

PERFILES DE VELOCIDAD ALREDEDOR DE UN VENTILADOR CENTRIFUGO DE CONFORT

STEFAN ZAREA¹, JUAN PEDRO MARVAL²

¹Departamento de Conversión y Transporte de Energía,
Universidad Simón Bolívar. Caracas, Venezuela. A.P.89.000. szarea@usb.ve

²Departamento de Energética. Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda.
Punto Fijo, Edo. Falcón, Venezuela. jpmarval@unefm.edu.ve

Recibido: abril de 2006

Recibido en forma final revisado: marzo de 2007

RESUMEN

Las componentes de la velocidad del flujo de aire a la entrada y salida del rotor de un ventilador centrífugo sin carcasa fueron medidas con un anemómetro de hilo caliente, en condiciones controladas. El ventilador centrífugo de confort provisto de rejilla de protección y pedestal fue ubicado en un espacio aislado de corrientes de aire exteriores. Las mediciones de las velocidades axiales, radiales y tangenciales se realizaron sobre un plano horizontal que corta al ventilador simétricamente por el eje. Los resultados se presentaron en 13 gráficos, en dos formas: curvas de velocidad adimensionales en función de la distancia adimensional respecto del ventilador y curvas de isovelocidad. El perfil de velocidad axial a la succión es aproximadamente simétrico respecto del eje del ventilador. Las velocidades radiales y tangenciales son del mismo orden de magnitud. Se cuantificaron los parámetros que caracterizan el chorro cuasi-radial de descarga y el flujo de succión.

Palabras clave: Perfiles de velocidad, Flujo giratorio, Ventilador centrífugo, Anemómetro, Hilo caliente.

VELOCITY PROFILES AROUND OF THE COMFORT CENTRIFUGAL FAN

ABSTRACT

The components of air flow velocity in inlet and outlet of a centrifugal fan without volute were measured with a hot wire anemometer, in controlled conditions. The centrifugal fan, provided with grill and pedestal, was placed in an isolated space of exterior air draught. The measures of axial, radial and tangential velocities were made on a horizontal plane that cut the fan symmetrically by the shaft. The results are shown in 13 graphs, in two forms: Dimensionless Velocity Curves in function of dimensionless distance with regard to the fan and isovelocity curves. The axial velocity profile on the suction is approximately symmetrical with regard to the axis of the fan. The radial and tangential velocities were of same order of magnitude. The parameters that characterize the cuasi-radial jet discharge and the suction flow were calculated.

Keywords: Velocity profile, Vortex flow, Centrifugal fan, Anemometer, Hot wire.

INTRODUCCIÓN

La determinación del campo de velocidades alrededor de un ventilador centrífugo de confort es útil para evaluar el efecto del control de la temperatura en los recintos habitados. El flujo de succión en un ventilador centrífugo de confort es cuasi-axial simétrico y es sometido a la influencia del flujo de descarga. La componente tangencial de la velocidad en el flujo de descarga es relativamente grande. Las condiciones de contorno y el movimiento giratorio global que imprime el

flujo de descarga en el aire circundante, generan torbellinos locales y una asimetría en la distribución de las velocidades tal como se ha puesto en evidencia en estudios cualitativos de visualización (Zarea y Marval, 2004).

El objetivo del presente trabajo consistió en mostrar los resultados de una investigación experimental consagrada a la medición de los campos de velocidades en el flujo de succión y descarga del ventilador de confort R4E280 fabricado por la empresa Alemana Ziehl.

Para tal fin se realizó un montaje experimental que permitió medir, con la ayuda de un anemómetro de hilo caliente las tres componentes: axial, radial y tangencial de la velocidad en un plano horizontal que pasa por el eje del ventilador. Debido a la expansión radial del chorro de descarga la dimensión del área de succión y medición de las velocidades en sentido de expulsión del aire, es 2,5 veces más grande que la correspondiente a la dirección axial.

Los resultados de las mediciones se han resumido en 13 graficas, en dos clases de curvas que representan la distribución de las velocidades en un sistema de coordenadas cilíndricas. También se han graficado las curvas de isovelocidades para las tres componentes de la velocidad. Los resultados experimentales permitieron cuantificar los campos de velocidades y confirmar el análisis cualitativo previo al estudio de visualización del flujo en el exterior del ventilador centrífugo de confort evaluado.

ANTECEDENTES

Las mediciones de los campos de velocidades relativas o absolutas en ventiladores centrífugos con carcasa espiral han sido temas de estudio experimental desde hace varias décadas, utilizándose anemómetros de hilo caliente (Howard y Lennmann, 1971; Kjörk y Löfdahl, 1989) y más recientemente con anemómetros láser (Powell *et al.* 1981; Hessami Azizi *et al.* 2005).

Los ventiladores centrífugos sin carcasa espiral han sido poco estudiados excepto los trabajos para determinar el desarrollo de la capa límite sobre los alabes (Litval y Preszler, 1969) y la distribución de velocidades a la salida de un rotor centrífugo (Howard *et al.*, 1971; Raj y Swin, 1981; Petersson *et al.*, 1996; Velarde-Suarez *et al.*, 2001).

La visualización del flujo absoluto de entrada y a la salida del rotor de un ventilador centrífugo sin carcasa y la determinación del campo de velocidades han sido realizadas recientemente (Marval, 1999; Zarea y Marval, 2004).

MONTAJE EXPERIMENTAL

El estudio experimental del flujo, en el exterior del ventilador de confort R4E280, se realizó ubicando el ventilador, provisto de sus rejillas de protección y el pedestal, en una habitación con un área de 20 m². En el piso del recinto, en la zona central, se delimitó un área de 2000x820 mm, en la cual se realizó un mallado cartesiano con un paso de 20mm.

