

APLICACIÓN DE MODELOS DE PUNTO DE CAMBIO PARA EL ANÁLISIS DE LA FLUCTUACIÓN DE PRESIÓN EN FLUJO TURBULENTO

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

^aUIDET de Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental, Departamento de Aeronáutica,

^bUIDET Grupo de Aplicaciones Matemáticas y Estadísticas de la Facultad de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, calle 1 y 47, La Plata (1900), Pcia. Buenos Aires.

^cConsejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

jmaranon@ing.unlp.edu.ar

Palabras Clave: Test de Hipótesis, Punto de cambio, Turbulencia, Presiones.

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo mostramos los resultados obtenidos de la aplicación de la herramienta estadística basada en algoritmos de punto de cambio (CPM – Change Point Model) [1], con el objetivo de determinar cambios en una señal de fluctuaciones de la presión determinadas en un ensayo experimental en túnel de viento, con el objeto de analizar y detectar los efectos sobre el campo fluidodinámico de un comando sometido a la acción de una hélice operando en las inmediaciones del borde de fuga de un ala. En estos ensayos buscamos establecer las características de los efectos producidos sobre la operación del comando. En este caso se trata de un flap simple operando en el borde de fuga de un ala sometido a los efectos de una hélice en configuración pusher cercana al flap. Los modelos CPM se aplican ampliamente en la detección de cambios en variables aleatorias en una vasta variedad de procesos y problemas. En nuestro caso hemos implementado, previamente [2-4], los modelos CPM para el análisis de señales de las fluctuaciones turbulentas de la velocidad obteniendo muy buenos resultados, logrando establecer las escalas de eventos turbulentos, con iguales resultados de los que se consiguen con las herramientas estadísticas clásicas para este tipo de estudios.

En este caso implementamos los algoritmos CPM en las señales de presión procesadas y se han podido comparar los resultados obtenidos con aquellos que se obtienen mediante los tratamientos habituales en este tipo de estudios. De esta manera demostramos la aplicabilidad de los modelos CPM permitiendo generar una nueva herramienta de análisis, y con la particularidad de que estos algoritmos son utilizables, también, en tiempo real con la posibilidad de poder detectar en el mismo ensayo las características particulares de la fluctuación de las presiones.

METODOLOGÍAS

Experimental

Para la aplicación de la herramienta estadística basada en algoritmos CPM se consideraron las mediciones en túnel de viento que se vienen realizando sobre un comando de flap en un ala. El modelo de ala para el ensayo contó con un perfil aerodinámico NACA 2412, siendo sus dimensiones de una envergadura (b) de 80 cm. con una cuerda (c) constante de 30 cm., en la misma se le incorporó un flap simple móvil de una envergadura de 40 cm. con una cuerda (c_f) constante del 35% de c . (ver Figura 1).

Se ubicó un soporte adherido al techo del Túnel de Viento para montar al motor, se utilizó una hélice de madera 4x8 pulgadas (radio de la pala $R \cong 18$ cm.) y un sistema de control asociado para el motor. El motor fue ubicado estableciendo un ángulo de empuje de $6,25^\circ$

respecto de la horizontal, obteniéndose un ángulo de $8,75^\circ$ relativo al modelo, ya que el mismo se ubicó con un ángulo de incidencia geométrico de $2,5^\circ$ (ver Figura 2)

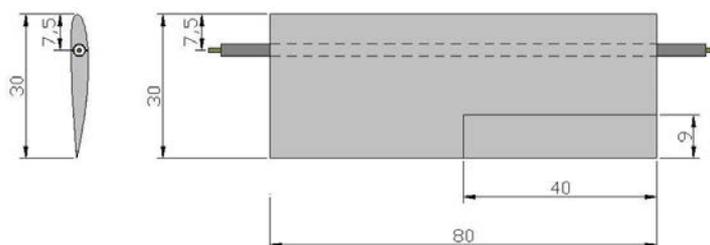


Figura 1: Datos geométricos del modelo utilizado.

