

DETECCIÓN DE EVENTOS TURBULENTOS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE ALGORITMOS DE PUNTO DE CAMBIO

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

^aUnidad de Investigación, Desarrollo, Extensión y Transferencia 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,
<http://www.laclyfa.ing.unlp.edu.ar>

^bGrupo 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, Escala temporal, Frecuencia característica, Algoritmo de detección, Punto de cambio.

Resumen. El presente trabajo surge como una continuación de los análisis realizados previamente empleando algoritmos numéricos de modelos para la determinación de un punto de cambio en una señal de flujo turbulento obtenida a partir de mediciones experimentales. La señal corresponde a una medición basada en anemometría de hilo caliente, considerando mediciones de las componentes fluctuantes de la velocidad en túnel de viento en un punto específico. De la muestra de datos obtenidos se analiza la aplicación del modelo de un nuevo algoritmo de punto de cambio (CPM), con el fin de determinar los posibles cambios de la fluctuación de la velocidad, comparando los resultados con los análisis tradicionales.

Se emplean algoritmos que logran detectar cambios en datos que no presenten una distribución conocida, pudiendo llevarse adelante el análisis de manera “on line”, es decir en tiempo real, permitiendo detectar la aparición de estructuras vorticosas específicas en el flujo turbulento estudiado. Se comparan resultados obtenidos de estudios previos con los nuevos modelos empleados, contrastados con la misma señal, la cual ha sido identificada previamente mediante las metodologías conocidas para el análisis de flujos turbulentos. Dicha señal se corresponde con desprendimientos periódicos aguas abajo de un dispositivo de control de flujo (mini flap de Gurney) en el borde de fuga de un perfil aerodinámico. Además se agrega el análisis de una señal conocida para el testeo del nuevo modelo CPM.

1 INTRODUCCIÓN

El problema de la detección de un cambio ha sido una vasta área de investigación desde la década del '50. Debido a que el problema tiene una naturaleza muy general, la literatura sobre el tema es muy diversa y se desarrolla en muchos campos diferentes. En particular, muchos de los métodos tienen su origen en la comunidad del control de la calidad, donde el objetivo principal es monitorear las salidas de un proceso de manufactura industrial y detectar las fallas en el mismo lo más rápido posible (Lai, 1995). Sin embargo, existen muchas otras aplicaciones donde las técnicas de detección de cambios resultan importantes, datos de genes, intrusión en redes de computadoras, evoluciones de mercados financieros, etc. De todos estos temas existe mucha bibliografía que hace referencia a la temática, pero su aplicación a análisis de señales anemométricas no es conocido, éstas representan los valores fluctuantes de la velocidad del aire en un flujo turbulento. Nuestro objetivo es, entonces, aplicar estas herramientas conocidas y otras nuevas que se vienen desarrollando en los últimos años, en esta temática. Principalmente, se consideran dos objetivos primarios, uno de ellos consiste en emplear estas metodologías con el fin de analizar mediciones realizadas con anemometría de hilo caliente, incorporándolas como una herramienta más que nos permita determinar la aparición de eventos particulares en un campo fluidodinámico con el fin de realizar su análisis y estudio. Por otra parte, nos parece interesante su posibilidad de aplicación como una herramienta en el software de adquisición de datos con el objetivo final de optimizar las mediciones que se realizan, aprovechando las posibilidades de detección de algún cambio particular en la señal.

En el trabajo previo (Marañón Di Leo y otros, 2011), presentado en el ENIEF 2011, realizamos el análisis de la aplicación de la metodología del Punto de Cambio, a partir del concepto de sumas acumulativas (CUSUM) (Miller y otros, 1992), utilizado para detectar pequeñas desviaciones en la media o en la dispersión de la muestra. En dicho trabajo se detalla esta metodología y su aplicación a un caso específico de medición con anemometría de hilo caliente. Los resultados obtenidos fueron muy alentadores, por lo cual se prosiguió con el estudio y análisis de otros modelos de Punto de Cambio, con el fin de determinar cuál sería el más adecuado a implementar en nuestro caso.

2 METODOLOGÍAS DE PUNTO DE CAMBIO

Como se mencionó previamente, en este trabajo presentamos un nuevo modelo de Punto de Cambio (CPM - Change Point Model), obtenido de nueva bibliografía sobre la temática, de publicación reciente (Ross y Adams, 2012).