En la figura 1 se muestra una vista global del arreglo experimental que contiene los siguientes componentes: 1) ventilador centrífugo de confort, 2) mesa soporte para el

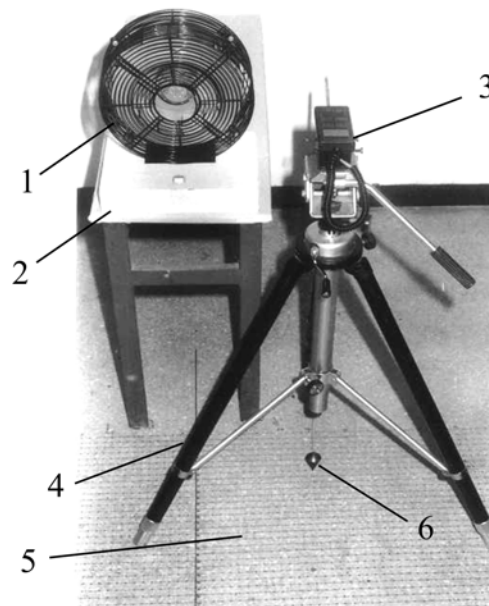


Figura 1. Vista superior frontal del montaje experimental. Apreciación general del conjunto.

ventilador centrífugo, 3) anemómetro digital de hilo caliente, 4) trípode para cámaras fotográficas, 5) arreglo de coordenadas equidistante marcadas en el piso (mallado), 6) nylon y plomada cónica, 7) computadora personal para adquisición de datos (no aparece en la figura 1). La mesa que sirvió de soporte tenía una altura de 1.100 mm respecto al piso y ocupaba un área de 400 x 1.400 mm.

La sonda de medición del anemómetro fue colocada sobre un trípode, sujeto a través de un dispositivo diseñado para tal fin. En la figura 2 se presenta el dispositivo de sujeción de la sonda del anemómetro, ubicada en la posición de medición de la componente tangencial de la velocidad del flujo.

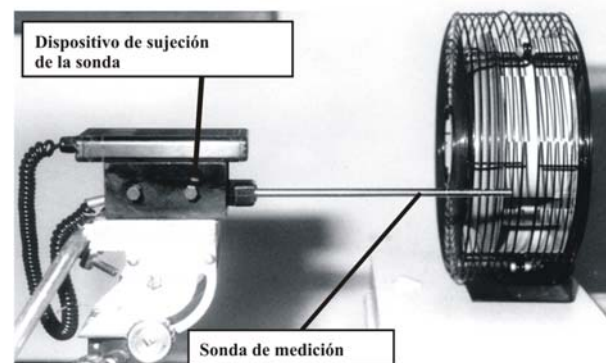


Figura 2. Vista lateral del montaje experimental. Detalle de la sonda de medición y del dispositivo de sujeción.

La sonda tiene un diámetro de 8 mm y una longitud de 235 mm. En la punta del cilindro hay dos perforaciones perpendiculares al eje del mismo, en las cuales se ubican el filamento de medición de velocidad y el dispositivo de medición de temperatura.

El agarre entre el dispositivo de sujeción y la sonda se realizó con cuatro tornillos (figuras 2 y 3). Este dispositivo permitió sujetar la sonda de medición y alinearla con respecto al piso y al eje del ventilador, además de nivelarlo horizontalmente.



Figura 3. Vista superior del conjunto anemómetro y trípode. Detalle del visor del anemómetro.

La posición relativa del trípode con respecto al mallado realizado en el piso, se controló con la ayuda de una plomada cónica suspendida desde la parte central del trípode (figura 4).

El origen del sistema de coordenadas cilíndricas y la identificación del plano derecho y el plano izquierdo se muestran en la figura 5.

El origen de las coordenadas está situado en la corona interior del ventilador estudiado sobre el eje del mismo, por lo que para calcular la coordenada de medición, con respecto al sistema de referencia, se midió la distancia entre el centro del trípode y el filamento de la sonda. De esta manera ha sido posible determinar con precisión las coordenadas de la sonda con respecto al origen.

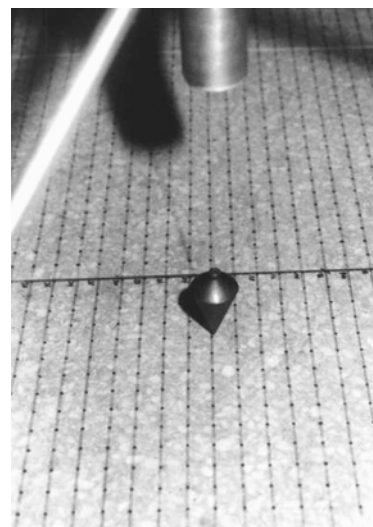


Figura 4. Detalle de la plomada cónica y su ubicación con respecto a la cuadrícula del piso.

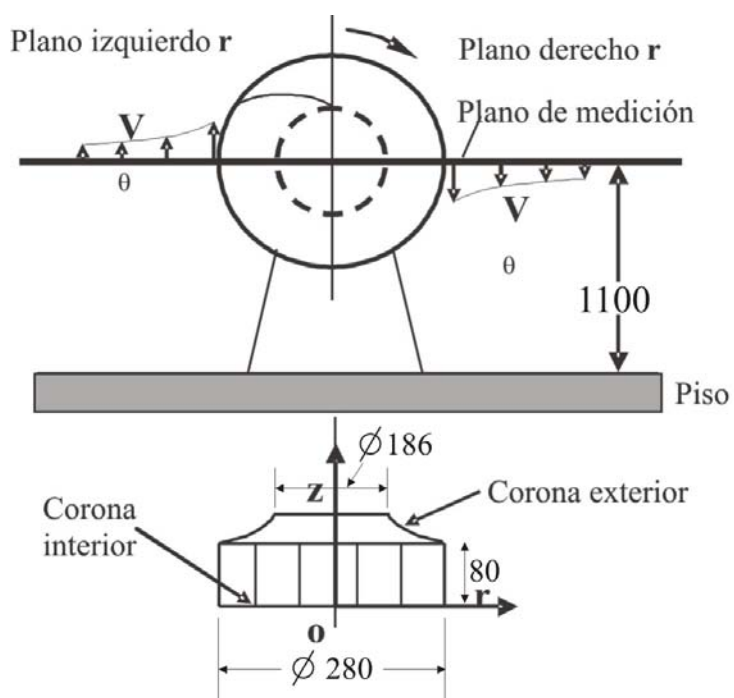


Figura 5. Esquema de ubicación del plano de medición. Vista posterior y de planta.

