

Dinámica de vórtices de gran escala

R. H. Hernández* & L. Bellon

LEAF-NL, Departamento de Ingeniería Mecánica
Universidad de Chile, Casilla 2777, Santiago, Chile

Resumen

Presentamos resultados experimentales referentes a la dinámica de vórtices de gran escala en régimen turbulento, creados por un cuerpo cilíndrico enfrentando un flujo uniforme de aire en un túnel de viento. A través de mediciones de presión en la superficie del cuerpo así como del análisis de series de velocidad medidas en la estela cercana a éste, se observa y confirma la emisión periódica y alternada de vórtices sumergidos en un background turbulento cuyas fluctuaciones de velocidad alcanzan el 40 %. Dicho fenómeno es confirmado por secuencias de imágenes del flujo obtenidas a través de filetes de humo iluminados por un plano laser.

Introducción

Las fluctuaciones de presión en flujos turbulentos originadas por la presencia de un cuerpo interactuando con una corriente fluida, pueden ser utilizadas para predecir el campo de fuerzas al que está sujeto el cuerpo [1]. Usualmente, cerca de la pared del cuerpo, las fluctuaciones de presión toman la forma de una integral de volumen, la cual involucra directamente las fluctuaciones de velocidad [9], y ello permite relacionarlas al comportamiento local de la capa límite así como al movimiento coherente de gran escala que ocurre en la estela de dicho cuerpo.

Incluso a altos números de Reynolds, el movimiento a gran escala detrás de un cuerpo cilíndrico, consiste en la emisión alternada de vórtices contra-rotativos, inmersos en un background turbulento [7, 6, 5]. Por este motivo, el campo de presión asociado en regiones cercanas a la superficie del cuerpo, puede estar fuertemente acoplado al movimiento de las grandes escalas (vórtices) de la estela cercana [2]. Una vez que este movimiento se establece en el tiempo, aparecen fuerzas fluctuantes debido al cambio sistemático de la geometría del flujo [4].

Es así, como la presión promedio y sus fluctuaciones dependerán de la coordenada angular en la superficie del cuerpo cilíndrico. El espectro, o densidad espectral de potencia, asociado a las fluctuaciones de presión debe mostrar este acoplamiento a través de un peak a la frecuencia de emisión de estructuras de vorticidad a gran escala [10, 6].

Nuestro interés central es llevar a cabo un estudio experimental de la dinámica de vórtices en un régimen de flujo turbulento. Para ello se concibió un generador de vórtices de geometría cilíndrica. Este dispositivo (cuerpo

sólido) se enfrenta a un flujo uniforme, que es en éste caso, un flujo de aire al interior de la sección de nuestro túnel de viento. Este generador de vórtices, una vez inmerso en el flujo de aire, desarrolla la inestabilidad hidrodinámica de Bénard-von Kármán, que da origen a una distribución espacial periódica de vórtices que son advectados por el flujo turbulento principal. Estos vórtices forman un arreglo periódico cuyas características dependen de la frecuencia de desprendimiento, de la velocidad del flujo y de la razón de aspecto del cuerpo. Si el régimen de flujo es alto, y como consecuencia la estela aguas abajo del generador de vórtices es turbulenta, los vórtices de gran escala creados, al encontrarse inmersos en un background turbulento [8], van perdiendo coherencia temporal. Por ello la estela estará caracterizada por fluctuaciones de presión y velocidad aleatorias y rápidas [3] (a pequeña escala), y lentas pero periódicas (a gran escala).

Montaje experimental

El esquema básico se muestra en la figura 1. Al interior de la sección de ensayo de nuestro túnel de viento, se instala un generador de vórtices cilíndrico, que enfrenta un flujo uniforme, de aire, de velocidad U_0 . Un captor de presión PCB piezotronics (103A02) es ubicado en la superficie del cuerpo formando un ángulo α con respecto al eje del flujo. Una sonda TSI de hilo caliente de 20 μm de diámetro es dispuesta aguas abajo del cuerpo, aproximadamente a dos diámetros de éste, la cual registra el campo de velocidad asociado a la estela turbulenta creada por el cuerpo.

