

DETECCIÓN Y ANÁLISIS CON WAVELETS DE ESTRUCTURAS ORGANIZADAS EN LA ESTELA DE UN PERFIL AERODINÁMICO

Pablo E.L. Giacomini^a, Ana E. Scarabino^a, Juan S. Delnero^{a,b}, Federico Bacchi^a

^a*Grupo de Fluidodinámica Computacional, Universidad Nacional de La Plata, Calle 116 e/47 y 48, 1900 La Plata, Argentina, scarabino@ing.unlp.edu.ar*

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

Palabras Clave: Wavelets, Perfiles, Hipersustentadores, Estelas.

Resumen. Los flujos turbulentos pueden analizarse separando estructuras coherentes, que concentran la mayor parte de la energía y flujo incoherente de fondo. El tamaño y la distribución espacial de las estructuras coherentes son claves para la comprensión de la turbulencia. Las wavelets son funciones base localizadas tanto en el espacio como en la escala y pueden expresar la categoría de frecuencia de una señal en un tiempo o posición dados. La transformada Wavelet se realiza localmente en la señal y las formaciones y colapsos de estructuras especiales en una señal (singularidades, discontinuidades, gradientes, máximos) pueden ser identificados.

El objetivo de este trabajo es identificar las estructuras coherentes o vórtices predominantes en la estela a sotavento de un perfil HQ 17 con dispositivo hipersustentador tipo miniflap gurney. Estos dispositivos consisten en una pequeña placa perpendicular al perfil, en o cerca del borde de fuga, de una altura H del orden de 1% al 4% de la cuerda. El efecto global es producir un aumento significativo en la sustentación, acompañado de un incremento relativamente menor en la resistencia del perfil. Su geometría genera desprendimientos vorticosos de escala espacial H , que modulan la estela e influyen así en la configuración global del flujo.

Para este estudio, se realizó una simulación numérica, para un número de Reynolds de 4.4×10^5 con el método de Volúmenes Finitos implementados con el software comercial Fluent. Se corrieron simulaciones con sucesivos refinamientos de malla hasta que los resultados fueron independientes de posteriores remallados. Se utilizó el modelo de turbulencia SST (Shear Stress Transport) $k-\omega$. Simultáneamente se llevaron a cabo experimentos en el túnel de viento del Área Departamental Aeronáutica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata. Con un anemómetro de hilo caliente Dantec Streamline se obtuvieron registros de las componentes instantáneas horizontal y vertical de la velocidad en la estela del perfil. Tanto los datos experimentales como los obtenidos por simulación numérica fueron analizados con la técnica de transformada wavelet continua. Los resultados son concordantes, validando la calidad de la simulación numérica, y muestran la estructura de los vórtices desprendidos y el grado de organización de estos desprendimientos periódicos.

1 INTRODUCCIÓN

Si escuchamos una sinfonía clásica, oímos muchos tonos. El análisis de espectro de potencias de Fourier de la sinfonía revelará, por supuesto, los tonos y sus armónicos, así como otras frecuencias que se repiten en modulaciones y vibraciones. Si tocamos las partes en otro orden, el espectro de potencias no cambia en absoluto, pero para el oyente se tratará de una pieza totalmente diferente, y más aún si intercambiamos partes dentro de las partes, a una escala más fina. La Transformada de Fourier Ordinaria mapea una función del espacio de tiempo al espacio de frecuencia pero la información de localización de tiempo de la señal se pierde.

Por el contrario, el análisis de wavelets no sólo nos da las frecuencias principales, sino que nos indica cuándo ocurren y cuál es su duración.

Para muchas señales, el análisis de Fourier es muy útil, debido al contenido de frecuencias en la señal. Entonces, ¿para qué otra técnica como wavelets? Porque, al transformar al dominio de frecuencias, la información temporal se pierde. Es decir, es imposible decir cuándo ocurrió un evento particular. Ahora bien, si las propiedades de la señal no cambian mucho con el tiempo, esto es, si la señal es estacionaria o periódica, no importa mucho. Sin embargo, las señales más interesantes son no estacionarias, pues presentan tendencias, cambios bruscos, y comienzos y terminaciones de eventos, para los cuales el análisis de Fourier no es adecuado.

Los Flujos Turbulentos consisten de dos partes, estructuras coherentes y el flujo incoherente de fondo. El tamaño y la distribución espacial de las estructuras coherentes son claves para la comprensión de la turbulencia pero el análisis de escala espacial no es posible con la transformación de Fourier. Un instrumento más apropiado es necesario.

Las Wavelets son las funciones base que son localizadas tanto en el espacio como en la escala y pueden expresar la categoría de frecuencia de una señal en un tiempo dado o la posición. La transformada Wavelet se realiza localmente en la señal y las formaciones y colapsos de estructuras especiales en una señal pueden ser identificados. La característica de localización de frecuencia en tiempo de la transformada Wavelet permite la detección de las posiciones de singularidades y discontinuidades en una señal, que es imposible con el análisis ordinario Fourier.

Se proponen las Wavelets para modelar y analizar la turbulencia generada en la estela a sotavento de un perfil HQ 17 con un mini flap tipo Gurney.

2 ASPECTOS MATEMÁTICOS

Las wavelets están localizadas tanto en el espacio como en la frecuencia, por lo tanto la transformada wavelet analiza una señal localmente en los dominios de frecuencia y el espacio o tiempo. La característica de localización de frecuencia en el tiempo de la transformada Wavelet 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. La Transformada Wavelet Continua (CWT) es una buena herramienta para analizar la diferenciabilidad local de una función y para hallar y caracterizar sus singularidades (Daubechies, 1992). El concepto de análisis de Multiresolución (Daubechies, 1988), que da un método general para construir bases de Wavelets ortogonales, conlleva a la implementación de algoritmos de Wavelet rápidos. Los primeros trabajos con Wavelets aplicados a un campo de flujo turbulento fueron desarrollados por Marie Farge (1992).

2.1 Transformada wavelet continua (CWT)

La transformada wavelet continua intenta expresar una señal $x(t)$ continua en el tiempo,

mediante una expansión de términos o coeficientes proporcionales al producto interno entre la señal y diferentes versiones escaladas y trasladadas de una función prototipo $\Psi(t)$ más conocida como wavelet madre. Asumiendo que tanto la señal como la nueva función $\Psi(t)$ son de energía finita, entonces podemos definir

$$CWT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

como la Transformada Wavelet Continua. Ahora, utilizando el teorema de Parseval, que dice que la energía de la señal es siempre la misma sin depender de si se encuentra en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia:

$$Energía\ Total = \int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |F(\omega)|^2 d\omega \quad (2)$$

podemos reescribir la anterior ecuación de CWT en términos de la Transformada de Fourier de $x(t)$ y Ψ como

$$CWT(a, b) = \frac{1}{2\pi\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) \Psi(a\omega) e^{-i\omega b} d\omega \quad (3)$$

La variable a (parámetro de escala) controla el ancho o soporte efectivo de la función, y la variable b (parámetro de traslación) nos da la ubicación en el dominio del tiempo de Ψ .

Grandes valores del parámetro de escalamiento a significan una escala grande y corresponden a pequeños rangos de frecuencia, mientras que valores pequeños del parámetro corresponden a altas frecuencias y escalas muy chicas.

Ahora bien, para que este análisis sea posible y además para poder lograr una perfecta reconstrucción de la señal a partir de la transformada, la función $\Psi(t)$ debe cumplir con la condición de admisibilidad. El cumplimiento de esta condición significa que el valor medio de $\Psi(t)$ es igual a 0, lo que a su vez implica obligatoriamente que Ψ tenga valores tanto positivos como negativos. Además como Ψ es una función “ventana” de la señal sobre un intervalo de tiempo dado por a alrededor de un punto $t = b$, se observa intuitivamente que Ψ es de soporte compacto, es decir, Ψ es una onda definida sobre un intervalo de tiempo finito, y esto es el porqué de su nombre wavelet u ondata.

Mediante la variable de escala nosotros podemos comprimir ($[a] < 1$) o dilatar ($[a] > 1$) la función $\Psi(t)$, mientras que la variable b controla la ubicación de la función en el espacio de tiempo permitiéndonos deslizar $\Psi(t)$ sobre el intervalo de tiempo en el que se haya definido $x(t)$. Un punto importante es que la función wavelet Ψ se traslada cubriendo toda la señal para cada valor de a . Si se utiliza la transformada wavelet discreta, esto es decir que si la escala escogida es pequeña, habrá más traslaciones que si la escala escogida es grande.

