

Estudio acústico de la expansión del chorro de un ventilador

Sandra Velarde Suárez. Carlos Santolaria Morros. Jorge L. Parrondo Gayo.

*Área de Mecánica de Fluidos. Departamento de Energía. Universidad de Oviedo.
E.T.S. Ingenieros Industriales. Carretera de Castiello, s/n. 33204 GIJÓN. ASTURIAS.*

RESUMEN

En este trabajo se realiza una revisión de diversas fuentes bibliográficas que estudian los fenómenos relacionados con la expansión de un chorro no uniforme y con componentes tangenciales de la velocidad. También se efectúa un estudio experimental de las características aerodinámicas de la expansión del chorro proveniente de un ventilador axial, obteniendo los perfiles de velocidad correspondientes a diversos planos axiales y meridionales. Por último, se lleva a cabo el estudio acústico en campo libre, consistente en la determinación de los perfiles de nivel de presión sonora. El estudio de estos fenómenos, y en particular la atenuación de la transmisión sonora en función de la directividad del chorro, tiene gran interés a efectos de acondicionamiento acústico de locales ventilados mecánicamente.

INTRODUCCION

El ruido que emana de un sistema de eyección de aire presenta varias componentes, las cuales deberían ser consideradas independientemente, en la medida de lo posible. La más importante y la más difícil de eliminar, es la debida a la mezcla turbulenta del chorro eyectado con el fluido ambiente, aguas abajo del plano de salida. Además, y en especial en el caso que nos ocupa, el propio ventilador es una fuente generadora de ruido, con unas características propias independientes del proceso aerodinámico que tiene lugar aguas abajo del mismo.

En este trabajo se efectúa un estudio experimental de las características aerodinámicas y acústicas del chorro, con el objetivo de caracterizar el mismo, distinguiendo en lo posible las dos componentes citadas.

Ruido en la expansión de un chorro

Esta componente del ruido ha sido estudiada teórica y experimentalmente por varios autores. El trabajo más importante, y del que han derivado los demás, es el debido a Lighthill (1952), en el cual se muestra cómo este ruido es generado como resultado de las tensiones de Reynolds, las cuales crean fuentes acústicas modelizables a partir de las características del flujo turbulento.

La esencia de la teoría del ruido aerodinámico de Lighthill es la formulación de la analogía acústica, en la cual todo el complejo proceso de generación de ruido debido a la turbulencia es modelado en términos de un conjunto de fuentes acústicamente equivalentes dispersas en un medio en reposo. Mediante una sencilla reordenación de las ecuaciones del movimiento de los fluidos, se muestra que este proceso se describe por la ecuación de onda:

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{\partial^2 \rho}{\partial x_i^2} = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (1)$$

en la cual T_{ij} es un término del tensor de tensiones, que incluye las siguientes componentes:

$$T_{ij} = \rho v_i v_j + (p - c_0^2 \rho) \delta_{ij} + \sigma_{ij} \quad (2)$$

donde se presentan las tensiones de Reynolds, las tensiones normales elásticas y las tensiones viscosas.

Así, el primer miembro de la ecuación (1) describe la propagación de perturbaciones acústicas a través del medio a la velocidad del sonido, mientras que el segundo miembro es interpretado como una función forzada o término fuente.

La solución de la ecuación para un observador situado en x , a una gran distancia r , en función de una posición genérica de la fuente en y , es:

$$p(x,t) - p_0 = \frac{1}{4\pi c_0^2 r} \int_V \frac{\partial^2 T_{rr}}{\partial t^2}(y,t - r/c_0) dv(y) \quad (3)$$

en la cual los términos del tensor de tensiones toman la forma:

$$T_{rr} = \rho v_r^2 + (p - c_0^2 \rho) \quad (4)$$

en la cual v_r es la velocidad del fluido en la dirección del observador, habiéndose prescindido de las tensiones viscosas, que en los chorros de interés resultan de menor importancia.