METODOLOGÍA DE MEDICIÓN

Las mediciones han requerido de una sucesión de operaciones correspondientes al objetivo principal de la exploración del campo de velocidades en el flujo de succión y de descarga del ventilador centrífugo de confort R4E280. Se fijaba la sonda del anemómetro en el trípode según la componente de la velocidad que se deseaba medir. Luego se posicionaba el trípode sobre el mallado de manera que la plomada cónica coincidiera con el punto de medición requerido.

Se encendía el ventilador y se esperaba aproximadamente 10 segundos para que el flujo de aire se estabilizara. Se encendía el anemómetro digital seleccionando el rango adecuado de velocidad. En cada punto se registraron 10 valores sucesivos de la velocidad indicada por el anemómetro. El procedimiento se repitió para todos los puntos de la cuadrícula trazada en el piso de la habitación, es decir en puntos situados a 20 mm uno del otro.

Las mediciones se realizaron en 4.000 puntos y se obtuvieron más de 100.000 registros de velocidad. El rango de medición se seleccionó según la velocidad del aire registrada por el anemómetro. En las cercanías del ventilador se utilizó el rango de velocidad 0-7 m/s, mientras que en las zonas donde la velocidad descendió por debajo de 3 m/s se utilizó el rango entre 0 y 3 m/s. En ambos casos se registraron velocidades con dos dígitos de precisión.

Para el registro de la información suministrada por el anemómetro se utilizó una computadora personal, en la cual se introdujeron los datos y luego se promediaron 10 valores continuos de la velocidad en un tiempo aproximado de 5 segundos por cada punto de medición.

Las mediciones de las tres componentes de la velocidad no se realizaron simultáneamente, debido a la limitación del anemómetro que permite medir sólo una componente de la

velocidad según se ubicara la sonda. Se midieron las componentes de la velocidad por separado, realizando barridos sobre la cuadrícula al desplazar el trípode en una sola posición de la sonda de medición del anemómetro, permitiendo medir una sola componente por barrido.

ERRORES DE MEDICIÓN

Los resultados finales fueron influenciados por los errores inevitables en las diferentes actividades en el proceso de medición. A continuación se mencionan las operaciones que originaron imprecisiones y los valores de los errores respectivos:

- Ubicación y orientación del anemómetro de hilo caliente, 4%,
- Ubicación del trípode y la identificación del punto de medición, 3%.

El error resultante de las mediciones, E_r , resulto ser:

$$E_r = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5\%$$

PROCESAMIENTO DE LOS RESULTADOS

Los resultados experimentales registrados en la computadora fueron procesados utilizando tres programas: Microsoft Excel 97, Surfer 6.04 y Grapher 1.3.

Se hicieron dos tipos de gráficas que representan los datos obtenidos de la medición. Un primer grupo de 7 gráficas consistió en representar las velocidades como curvas bidimensionales parametrizadas, mientras que el otro grupo correspondió a 6 gráficas de contorno de velocidad constante.

En la figura 6 se presenta un esquema explicativo de las gráficas parametrizadas. En el primer cuadrante se muestra un chorro casi-radial en la descarga del ventilador

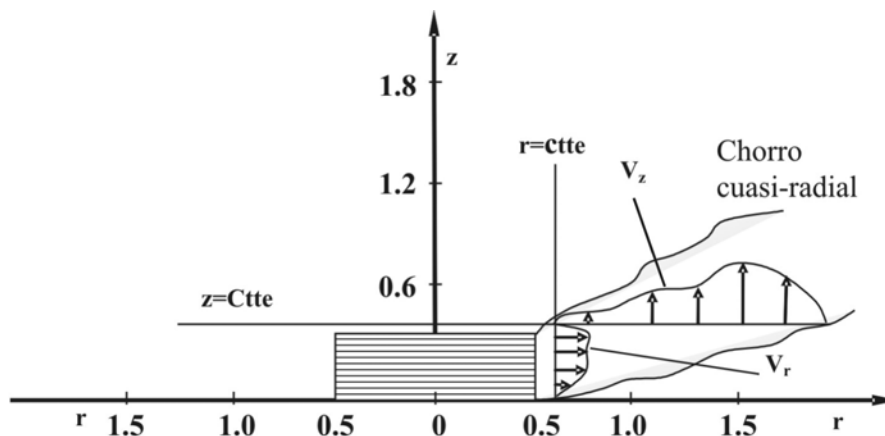


Figura 6. Esquema explicativo para gráficas parametrizadas.

apreciándose los perfiles genéricos de velocidades axial y radial, además se indican las líneas de parametrización: $r=cte$ y $z=cte$.

En el esquema de la figura 7 se identifican las tres zonas (1,2,3) para las cuales se trazaron las familias de curvas $V_z(r;z)$, figuras 11, 12 y 13, $V_\theta(z;r)$, figuras 16 y 17 y $V_r(z,r)$ figuras 20 y 21 llamadas también curvas parametrizadas.

Las gráficas de velocidad axial V_z se realizaron sobre líneas $z=constante$ en el plano de medición (figuras 11, 12 y 13). La velocidad tangencial se mide sobre líneas de $r=constante$, (figuras 16 y 17) al igual que las velocidades radiales, tal como se evidencia en los gráficos de las figuras 18 y 20.

La zona 1 corresponde a las mediciones realizadas sobre el plano situado en el segundo cuadrante, mientras que la zona 3 se refiere al plano correspondiente al primer cuadrante.

La zona 2, simétrica respecto al eje del rotor, abarca en el plano de medición una franja de ancho igual al diámetro exterior del rotor: la mitad de esta zona está situada en el primer cuadrante y la otra en el segundo cuadrante del sistema de coordenadas utilizado.