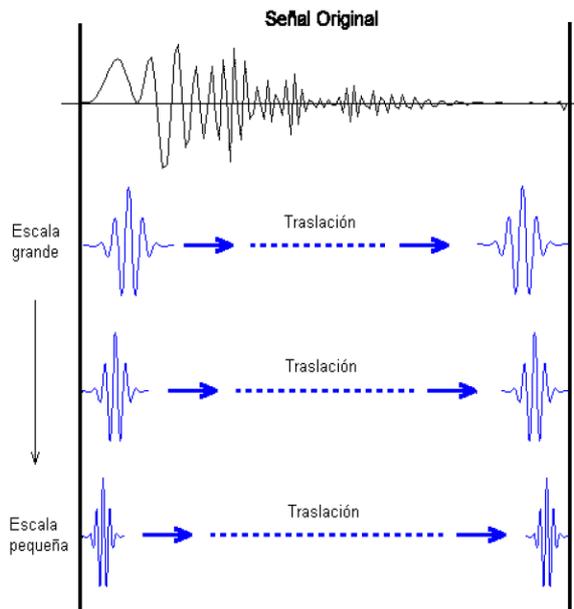


Figura 1: Proceso de escalamiento y traslación de una Wavelet

Se observa que para una escala grande la wavelet ocupa un mayor segmento de la señal y por lo tanto tiene mejor resolución en frecuencia mientras que para una escala más pequeña el intervalo de tiempo bajo el que se analiza la señal es menor, lo que implica mayor resolución en tiempo.

2.2 La elección de la wavelet y de la transformada wavelet

Las Wavelets pueden ser funciones de valor real o complejo. La mayoría de las Wavelet son de valor real como las de Haar, Daubechies, Biortogonal, Meyer, Gaussiana, y Morlet Real (Figura 2). Sin embargo las de valor complejo tienen algunas ventajas. Su cambio de fase entre las partes real e imaginaria puede impedir oscilaciones falsas en los coeficientes de la transformada Wavelet y por lo tanto son preferidos para propósitos de transformación (Daubechies, 1992).

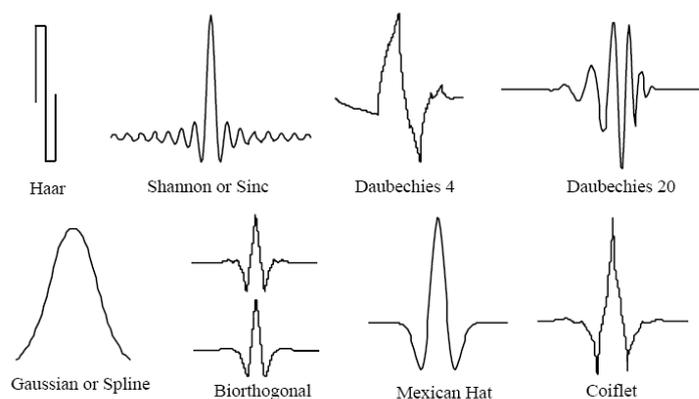


Figura 2: Diferentes tipos de Wavelets

En la mecánica de fluidos, dos son las preferidas (Meneveau, 1991):

- Wavelet Compleja Morlet:

$$\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) = \frac{1}{\pi^{1/4}} e^{-\frac{(t-b)^2}{2a^2}} e^{i5\frac{(t-b)}{a}} \quad (4)$$

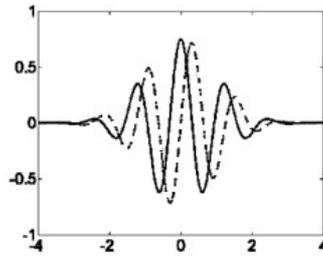


Figura 3: Wavelet de Morlet; línea sólida para la parte real y punteada para la imaginaria

- Wavelet Mexican Hat

$$\psi(t) = \frac{2}{\sqrt{3\sigma\pi^{1/4}}} \left(1 - \frac{t^2}{\sigma^2}\right) e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

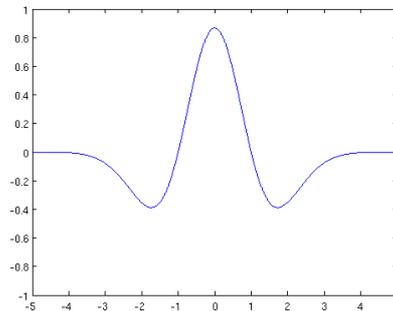


Figura 4: Wavelet "Mexican Hat"

La elección de la transformada depende de qué información queramos extraer de la señal. La transformada Wavelet continua es mejor para el análisis señales o campos, porque debido a su redundancia muestra mejor el contenido de información de la señal que la Transformada Wavelet discreta. La transformada Wavelet discreta es un buen instrumento para el procesamiento de señales (filtrado de ruido y compresión) y para propósitos de modelado debido a la propiedad de ortogonalidad y porque descompone la señal en un número mínimo de coeficientes.

En la selección de la función wavelet hay varios factores que deberían ser considerados (Farge, 1992).

1) Ortogonal u no ortogonal. En el análisis por wavelet ortogonal, el número de convoluciones en cada escala es inversamente proporcional al ancho de la base de wavelet en esa misma escala. Esto genera un espectro de wavelet que contiene "bloques" discretos de potencia de wavelet y es útil para el procesamiento de la señal al brindar la representación más compacta de la señal. Lamentablemente para el análisis de serie de tiempo, un aumento aperiódico en la serie de tiempo produce un espectro de wavelet diferente. Inversamente, un análisis no ortogonal (como el utilizado en este estudio) es altamente redundante en escalas grandes, donde el espectro de wavelet en tiempos adyacente es altamente correlacionado. La

transformada no ortogonal es útil para el análisis de serie de tiempo, donde se esperan variaciones suaves y continuas en la amplitud de wavelet.

2) Compleja o real. Una función wavelet compleja nos dará información tanto sobre la amplitud como sobre la fase y se adapta mejor para capturar comportamientos oscilatorios. Una función wavelet real nos da sólo una componente y puede ser utilizada para aislar picos o discontinuidades.

3) Ancho. La resolución de una función wavelet se determina por el balance entre la anchura en el espacio real y el correspondiente en el espacio de Fourier. Una función estrecha (en el tiempo) tendrá una resolución en el tiempo buena, pero la resolución en frecuencia será pobre, mientras una función ancha tendrá una pobre resolución en el tiempo, pero la resolución de frecuencia será buena.

4) Forma. La función wavelet debería reflejar las características presentes en la serie temporal. Para una serie temporal con saltos pronunciados, uno seleccionaría una función tipo cuadrada como la de Haar, mientras que series con variaciones suaves en el tiempo uno escogería una función suave como un coseno amortiguado. Si uno está interesado principalmente en espectros de potencia de wavelet, entonces la selección de la función de wavelet no es crítica, y una función dará similares resultados cualitativos que otra.

3 TURBULENCIA

La imprevisibilidad y aleatoriedad de la turbulencia la han hecho difícil de entender totalmente, aún con herramientas poderosas como la mecánica estadística. Debido a las fluctuaciones "no determinísticas" en las propiedades del flujo, uno no puede predecir con precisión el valor de una propiedad del flujo en un instante futuro.

Los flujos turbulentos contienen patrones ordenados llamados estructuras o vórtices coherentes, y una parte aleatoria. En el análisis estándar de la turbulencia es común dividir el flujo en dos partes: la parte promediada en el tiempo y la parte fluctuante.

Entre las formas clásicas de analizar los flujos turbulentos se encuentran el estudio estadístico de las propiedades de las fluctuaciones o un modelado semiempírico de las magnitudes medias turbulentas.

La investigación actual en turbulencia se basa fundamentalmente en observaciones, experimentos en laboratorio y simulaciones numéricas. Parámetros medidos que caracterizan a los flujos turbulentos son campos escalares (temperatura, concentraciones, presiones, etc.), campos vectoriales (velocidad, vorticidad, etc.) y tensoriales (tensiones, deformaciones, etc.)

Considerando la Hipótesis de Taylor, en donde los tiempos característicos de las fluctuaciones son pequeños en comparación con los relativos a cambios en el valor medio de la velocidad, uno puede asumir que las estadísticas temporales pueden identificarse con las estadísticas espaciales. Esto permite la comparación de observaciones o mediciones experimentales con las predicciones de la teoría estadística de la turbulencia, y además con las estadísticas obtenidas de experiencias numéricas.