La sonda de velocidad puede realizar recorridos transversales, de manera de registrar la evolución del perfil de velocidad del flujo. El captor de presión reg-

*rohernan@cec.uchile.cl

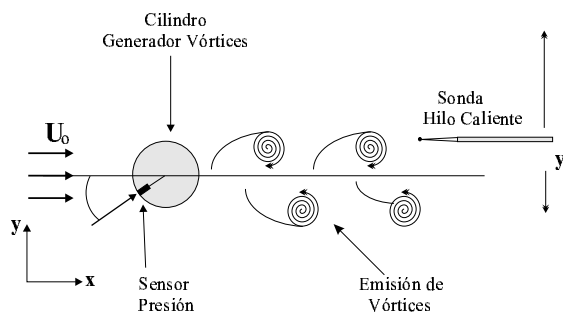


Figure 1: *Montaje experimental. Un cilindro de razón de aspecto $L/d = 5$ (d, L , diámetro y largo respect.) instalado en la sección de ensayo del túnel de viento. Un captor de presión se ubica en la superficie del cilindro formando un ángulo θ . La velocidad en la estela es medida con una sonda hot wire controlada por un anemómetro de hilo caliente.*

istrará las fluctuaciones de presión en la superficie del cuerpo, y dado que el sistema completo es soportado sobre un eje vertical, es posible variar el ángulo θ continuamente, de manera de registrar el perfil de fluctuaciones de presión sobre toda la superficie del cuerpo.

El sistema de adquisición de datos y la estrategia utilizada se muestran en la figura 2. Las señales provenientes del captor de presión, $P(\theta, t)$ y de la sonda de velocidad $U(y, t)$, son filtradas y luego amplificadas con dos pre-amplificadores SR 560. Luego son ingresadas al panel de recepción de señales (16 Canales) para luego pasar a la tarjeta de adquisición A/D y al PC. Paralelamente, la velocidad del flujo en el túnel de viento es ajustada via una interfaz IEEE488.2 conectada a la fuente de alimentación. Podemos así monitorear (si es necesario) la potencia instantánea entregada al flujo $W = Vi$, donde V, i corresponden al voltaje y corriente aplicados respectivamente. Usando una estrategia sincronizada, ambas señales de presión y velocidad pueden ser adquiridas simultáneamente, permitiendo así la posibilidad de detección sincronizada de eventos de velocidad y presión.

La adquisición de imágenes asociadas al tránsito de estructuras vorticiales aguas abajo del generador de vórtices es apreciada en la figura 3. El sistema consiste en una cámara ccd orientada en forma perpendicular al flujo medio. Un plano de luz laser creado por un laser emitiendo en 532 nm (verde) y un juego de lentes ópticos. Eventualmente la detección (Trigger) de imágenes puede acoplarse a un chopper, de manera de efectuar una detección sincronizada.

Resultados

A continuación presentamos algunos resultados correspondientes a la medición de las propiedades básicas de

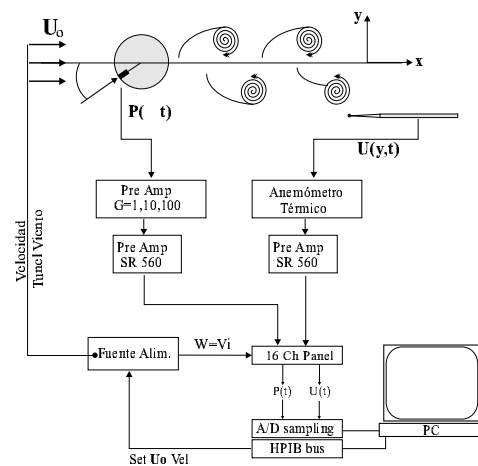


Figure 2: *Esquema del montaje experimental usado para la adquisición de señales de presión y velocidad*