La zona 2 fue utilizada para la presentación de las gráficas parametrizadas con líneas $r=constante$, mostrando los perfiles de velocidad axial que se generan en el flujo de acceso por acción de la succión del ventilador centrífugo de confort R4E280.

Las gráficas parametrizadas se realizaron en el programa Grapher 1.3, aproximándose los datos con el método «spline». Esta aproximación tiene la peculiaridad que la curva ajustada pasa suavemente por todos los puntos, independientemente del espaciado y del factor de tensión que se utiliza en la aplicación del «spline».

En todas las gráficas se utilizaron magnitudes adimensionales. Las coordenadas r y z adimensionales son:

$$r = \frac{r_{\text{dimensional local}}}{D_2}; \quad z = \frac{z_{\text{dimensional}}}{D_2}$$

Cabe señalar que se tomo el diámetro externo del rotor del ventilador para calcular los valores adimensionales de toda la geometría del montaje experimental y no es el radio R_2 como es usual.

Los valores de las componentes V_r , V_θ y V_z de la velocidad adimensional se obtuvieron dividiendo los valores locales dimensionales por el valor máximo que alcanzó cada una de estas magnitudes:

$$V_z = \frac{V_{z \text{ dimensional local}}}{V_{z \text{ max}}}; \quad V_{z \text{ max}} = 4,96 \text{ m/s}$$

$$V_r = \frac{V_{r \text{ dimensional local}}}{V_{r \text{ max}}}; \quad V_{r \text{ max}} = 5 \text{ m/s}$$

$$V_\theta = \frac{V_{\theta \text{ dimensional local}}}{V_{\theta \text{ max}}}; \quad V_{\theta \text{ max}} = 4,8 \text{ m/s}$$

Las gráficas de contorno de velocidad constante fueron realizadas utilizando el código Surfer 6.04, que permitió procesar los datos con tres coordenadas generando superficies tridimensionales. El ajuste implementado sobre los datos de velocidad fue procesado por el método «Kriging» de mallado geoestadístico.

En la figura 8 se muestra un esquema cualitativo de las corrientes de flujos esperados en los alrededores del ventilador centrífugo de confort. En la zona 1 se señala un flujo de descarga que es succionado inmediatamente por el rotor y en la zona 3 un flujo que es parcialmente succionado conservando un desarrollo radial-axial significativo. En la zona 2 se espera un flujo axial hacia la succión del ventilador.

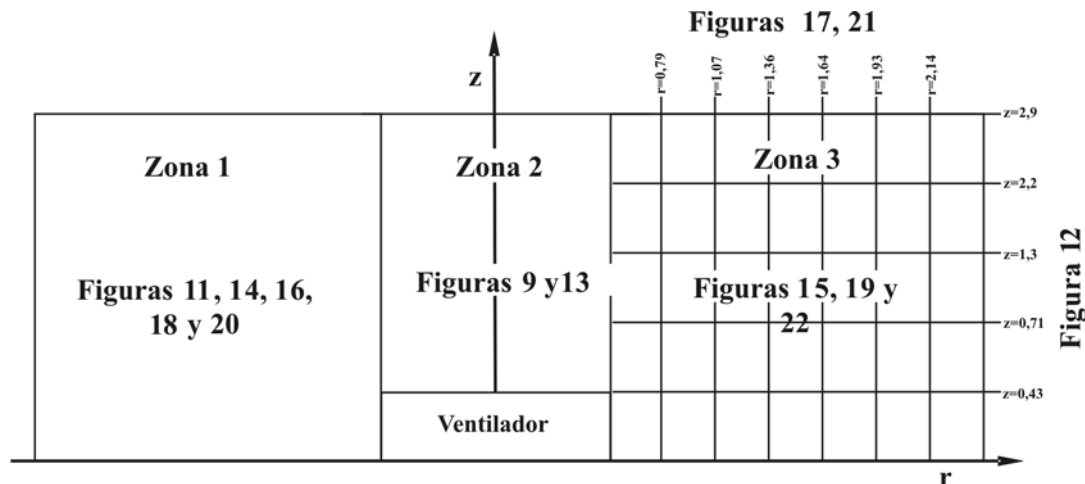


Figura 7. Esquema sobre la ubicación relativa de las tres zonas donde se presentan las gráficas.

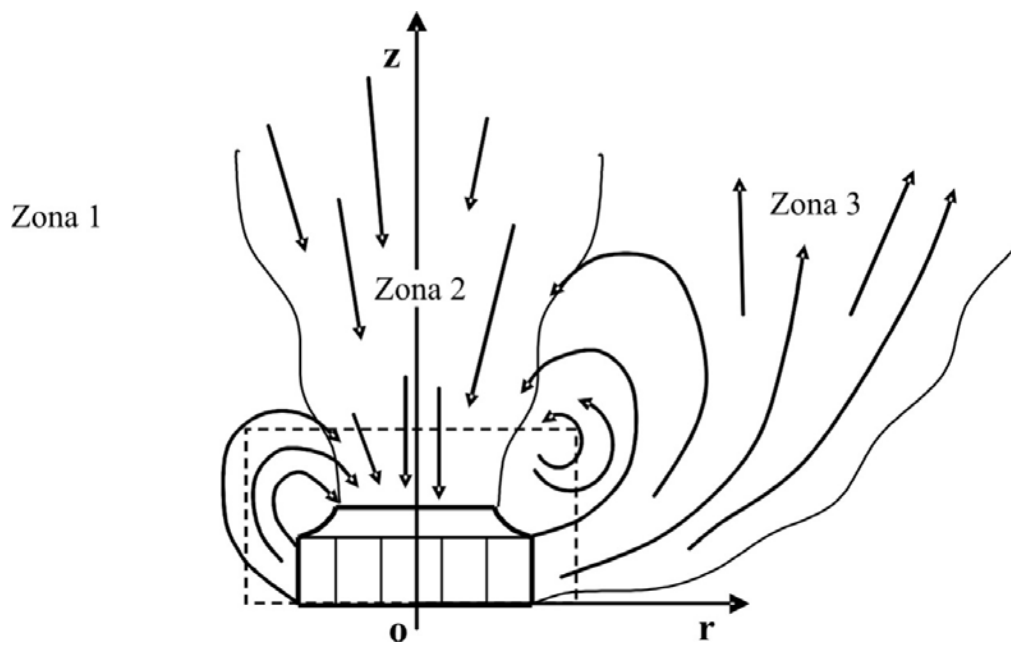


Figura 8. Esquema de los flujos principales generados por el ventilador a su alrededor.
Vista de planta del ventilador (plano horizontal de medición).