3.1 Propiedades de la turbulencia

Aunque la turbulencia sea caracterizada como un movimiento irregular y desordenado, éste tiene una estructura espacial y el desorden no es solamente ruido blanco. Estas estructuras incoherentes están asociadas con la parte gaussiana del flujo, mientras las estructuras organizadas son responsables de la no gaussianidad del flujo (Farge *et al*, 2003). Las estructuras coherentes contienen la mayor parte de la energía del flujo. Por lo tanto la física de turbulencia puede ser relacionada con las interacciones entre remolinos de tamaños diferentes por una amplia gama de escalas de longitud que van del orden del micrómetro al metro. El rol de remolinos grandes es el de transferir la energía cinética a los remolinos de

menor tamaño mientras los remolinos más pequeños disipan la energía (Teoría de Kolmogorov, Hinze, 1975)

La intermitencia, que significa el porcentaje de tiempo que el flujo es turbulento, es una característica importante de flujos de transición. En un flujo intermitente períodos “tranquilos” son interrumpidos irregularmente por explosiones turbulentas fuertes en el espacio o en el tiempo.

La intermitencia en la energía en los flujos turbulentos es causada por el ciclo de regeneración de remolinos. Esta característica autónoma es también una característica de los flujos turbulentos. Significa que la turbulencia puede mantenerse/sustentarse produciendo nuevos remolinos para sustituir aquellos perdidos por disipación viscosa.

3.2 Turbulencia y wavelets

Los métodos clásicos para analizar la turbulencia se basan en la representación Fourier, y el término de disipación ($\nu \nabla^2 \omega$) de la ecuación de Navier-Stokes es óptimamente representado en el espacio de Fourier. Sin embargo, el término de convección no lineal $\nabla(\omega \cdot V)$ es muy complicado en el espacio de Fourier. Al aumentar el número de Reynolds del flujo, el término no lineal se vuelve dominante y la representación de Fourier no es adecuada.

Los flujos turbulentos pueden ser pensados como una superposición de paquetes de ondas de forma Gaussiana (Tennekes y Lumley, 1972). Su descripción de un remolino (Figura 5 (a)) se parece enormemente a una Wavelet (Figura 5 (b)). Marie Farge fue inspirada por Tennekes y Lumley para introducir las técnicas de transformada Wavelet para analizar, modelar y calcular flujos turbulentos. Muchos trabajos se sucedieron desde entonces, profundizando distintos aspectos de esta técnica en el análisis de flujos (Gilliam *et al* 2000, Sikiö 2004).

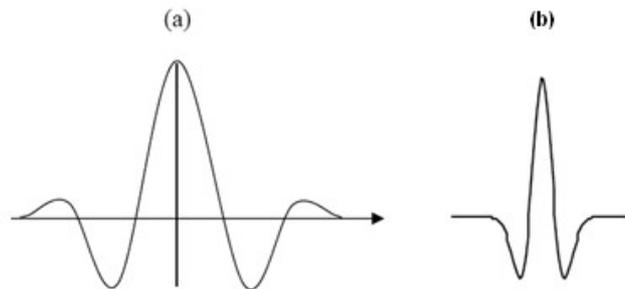


Figura 5: (a) Un remolino, (b) Wavelet “Mexican Hat”

Según Farge (1992), las estructuras coherentes pueden ser caracterizadas por el hecho de que se corresponden con los coeficientes wavelet más elevados del campo de vorticidad.

Para estudiar las señales turbulentas, proponemos separar los eventos raros y extremos (estructuras coherentes) de los densos y débiles (flujo residual de fondo), y luego calcular las estadísticas relacionadas con cada evento por separado. Al utilizar Wavelets, combinamos tanto las localizaciones en el espacio físico como en el espectral.

4 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Inmediatamente detrás de un perfil alar común operando normalmente con una incidencia que genere sustentación, la estela cercana es asimétrica. Esta asimetría es debida a las apreciables diferencias entre la capa límite proveniente de la superficie expuesta a baja presión del extradós con respecto a la capa límite de la superficie con sobrepresión del intradós. Al dejar el borde de fuga estas diferentes capas límites se desprenden,

transformándose en capas de corte que se enrollan en vórtices, constituyendo la estructura vorticosa característica de la estela cercana al borde de fuga. A mayor sustentación las capas límites y las mencionadas capas de corte provenientes del intradós y extradós se diferenciarán aun más, por lo que la estructura vorticosa de la estela cercana será influenciada por la carga aerodinámica y las características del perfil.

El flujo turbulento de un perfil con borde de fuga como provisto con un miniflap de Gurney (placa de muy pequeña altura perpendicular a la superficie del perfil) involucra capas límite turbulentas que se desprenden a una determinada frecuencia, formando capas de corte que se enrollan, las que forman a su vez una calle de vórtices periódicos.

Desde ambos extremos de un flap de Gurney emergen dos capas de corte que se enrollan en un patrón de vórtices alternantes y contra rotantes estableciendo lo que se denomina una inestabilidad absoluta de estela (Delnero et al., 2007)

La ventaja de este mini flap es que es un dispositivo muy simple y pequeño, que tiene una altura igual al 1.5% de la cuerda del perfil. Al mismo tiempo puede generar un aumento importante en la fuerza sustentadora (perpendicular a la corriente). Para un perfil HQ17, por ejemplo, la sustentación a 0° de ataque puede incrementarse en un 60%, y el máximo valor de sustentación puede incrementarse un 20% (Delnero et al., 2007). La contraparte de este dispositivo es que el aumento de sustentación es acompañado un aumento de la resistencia, aunque este último no es tan significativo. Estos efectos están asociados con el desprendimiento de vórtices en la estela del mini flap.

Los estudios se concentraron en la búsqueda de asimetrías entre los vórtices a sotavento del miniflap, generados por un diferente enrollamiento de las capas de corte provenientes de las superficies del extradós e intradós del ala en una región de estela cuya extensión es de dos cuerdas de miniflap. Simultáneamente se exploró la región de estela cercana tratando de detectar la ubicación inicial de la zona en la cual los vórtices mencionados se desarrollan midiendo la intensidad y características de los vórtices.

5 METODOLOGÍA

5.1 Estudio Experimental

Los experimentos de Túnel de Viento se llevaron a cabo en el Laboratorio de Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental (LACLYFA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata, operando a números de Reynolds menores a 5×10^5 . En lo que sigue se considerará al perfil alar ubicado con su extradós arriba y el intradós debajo, respecto de la dirección de la corriente incidente.

El perfil seleccionado para el estudio es el HQ17 con un mini flap tipo Gurney ubicado en el borde de fuga sobre el intradós.

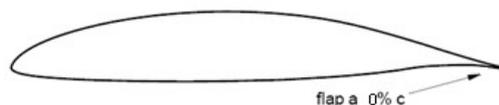


Figura 6: Perfil HQ 17 con miniflap al borde de fuga

El modelo ensayado consiste en un ala de planta rectangular sin torsión, con una cuerda de 45 cm y una envergadura de 80 cm, equipado con un miniflap Gurney de altura H igual al 1,5% de cuerda. El modelo fue ubicado horizontalmente en la sección de ensayo del túnel. La velocidad de la corriente fue de 15 m/s.

Las velocidades fueron medidas con un sistema anemométrico de hilo caliente de

temperatura constante de 2 canales marca Dantec modelo Streamline. Se emplearon puntas de prueba X-wire Dantec 55R51 con una frecuencia de adquisición de datos de 2000 Hz por canal.

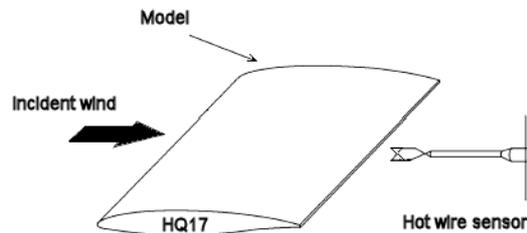


Figura 7: Esquema de la disposición experimental en el túnel de viento

Las velocidades instantáneas longitudinal, u , y vertical, v , fueron medidas corriente arriba y corriente abajo del modelo, particularmente en la región de la estela cercana al borde de fuga como con flap de Gurney, a lo largo de una grilla con puntos distanciados horizontalmente a longitudes del H y $2H$ de la cuerda alar y 12 intervalos verticales distanciados 2 mm.