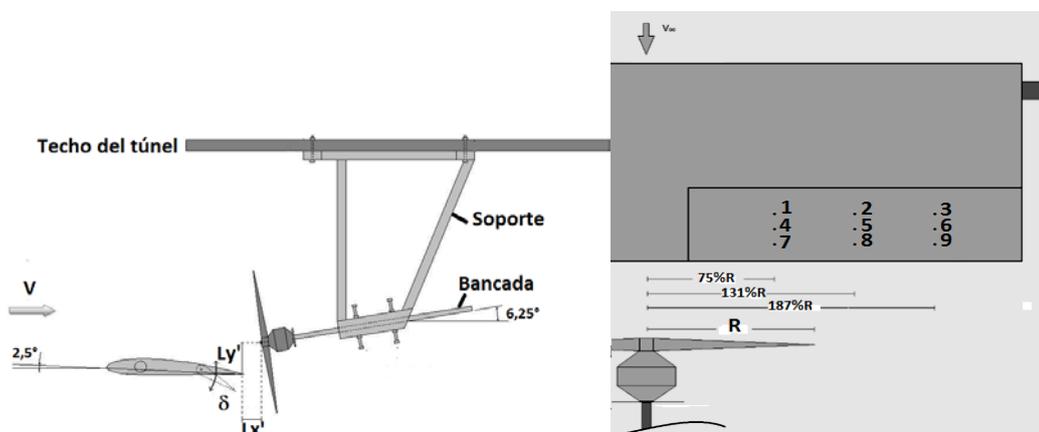


Figura 2: Esquema del montaje de la medición y tomas de presión sobre en el modelo.

El plano rotor de la hélice se ubicó, como muestra la Figura 2, de tal forma que el eje de propulsión se ubicaba en dos posiciones respecto al borde de fuga del modelo. Las posiciones relativas se muestran en la Tabla 1.

Posiciones relativas entre flap y hélice	P0	P1
	($Lx' = 7\%$ C)	($Lx' = 11,6\%$ C)
Lx' [m]	0,021	0,035
Ly' [m]	0,047	0,056

Tabla 1: Posiciones relativas del motor respecto al modelo.

Los ensayos fueron realizados con una configuración del flujo, en la sección de prueba, con la mínima intensidad de turbulencia para este Túnel de Viento que es de 1,8%. Como equipamiento se contó con un sistema de medición de presiones de la marca Scanivalve, utilizándose módulos del modelo DSA3217-16px. El modelo incorporó tomas de presión en la superficie del flap, siendo 9 tomas en el intradós y otras 9 tomas en el extradós, en posiciones homologas en cada lado. (ver Figura 2). Las tomas 1, 4 y 7 se encontraban a una distancia del eje de la hélice correspondiente al 75% de R (13,34 cm.), las tomas 2, 5 y 8 se ubicaban al 131% de R (23,34 cm.) y las tomas 3, 6 y 9 en la posición de 187% de R (33,34 cm.), y ubicadas según la dirección de la cuerda a 2,5 cm. desde el borde de ataque del flap y entre sí. El total de mediciones realizadas incluyó, las dos posiciones relativas de la hélice P0 y P1, y la variación de los parámetros de deflexión del flap (δ) y las RPM del motor, con los valores presentados en la Tabla 2.

Deflexión del flap (δ)	0°	10°	20°	30°
RPM del motor	0	4000	6000	

Tabla 2: Posiciones de la deflexión del flap y revoluciones del motor empleadas.

Las mediciones fueron realizadas considerando una frecuencia de muestreo de 500 Hz. obteniéndose un total de 7500 valores con una duración de 15 segundos por muestra.

Debido a que el objetivo del presente trabajo no es el de mostrar los resultados específicos del ensayo sino la aplicación de la metodología descrita previamente (modelos CPM) en lo que sigue presentaremos algunos resultados, necesarios para realizar una comparación y análisis respecto de las determinaciones realizadas con dicha metodología. En las referencias [5-7] se realiza un análisis más detallado de los resultados. Vemos en la Figura 4 los valores de la fluctuación de la presión para la posición P0, sin deflexión del flap y con la hélice a 6000 RPM.



Figura 3: Visualizaciones con humo del flujo sobre el ala en vista posterior a distintas RPM.