Actualmente se ha comenzado a trabajar exhaustivamente en la temática y se han definido ciertos criterios básicos. Muchos problemas estadísticos requieren la identificación de puntos de cambio en una secuencia de datos. El control estadístico de procesos (SPC – Statistical Process Control) se refiere al monitoreo de procesos debido a un cambio en su distribución. En los métodos tradicionales se asume que la distribución del proceso es totalmente conocida previo a cualquier cambio, incluyendo todos sus parámetros, en cuyo caso se dice que el proceso está “en control”, y “fuera de control” si ocurre un cambio que causa que el proceso se corresponda a una distribución diferente. Se busca diseñar cartas de control que puedan detectar desviaciones de la distribución de base. Usualmente, en cartas de control, se emplea la función de Longitud de Corrida Promedio (ARL – Average Run Length), donde ARL_0 indica el número promedio de observaciones entre la detección de falsos positivos asumiendo que no ha ocurrido un cambio y ARL_δ que indica el retraso medio antes que un cambio de tamaño δ sea detectado. Esto es análogo a la idea clásica aplicada en el diseño de test de

hipótesis de tener un error de Tipo 1 acotado y un error de Tipo 2 controlado.

Históricamente las cartas de control fueron desarrolladas con el propósito de monitorear cambios en el valor medio de un proceso, pero hoy día se han desarrollado variaciones que permiten, además, monitorear los cambios en la desviación standard, tanto en distribuciones Gausianas como No-Gausianas, este hecho nos impulsó a investigar la aplicabilidad de dichas nuevas metodologías a la detección de cambios en una señal aleatoria turbulenta.

Las cartas de control, tradicionalmente, requieren el conocimiento total del proceso “en control”, pero ello no es un problema si existe una muestra de referencia grande de observaciones que son conocidas para generar la distribución “en control”. En el caso de tratarse de muestras de tamaño fijo se considera el llamado análisis Fase I, mientras que si se realiza un monitoreo secuencial del proceso cuando las observaciones son recibidas en el tiempo se lo denomina análisis Fase II.

En algunos casos la muestra de referencia puede ser pequeña o no existir. En estos casos sería imposible estimar con exactitud los parámetros “en control”. Esto tiene importantes implicaciones, se encontró que aún pequeñas desviaciones a partir de los valores reales pueden causar que las cartas muestren un ARL_0 significativamente diferente respecto al valor deseado (Jensen y otros, 2006). Una situación peor puede ocurrir cuando la distribución “en control” es incorrectamente especificada, como el uso de una distribución Gausiana para procesos que exhiben Skewness. En estas circunstancias son necesarias cartas de control no paramétricas tal que no asuman ningún conocimiento de la distribución “en control” (cartas de “distribución libre”), en el sentido de que pueden mantener un valor deseado del ARL_0 sin importar la distribución verdadera del proceso en estudio.

En este trabajo incluimos una carta de control alternativa que puede detectar cambios arbitrarios en la distribución del proceso en estudio durante el monitoreo de Fase I o Fase II cuando solo se tiene muy poco conocimiento sobre la forma de la distribución. Se considera un nuevo test de distribución libre como modelo para CPM, en este caso consideramos el test Cramer-von-Mises (CvM CPM), el cual es uno de los más populares en la literatura estadística no paramétrica (Ross y Adams, 2012).

2.1 Monitoreo Fase I

Consideraremos el problema de detectar un punto de cambio en una secuencia de observaciones fija. Identificando las observaciones como $\{X_1, \dots, X_t\}$, el objetivo es testear si han sido generadas por la misma distribución de probabilidad. Asumimos que no se conoce a priori esa distribución. Utilizando el lenguaje de test de hipótesis estadístico, la hipótesis nula es la que refiere a que no hay punto de cambio y todas las observaciones provienen de la misma distribución, mientras que la hipótesis alternativa es la que indica que existe un punto de cambio τ en la secuencia que la particiona en dos conjuntos, con X_1, \dots, X_τ que provienen de la distribución F_0 previa al cambio, y $X_{\tau+1}, \dots, X_t$ que provienen de una distribución F_1 diferente luego del cambio.

$$\begin{aligned} H_0 : X_i &\sim F_0 \quad \text{para } i=1, \dots, t \\ H_1 : X_1, \dots, X_\tau &\sim F_0, \quad X_{\tau+1}, \dots, X_t \sim F_1 \end{aligned} \quad (1)$$

Se puede testear si existe un punto de cambio inmediatamente después de cualquier observación X_k particionando las observaciones en dos muestras $S_1 = \{X_1, \dots, X_k\}$ y $S_2 = \{X_{k+1}, \dots, X_t\}$ de tamaños $n_1 = k$ y $n_2 = t - k$, respectivamente, y entonces se aplica un test de hipótesis a las dos muestras. Nosotros para estos test emplearemos el CvM. Este test se basa en la comparación de la función de distribución empírica de las dos muestras, definidas como,

$$\hat{F}_{S_1}(x) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k I(X_i \leq x) \quad (2)$$

$$\hat{F}_{S_2}(x) = \frac{1}{t-k} \sum_{i=k+1}^t I(X_i \leq x)$$

Donde $I(X_i < x)$ es la función indicador

$$I(X_i < x) = \begin{cases} 1 & \text{si } X_i < x \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (3)$$