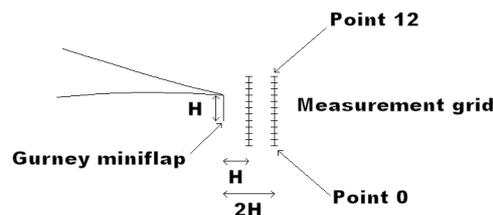


Figura 8: Detalle del esquema de mediciones en la estela

5.2 Estudio numérico

Se llevó a cabo una simulación numérica del problema en estudio con el programa FLUENT, en el Grupo de Fluidodinámica Computacional del Departamento de Ingeniería Aeronáutica de la Universidad Nacional de La Plata, con el fin de poder visualizar y analizar la estela que se generaba a partir del Gurney flap.

Se utilizó una malla híbrida con aproximadamente 100000 elementos, adaptable en forma dinámica según el gradiente de presión. Se utilizó un modelo de turbulencia $k-\omega$, para capturar mejor los flujos desprendidos en la estela. El nro. de Reynolds de la simulación fue $5 \cdot 10^5$, el mismo de los ensayos en el túnel de viento. El paso de tiempo fue fijado para capturar adecuadamente los vórtices periódicos desprendidos de la estela.

La Figura 9, Figura 10 y Figura 11 muestran el mallado con distinto nivel de detalle.

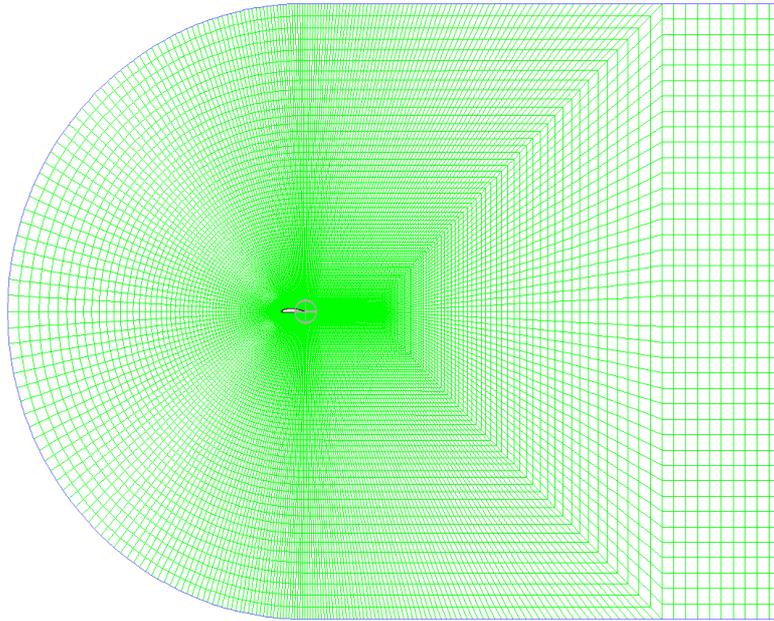


Figura 9: Mallado del campo fluidodinámico alrededor del perfil

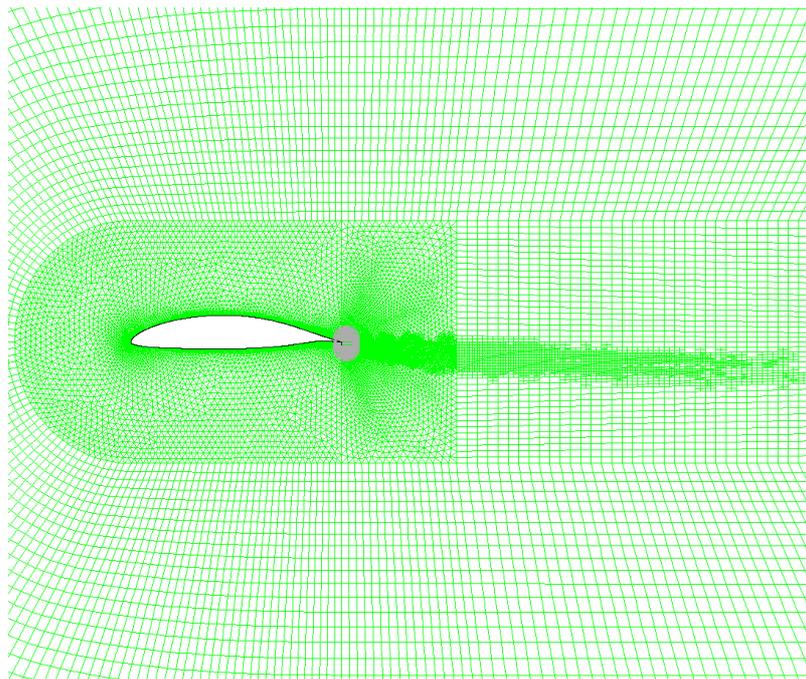


Figura 10: Detalle del mallado en las cercanías del perfil

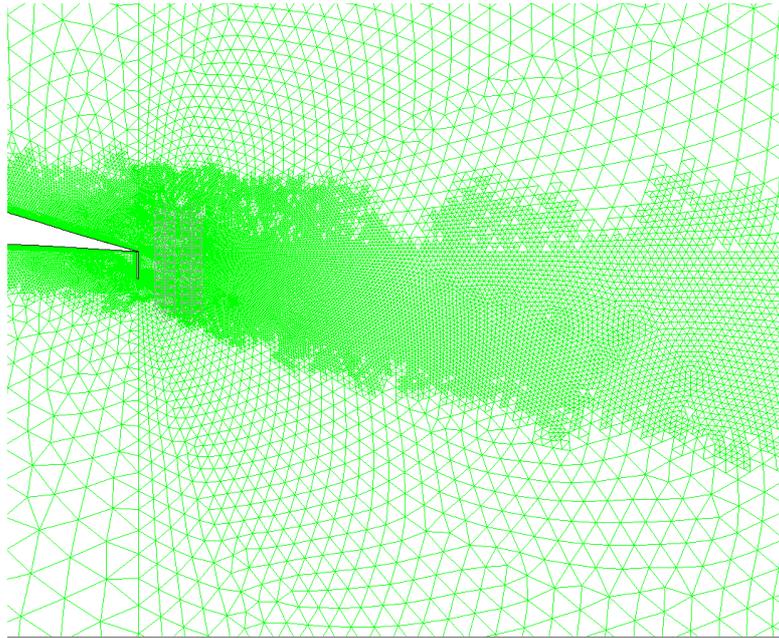


Figura 11: Mallado dinámico por gradiente de presión de la estela del perfil y detalle de los puntos de adquisición para contrastar con las mediciones experimentales.

6 RESULTADOS

6.1 Resultados Numéricos

Se obtuvieron los siguientes resultados al cabo de alrededor de 2 segundos de tiempo de flujo. Los resultados obtenidos son los siguientes:

- Velocidad del Fluido:

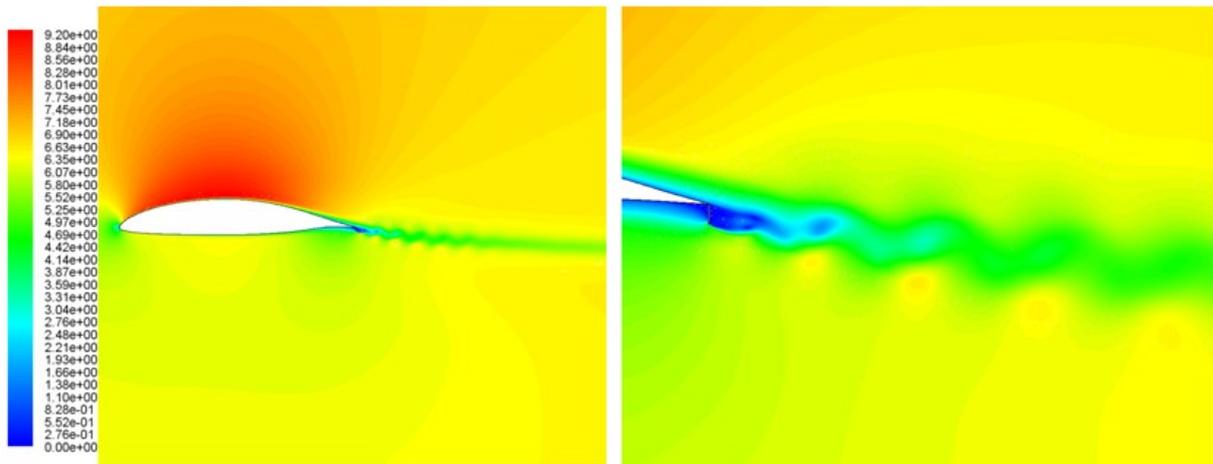


Figura 12: Contornos de magnitud de velocidad (m/s)

Se puede observar en la Figura 12 que las fluctuaciones de velocidad en la estela no son simétricas.