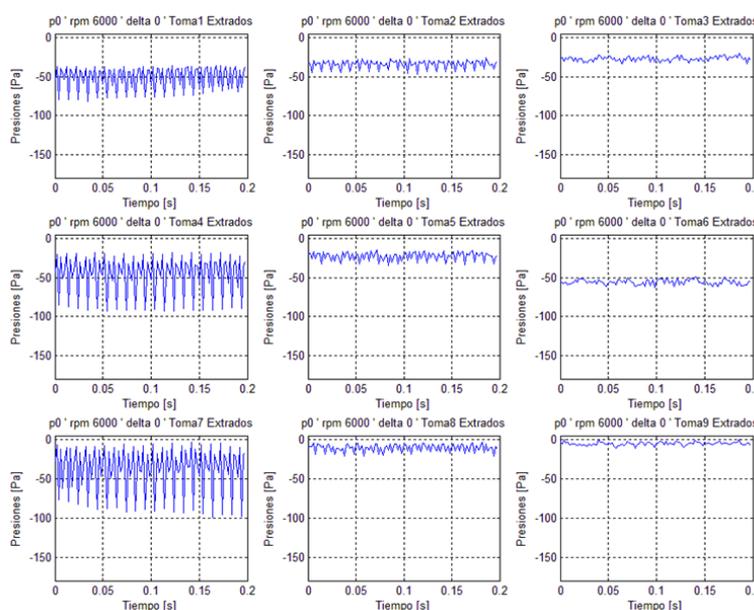


Figura 4: Valores de la presión para todas las tomas en la configuración P0, $\delta = 0^\circ$ y 6000 RPM. [8]

Allí observamos que se producen altas fluctuaciones de la presión en las tomas 1, 4 y 7 que se corresponden exactamente con la posición al 75% del radio de la pala, donde se producen las mayores cargas sobre la misma y a su vez se incrementan de la toma 1 hacia la toma 7, es decir en la dirección de la cuerda hacia el borde de fuga, reduciéndose significativamente para las demás tomas, que se encuentran alejadas de la pala. Estos resultados muestran claramente la influencia de la pala sobre el comando de flap, a pesar de que el mismo no se encuentra deflectado. Además, mostramos resultados del análisis espectral realizado mediante la aplicación de la transformada de Fourier a los datos de la presión fluctuante. En la Figura 5 se observa el caso para los mismos datos presentados en

la Figura 4. Aquí se observa la concordancia del máximo del espectro en cada caso relacionado con la frecuencia de pasaje de la pala, que para el caso de 6000 RPM se encuentra en 200 Hz. aproximadamente. Se encuentra en análisis la explicación de los máximos secundarios que se presentan, lo cual puede ser debido a diferentes factores, entre ellos un desbalance de la hélice, algún acople mecánico o fluidodinámico, etc. Se observa que el máximo secundario decrece hacia las tomas más alejadas de la pala, tanto en envergadura como en la cuerda. Explicable dado la energización que induce la pala sobre el campo del fluido.

Estadística

En trabajos previos [2-4], se realizaron estudios para analizar la aplicación de modelos de punto de cambio (Change Point Model, CPM), utilizados para detectar desviaciones en una señal sensada, en estos casos resulto ser la señal de la velocidad turbulenta fluctuante del aire en campos de velocidades de estelas, obteniéndose muy buenos resultados para el análisis del flujo. En el presente trabajo se consideran, nuevamente, tests no paramétricos