Este test utiliza un estadístico basado en el cuadrado de la distancia promedio entre las distribuciones empíricas, y este puede ser estimado como,

$$W_{k,t} = \sum_{i=1}^t \left| \hat{F}_{S_1}(X_i) - \hat{F}_{S_2}(X_i) \right|^2 \quad (4)$$

Nuevamente rechazamos H_0 si $W_{k,t} > h_{k,t}$ para algún umbral $h_{k,t}$

Como no se conoce dónde va a estar ubicado el punto de cambio, no sabemos qué valor de k utilizar para el particionado de la muestra, es por ello que se especifica una hipótesis H_0 más general, no hay ningún cambio en la secuencia de valores. La hipótesis alternativa es que existe un punto de cambio para algún valor de k no específico. Entonces podemos hacer este test mediante el cálculo de $W_{k,t}$ en cada valor $1 < k < t$ y tomar el valor máximo. Como la varianza del estadístico $W_{k,t}$ depende del valor de k , se debe estandarizar el estadístico de forma que tenga igual media y varianza para todos los valores de k . Para nuestro caso la estandarización es simple obteniéndose las siguientes media y varianza para el estadístico,

$$\begin{aligned} \mu_{W_{k,t}} &= \frac{t+1}{6t} \\ \sigma_{W_{k,t}}^2 &= \frac{(t+1)[(1-3/4k)t^2 + (1-k)t - k]}{45t^2(t-k)} \end{aligned} \quad (5)$$

Esto lleva a la maximización del test estadístico

$$W_t = \max_k \frac{W_{k,t} - \mu_{W_{k,t}}}{\sigma_{W_{k,t}}}, \quad 1 < k < t \quad (6)$$

Si $W_t > h_t$ para algún umbral elegido posible h_t , entonces la hipótesis H_0 es desechada y concluimos que ha ocurrido un cambio en algún punto de los datos. En este caso, el mejor estimador τ de la ubicación del punto de cambio es en el valor k que maximiza W_t . Si $W_t \leq h_t$, entonces no se rechaza la hipótesis H_0 y por ello se concluye que no ha ocurrido ningún cambio.

2.2 Monitoreo Fase II

Habiendo considerado el problema de detectar puntos de cambio de una muestra de tamaño fijo, ahora veremos como se implementa el caso de tener observaciones que se van sucediendo

en el tiempo. Sea X_t la t -ésima observación, siendo t incrementada con el tiempo. A medida que una nueva observación X_t es recibida, se puede tratar a $\{X_1, \dots, X_t\}$ como si fuera una muestra de tamaño fijo y utilizar la metodología descrita en la sección anterior 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. Es por ello que, en esta primera instancia de análisis previo a su utilización en mediciones en tiempo real, solo planteamos realizar un análisis de Fase I de la señal.

Una de las cuestiones más importantes en la aplicación de este modelo CPM es el número de observaciones previas al cambio, este tiene un gran impacto en el desempeño del modelo. Como la distribución previa al cambio es desconocida, será fácil de detectar cambios cuando el número de observaciones previo sea grande, permitiendo obtener una distribución mejor estimada, y una función de distribución empírica más exacta.

3 APLICACIÓN DEL MODELO CVM CPM Y COMPARACIONES

En análisis de flujos turbulentos es común emplear herramientas muy conocidas como son el espectro de densidad de potencia, las autocorrelaciones, la transformada wavelet, aplicadas directamente a los valores de la fluctuación de la velocidad obtenida de los ensayos realizados, con el objeto de encontrar las características particulares de las estructuras turbulentas que aparecen en el flujo. De esta manera se puede determinar la aparición de eventos específicos presentes en el campo del fluido, las escalas temporales y espaciales características de dichos eventos, etc. (Hinze, 1975).

Presentamos la información acerca de una serie de experimentos realizados, en los cuales se propone la aplicación del estimador de punto de cambio CvM CPM, utilizando el monitoreo de Fase I, puesto que nuestro interés inicial es comparar los resultados obtenidos mediante este nuevo estimador y el previamente utilizado (Marañón Di Leo y otros, 2011), cotejando ambos con las metodologías tradicionales de análisis de flujos turbulentos. Buscamos el mejor estimador para su aplicación en mediciones en tiempo real.

3.1 Caso de las señales de un inyector

En primera instancia mostraremos la información sobre las mediciones realizadas con anemometría de hilo caliente, que tenían el objeto de caracterizar el flujo de aire pulsante saliendo de un inyector diseñado para realizar experimentos de control de flujo en el interior de una cavidad de relación de aspecto 1. Nuestro interés, ya que esta señal no es proveniente de un flujo turbulento libre sino de una distribución particular de flujo generada por la boquilla del inyector, era ver el comportamiento del estimador en estudio con el fin de establecer su capacidad en la detección de cambios en la señal, siendo la misma totalmente conocida.