A partir de esta relación se deduce la ley de la intensidad sonora radiada, en la forma polar:

$$I(r,\theta) \sim \frac{\rho_s u_j^3 D^2}{c_0^3 r^2} \quad (5)$$

Para ello se han aceptado las siguientes hipótesis:

a) Las variaciones de presión y densidad están relacionadas en el medio, en la forma:

$$p' - c_0^2 \rho' = 0 \quad (6)$$

b) Todas las velocidades varían en forma directamente proporcional a la velocidad de eyección del chorro,

$$\rho v_r^2 \sim \rho_s u_j^2 \quad (7)$$

c) La derivada segunda respecto al tiempo es tomada como equivalente a la frecuencia al cuadrado, y la frecuencia está tomada como proporcional al número de Strouhal basado en el diámetro del chorro y a la velocidad de eyección,

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \sim \omega^2 \sim \left(\frac{u_j}{D}\right)^2 \quad (8)$$

d) El volumen productor de ruido se considera proporcional al cubo del diámetro del chorro,

$$\int dv(y) \sim D^3 \quad (9)$$

Es interesante destacar cómo se predice que la intensidad sonora varía proporcionalmente a la octava potencia de la velocidad de eyección, en chorros a baja velocidad, por los cuales la fuente se puede considerar compacta, esto es, la longitud de onda es grande en comparación con la extensión de la zona emisora y, por tanto, las diferencias de fase provocadas por el tiempo de retardo, $t-r/c_0$, no deben ser consideradas.

Experiencias realizadas muestran una buena correspondencia con la predicción. Sin embargo, en los trabajos de Lush (1971) y Tanna (1976), se muestran discrepancias significativas y sistemáticas entre las medidas y las predicciones derivadas de la teoría de Lighthill. Ello no significa la existencia de errores en esta teoría, sino que el conocimiento de las variables requeridas para la evaluación es inadecuado. En particular, es preciso estudiar el término fuente correspondiente a los procesos de refracción y dispersión de la radiación acústica en el chorro. Lilley (1973) plantea una reformulación de las ecuaciones de gobierno que separe la generación de energía acústica y su posterior transmisión a través del chorro, lo cual ha dado lugar a un nuevo campo denominado interacción fluido-acústica.

ESTUDIO EXPERIMENTAL

El estudio experimental se ha realizado sobre un ventilador axial de 500 mm de diámetro, con 7 álabes y una velocidad de rotación aproximada de 1410 rpm.

Para la medida de velocidades se utiliza un anemómetro portátil de tipo industrial. El valor de la velocidad de la corriente, en m/s, aparece directamente en la pantalla del instrumento. Los datos obtenidos se recogen en unas tablas, para su posterior tratamiento y representación.

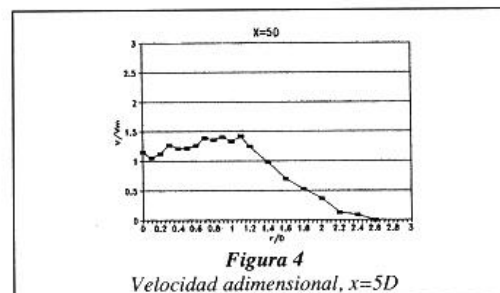
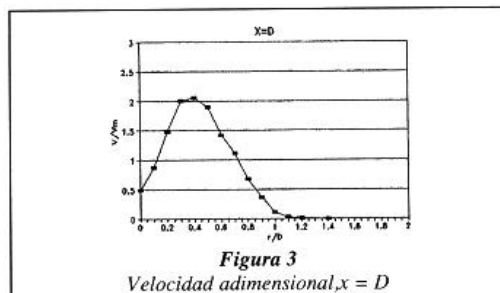
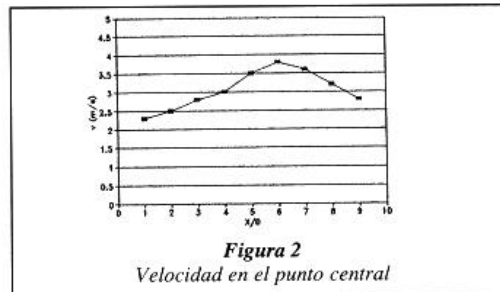
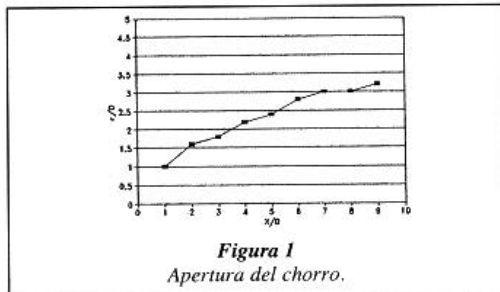
Las medidas acústicas se realizan con un micrófono de 1/2" acoplado a un sonómetro modular de precisión de tipo I. El micrófono se protege con una esfera de espuma para minimizar la distorsión introducida por la velocidad de la corriente. El sonómetro lleva incorporados un juego de filtros analógicos y un módulo de análisis automático en frecuencia, que permiten la obtención de espectros en bandas de tercio de octava de manera sencilla. La señal de salida del sonómetro se envía a una impresora.