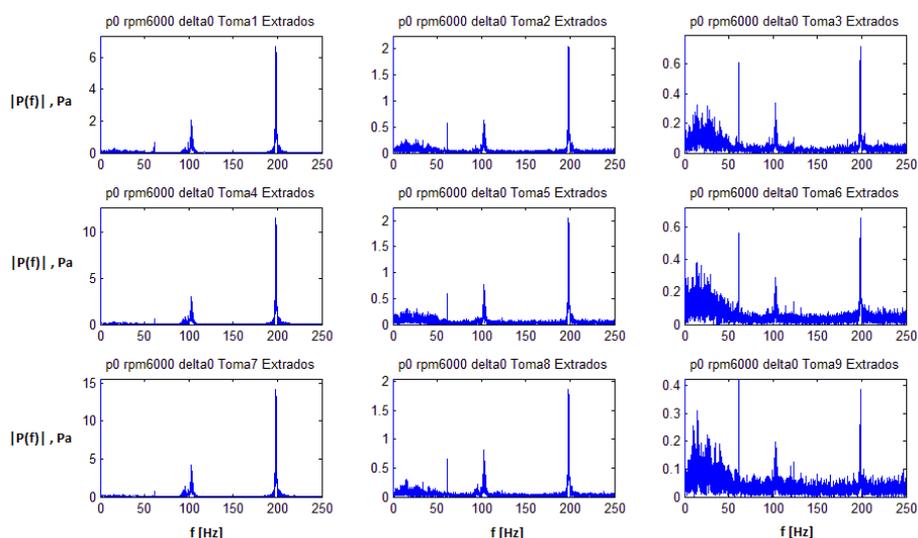


Figura 5: Transformada de Fourier de cada señal para el extradós en la configuración P0, $\delta = 0^\circ$ y 6000 RPM. [8]

aplicados a las señales de las mediciones de las fluctuaciones de la presión, para la implementación del modelo CPM, utilizando para la aplicación del algoritmo de detección rutinas codificadas en lenguaje R (<https://cran.r-project.org/web/packages/cpm/index.html>) [8], las cuales son de dominio público, empleando el tests de Cramer-von Mises (CPM-CvM) [9].

RESULTADOS

Se analizaron, mediante la metodología CPM, algunas configuraciones de medición que presentaban situaciones del comportamiento del flujo diferentes, con el fin de probar los algoritmos para establecer el nivel de detección en estas situaciones particulares. Se aplicó el análisis de Fase I, es decir, con todos los valores de la muestra en forma completa luego de finalizada la medición, y no en tiempo real. De los cálculos realizados mostramos un caso particular, a modo de ejemplo, mediante una tabla de detecciones (ver Figura 6), asociada a la señal para la configuración P0, 0 RPM y $\delta = 0^\circ$ en la toma 1, solamente para las primeras 14 detecciones, la cuales se representan en la Figura 6, en la misma se observa en líneas punteadas las posiciones de los cambios detectados en la señal.

Cambio	Tiempo [s]
1	0,008
2	0,032
3	0,058
4	0,08
5	0,1
6	0,12
7	0,188
8	0,2
9	0,228
10	0,244
11	0,264
12	0,296
13	0,312
14	0,334

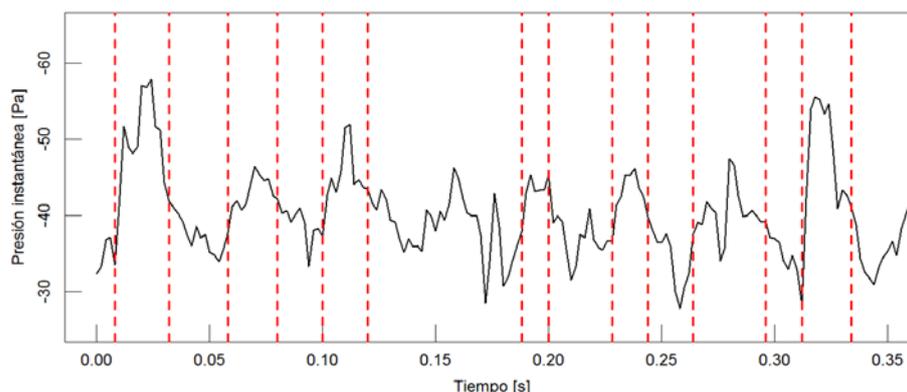


Figura 6: Tabla y gráfica de los cambios detectados en la presión en el extradós del flap en la toma 1 (primeros 0,35 segundos de la señal, para P0, $\delta = 0^\circ$ y 0 RPM).