- Vorticidad

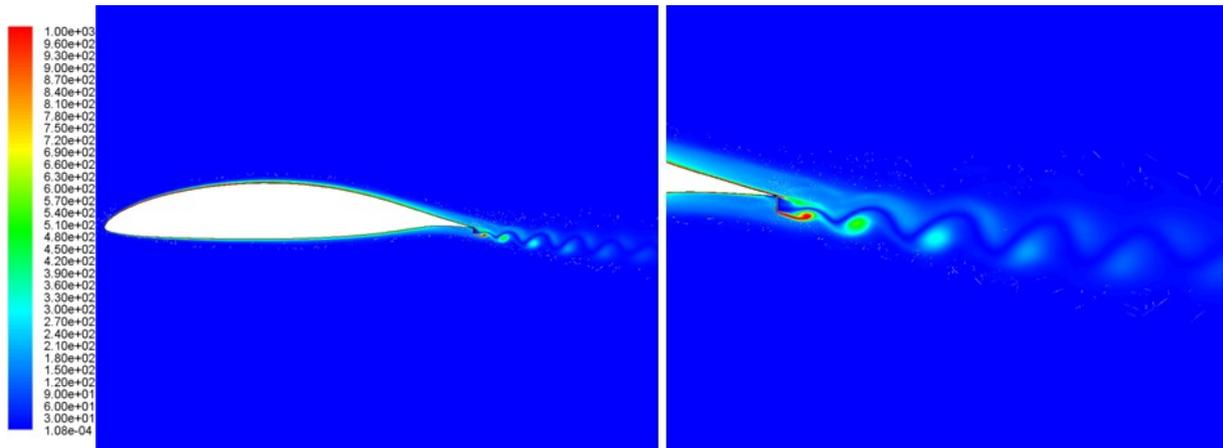


Figura 13: Contornos de Magnitud de Vorticidad (1/s)

La Figura 13 muestra la concentración de vorticidad en las estructuras coherentes desprendidas en la estela

- Intensidad de la Turbulencia

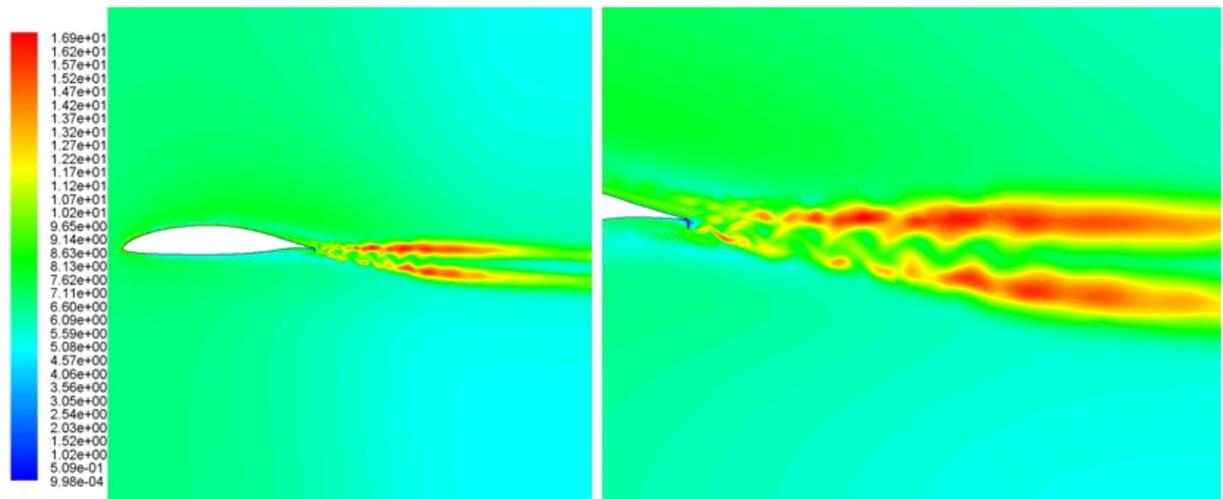


Figura 14: Contornos de Intensidad de Turbulencia (%)

En la Figura 14 se puede observar que los valores máximos de intensidad de turbulencia corresponden a capas de corte entre los cuales los vórtices se desplazan y desarrollan, introduciendo allí el máximo valor de fluctuaciones de velocidad.

En nuestra simulación numérica se puede observar (Figura 13 y Figura 14) el desprendimiento de vórtices de escala espacial similar al Gurney flap, que se van desarrollando corriente abajo. Debido al posicionamiento de nuestros sensores, las medidas interesantes de análisis serán aquellas comprendidas entre la posición “h0” y “h7”(a media altura del Gurney), tanto a una distancia H como a 2H.

Los vórtices se desarrollan en el borde de fuga y se desprenden con una frecuencia característica, desplazándose luego corriente abajo. Una sonda anemométrica ubicada en estas regiones estará frecuentemente embestida e inmersa en estos vórtices, pudiendo extraer información de los mismos.

6.2 Análisis espectral de las mediciones experimentales

El análisis de las mediciones muestra que en las regiones de la estela cercana detrás del miniflap, en donde comienzan su desarrollo los vórtices, se aprecia un importante pico en el espectro de las velocidades fluctuantes indicando claramente la presencia de la inestabilidad absoluta y la calle de vórtices ilustrada en la Figura 13 y Figura 14.

Los espectros de las velocidades instantáneas adquiridas fueron calculados con la función “spectrum” de Matlab. En los gráficos la frecuencia fue normalizada como

$$St = \frac{f \cdot c}{U} \quad (6)$$

donde c es la cuerda del perfil (se toma en lugar de la correspondiente al Gurney, Delnero et al., 2007) y U la velocidad de la corriente libre, para poder comparar los resultados experimentales y numéricos en los que estos valores son distintos.

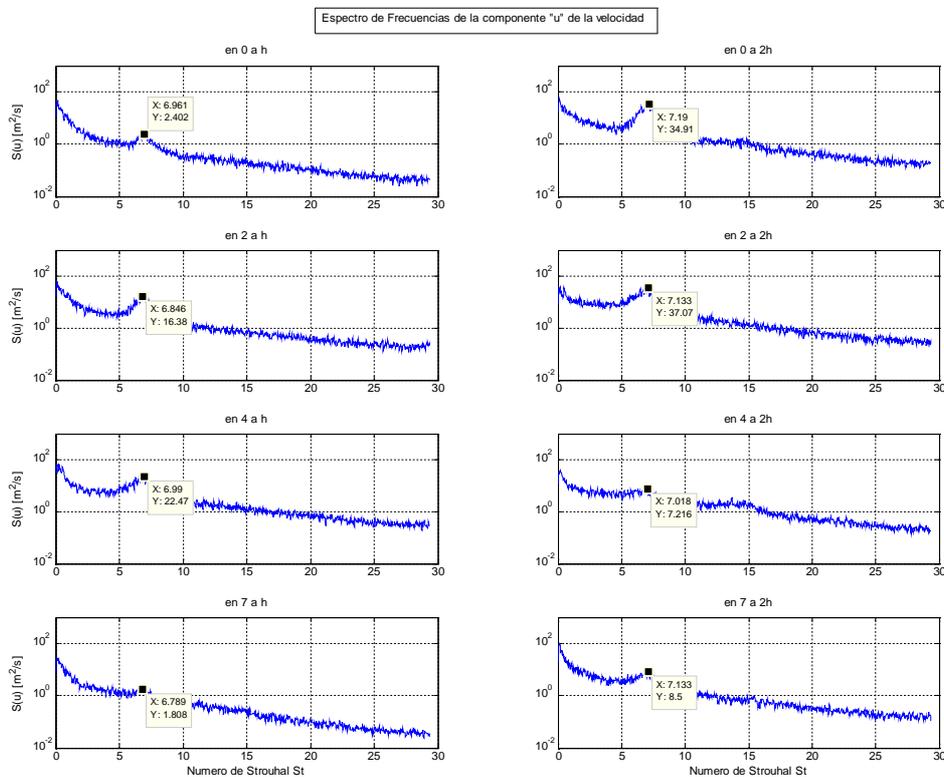


Figura 15: Distribución del espectro de densidad de potencia de la componente “u” de la velocidad experimental en los puntos 0, 2, 4 y 7 de la estela a H y 2H corriente abajo.