En la salida de la boquilla del inyector se realizó un relevamiento vertical y transversal del campo de velocidades para determinar la distribución de velocidades de inyección. Además dicho flujo de aire se regulaba con electroválvulas (frecuencias de accionamiento en un rango admisible de 0 a 250 Hz.) en un sistema neumático (ver Figura 1). En este caso mostramos dos señales específicas de la pulsación del aire por el inyector para frecuencias de accionamiento de 10Hz y 100Hz. Los cuales fueron casos típicos en los estudios realizados.

En esta oportunidad aplicamos un análisis Fase I a los datos de la componente longitudinal de la velocidad del aire medida en el eje axial de salida del inyector, a una distancia de 20 mm. del mismo. Las velocidades fueron medidas con un anemómetro de hilo caliente de temperatura constante marca Dantec modelo Streamline. Se empleó una punta de prueba X-wire Dantec 55R51 con una frecuencia de adquisición de datos de 4000 Hz por canal,

midiendo dos componentes de la velocidad (longitudinal u y vertical v).

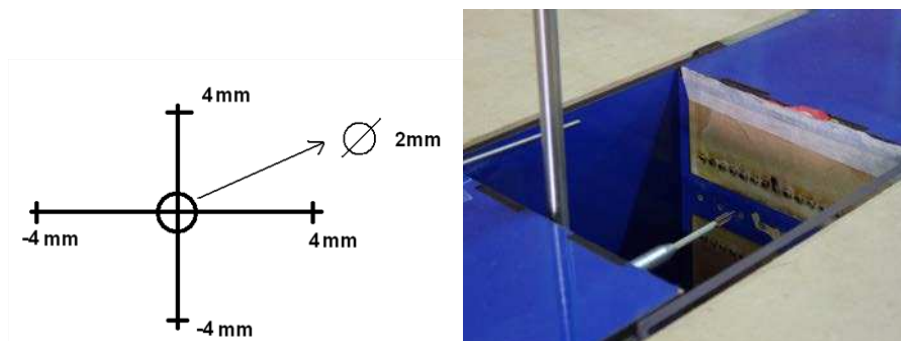


Figura 1. Esquema de medición centrado en el eje del inyector. Imagen de la medición en la cavidad.

| Estimador CvM CPM | | |
|-------------------|-----------------|------------------|
| Posición | Tiempo [seg.] | |
| | Pulsación 10Hz. | Pulsación 100Hz. |
| 1 | 0,045 | 0,0065 |
| 2 | 0,096 | 0,011 |
| 3 | 0,1455 | 0,016 |
| 4 | 0,1955 | 0,0215 |
| 5 | 0,2435 | 0,0265 |
| 6 | 0,2945 | 0,0315 |
| 7 | 0,3435 | ----- |
| 8 | 0,394 | ----- |
| 9 | 0,443 | ----- |
| 10 | 0,4935 | ----- |
| 11 | 0,5425 | ----- |
| 12 | 0,593 | ----- |
| 13 | 0,642 | ----- |
| 14 | 0,6925 | ----- |
| 15 | 0,7415 | ----- |

Tabla 1: Posiciones de los puntos de cambio de las velocidades del inyector para ambas frecuencias de pulsación (en la fracción de señal estudiada, respectivamente).

En la Tabla 1 se observan los puntos de cambio encontrados en las señales, para ambos casos de frecuencia de inyección, considerando una fracción de tiempo de la señal. En las Figuras 2 y 3 se puede observar dicha fracción de las señales (para 10Hz. y 100Hz., con frecuencias de cambio previstas en cada señal de 0,1 segundos y 0,01 segundos respectivamente), con la indicación de la posición de los puntos de cambio encontrados por el estimador CvM (líneas rojas punteadas verticales). Se observa la buena concordancia con la iniciación del pulso y luego con otro cambio en la caída de la señal hasta el corte del pulso.