Velocidad Axial

La medición de los campos de velocidad arrojó resultados que confirmaron la presencia de las estructuras de flujo descritas en el estudio de visualización (Marval, 1999), como la interacción succión-descarga en el ventilador que origina la presencia de un chorro cuasi-radial rotatorio.

La figura 9 representa esquemáticamente un resultado

genérico clásico, donde el perfil de velocidad actual en el flujo de succión no perturbado, se asemeja a una parábola con un máximo de la velocidad sobre el eje z, característico de un flujo axial simétrico, situación que se manifiesta solamente parcialmente a una distancia z relativamente grande en el ventilador en estudio. A continuación se presentan las gráficas correspondientes a las mediciones de la componente axial de la velocidad sobre el ventilador centrífugo.

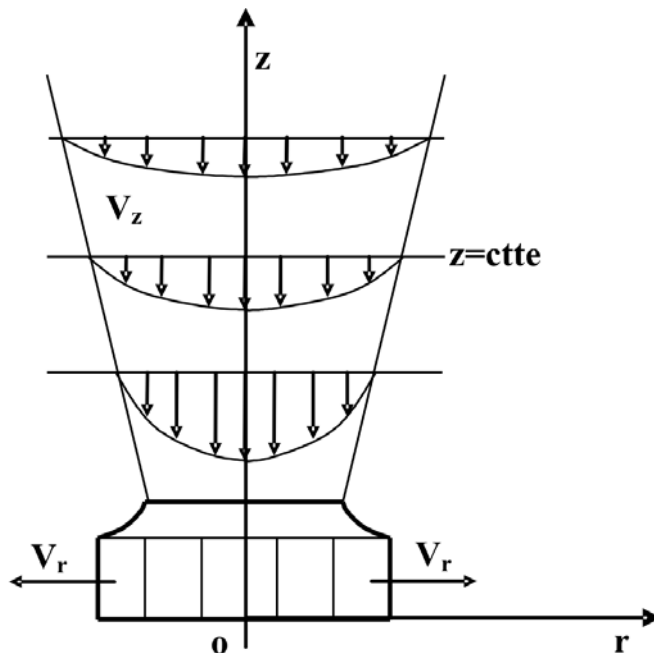


Figura 9. Perfiles genéricos de la velocidad axial en el flujo de succión no perturbado de un ventilador centrífugo (zona 2).

En la figura 10 se exponen los resultados de las mediciones de velocidad axial sobre el plano horizontal estudiado, como contornos de velocidad constante. Este tipo de gráfico resulta ilustrativo para delimitar chorros y mostrar la existencia de torbellinos.

El anemómetro de hilo caliente al igual que la mayoría de los aparatos de medición existentes en la actualidad, excepto los anemómetros de cabeza esférica con cinco tomas, no pueden medir el sentido de las componentes de la velocidad, sólo miden la magnitud del vector de velocidad en la dirección que se desee. En consecuencia resulta útil representar los datos obtenidos a través de contornos donde la velocidad es constante, con lo cual el sentido de la velocidad no tiene importancia. Se conoce el sentido de la velocidad de la corriente global, pero no localmente en las zonas donde existen torbellinos.

Como se puede apreciar en la figura 10 la zona más oscura corresponde a las velocidades más altas, llegándose a registrar velocidades axiales de hasta 4.96 m/s aproximadamente. Resulta resaltante la asimetría del campo de velocidad axial con respecto al eje «z» ($r=0$). Aunque en la zona de descarga izquierda existen velocidades mayores, el alcance del chorro cuasi-radial es pequeño en comparación con la penetración del chorro por el plano derecho (zona 3).

La zona de mayor velocidad en la figura 10 se observa en la succión y en la descarga del ventilador por el plano izquierdo. El hecho de que en la succión del ventilador se encuentre una velocidad alta se debe a que el área de flujo en la succión del ventilador es menor que el área de flujo de descarga y el caudal de aire es constante (flujo

incompresible).

Asumiendo una velocidad de delimitación del chorro de un 0,5 m/s (aprox. 0.1 adimensional), se puede identificar éste con un ancho promedio aproximado de 35 cm a la descarga del ventilador, medido perpendicularmente sobre la dirección diagonal dominante del flujo de descarga sobre el plano derecho (zona 3).

Igualmente se observa que el alcance del chorro en el plano izquierdo del ventilador es menor que en el plano derecho, apreciándose que el flujo en las cercanías del ventilador posee una gran componente de la velocidad axial. Para $r > 1,25$ en el plano izquierdo y $r > 2,5$ en el plano derecho de la figura 10 la componente axial es muy baja (menos de 0,25 m/s).

El sentido de giro del ventilador y el valor grande de la componente tangencial del flujo de salida, aunados al efecto de pared que ejerce la base y la mesa donde está el ventilador, ocasionan que el chorro de aire tenga la tendencia a desarrollarse en el plano derecho. El alcance axial en el plano derecho es de más de 56 cm aproximadamente, considerando una velocidad mínima de perturbación del aire circundante de 0,5 m/s como criterio de definición del alcance.

El fenómeno ocurrido en el plano izquierdo (zona 1) muestra la existencia de un flujo descargado por el ventilador que es arrastrado inmediatamente hacia la succión, sin posibilidades de desarrollarse y expandirse como el chorro ubicado sobre el plano derecho. El fenómeno antes mencionado fue visualizado y explicado en el estudio de Visualización (Zarea, Marval, 2004) como una interacción succión-descarga que es una de las causas de esta fuerte recirculación.

