

Estudio experimental del acoplamiento aeroacústico en un ventilador de característica inestable

Sandra Velarde Suárez, Rafael Ballesteros Tajadura, Carlos Santolaria Morros, Jorge Luis Parrondo Gayo
Universidad de Oviedo. Área de mecánica de fluídos
Campus de Viesques. 33271 Gijón. Asturias

Abstract

In this work, an aeroacoustic study on a forward-curved radial bladed fan has been carried out. Fan performance curves were obtained, showing its unstable behaviour over a wide operating range. Also, the fan sound power level spectra for several working conditions were determined. Following this, the velocity and pressure fields at an outlet plane of the impeller were measured. Finally, the aeroacoustic behaviour of the fan has been characterized by obtaining the vorticity field at the impeller outlet, which is known to be related to the tonal noise generation. Also a numerical study of the flow field at the fan has been made using a CFD code in order to complete this aeroacoustic study.

Introducción

En los ventiladores centrífugos con álabes curvados hacia delante, se presentan fenómenos de inestabilidad importantes que limitan su rango de operación, aunque por otra parte presentan la ventaja de un tamaño y coste inferiores a otras alternativas. Una característica fundamental de estos rodets es el deficiente guiado de la corriente relativa, como consecuencia de la corta extensión radial de los álabes y de su gran curvatura, lo cual se compensa por el elevado número de los mismos. Este guiado deficiente provoca el desprendimiento de la corriente, incluso en condiciones de flujo óptimas. Pueden aparecer entonces algunos fenómenos de inestabilidad como recirculación, prerrotación, desprendimiento rotativo, etc., que a pesar de haber sido objeto de abundantes estudios aún no están explicados en su totalidad.

La mayor parte de los progresos sobre generación aerodinámica de ruido por álabes giratorios están basados en la analogía acústica desarrollada por Lighthill (1952). Presenta también un notable interés, y va a utilizarse en este trabajo, la teoría del ruido de vórtice de Powell (1964), que expresa la generación acústica en función de los campos de vorticidad y velocidad. En la solución de la ecuación de onda obtenida por Ffowcs Williams y Hawkins (1969) aparecen distintos términos que pueden identificarse con los diferentes mecanismos aeroacústicos de generación presentes en el movimiento de superficies rígidas: ruido cuadrupolar, relacionado con las tensiones cortantes turbulentas, ruido dipolar, debido a las fuerzas estacionarias y no

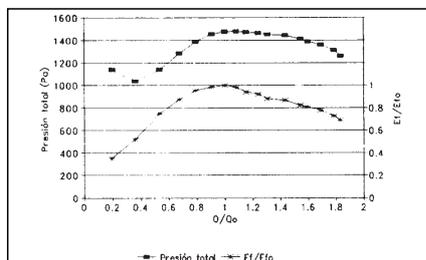


Figura 1. Curvas de presión y rendimiento

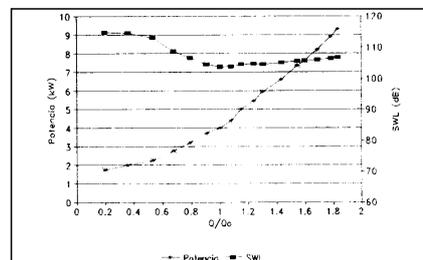


Figura 2. Curvas de potencia y SWL

estacionarias ejercidas por las superficies sobre el flujo y ruido monopolar o de espesor, generado por los efectos de desplazamiento de volumen de las superficies móviles. Aunque las radiaciones monopolar y cuadrupolar pueden tener importancia en algunos casos, la principal fuente de generación de ruido en ventiladores son las fuerzas sobre los álabes, directrices y carcasa, generadas por su interacción con el flujo turbulento. Las fuerzas sobre los álabes pueden ser de naturaleza periódica o aleatoria, y por tanto el campo sonoro resultante tendrá componentes discretas y en banda ancha (Neise, 1992).

En este trabajo se presenta un estudio experimental del flujo en un ventilador centrífugo de característica inestable, relacionando a continuación los fenómenos aerodinámicos con la generación de ruido a través de la teoría de ruido de vórtice de Powell (1964).

