero en este caso se corresponde con la Punta B, a la misma distancia pero con el dispositivo del miniflap fijo y con la misma velocidad de referencia.

Se observó que el intervalo de tiempo promedio en todos los casos concuerda con la aparición de los eventos turbulentos detectados en el mapa de wavelet (ver indicación en las Figuras 4 y 5).

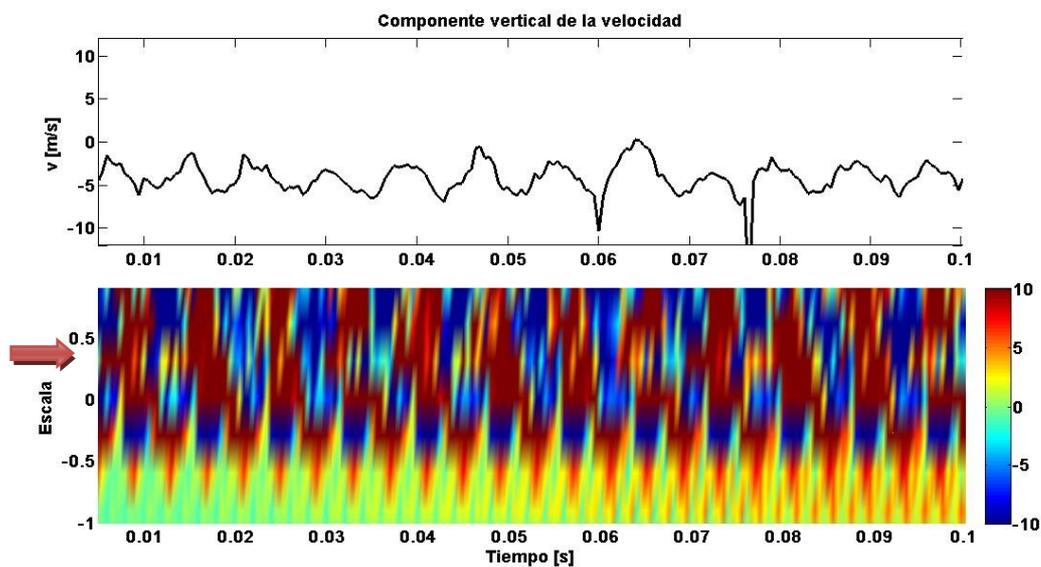


Figura 4. Mapa de wavelets para: Punta B, miniflap móvil fijo, distancia 1h, velocidad de ref. 10 m/s.

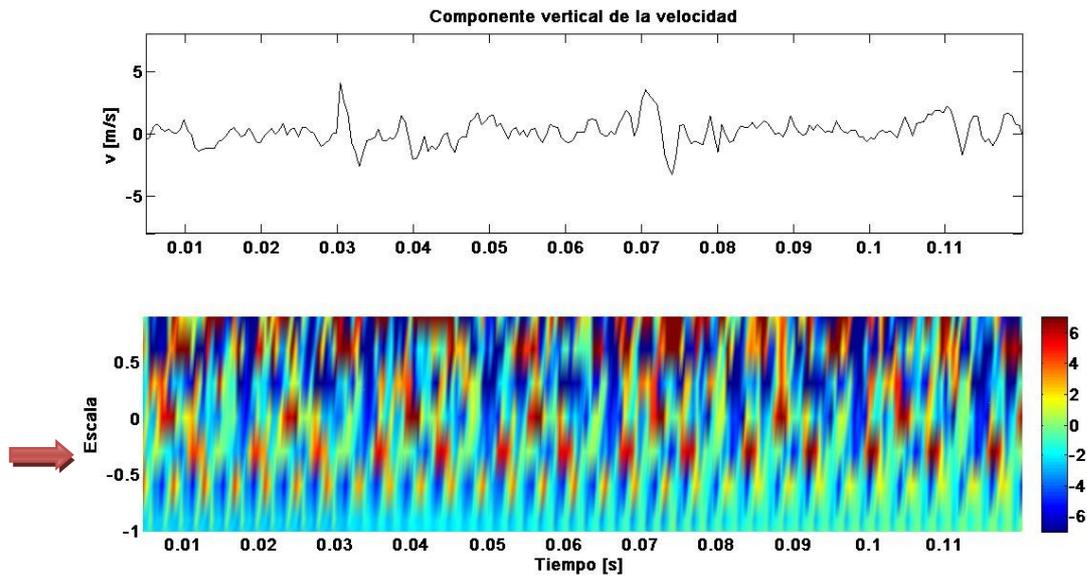


Figura 5. Mapa de wavelets para: Punta E, miniflap móvil a 25 Hz., distancia 1h, velocidad de ref.10 m/s.