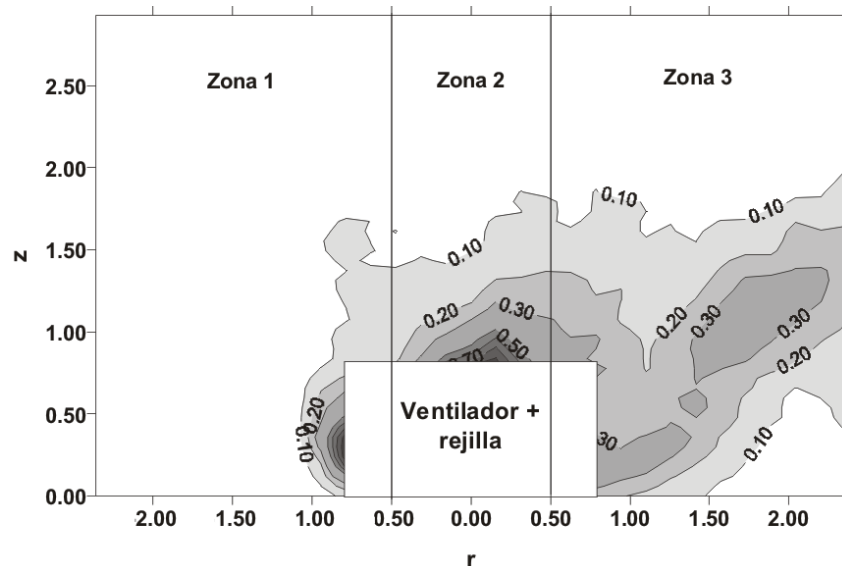


Figura 10. Contornos de velocidad axial adimensional $V_z=cte$ alrededor del ventilador.

La recirculación entre la descarga y la succión del ventilador no se presenta en ventiladores centrífugos normales, ya que al existir una caja espiral, la descarga y la succión quedan aisladas y la recirculación ocurre en la zona delantera de la voluta.

La velocidad axial sobre el plano izquierdo (zona 1) presentada en la figura 11 muestra la curva correspondiente a $z=0.43$ con un perfil de velocidad axial adimensional alto en la zona cercana a la descarga del ventilador ($r/D_2=0.6$) en comparación con el resto de las curvas.

Las curvas para $z=0$ y 0.71 representan perfiles de velocidad similares pero con menores velocidades máximas locales que la curva correspondiente a $z=0.43$. El resultado anterior demuestra la presencia de una corriente de aire que se desplaza desde la descarga del ventilador hacia la succión. Esta zona corresponde, según la visualización, con un área de recirculación permanente que se manifiesta en el ventilador equipado con rejilla y pedestal.

La figura 12 muestra los perfiles de velocidad axial adimensional sobre el plano derecho (zona 3), evidenciándose que las mayores velocidades axiales se encuentran en la cercanía del ventilador.

La coordenada de parametrización $z=0$ se encuentra dentro del ancho de salida del ventilador. Si se toma en cuenta que $b_2/D_2=0.285$, las líneas contiguas $z=0.43$ y superiores se

encuentran fuera del ancho del ventilador, mostrando que el máximo del perfil de velocidad axial correspondiente disminuye proporcionalmente con el incremento de z , es decir, al alejarse del ventilador.

La curva $V_z(r)$ correspondiente a $z=0$ (sobre el eje r) muestra un comportamiento decreciente a medida que se aleja del ventilador ($r>$), situación que pone de manifiesto la asimetría radial del flujo de descarga, tendiente más bien a dirigirse hacia la succión, como se demostró anteriormente.

La velocidad axial aumenta en las curvas correspondientes a $z=0.43, 0.71$ y 1.36 , indicando la presencia de un flujo con mayor componente axial hacia el frente del ventilador, para luego caer precipitadamente hacia las distancias $z=2.21$ y 2.93 .

Los perfiles de velocidad mostrados en la figura 12 sugieren la presencia de un chorro diagonal, que se ve reflejado al comparar las curvas de $V_z(r)$ para $z=0$ y $z=1.36$. En efecto, para $z=0$ el valor máximo de V_z ocurre en la cercanía del ventilador, mientras que para $z=1.36$ el máximo de la velocidad axial está situado lejos del eje del rotor ($\approx r=1.8$). Para $z \in (0, 1.36)$ los valores máximos de la velocidad suceden a distancias $r \in (0.70, 1.90)$.

Los perfiles de velocidad axial $V_z(r)$ adimensional en la zona de succión del ventilador (zona 2), reportados en la figura