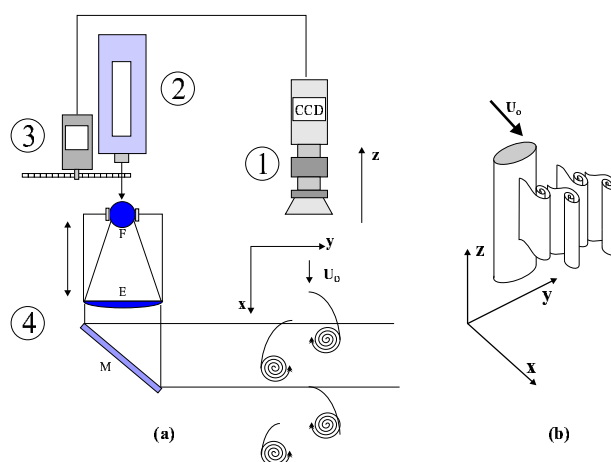


Figure 3: (a) *Esquema de visualización de vórtices: 1) cámara ccd, 2) Laser, 3) Chopper, 4) Lentes para plano laser.* (b) *Esquema de dichas estructuras emitidas por el generador de vórtices.*

la inestabilidad de la estela turbulenta para un rango moderado de números de Reynolds, $Re = U_0 d / \nu$, donde U_0, d, ν corresponden a la velocidad media del flujo, el diámetro del cilindro y la viscosidad cinemática del aire, respectivamente. Si consideramos que la inestabilidad de Bénard von Kármán ocurre para un valor del número de Reynolds cercano a $Re \sim 47$, estos experimentos fueron realizados a un nivel de flujo alrededor de 40 veces superior. El flujo es completamente turbulento, es decir que las fluctuaciones de velocidad alcanzan valores superiores al 10 %.

La figura 4 muestra los perfiles de velocidad promedio en la estela turbulenta del generador de vórtices. Para tres valores del número de Reynolds, éstos presentan una simetría evidente con respecto a la coordenada transver-

sal y . Un aumento de la velocidad es detectado en los extremos de la estela, allí donde el flujo de aire no es obstruido por el generador de vórtices, así como una disminución abrupta en la región central frente al generador. Estos perfiles promedio fueron normalizados con la velocidad del flujo uniforme U_0 , y con ello podemos observar el grado de similitud que se obtiene entre ellos. Es así como vemos que el flujo turbulento creado a diferentes valores de Reynolds es, en promedio, similar. La dispersión observada, debida al alto grado de turbulencia, se puede mejorar (disminuir) si los promedios de velocidad fuesen calculados sobre series de tiempo suficientemente largas (30 minutos). Ello lleva consigo tiempos de adquisición de 30 horas para cada perfil de velocidad.

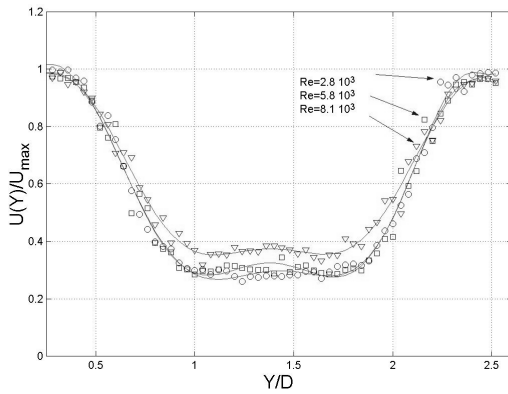


Figure 4: Perfiles de velocidad promedio sobre la estela turbulenta del generador de vórtices a diferentes números de Reynolds. La sonda de velocidad se ubicó en $x/d = 1.85$, $\delta y/d = 3.2$.

La figura 5 nos muestra la evolución de los perfiles de fluctuaciones de velocidad en la estela turbulenta creada por el generador de vórtices para tres valores del número de Reynolds. Se aprecia dos peaks ubicados simétricamente con respecto al eje central del flujo. Ellos se explican por el tránsito periódico de estructuras vorticiales emitidas por el cuerpo y que son advectadas por el flujo turbulento promedio. Las fluctuaciones pueden alcanzar valores superiores al 40 % en función del valor del número de Reynolds. La forma de dichos perfiles es similar a la encontrada en experimentos en régimen de flujo laminar, sin embargo para ese caso el nivel de fluctuaciones es bastante inferior al nuestro ($< 1\%$).