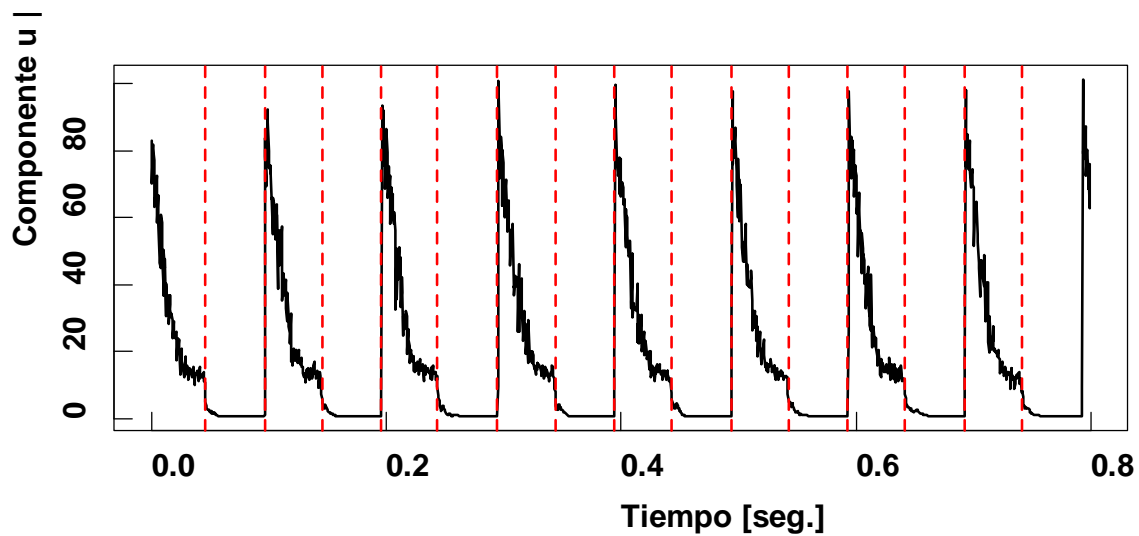


Figura 2. Gráfico de la medición de la componente u de la velocidad en el eje del inyector para una frecuencia de pulsación de 10 Hz.

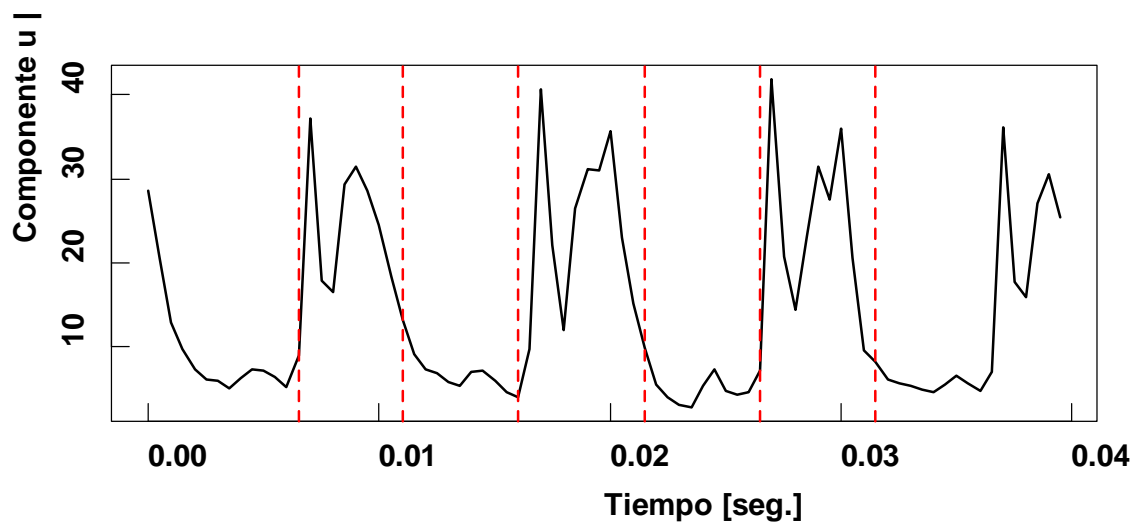


Figura 3. Gráfico de la medición de la componente u de la velocidad en el eje del inyector para una frecuencia de pulsación de 100 Hz.

3.2 Caso de la señal corriente abajo de un dispositivo de control de flujo

Para el siguiente caso ya se ha aplicado, previamente, la metodología CUSUM con el objeto de analizar la aplicabilidad del estimador de Punto de Cambio en el análisis de la señal (Marañón Di Leo y otros, 2011). Resumidamente la señal se corresponde con una medición realizada en uno de los túneles de viento de capa límite existentes en la Unidad de Investigación, Desarrollo, Extensión y Transferencia de Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental (UIDET-LaCLyFA) del Departamento de Aeronáutica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata, y se corresponde con el análisis corriente abajo en la estela de un perfil aerodinámico al que se le agrega un dispositivo pasivo de control de flujo (mini-flap Gurney), ubicado en el borde de fuga del perfil a 90° respecto a la cuerda (ver Figura 4). Con la incorporación del dispositivo un perfil aerodinámico a 0° de ángulo de

ataque puede incrementar la fuerza de sustentación en un 60%, y el máximo valor de resistencia puede incrementarse un 20% (Delnero y otros, 2007). Estos efectos están asociados con el desprendimiento de vórtices en la estela del mini flap.

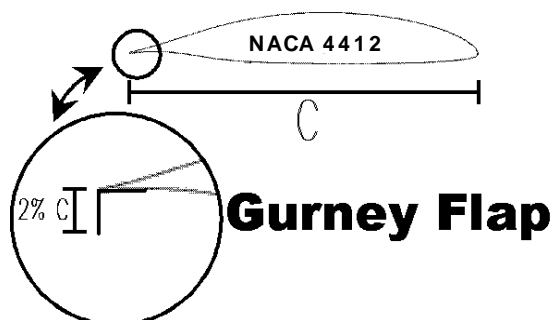


Figura 4. Esquema del modelo y la medición realizada.