Se han tomado medidas en secciones transversales situadas a distancia iguales a D , $2D$, $3D$, etc., siendo D el diámetro del ventilador. En cada sección se ha establecido un sistema de coordenadas (r, θ) , siendo r la distancia al centro y θ el ángulo con respecto a un plano horizontal. De esta forma, cada punto de medida queda definido por una coordenada axial x , una radial r y una circunferencial θ . Se ha construido una estructura de referencia con el fin de posicionar con precisión los instrumentos de medida en cada punto. Las medidas realizadas son las siguientes:

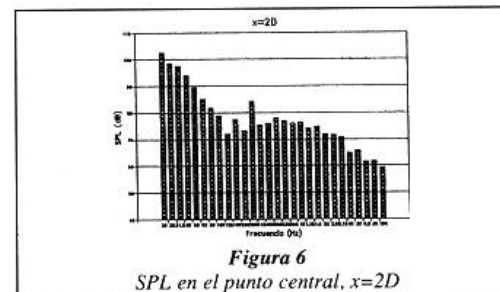
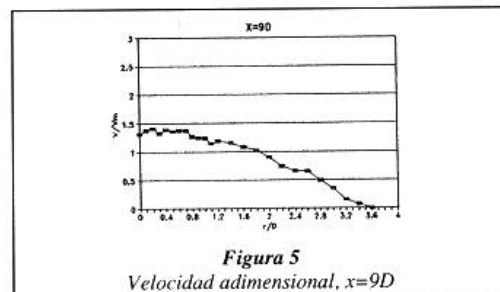
- Medida de la velocidad en cada punto de una sección transversal. Esta operación se realiza para todas las secciones entre $x=D$ y $x=9D$.
- Medida del nivel de presión sonora (SPL) global en cada punto de una sección transversal. Esta operación se realiza para todas las secciones entre $x=D$ y $x=8D$.
- Medida del nivel de presión sonora por bandas de tercio de octava en el punto central ($r=0, \theta=0$), para secciones situadas entre $x=D$ y $x=12D$.

RESULTADOS OBTENIDOS

En la figura 1 puede observarse la forma de apertura del chorro. La línea dibujada corresponde a los puntos en que la velocidad se hace nula. El ángulo aproximado de apertura del chorro, según estos resultados, es de unos 15° , valor que aparece en la bibliografía consultada respecto a este tema (Wallis, 1981).



En la figura 2 se representa la velocidad medida en el punto central ($r=0, \theta=0$), para diferentes secciones. El aumento de la velocidad hasta la sección correspondiente a $x=6D$ para descender posteriormente, corresponde a la influencia del núcleo del ventilador, que frena la corriente. Este efecto deja de tener relevancia a partir de la citada sección.