Como ejemplo de los cálculos realizados mediante el modelo CPM CvM, se muestra en la Tabla 1 una serie de detecciones de cambios en parte de la señal para el caso con miniflap fijo a una distancia de 1h y para las tres señales simultáneas.

| <i>Punta B</i> | <i>Punta E</i> | <i>Punta F</i> |
|----------------|----------------|----------------|
| <i>[s]</i> | | |
| 0,017 | 0,018 | 0,002 |
| 0,0305 | 0,0285 | 0,007 |
| 0,041 | 0,1115 | 0,018 |
| 0,0545 | 0,1335 | 0,023 |
| 0,0575 | 0,1465 | 0,028 |
| 0,0685 | 0,1755 | 0,071 |
| 0,0825 | 0,185 | 0,0815 |
| 0,096 | 0,231 | 0,085 |
| 0,1095 | 0,262 | 0,106 |
| 0,138 | 0,278 | 0,1155 |
| 0,1475 | 0,3105 | 0,129 |
| 0,161 | 0,3155 | 0,1475 |
| 0,179 | 0,339 | 0,1605 |
| 0,2005 | 0,346 | 0,1695 |
| 0,23 | 0,374 | 0,1965 |
| 0,2395 | 0,4055 | 0,2295 |
| 0,2445 | 0,434 | 0,2385 |
| 0,267 | 0,4545 | 0,2665 |
| 0,2805 | 0,468 | 0,284 |
| 0,3085 | 0,485 | 0,2865 |

Tabla 1: Tiempos de la detección de cambios en las señales (miniflap fijo, 1h, 10m/s)

Debido a la cantidad de detecciones realizadas se incluye solo la Tabla 1 como ejemplo de las mismas. Excepto en casos puntuales, hay gran intermitencia de las detecciones para todos los sensores en todas las posiciones, lo cual nos asegura que los mismos se encuentran en la estela turbulenta del perfil aerodinámico. Esto es válido puesto que para bajos ángulos de ataque (0° , en este caso) la estela de un perfil aerodinámico se extiende corriente abajo del mismo a nivel de la cuerda, mínimamente hasta una distancia de $1c$ desde el borde de fuga.

A partir de los resultados obtenidos de la aplicación del modelo CPM CvM se realizó un análisis de la frecuencia de eventos promedio para los casos característicos definidos. Se calculó una estimación promedio de la distancia entre cambios y a partir de la misma se calculó la frecuencia de cambio promedio, los resultados de dichas frecuencias para cada caso se presentan en la Tabla 2.

| Datos | | Miniflap fijo | | | | | Miniflap móvil (25 Hz.) | | | | |
|-----------|----------------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Velocidad | Distancia [cm] | 0,6 | 1,8 | 3 | 20 | 40 | 0,6 | 1,8 | 3 | 20 | 40 |
| 10 m/s | Punta B | 63,3 | 56,5 | 45,9 | 63,9 | 96,5 | 100,9 | 95,1 | 96,2 | 113,1 | 111,9 |
| | Punta E | 40,8 | 58,2 | 39,6 | 46,9 | 75,8 | 75,9 | 84,9 | 84,1 | 90,5 | 111,3 |
| | Punta F | 66,3 | 59,7 | 48,2 | 48,6 | 62,1 | 131,5 | 121,1 | 104,2 | 84,2 | 86,5 |
| 5 m/s | Punta B | 143 | 170,8 | 168,1 | 158,9 | 159,1 | 121,8 | 124,7 | 128,2 | 136,3 | 134,8 |
| | Punta E | 124,4 | 170,4 | 177,3 | 175,8 | 165,2 | 110,7 | 130,7 | 137,2 | 136,6 | 144,4 |
| | Punta F | 159,4 | 169,3 | 187,6 | 169,1 | 162,1 | 157,5 | 163,4 | 162,1 | 157,3 | 147 |

Tabla 2: Frecuencias medias de eventos a partir de tiempos promedio de ocurrencia.