Es interesante notar que dichos peaks están distanciados alrededor de una escala de distancias coincidente con un diámetro del cilindro generador de vórtices, lo cual ha sido mencionado en la literatura especializada [1].

Si dichos peaks corresponden a la emisión periódica de estructuras de vorticidad de gran escala y por lo tanto

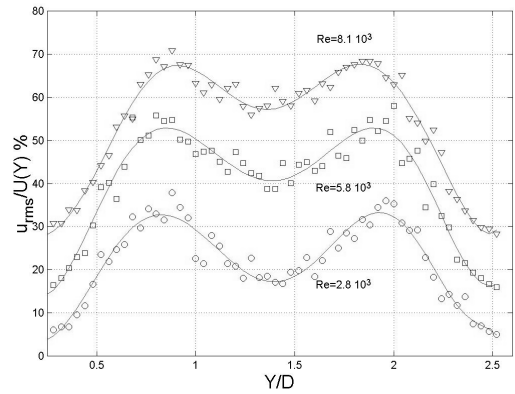


Figure 5: Perfiles de fluctuaciones de velocidad sobre la estela turbulenta del generador de vórtices. La sonda de velocidad se ubicó en $x/d = 1.85$, $\delta y/d = 3.2$. Han sido despalzados en 20 unidades arbitrarias con respecto al mas bajo para poder diferenciarlos.

lentas, el cálculo de la densidad espectral de potencia debiera indicar un peak a la frecuencia de emisión de éstas. Esto se confirma en la figura 6, donde se muestra el espectro de una serie de velocidad de 30 minutos de duración. La posición de la sonda de velocidad fue $y/d = 0.6$ coincidiendo con la región del flujo donde las fluctuaciones de velocidad son máximas. Se aprecia claramente un peak a la frecuencia de $f \sim 8$ Hz, es decir muy lento, y corresponde a la frecuencia de Strouhal del flujo, o frecuencia de emisión de vórtices. Dicho peak, para el caso de las series de presión, es perceptible sólo a números de Reynolds importantes, debido simplemente a la sensibilidad limitada del sensor de presión.

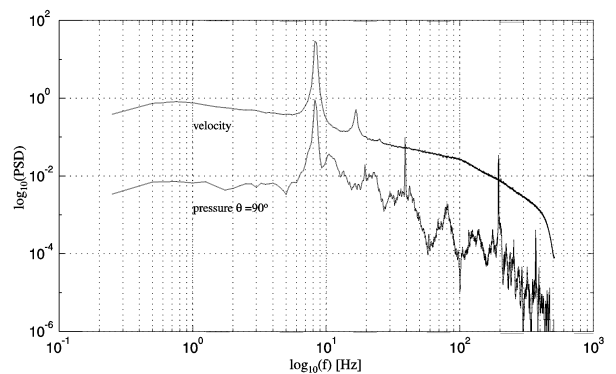


Figure 6: Densidad espectral de potencia para velocidad y presión con $Re \sim 2 \times 10^4$. La sonda de velocidad está ubicada en $x/d = 1.85$, $y/d = 0.6$. El captor de presión se ubica en $\theta = 90^\circ$.

El montaje experimental usado para visualización de

la estela creada por el generador de vórtices, escala 1/5, es el que se discutió en la figura 2. La diferencia fundamental radica en que el lente generador de la napa laser, está ubicado justo a la salida del haz laser, de manera de obtener una napa más amplia y cubrir completamente la región trasera del generador de vórtices.

Un espejo de grandes dimensiones (30x30 cm) es dispuesto en un ángulo de 45 grados, al interior de la sección de ensayos del túnel. Al ubicarse aguas abajo del cilindro, no interfiere mayormente con la dinámica próxima al éste.

Las imágenes fueron creadas por scattering de luz laser verde (532 nm) con partículas de humo, inyectadas por un sistema de generación de filetes de humo, construido en nuestro Laboratorio.

Los filetes de humo, advectados por los vórtices dejan ver zonas brillantes, que indican la forma de éstos, su estructura y si se filma durante largo tiempo, su dinámica interna.