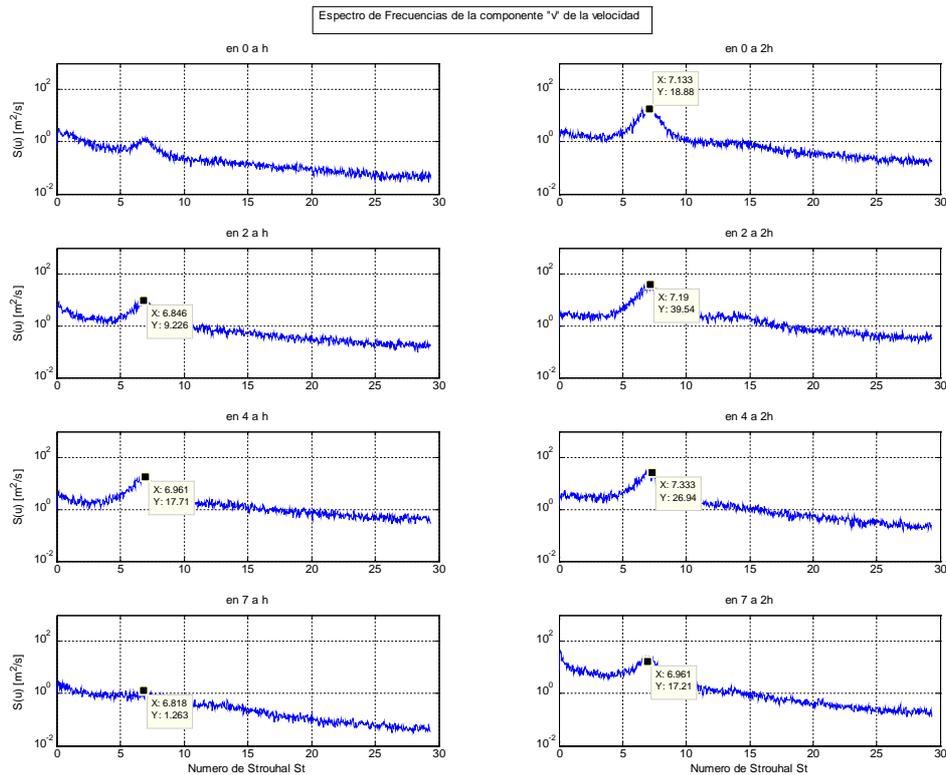


Figura 16: Distribución del espectro de densidad de potencia de la componente "v" de la velocidad experimental en los puntos 0, 2, 4 y 7 de la estela a H y 2H corriente abajo.

Las Figura 15 y Figura 16 muestran los espectros normalizados de las componentes u y v respectivamente en el análisis experimental.

Para el estudio numérico se conservó el nro. de Reynolds con una velocidad y una cuerda distintas, lo que hizo que las frecuencias de desprendimiento fueran otras. Por ello se normalizaron las frecuencias con las cuerdas y velocidades correspondientes.

Las Figura 17 y Figura 18 muestran los espectros normalizados de las componentes u y v respectivamente en distintos puntos en el análisis numérico.

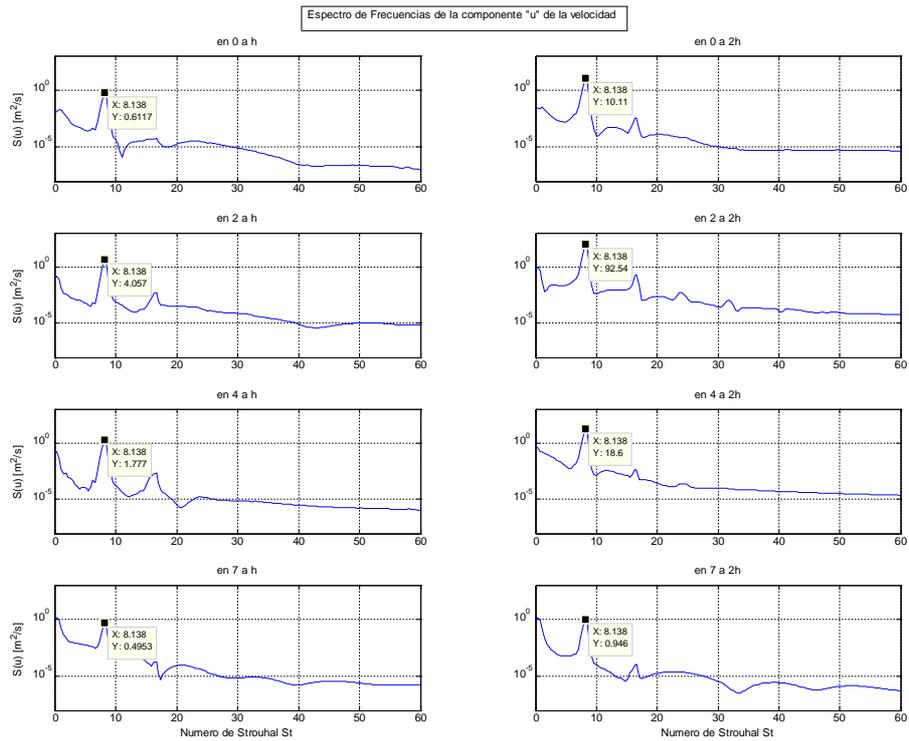


Figura 17: Distribución del espectro de densidad de potencia de la componente “u” de la velocidad numérica en los puntos 0, 2, 4 y 7 de la estela a H y 2H corriente abajo.

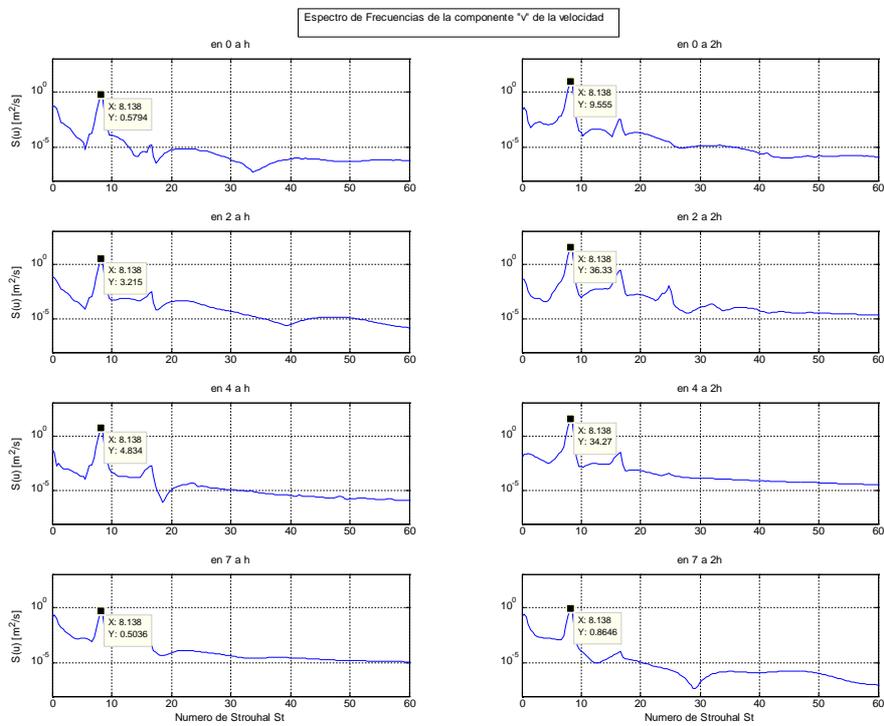


Figura 18: Distribución del espectro de densidad de potencia de la componente “v” de la velocidad numérica en los puntos 0, 2, 4 y 7 de la estela a H y 2H corriente abajo.

Las frecuencias detectadas de los desprendimientos son de 220 Hz para las mediciones experimentales y de 55 Hz para las numéricas. Si se normaliza con la velocidad de la corriente libre y la cuerda del perfil se encuentra el nro. de Strouhal característico de los vórtices, que dio resultados similares tanto en el análisis experimental como en el numérico (aproximadamente 7 en el experimental y 8 en el numérico)

La altura de un pico espectral medida en un punto fijo reflejará la intensidad de las fluctuaciones de velocidad causadas por los vórtices pasantes, y también el período en que las capas de corte, que se van enrollando, permanecen cerca del punto de medición antes de alejarse corriente abajo.