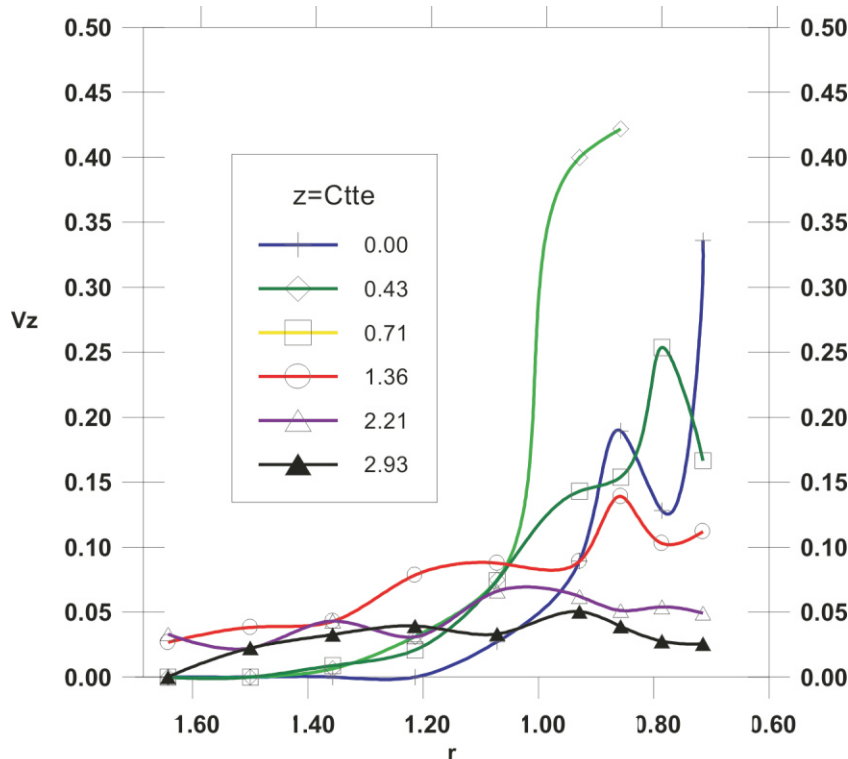


Figura 11. Velocidad axial adimensional sobre el plano izquierdo (zona 1), parametrizada según $z=cte$.

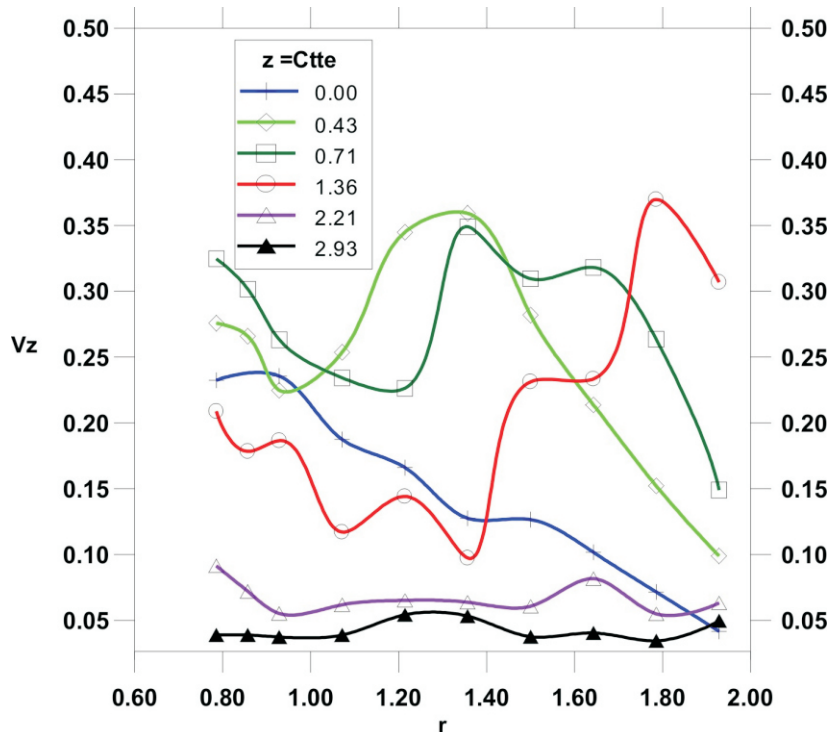


Figura 12. Velocidad axial adimensional sobre el plano derecho (zona 3) parametrizada según $z=ctte$.

13, tienen un comportamiento correspondiente a chorro coaxial con el ventilador, alcanzando los valores máximos sobre el eje del rotor.

zona 2, la cual está relacionada con los fenómenos de interacción presentes entre el flujo de succión y el flujo de descarga del ventilador.

Para $z=0.93$ se nota una disminución progresiva de la velocidad axial, y además una asimetría del flujo axial en la

Los valores máximos de la velocidad axial señalados en la gráfica 13 son mayores del lado derecho que en el lado

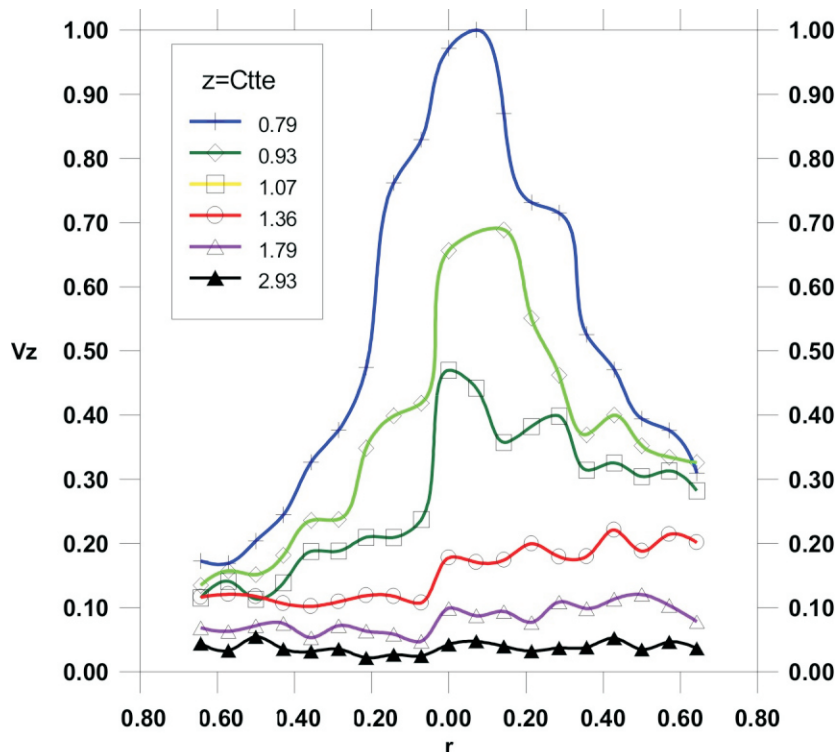


Figura 13. Velocidad Axial adimensional sobre la zona 2, parametrizada según $z=ctte$.

izquierdo. Esta asimetría se debe a la presencia del pedestal del ventilador que genera una perturbación en el flujo de descarga, que altera también la simetría del flujo de succión reflejado en la gráfica 13.