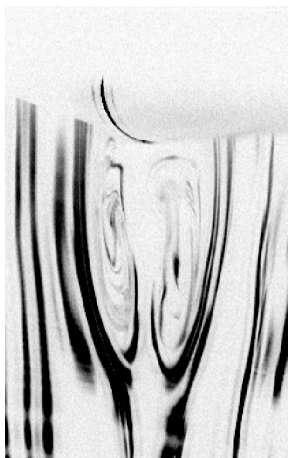


Figure 7: *Imagen que muestra parte del cilindro (borde superior) y dos vórtices de circulación de signo opuesto en fase simétrica. El sentido del flujo es desde arriba hacia abajo. El valor de Reynolds es $Re \sim 300$*

La dinámica de vórtices de gran escala a Reynolds moderado, muestra que existe una region de circulación fluida cercana al cilindro. Si el número de Reynolds es inferior al valor crítico, estos vórtices se comportan de manera estacionaria, es decir, su geometría no cambia, y sus centros de rotación tampoco. Sobre la figura 7 apreciamos dos vórtices de circulación opuesta, pegados al borde de fuga (trasero) del generador de vórtices. Si bien el número de Reynolds es moderado, la dinámica no es estacionaria, ya que en este caso el Reynolds es largamente superior al valor crítico. Se aprecian dos vórtices en fase simétrica.

A Reynolds superior al valor crítico en regimen turbulento, la dinámica de vórtices no es estacionaria. En la figura 8 apreciamos fases opuestas de la dinámica de dos

vórtices (near wake). Ambas imágenes se seleccionaron para demostrar que si la dinámica presenta un frecuencia definida (temporal) es posible realizar una detección sincronizada y así efectuar un promedio coherente. Así, si vemos que luego de transcurridos $40\Delta t$ (con $\Delta t = 1/60$ s) tenemos oposición de fases, es posible obtener imágenes en fase, desplazándonos la mitad del período temporal, es decir, $40\Delta t + 20\Delta t$.

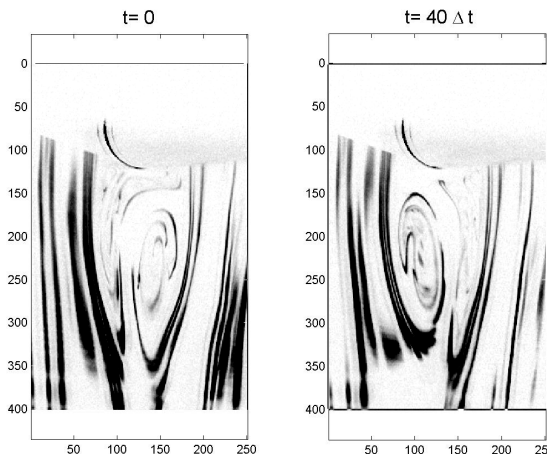


Figure 8: *Imagen que muestra parte del cilindro (borde superior) y dos vórtices de circulación de signo opuesto en fase asimétrica (oposición de fase). El sentido del flujo es desde arriba hacia abajo. El valor de Reynolds moderado pero supercrítico $Re \sim 300$*

Al calcular el coeficiente de correlación bidimensional entre imágenes sucesivas, es posible determinar a priori, el grado de semejanza entre dos fases de la dinámica de vórtices. En la figura 9 se muestra la evolución temporal del coeficiente de correlación 2D. Las imágenes correspondientes a la figura 8 están indicadas con una flecha. Efectivamente, existe oposición de imágenes (fase) cuando seleccionamos mínimos y máximos de dicho coeficiente. Esto demuestra que nuestra técnica de visualización es más que un simple display de imágenes. Podemos detectar la posible periodicidad de la dinámica a gran escala turbulenta y así efectuar un promedio coherente.

Otro aspecto importante es lo relativo a las fluctuaciones de intensidad luminosa, asociada a un regimen de flujo completamente turbulento. En dicho caso, la correlación cruzada a intervalos de tiempo pequeños, nos permite retirar el campo de intensidad luminosa promedio, asociado a las grandes estructuras de vorticidad, y quedarnos exclusivamente con la estructura fluctuante, que constituye la riqueza de un flujo turbulento.