6.3 Análisis por wavelets de las mediciones experimentales

Los registros velocidad-tiempo fueron explorados a fin de detectar indicios relacionados con la segunda derivada de una Gaussiana g_2 ("Mexican Hat"). Asumiendo una hipótesis de "flujo congelado" es posible deducir la escala turbulenta espacial para una componente de velocidad instantánea buscando su máximo en el mapa de wavelets. Esta wavelet tiene la característica de identificar con buena precisión máximos locales en diferentes escalas.

Nuestro análisis por Wavelets se concentrará en aquellos puntos para los que el análisis espectral marca "notoriamente" picos de desprendimiento (puntos 2 y 4 tanto a una distancia H como a $2H$).

Para el análisis por Wavelets emplearemos la función CWT de Matlab con la wavelet "Mexican Hat" ("mexh"), con las siguientes escalas:

$$a = \text{escalas} = 2^x, \quad x = 1 : .5 : 8 \quad (7)$$

La relación entre la escala wavelet y la escala real temporal es:

$$a = dt \cdot t_{real} \quad (8)$$

donde "a" representa a la escala de la Wavelet, dt es el tiempo de muestro ($dt=1/f_{muestreo}$) y t_{real} es la escala temporal de la wavelet.

Para obtener una aproximación a la escala real espacial (siempre considerando la hipótesis de "flujo congelado") basta con multiplicar esta última por la velocidad local del fluido:

$$t_{real} = V_{local} \cdot L \quad [seg] \quad [m \neq seg] \quad [m] \quad (9)$$

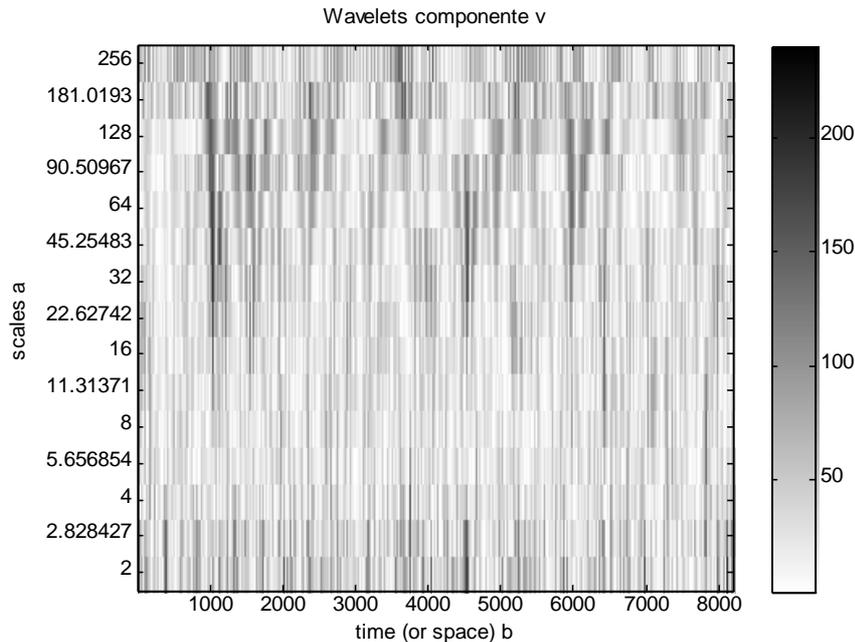


Figura 19: Mapa de wavelets para la componente vertical de la velocidad, a una distancia h del borde de fuga del perfil.

El análisis por wavelets de los datos experimentales muestra claramente los máximos de energía asociados a dos escalas temporales predominantes: una, de 0.0325 segundos ($a=64$), correspondiente a fluctuaciones de velocidad producidas por el perfil completo, y otra, de escala temporal correspondiente a la frecuencia de desprendimientos vorticosos del Gurney flap (escalas 2-2.8), que reproduce correctamente el pico de frecuencia detectada en el espectro, correspondiente a un nro. de Strouhal de 6.96.

La frecuencia de adquisición de datos, de 2000 Hz, si bien permite la identificación correcta de la frecuencia de desprendimientos de vórtices, con alrededor de 8 mediciones por ciclo, resulta inadecuada para la identificación de un vórtice desprendido, ya que la fluctuación de energía asociada a su escala espacial es de menos de 0.002 s. La escala asociada que detectaría el valor absoluto graficado de la transformada wavelet no es el período $T = 1/f_d$, sino la mitad, debido a que la CWT es máxima en una fluctuación, y un periodo tiene dos fluctuaciones; por ende para $T=0.004$ tenemos $T_{\text{desp}}=T/2=0.002$ seg, lo que hace que sólo dos o tres valores instantáneos de la medición capturen la estructura y su identificación en el mapa de wavelets no sea fácil. Por esa razón, se realiza un análisis complementario en la simulación numérica, con una frecuencia de adquisición de 5000 Hz.

A continuación se analizan los valores de velocidad instantánea adquiridos en un punto de la simulación numérica equivalente al punto 4 a una distancia H de las mediciones experimentales.

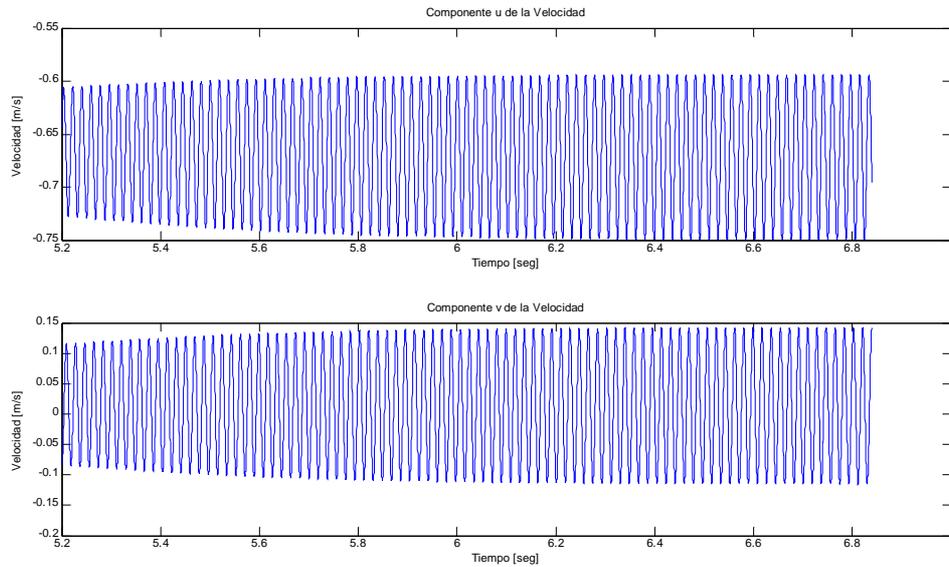


Figura 20: Valores de velocidad instantánea adquiridos en el punto 4 a una distancia H del borde de fuga.

La Figura 20 muestra las fluctuaciones en el tiempo de la velocidad longitudinal y la vertical en ese punto de la estela. Se puede apreciar que al resolver ecuaciones tipo RANS ($k-\omega$ Shear Stress Transport), la solución presenta muchas menos fluctuaciones aleatorias de velocidad y el espectro es más “limpio” (Figura 17 y Figura 18).

El mapa de wavelets correspondiente a la componente transversal “v” de la velocidad es el mostrado en la Figura 21:

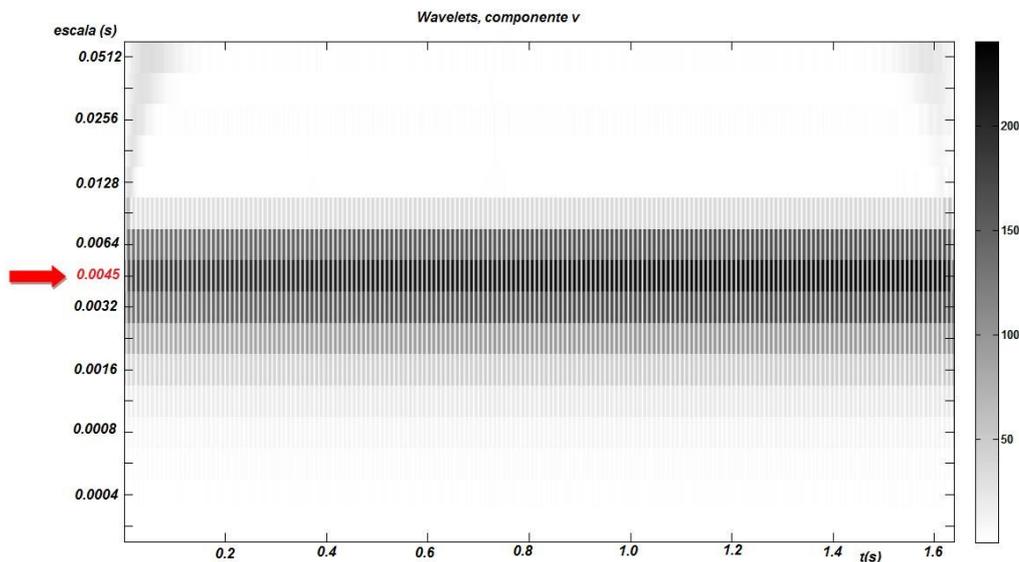


Figura 21: Mapa de Wavelets de la componente “v” de la velocidad en el punto 4 a una distancia H.