Caracterización funcional del ventilador

Los ensayos se han realizado sobre un ventilador centrífugo de simple aspiración. El rodete tiene un diámetro de entrada de 300 mm y de salida de 400 mm, y consta de 38 álabes curvados hacia delante. El ventilador está acoplado directamente a un motor de 9.2 kW, accionado a 1460 rpm.

Se ha diseñado un banco de ensayos siguiendo las normas BS 848: Part 1: 1980. Methods of testing performance y BS 848: Part 2: 1985. Methods of noise testing. De esta forma puede utilizarse la misma instalación tanto para los ensayos de prestaciones como para los acústicos. Las curvas de presión total, potencia y rendimiento en función del caudal se han obtenido según las indicaciones de la norma.

En las figuras 1 y 2 se recogen las curvas características del ventilador. En la curva correspondiente a la presión total puede observarse una amplia zona de pendiente positiva, en la que puede producirse inestabilidad. El punto de diseño, correspondiente al rendimiento máximo, coincide con el comienzo de la pendiente negativa. Esta circunstancia revela un mal diseño del ventilador, que funcionará habitualmente en condiciones desfavorables. La curva correspondiente a la potencia eléctrica consumida por el ventilador presenta un crecimiento aproximadamente exponencial con el caudal, pudiendo producirse daños por sobrecarga en el motor eléctrico en caso de funcionamiento a caudales elevados durante largos períodos.

El nivel de presión sonora se midió con un sonómetro modular de precisión de tipo I. El micrófono utilizado es de 1/2", acoplado a un cono de protección antiviento. El sonómetro lleva incorporado un juego de filtros analógicos y un módulo de análisis automático en frecuencia. Para calcular los niveles de potencia sonora del ventilador (SWL) se ha seguido el procedimiento indicado en la norma BS, basado en la medi-

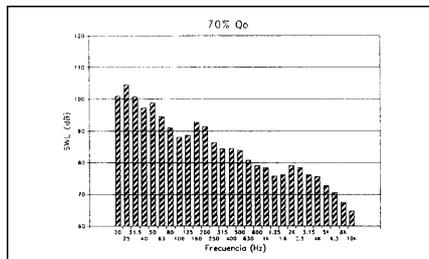


Figura 3. Espectro de SWL. 70% Qo

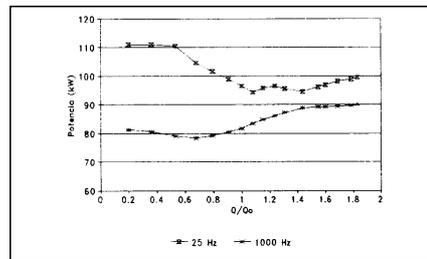


Figura 4. Evolución del SWL con el caudal

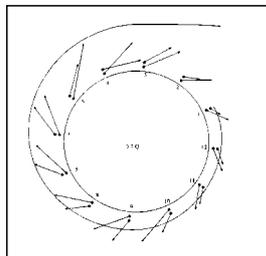


Figura 5. Vectores de velocidad

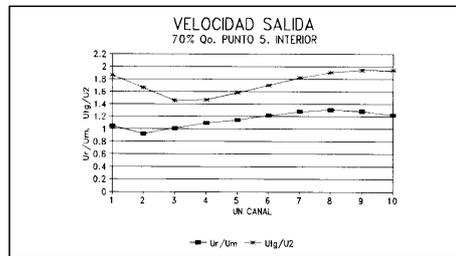


Figura 6. Distribución de velocidad

da de los niveles de presión sonora (SPL).

En la figura 2 se representa la curva del nivel de potencia sonora global (SWL) en función del caudal. En ella se observan niveles muy altos en la zona de caudales bajos (zona de pendiente positiva e inestabilidad). El mínimo en esta curva corresponde al punto de máximo rendimiento, y vuelve a subir, aunque no demasiado, en la zona de caudales elevados.