Las velocidades fueron medidas con el mismo equipamiento comentado previamente, y en las mismas condiciones. La medición que se presenta corresponde a un punto de la estela generada por el perfil aerodinámico a una distancia corriente abajo del borde de fuga.

Al conocerse el campo del flujo producido por la presencia de este dispositivo y sabiendo que genera estructuras vorticosas periódicas que se desprenden del perfil, como vórtices contrarrotantes periódicos (ver Figura 5), se consideró la posibilidad de implementar esta metodología con el fin de detectar los eventos esperados en la estela, los cuales fueron cuantificados mediante un espectro de densidad de potencia, el cálculo de los coeficientes de autocorrelación y la aplicación de la transformada wavelet a la señal. La característica de localización de frecuencia en el tiempo de la transformada wavelet (Farge, 1992) da una gran posibilidad de descubrir las posiciones de singularidades y discontinuidades en una señal, algo que es imposible de alcanzar en el análisis ordinario de Fourier (Giacopinelli y otros, 2010). Se compararon dichos resultados con los arrojados por las metodologías de los estimadores de Punto de Cambio.

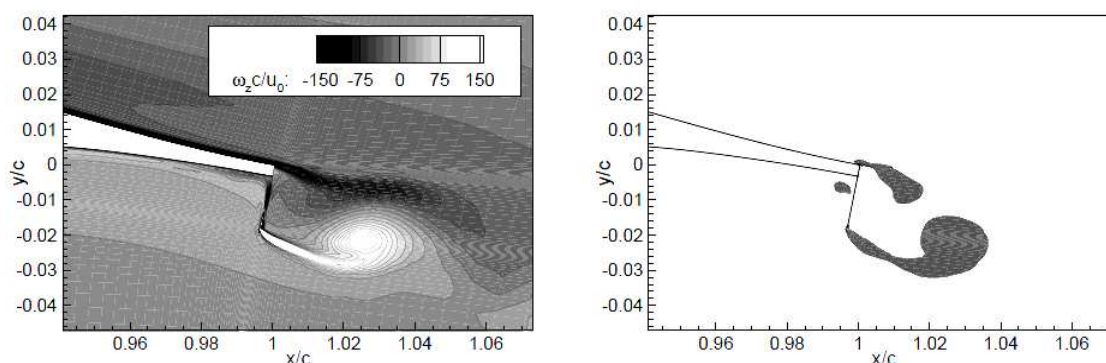


Figura 5. Esquema de las estructuras vorticosas contrarrotativas que se desprenden corriente abajo del mini-flap Gurney - Simulaciones numéricas de la vorticidad (Delnero y otros, 2007)

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 6 se presenta el mapa de wavelets 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 y otros, 2010). Allí se observa la aparición de un evento turbulento periódico asociado a uno de los vórtices contrarrotativos que se desprenden corriente abajo del dispositivo.

En dicha Figura 6 el valor de ordenadas correspondiente a Escalas se define con la siguiente expresión:

$$Escala = \frac{\ln(\Delta t)}{\ln(10)} \quad (7)$$

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

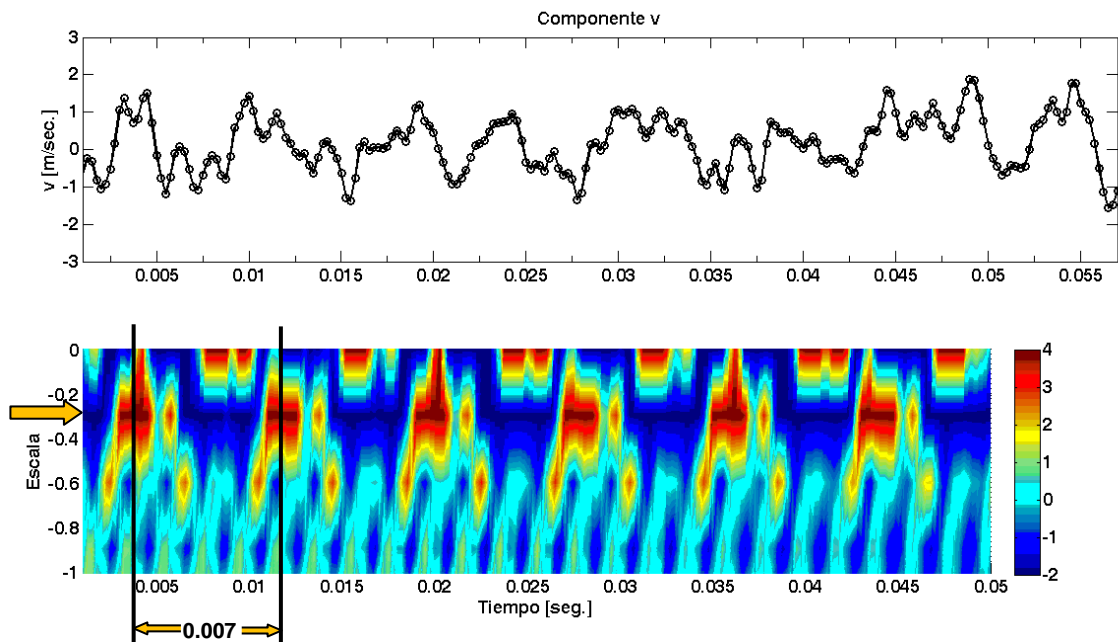


Figura 6. Mapa de wavelets y valores de la fluctuación de la señal para la fluctuación alrededor del valor medio de la componente vertical de la velocidad en los primeros 0,05 segundos (Escala de aparición del vórtice - 0,3).

Las estructuras marcadas en el mapa de wavelets (Escala -0,3) concuerdan con la frecuencia del pico de energía (141,6 Hz) encontrado mediante el análisis realizado por el cálculo del espectro de densidad de potencia de la misma señal. Esta frecuencia se corresponde con la periodicidad encontrada en los máximos secundarios correspondientes a un intervalo de tiempo de 0,007 segundos.

De la aplicación del algoritmo del estimador de Punto de Cambio, aplicando el método de las sumas acumulativas (CUSUM), se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 2. En la misma, también, se presentan los cambios encontrados mediante la nueva aplicación de la metodología CvM CPM, en las mismas se indica el instante de tiempo en segundos en el que se produce el cambio para cada caso. De los resultados obtenidos se observa que el intervalo de tiempo promedio entre cambios es 0,0032 segundos.

| Puntos de Cambio (tiempo [seg.]) | |
|----------------------------------|---------------|
| Estimador CUSUM | Estimador CvM |
| 0,0025 | 0,00225 |
| 0,00475 | 0,0045 |
| 0,009 | 0,00875 |
| 0,01225 | 0,01175 |
| 0,01575 | 0,0155 |
| 0,020 | 0,020 |
| 0,022 | 0,0215 |
| 0,02475 | 0,0245 |
| 0,02675 | 0,028 |
| 0,02925 | 0,0335 |
| 0,03375 | 0,03775 |
| 0,03775 | 0,0405 |
| 0,04075 | 0,043 |
| 0,044 | 0,048 |

Tabla 2: Resultados de los puntos de cambio de la señal analizada por el método CUSUM y CvM.

Aquí se observa que los puntos de cambio encontrados se aproximan a los máximos del mapa de wavelets para la escala aproximada de $-0,3$, con una periodicidad de $0,007$ segundos, que se corresponden con las estructuras vorticosas contrarrotantes conocidas. Cabe destacar que el algoritmo de Punto de Cambio detecta independientemente los valores máximos y mínimos que se observan en el mapa de wavelets, por ello es que se observa una periodicidad de, aproximadamente, la mitad del valor obtenido mediante las otras metodologías.

En la Figura 7 mostramos, nuevamente, la fracción de la señal analizada. Además, en la misma se observan los puntos de cambio obtenidos por ambas metodologías, indicando los mismos con rectas verticales de distinto color para cada caso. De esta manera mostramos visualmente la concordancia de los resultados obtenidos. En algunos puntos no se encuentra una correlación exacta, pero en general ambos modelos presentan una buena aproximación en la detección de cambios de la señal, concordando con los efectos en la estela para este flujo particular.

Cabe acotar que, respecto al nuevo modelo de punto de cambio (CvM) la detección de cambios en la señal es sensiblemente influenciada por el número de datos tomados como referencia para estimar la distribución de referencia. En este caso se inicia la detección luego de muy pocos valores de comenzado el muestreo, siendo que así la detección de cambios es más precisa para este tipo de señales. Si por el contrario se comienza la detección más avanzado el muestreo la detección no es tan precisa. Se sigue analizando esta situación puesto que, como se mencionó el estimador es muy sensible a la cantidad de valores analizados previos al inicio de la detección.