Si se amplifica un sector de esta figura para tener más resolución y además se grafica solamente la fila de la matriz de coeficientes correspondiente a la escala de mayor intensidad, se observa lo siguiente:

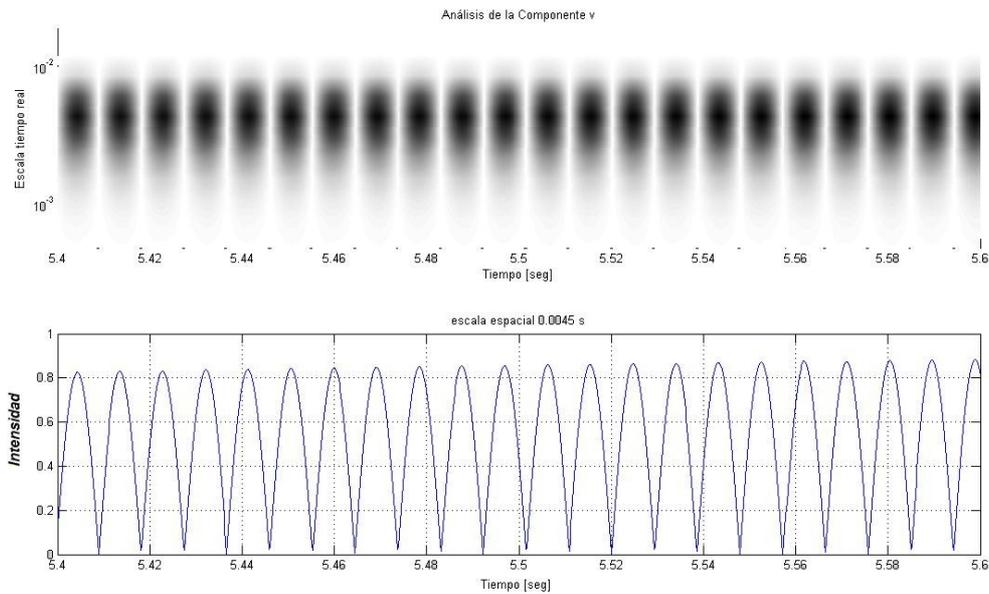


Figura 22: Mapa de Wavelets para una fracción de tiempo de 0.2 seg. y gráfica del coeficiente de escala de mayor intensidad.

Los máximos de intensidad de la transformada en esa escala aparecen con una frecuencia de 22 picos en 0.2 segundos, o 110 Hz. En realidad, considerando que se está graficando el módulo de la transformada, y que las fluctuaciones de velocidad transversal correspondientes a vórtices desprendidos son de signo alternado (un máximo de $\text{abs}(\text{cwt})$ corresponde a una fluctuación positiva y el siguiente a una negativa), la conclusión es que la frecuencia de los máximos de cwt en la escala temporal de 0.0045 s es de aproximadamente 55 Hz, la misma

que aparece dominante en el espectro (Figura 18, con $f = \frac{St}{c} \frac{U}{1} = \frac{8.138}{1} \frac{6.6}{1} = 53.7 \text{ Hz}$ en 4 a H).

Pero debe destacarse que la escala temporal asociada a estos máximos de intensidad de la transformada wavelet de la señal no es $1/110 \text{ Hz}$ (0.0091 s), ni tampoco $1/55 \text{ Hz}$ (0.0182 s), como ocurriría en el caso de una señal senoidal, sino que la escala de los máximos, 0.0045 s, es aproximadamente la cuarta parte del periodo asociado a un ciclo completo. Es decir, la transformada wavelet permitió detectar la escala temporal real de las fluctuaciones intensas de energía asociadas al pasaje de un remolino, de manera independiente a la escala temporal asociada a la frecuencia del desprendimiento periódico de estos.

7 CONCLUSIONES

Para diferenciar los aportes de la transformada wavelet por sobre el análisis de Fourier podemos mencionar:

1. Hay que dejar en claro que Wavelet no ha aparecido como la herramienta que desplaza a la Transformada de Fourier (TF), sino más bien como una herramienta que puede complementarse con la TF, o ser una correcta o no correcta elección dependiendo del tipo de señal a analizar o de la aplicación en la cual se desee utilizar.
2. Las bases de Wavelet, al ser muchas y muy distintas, se adaptan muy bien a diversas aplicaciones y tipos de señal, dando incluso la posibilidad de crear una nueva base para una aplicación específica o para un determinado tipo de señal.
3. En el análisis de señales no estacionarias la transformada de Fourier no es óptima ya que aunque entrega una información completa del contenido espectral de la señal, no es capaz de localizar en el tiempo las componentes de frecuencia.

4. Otra ventaja de la transformada wavelet continua por sobre el espectro de frecuencias radica en que la escala y la frecuencia no siempre están relacionadas como recíprocas una de otra, como lo estarían en una señal senoidal.

Del análisis del problema en estudio, se deduce que la escala temporal de los vórtices desprendidos del flap Gurney es aproximadamente un cuarto del periodo entre desprendimientos sucesivos. Si consideramos que en la estela del perfil la velocidad media es mucho menor que en el flujo libre (Ver Figura 12) obtenemos el resultado razonable de que la escala espacial es del mismo orden que la cuerda del miniflap Gurney.

Si bien el análisis de Fourier permite la correcta detección de la frecuencia de desprendimientos, no alcanza para determinar la escala ni duración de las estructuras organizadas (vórtices) que se desprenden, lo que sí logra la transformada wavelet continua. Esta permite la localización temporal de los vórtices y determinar correctamente su escala y nivel de energía, además de la frecuencia característica del desprendimiento periódico. En el análisis experimental la cwt permite además identificar fluctuaciones energéticas en una escala correspondiente a la cuerda del perfil aerodinámico, que se pierden en el análisis espectral clásico, dominado por la frecuencia característica de los desprendimientos.

Por otra parte, los números de Strouhal característicos del gurney flap en la simulación numérica y las mediciones experimentales muestran buena concordancia, validando la calidad de la simulación numérica realizada.

REFERENCIAS

Daubechies I. . Orthonormal bases of compactly supported wavelets, *Comm. Pure Appl. Math.*, 41 (1988), pp. 909-996.

Daubechies I.,: *Ten Lectures on Wavelets*, Society for Industrial and Applied Mathematics (1992)

Delnero J.S., Marañón Di Leo J., Boldes U., Colman J., Bacchi F., Martinez M.A.M., Wassen E., Guenther B. and Thiele F., Numerical and Experimental Investigation of Mini-Flap Positions on an Airfoil., *45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. 8 - 11 January 2007, Reno, Nevada.

Farge, M., Wavelet transforms and their applications to Turbulence. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 24: 395-457, 1992.

Farge, M. Schneider K., Pellegrino G., Wray A., Rogallo, R. : “Coherent vortex extraction in three-dimensional homogeneous turbulence: Comparison between CVS-wavelet and POD-Fourier decompositions”, *Physics of Fluids*, Vol. 15, 10, Oct. 2003

Gilliam, X., J. Duniak and A. L. Doggett, 2000: Detecting Localized Periods of Concentrated Turbulence Using Wavelets. *Proc. 14th Symp. on Boundary Layers and Turbulence*. Aspen, CO. pp.171-174.

Hinze, J. O., *Turbulence*. ed. Mc Graw-Hill, New York, 1975.

Meneveau, C.: 1991: Analysis of turbulence in the orthonormal wavelet representation, *J. Fluid Mech* 232, pp. 469-520.

Sikiö, Päiv, *Wavelet Analysis in Turbulence*. Thesis for the Degree of Master of Science, Lappeenranta University of Technology, Finlandia, 2004

Teenekes H., Lumley J. L., *A First Course in Turbulence*. The MIT Press, 1972.