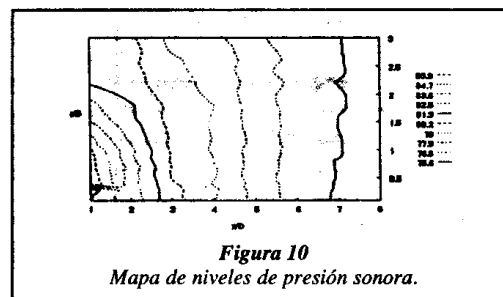
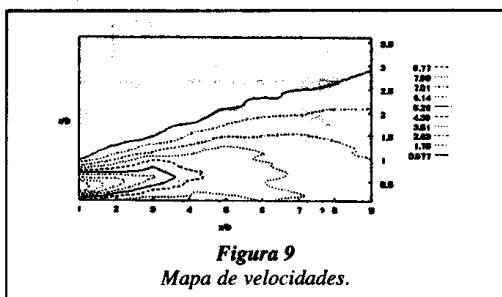
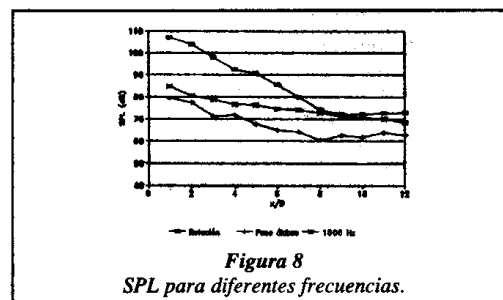
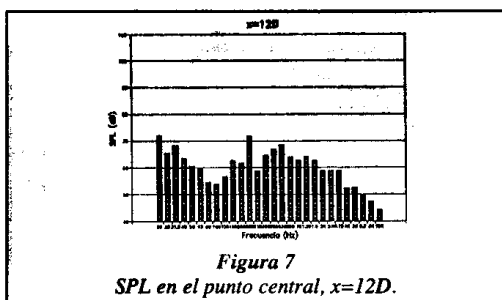
En las figuras 3, 4 y 5 se representa la velocidad en forma adimensional en función de la posición radial, para diferentes secciones. Para cada posición radial ($r=cte.$), se promedian todos los valores circunferenciales obtenidos. En estas representaciones puede apreciarse la influencia del núcleo en las secciones más próximas al ventilador, que se manifiesta por la presencia de un máximo de velocidad, que va haciéndose

menor y desplazándose hacia la derecha en las secciones más lejanas, hasta que desaparece al llegar a la sección correspondiente a $x=6D$.

En las figuras 6 y 7 se representan dos espectros en bandas de tercio de octava obtenidos al medir el nivel de presión sonora en el punto central, para diferentes secciones. En la figura 8 se representa el nivel de presión sonora en el punto central para las frecuencias más características: frecuencia de giro (23 Hz aproximadamente), frecuencia de paso de álabes (164 Hz aproximadamente) y banda de frecuencia de 1000 Hz, representativa de las frecuencias altas. Puede observarse que la frecuencia fundamental es la de giro, cuyo valor desciende de forma considerable con la distancia. Algo similar ocurre con la frecuencia de paso de álabes, también representada. En el caso de la frecuencia alta representada (1000 Hz) se produce un descenso bastante más suave con la distancia.

A frecuencias altas, el ruido observado corresponde al generado por la mezcla del chorro con el fluido circundante. En cambio, las señales obtenidas a las frecuencias de giro y de paso de álabes, están relacionadas con el ruido generado directamente por el ventilador.

En la figura 9 se representa un mapa de velocidades en función de las coordenadas x y r . Las componentes circunferenciales se han promediado para cada valor de r . En la figura 10 se representa de forma análoga el SPL.



CONCLUSIONES

- De las medidas de la velocidad se ha deducido que el chorro se abre en forma aproximadamente tronco-cónica, con un ángulo de unos 15° .
- Se ha podido observar la influencia del núcleo del ventilador en la velocidad del chorro. Se manifiesta como una zona central con velocidad baja, que va perdiendo importancia con la distancia.
- En las medidas acústicas se ha observado el predominio de la frecuencia de giro. También tiene cierta relevancia la de paso de álabes.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se ha realizado al amparo del Proyecto "Desarrollo aeroacústico de ventiladores de chorro de elevada relación empuje-potencia" (REF. PA-TP92-06), financiado por la FICYT, organismo al que los autores desean expresar su agradecimiento.

REFERENCIAS

- (1) Lighthill, M.J. (1952) *Proc. Roy. Soc. A.*, On sound generated aerodynamically. I: General theory.
- (2) Lighthill, M.J. (1952) *Proc. Roy. Soc. A.*, On sound generated aerodynamically. II: Turbulence as a source of sound.
- (3) Lilley, G.M.; Morris, P.J.; Tester, B.J. (1973) *AIAA Paper*. On the theory of jet noise and its applications.
- (4) Lush, P.A. (1971) *J. Fluid Mech.* Measurements of subsonic jet noise and comparison with theory.
- (5) Tanna, H.K. (1976) *J. Sound & Vib.* An experimental study of jet noise. Part I: Turbulent mixing noise.
- (6) Wallis, A. (1981) *Axial Flow Fans and Ducts*. Pergamon Press.