En la figura 3 se representa un espectro del nivel de potencia sonora, correspondiente al 70% del caudal de diseño. Puede observarse que la frecuencia fundamental es la de giro (24.33 Hz aproximadamente). Otra frecuencia importante es la de paso de los álabes (24.33x38=924Hz), incluida en la banda de 1000 Hz, que en este caso no tiene gran relevancia. En la figura 4 se representa la evolución de estas dos frecuencias fundamentales con el caudal. La frecuencia de giro presenta sus valores más bajos en torno a 1-1.4 veces el caudal de diseño, y aumenta de forma considerable a caudales inferiores. Esta evolución puede estar relacionada con la existencia de prerrotación a carga parcial, y no es extraño que aparezca incluso en caudales superiores al de máximo rendimiento. En cuanto a la frecuencia de paso de álabes, se observa que presenta un mínimo sobre el 70% del caudal de diseño. Por debajo de ese caudal el nivel aumenta algo, pero la tendencia más reseñable es el aumento importante y continuado a medida que aumenta el caudal, a partir del 70% del caudal de diseño. Esta evolución se debe al efecto de estela de los álabes y su choque con el cortaaguas de la voluta, y por ello el nivel es de mayor magnitud a caudales elevados.

Caracterización experimental del flujo

Se ha estudiado el flujo en la voluta del ventilador, a la salida del rodete, mediante la obtención de señales de presión y velocidad en diferentes posiciones y para tres puntos de funcionamiento: el correspondiente al caudal de diseño y dos inferiores, el 40% y 70% del mismo. Para la obtención de las señales de presión se han utilizado como transductores micrófonos de 1/4", adecuados a la amplitud y frecuencia de las oscilaciones a medir. Para la medida de la velocidad se han aplicado técnicas de anemometría térmica; mediante la utilización de una sonda de hilo caliente de dos hilos se han obtenido las dos componentes radial y tangencial del campo de velocidad, considerado bidimensional. En el trabajo de Velarde (1997) puede encontrarse una descripción detallada de la instrumentación empleada, así como su calibración y el procedimiento de medida.

En la figura 5 se representa un esquema del ventilador, con las posiciones en que se han realizado las medidas y sobre ellas los vectores de velocidad obtenidos para el 70% del caudal de diseño, promediados a un solo valor. Las posiciones situadas más próximas a la salida del rodete se denominarán en lo sucesivo *interiores*, y las más alejadas *exteriores*. En la figura 6 se representa la evolución de las señales temporales de velocidad, promediadas en el espacio de un canal entre álabes, en el punto 5 interior y para el 70% del caudal de diseño. Puede observarse claramente en esta representación la estructura núcleo-estela del flujo, en las dos componentes de la velocidad. En la figura 7 se representa el espectro de la componente tangencial de la velocidad correspondiente a ese mismo caso, donde se observa claramente el pico correspondiente a la frecuencia de paso de álabes así como su primer armónico. Sin embargo, la estructura núcleo-estela y el pico correspondiente a la frecuencia de paso de álabes no han podido observarse por igual en todas las posiciones de medida, revelándose una gran asimetría del flujo en la voluta y apareciendo como principal factor distorsionante el corta-aguas.

Estudio de acoplamiento aeroacústico

Una vez estudiado experimentalmente el flujo en la salida del rodete, se relacionarán las características aerodinámicas obtenidas con la generación de ruido, a través de la ecuación de Powell (1964):

$$\frac{\rho_0}{c_0^2} \delta \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = \rho_0 (\omega \Lambda u)$$