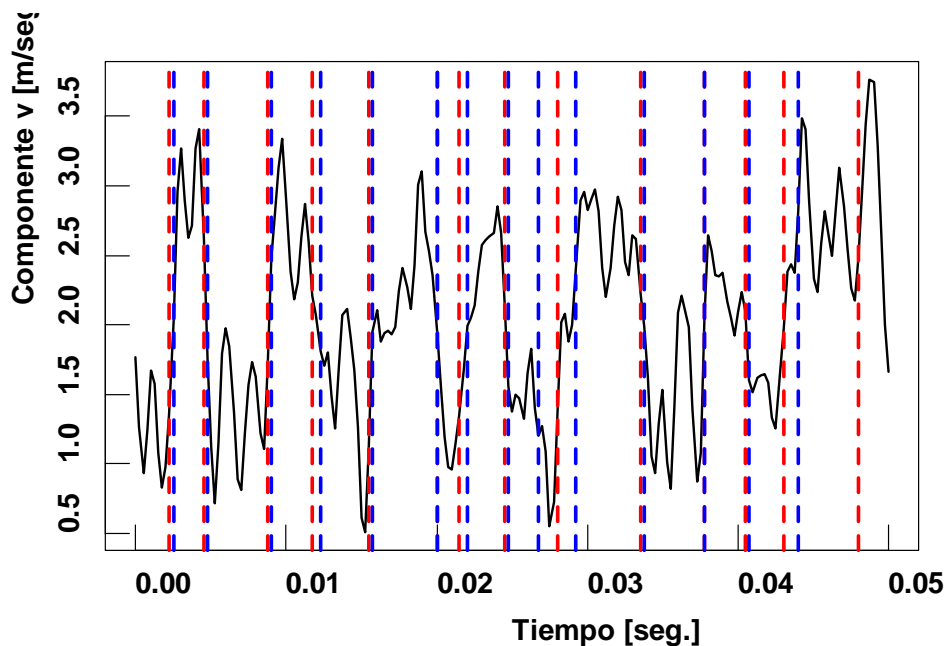


Figura 7. Gráfico de la señal para el caso de la estela con el Gurney flap. (Puntos de cambio: CUSUM-rojo y CvM-azul).

Por otro lado se observa en la Figura 7, que la mejor concordancia entre los dos estimadores se da, en general, cuando el cambio de la señal tiene una tasa de variación más pronunciada. Esto nos indica que ambos estimadores muestran diferencias en los casos en que la fluctuación de la señal no es tan alta, es decir en pequeñas fluctuaciones. Pero se debe tener en cuenta que las fluctuaciones mayores son las responsables de marcar con mayor énfasis la aparición de los eventos turbulentos comentados.

4 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En primera instancia, podemos mencionar que la metodología aquí propuesta muestra la factibilidad de ser aplicada a este tipo de experimentos, con dos fines principales. Por un lado, ambos métodos demuestran que responden de manera bastante correcta para la detección de cambios en la señal, los cuales provienen de los fenómenos en estudio. Y además, se considera que en estas circunstancias sería viable emplearlos como parte del software de adquisición de datos, con el objeto de optimizar los ensayos.

Los cálculos presentados, se basan en la implementación de la detección por monitoreo Fase I, puesto que en una primera instancia se buscó estudiar la capacidad de los algoritmos para detectar los cambios esperados en la señal, en particular el análisis de Fase II se basa en un análisis Fase I con cada aparición secuencial de una nueva observación, por lo cual se estima una respuesta similar, aunque se deberá comprobar.

Se implementó un código simple en lenguaje R, mediante el cual se llaman a librerías que tienen programados los modelos de punto de cambio empleados. (<http://cran.r-project.org/web/packages/cpm/index.html>)(Ross, *forthcoming*).

La implementación futura de los algoritmos, en la adquisición de datos, se podría realizar mediante el cálculo en un software adecuado para el control de la medición, aplicando el monitoreo Fase II, con el que se podrá realizar un análisis de los datos en forma secuencial. Buscamos, de esta manera, la detección on-line de un posible Punto de Cambio, pudiendo así optimizar las mediciones utilizando esta metodología como un disparador (trigger) para el inicio del muestreo. Ante la posible aparición de un evento turbulento coherente, que se quiera

estudiar con detalle, se iniciaría automáticamente la adquisición de datos, con el fin de analizar las características finas de turbulencia en el flujo específico.

Se prevé seguir analizando la aplicación del estimador, generando un software que lo incluya y permita el control del equipo. Para lograr dicho objetivo se realizarán nuevas experiencias en túnel de viento con el fin de determinar la capacidad del algoritmo. Además se seguirá con el análisis para la aplicación de otras metodologías de detección, aparte de las analizadas hasta el momento.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ing. Aer. Mariano Oscar Garcia Saíenz por su aporte con la información y los datos experimentales del sistema de inyección neumático indicado, el cual forma parte de su trabajo experimental relativo a su tesis doctoral.

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.
- 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.
- 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.
- Lai, T.L. Sequential Changepoint Detection in Quality Control and Dynamical Systems. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B - Methodological*, 57(4), 613-658, 1995.
- 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.
- Miller, I., Freund, J.E. y Johnson, R.A., *Probabilidad y Estadística para Ingenieros*, Prentice-Hall Hispanoamericana S.A. (Ed.), 1992.
- Ross, G. J., & Adams, N. M. , Two nonparametric control charts for detecting arbitrary distribution changes. *Journal of Quality Technology*, 44(2):102-116, 2012.
- Ross, G. J., Parametric and Nonparametric Sequential Change Detection in R: The cpm package, *Journal of Statistical Software*. Forthcoming.