Observando la Tabla 2, se ve claramente la dependencia de los efectos en la estela debido a la variación del número de Reynolds. Para el caso de la velocidad de referencia de 5 m/s se observan mayores frecuencias de ocurrencia en todos los casos para los tres sensores, es decir que podemos concluir que hay mayor cantidad de eventos en la estela, siendo inversamente proporcionales al valor del número de Reynolds. Se debería continuar analizando para otras condiciones con el objeto de establecer la contundencia de esta afirmación, por lo cual queda como una potencialidad, aunque los valores son muy claros a partir de los resultados obtenidos.

Comparativamente, el campo generado en la estela por el miniflap fijo muestra un claro incremento en frecuencias al disminuir la velocidad incidente, dicha tendencia no se muestra tan claramente para el caso del miniflap móvil (25 Hz.), donde pareciera que el mismo accionamiento del miniflap genera un campo en la estela más aleatoria, incrementándose las frecuencias, en general, respecto del caso fijo.

4 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos nos demuestran las capacidades de la metodología de punto de cambio para la detección de variaciones mínimas en la señal que pueden identificar aspectos importantes del comportamiento del campo del flujo en estelas turbulentas como la expuesta en este caso. Se detectan los más mínimos cambios en la señal que devienen de la aparición de conformaciones fluidodinámicas correspondientes a los distintos desprendimientos del flujo debido a las condiciones geométricas del borde de fuga del perfil. De esta manera se logra realizar una caracterización más precisa de los eventos que se desarrollan en la estela, los cuales son causantes de los cambios en la resistencia y la sustentación del perfil aerodinámico,

y finalmente de su variación en la eficiencia del mismo, la cual representa la relación entre la fuerza de sustentación respecto a la fuerza de resistencia (sustentación/resistencia). La eficiencia de un perfil aerodinámico es el parámetro que define la elección del mismo según su aplicación.

Para poder concluir las tendencias descriptas, se deberán verificar los valores correspondientes a otras frecuencias de movimiento y se deberían proyectar nuevos ensayos en otras condiciones de referencia para poder establecer los efectos del número de Reynolds sobre los resultados obtenidos. Es evidente que a velocidades mayores priman los efectos inerciales, por lo cual los efectos viscosos serían menores, siendo las estelas producidas más estrechas como efecto de la mayor energía imprimida y el estrechamiento de los tubos vorticosos, lo cual podría generar la expectativa de menores frecuencias de aparición de eventos.

REFERENCIAS

- Delnero, J.S., Marañón Di Leo, J., Boldes, U., Colman, J., Bacchi, F.A., Martinez, M.A.M., Wassen, E., Guenther, B. y Thiele, F., Numerical and Experimental Investigation of Mini-Flap Positions on an Airfoil, 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno Nevada, 8 - 11 January 2007.
- Farge, M., Wavelet transforms and their applications to Turbulence, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 24: 395-457, 1992.
- Gad-el-Hak, M. Flow control: Passive, Active and Reactive Flow Management. Cambridge Univ. Press. 2000.
- Giacopinelli, P.E.L., Scarabino, A.E., Delnero, J.S. y Bacchi, F.A. Detección y análisis con wavelets de estructuras organizadas en la estela de un perfil aerodinámico, 2do. Congreso Argentino de Ingeniería Aeronáutica (CAIA2), Córdoba, Argentina, 24 al 29 de noviembre de 2010.
- 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, 251-282, 1982.
- Hinze, J. O., Turbulence. ed. Mc Graw-Hill, New York, 1975.
- Jensen, W. A.; Jones-Farmer, L. A.; Champ, C. W.; and Woodall, W. H. (2006). Effects of Parameter Estimation on Control Chart Properties: A Literature Review, *Journal of Quality Technology* 38, pp. 349–364, 2006.
- Marañón Di Leo, J, Calandra M.V. y Delnero, J.S. Determinación de estructuras turbulentas mediante algoritmos numéricos, XIX Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones (ENIEF 2011), Rosario, Argentina, 1 al 4 de noviembre de 2011.
- Marañón Di Leo, J, Calandra M.V. y Delnero, J.S. Detección de eventos turbulentos mediante la aplicación de algoritmos de punto de cambio, XX Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones (ENIEF 2013), 19 al 22 de Noviembre de 2013, Mendoza, Argentina.
- Ross, G. J., & Adams, N. M., Two nonparametric control charts for detecting arbitrary distribution changes, *Journal of Quality Technology*, 44(2):102-116, 2012.