Aplicando la metodología se realizó un estudio de todos los datos, por la cantidad de información se presenta como ejemplo el análisis realizado en el promedio de cambios detectados y las frecuencias promedio de cambio para la configuración de estudio P0, para 0 RPM, $\delta = 0^\circ$ y $\delta = 30^\circ$ para las mediciones en el extradós (ver Tabla 4). En este caso se observa, para cada toma correspondiente, una disminución del promedio de cambio en el tiempo y, por consiguiente, un incremento en la frecuencia promedio de cambio para todas las tomas de medición sobre el flap al pasar de deflexión 0° a 30° . Este comportamiento era esperable puesto que se generan desprendimientos de flujo sobre el flap que generan mayores frecuencias sobre la fluctuación de la presión. A su vez se observa en los valores que al acercarnos a la hélice en la cuerda (es decir al acercarnos al borde de fuga) las frecuencias decrecen cuando $\delta = 0^\circ$, aunque se notan algunas fluctuaciones para valores cercanos a la hélice sin rotar. Luego para las tomas 3, 6 y 9 en la punta de ala, con el flap a $\delta = 30^\circ$ las frecuencias se incrementan por los desprendimientos del flujo en esta región del flap (en promedio entre 32 y 33 Hz.), y en las restantes tomas para esta deflexión las frecuencias fluctúan entre 27 a 30 Hz., aproximadamente.

Toma	$\delta = 0^\circ - \text{RPM} = 0$			$\delta = 30^\circ - \text{RPM} = 0$		
	1	2	3	1	2	3
Promedio de cambio [s]	0,039	0,041	0,038	0,031	0,034	0,031
Frecuencia promedio [Hz]	25,57 5	24,68 2	26,10	32,52 0	29,32 1	32,21 7
Toma	4	5	6	4	5	6
Promedio de cambio [s]	0,042	0,056	0,053	0,035	0,037	0,030
Frecuencia promedio [Hz]	23,78 5	17,94 9	18,93 6	28,44 9	27,01 3	33,23 2
Toma	7	8	9	7	8	9
Promedio de cambio [s]	0,042	0,068	0,067	0,035	0,033	0,031
Frecuencia promedio [Hz]	23,56 6	14,61 0	14,90 9	28,82 7	30,04 1	32,25 0

Tabla 3: Promedios de cambio y frecuencias promedio para los cambios detectados en la señal de presiones en el extradós para las distintas tomas, a 0 RPM, $\delta = 0^\circ$ y $\delta = 30^\circ$.

De los análisis realizados se observó que no se detectaban cambios en la señal en varios casos, además las detecciones mostraban similares resultados para las configuraciones P0 como P1. Por ello analizamos los resultados en una configuración, para mostrar una tendencia de los resultados. Observamos que cuando $\delta = 0^\circ$, las tomas más cercanas a la pala (1, 4, 7 y 2, 5, 8) no mostraban resultados de detección de cambios, si aparecían cambios en las tomas 3, 6 y 9, que son las más alejadas a la hélice en la envergadura del

		$\delta = 0^\circ$ - RPM = 6000			$\delta = 30^\circ$ - RPM = 6000		
Posición P1	Toma	1	2	3	1	2	3
	Promedio de cambio [s]	S/D	S/D	0,077	S/D	0,036	0,031
	Frecuencia promedio [Hz]	S/D	S/D	13,01	S/D	27,50	32,631
	Toma	4	5	6	4	5	6
	Promedio de cambio [s]	S/D	S/D	0,058	S/D	0,047	0,035
	Frecuencia promedio [Hz]	S/D	S/D	17,30	S/D	21,46	28,915
	Toma	7	8	9	7	8	9
	Promedio de cambio [s]	S/D	S/D	0,087	S/D	0,039	0,035
	Frecuencia promedio [Hz]	S/D	S/D	11,50	S/D	25,35	28,896