Si la serie de imágenes hubiese sido registrada sobre tiempos más largos, entonces el coeficiente de correlación 2D tendría un aspecto sinusoidal, aclarando la noción de periodicidad temporal. En todas las imágenes se usó un

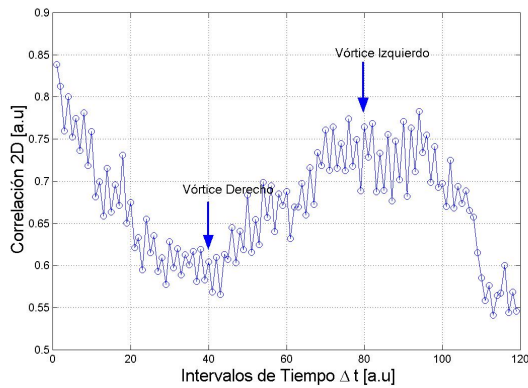


Figure 9: Evolución del coeficiente de correlación bidimensional (2D) entre imágenes sucesivas. Se aprecia los instantes en que fueron seleccionadas las imágenes de la figura 8, entre un mínimo y un máximo relativo de la correlación espacial.

intervalo de tiempo de 1/60 s, que es lo mínimo que permite nuestra cámara *ccd*. Sin embargo, es posible introducir una señal externa (trigger) sobre los tiempos de integración del *ccd* y así alcanzar intervalos de 1/10000 s, con lo cual flujos turbulentos de hasta 5 kHz pueden ser prácticamente congelados en una imagen 2D.

conclusión

Los experimentos sobre la dinámica de estructuras de vorticidad de gran escala realizados sobre la base de un flujo turbulento moderado, nos indican que el comportamiento tanto espacial como temporal del flujo engendrado es concordante con lo esperado. Se identifican dos escalas, tanto espaciales como temporales, asociadas a eventos lentos y rápidos creados por la interacción entre nuestro generador de vórtices y un flujo uniforme de aire al interior de un túnel de viento. La obtención de series de presión y velocidad sincronas es factible. El nivel de turbulencia encontrado en la estela del flujo es superior al 40 %, con lo cual los resultados obtenidos en régimen moderado pueden ser aplicados en régimen turbulento bien desarrollado a números de Reynolds superiores.

Agradecimientos

A los proyectos Fundación Andes C-13600/4, Fondecyt N° 1990571 y Fondecyt N° 3010067.

References

[1] A.Roshko, "On the development of turbulent wakes from vortex streets", NACA Report 1191 (1954).

[2] Taneda S., "Visual observations of the flow past a circular cylinder performing a rotatory oscillation", Journal of the Physical Society of Japan, **45** (3), pp. 1038 (1978).

[3] Snarski S.R. and Lueptow R.M., "Wall pressure and coherent structures in a turbulent boundary layer on a cylinder in axial flow", J.Fluid Mech., **286**, pp.137, 1995.

[4] Richter A. and Naudascher E., "Fluctuating forces on a rigid circular cylinder in confined flow", J.Fluid Mech., **78**, pp.561, 1976.

[5] Ayoub A. and Karamcheti K., "An experiment on the flow past a finite circular cylinder at high subcritical and supercritical Reynolds numbers", J.Fluid Mech., **118**, pp.1, 1982.

[6] Gerrard J.H., "An experimental investigation of the oscillating lift and drag of a circular cylinder shedding turbulent vortices", J.Fluid Mech., **11**, pp.244, 1961.

[7] Bearman P.W., "On vortex shedding from a circular cylinder in the critical Reynolds number régime", J.Fluid Mech., **37**, pp.577, 1969.

[8] Batham J.P., "Pressure distributions on circular cylinders at critical Reynolds numbers", J.Fluid Mech., **57**, pp.209, 1973.

[9] Panton R.L., Goldman A.L., Lowery R.L. and Reichman M.M., "Low-frequency pressure fluctuations in axisymmetric turbulent boundary layers", J.Fluid Mech., **97**, pp.299, 1980.

[10] Abry P., Fauve S., Flandrin P. and Laroche C., "Analysis of pressure fluctuations in swirling turbulent flows", Journal de Physique 2, **4** No5, pp.725, 1994.