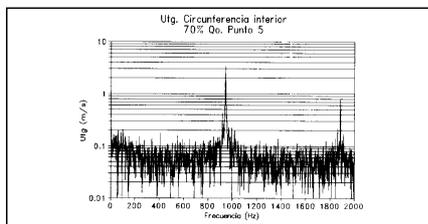


Figura 7. Espectro de velocidad

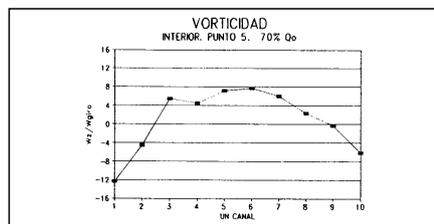


Figura 8. Distribución de vorticidad

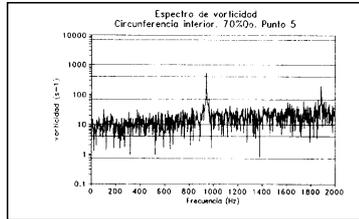


Figura 9. Espectro de vorticidad

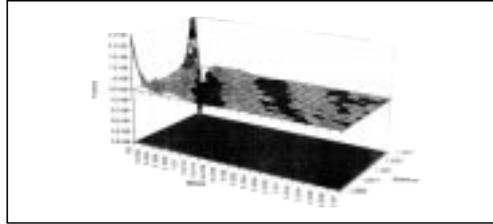


Figura 10. Término fuente

La obtención del término fuente que aparece en la parte derecha de esta ecuación no ha sido posible a partir del estudio experimental, debido a la imposibilidad de realizar una derivación en la dirección radial. Por ello, se ha intentado estudiar el acoplamiento aeroacústico a partir de la obtención de la vorticidad, que tendrá una única componente en este caso, por haber considerado el flujo bidimensional. Aunque la obtención directa de la vorticidad no es tampoco posible por la citada dificultad de la derivación en dirección radial, se ha aplicado un procedimiento indirecto que utiliza la formulación de Crocco de la ecuación de Euler.

En la figura 8 se representa la evolución temporal de la señal de vorticidad, promediada en el espacio del canal entre dos álabes en el punto 5 interior, para el 70% del caudal de diseño, donde puede observarse con bastante claridad la estructura núcleo-estela del flujo. En la figura 9 se representa el espectro de vorticidad correspondiente al mismo caso, destacándose sólo los picos correspondientes a la frecuencia de paso de álabes y su primer armónico mientras el resto del espectro es en banda ancha. También en este caso existen grandes diferencias entre los resultados obtenidos en unas posiciones y en otras.

Con objeto de completar el estudio aeroacústico se ha realizado una simulación numérica del flujo, mediante la aplicación de un programa comercial de simulación con unas condiciones de contorno adecuadas, obtenidas a partir del estudio experimental. Esta simulación ha permitido la obtención del campo de vorticidad en la salida del rodete, y también el cálculo del término fuente completo de la ecuación de Powell. En la figura 10 se representa este término fuente para el 70% del caudal de diseño. En esta figura se observan valores muy elevados de este término en los bordes de salida de los álabes, para disminuir rápidamente al alejarse en dirección radial. El efecto de la estela de los álabes, muy importante en la salida del rodete, va disminuyendo progresivamente, hasta desaparecer por completo a una distancia de unos 40 mm.

Conclusiones

Se ha realizado una caracterización exhaustiva del flujo en un ventilador centrífugo con álabes curvados hacia delante, de característica claramente inestable en una amplia zona. A partir de ella se ha estudiado la generación acústica de origen aerodinámico de este ventilador, que puede relacionarse de forma cualitativa con los campos de velocidad y vorticidad obtenidos en la voluta, a la salida del rodete.

En particular, del estudio de las distribuciones y espectros de la vorticidad puede concluirse que el ruido aerodinámico tonal se produce preferentemente a la frecuencia de paso de álabes y en mucho menor medida a su primer armónico, aumentando además este ruido tonal al hacerlo el caudal. Otras características del espectro de ruido -el predominio claro del ruido a la frecuencia de giro y la existencia de ruido a otras frecuencias relativamente bajas- no han podido ser explicadas en relación con los fenómenos aerodinámicos, deduciéndose por tanto que la generación acústica predominante en este ventilador tiene origen mecánico. Debe reseñarse, sin embargo, la gran importancia que tiene el estudio del ruido tonal a la frecuencia de paso de álabes encaminado a su reducción, debido a que se produce en una banda de frecuencia (1000 Hz) mucho más audible -y por tanto más susceptible de causar molestias a las personas- que las correspondientes al ruido mecánico.

Bibliografías

- Ffowcs Williams, J.E; Hawkins, D.L. 1969. "Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion". Phil. Trans. Roy. Soc. A 264
- Lighthill, M.J. 1952. "On sound generated aerodynamically. I. General theory". Proc. Roy. Soc. A 211
- Neise, W. 1992. "Review of fan noise generations mechanisms and control methods". Proc. FAN NOISE Symp
- Powell, A. 1964. "Theory of vortex sound". J. Acoust. Soc. Amer. Vol. 16
- Velarde Suárez, S. 1997. "Comportamiento aeroacústico de ventiladores inestables". Tesis Doctoral.