Tabla 5 Promedios de cambio y frecuencias promedio para los cambios detectados en las presiones en el extradós para las distintas tomas, a 6000 RPM, $\delta = 0^\circ$ y $\delta = 30^\circ$ y P1. (S/D: sin detección de cambios en la señal)

flap, en las mismas se observaba una variabilidad en las frecuencias, no pudiéndose establecer una tendencia clara. Sin embargo, cuando se producía la deflexión del flap con $\delta = 30^\circ$, se presentaba una tendencia clara. Primero, solamente las tomas 1, 4 y 7 no presentaban detección de cambios (tomas más cercanas a la hélice en la envergadura), luego las frecuencias crecían en envergadura hacia la punta del flap, este crecimiento da cuenta de un fenómeno esperable, ya que la deflexión del flap produce desprendimiento del flujo, generando mayores fluctuaciones en la señal. A su vez las frecuencias son superiores hacia las puntas, debidas a los efectos de punta en el flujo. Es claro que las tomas que no presentaban detección eran aquellas que, para la condición de rotación de la hélice, son las más influenciadas por el paso de la pala correspondiéndose con la modulación observada en la señal (ver Figura 4). Por otro lado, también, los análisis en frecuencia realizados muestran para las tomas en cuestión los efectos del paso de la hélice ya que se detecta la frecuencia del paso de la pala, claramente (200 Hz. aproximadamente para las 6000 RPM, ver Figura 5), y siendo mayor la energía en juego para dichas tomas, incrementándose para las tomas más cercanas a la pala.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos nos demuestran las capacidades de la metodología de punto de cambio para la detección de variaciones en la señal que pueden identificar aspectos importantes del comportamiento del campo del flujo en el entorno del flap, en el caso expuesto se deben a los desprendimientos del flujo por la deflexión del mismo. Estos efectos fluidodinámicos se asocian a efectos inerciales y estructurales que en combinación pueden provocar interacciones de tipo aeroelásticas, las cuales pueden ser importantes a la hora de analizar la implementación del dispositivo en dicha configuración.

En particular el tema de que estos algoritmos no presentan detección de valores en algunos casos está en evaluación, puesto que particularmente no se produce detección en las condiciones y tomas en las cuales la señal sensada presenta una fluctuación y

modulación particular, en este caso generada por el pasaje de la hélice en sus cercanías.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] T.L. Lai, Sequential Change-point Detection in Quality Control and Dynamical Systems, *Journal of the Royal Statistical Society. Series B - Methodological*, 57(4), (1995) 613-658.
- [2] J. Marañón Di Leo, M.V. Calandra, J.S. Delnero, Determinación de estructuras turbulentas mediante algoritmos numéricos, *Mecánica Computacional*, 30, (2011) 425-434.
- [3] J. Marañón Di Leo, M.V. Calandra, J.S. Delnero, Detección de eventos turbulentos mediante la aplicación de algoritmos de punto de cambio, *Mecánica Computacional*, Vol XXXII, (2013) 1297-1308.
- [4] J. Marañón Di Leo, M. V. Calandra y J. S. Delnero. "Algoritmos de punto de cambio para la detección de estructuras vorticosas en campos fluidodinámicos turbulentos". *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*. Editorial Elsevier - ISSN 0213-1315 (En Prensa) - (2016).
- [5] N. Savloff, J. M. Trochez Segura, S. Algozino, J. Marañón Di Leo. "Efectos aerodinámicos de hélices pusher sobre la configuración aerodinámica de un flap en condiciones de bajo Reynolds" Terceras Jornadas de Investigación, Transferencia y Extensión de la Facultad de Ingeniería 20, 21 y 22 de abril de 2015. ISBN 978-950-34-1189-
- [6] S. Algozino; J. Marañón Di Leo; J. S. Delnero; I. Echapresto Garay. "Aerodynamic Study of a Pusher-Propeller effects on a simple flap" 34th AIAA Applied Aerodynamics Conference, AIAA Aviation and Aeronautics Forum and Exposition 2016. 13-17 June 2016. Washington D.C., EE UU.
- [7] N. Savloff. "Estudio experimental de la interferencia aerodinámica producida en un flap por una hélice en configuración pusher". Trabajo Final de Carrera de Ingeniería Aeronáutica. 2016.
- [8] G.J. Ross, Parametric and Nonparametric Sequential Change Detection in R: The cpm Package, *Journal of Statistical Software*, 66(3), (2015) 1-20.
- [9] G.J. Ross, N.M. Adams, Two nonparametric control charts for detecting arbitrary distribution changes, *Journal of Quality Technology*, 44(2), (2012) 102-116.