Velocidad tangencial

Los contornos de la velocidad tangencial constante $V_{\theta}(r,z)=cte$, en el plano izquierdo del ventilador (zona 1), se pueden apreciar en la figura 14. Las velocidades tangenciales más altas en el rango $z \in (0,200\text{mm})$, ocurren a la descarga del ventilador.

La zona de alta velocidad tangencial antes mencionada está asociada con la presencia de la recirculación existente sobre el lado izquierdo del ventilador, por tal razón en esta gráfica no se aprecia un chorro que se desarrolle axial y radialmente lejos del ventilador.

La figura 15, donde se presentan las curvas $V_{\theta}(r,z)=cte$ en la zona 3, confirma lo antes expuesto en la figura 8 acerca de la existencia de un chorro diagonal que se ha denominado cuasi-radial por sus características antes visualizadas y ahora medidas. Se aprecia un chorro bien delimitado si se toma como criterio de definición del alcance la velocidad de 0.5

m/s, teniendo una influencia hasta los 600mm radialmente y 450mm axialmente hacia el frente del ventilador.

El sentido del flujo de aire en el plano izquierdo (zona 1) figura 14 es trigonométrico ($+\theta$), lo que corrobora el carácter ascendente predominante del flujo de descarga, ya antes señalado en la visualización con humo, mientras que en la zona 3 (figura 15) el sentido del flujo es horario ($-\theta$), es decir descendente.

Las figuras 16 y 17 presentan resultados de gran importancia para la descripción de la estructura cinemática del chorro cuasi-radial, concretados en la ubicación de los valores mayores de la velocidad tangencial a una distancia $z=0.3$, siendo en la zona 1 $V_{\theta_{max}}=0.80$ (figura 16), mientras que en la zona 3 $V_{\theta_{max}}=1.00$ (figura 17).

En la zona 1 se nota un decrecimiento monótono en la magnitud de las velocidades tangenciales (figura 16). En la zona 3 se observa un corrimiento del valor máximo local de la velocidad tangencial para cada línea $r=cte$ (figura 17).

Para la zona 3, a una distancia de $1.7D_2$ del eje del ventilador existe todavía una velocidad tangencial de 1,44 m/s aproximadamente, valor que es de interés para la ventilación de

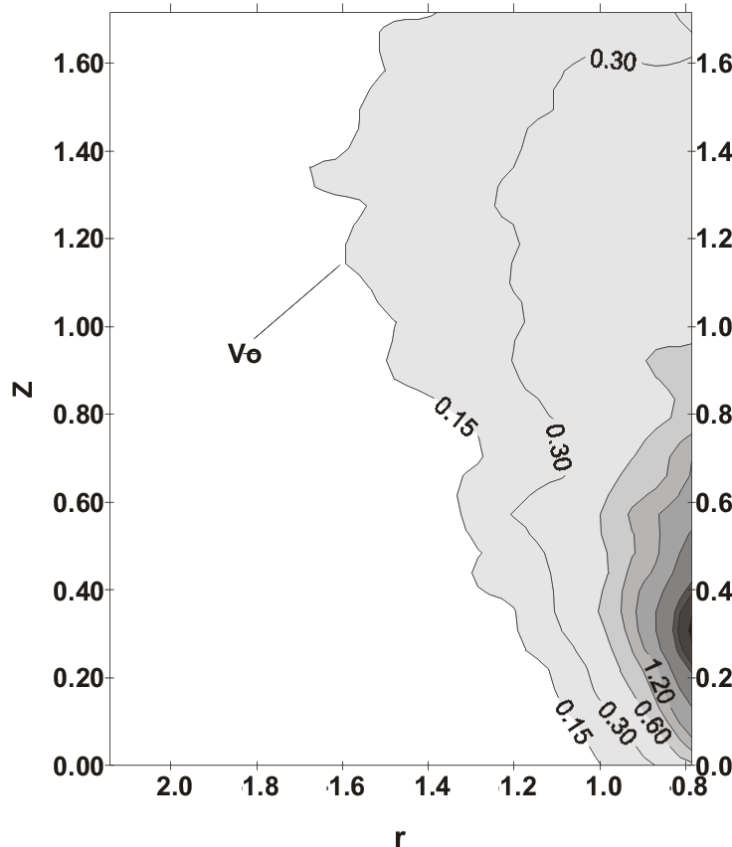


Figura 14. Contornos de velocidad tangencial adimensional $V_{\theta}=cte$ en el plano izquierdo del Ventilador (zona 1).

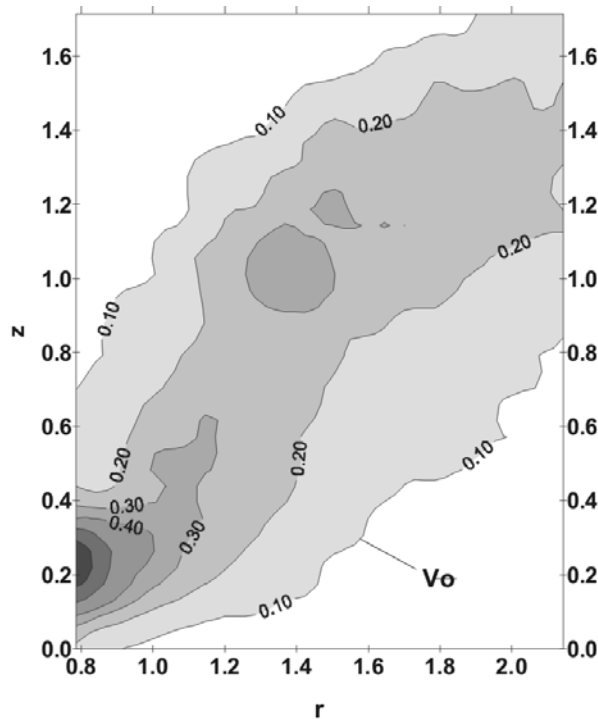


Figura 15. Contorno de velocidad tangencial adimensional $V_\theta = \text{cte}$ en el plano derecho del Ventilador (zona 3).

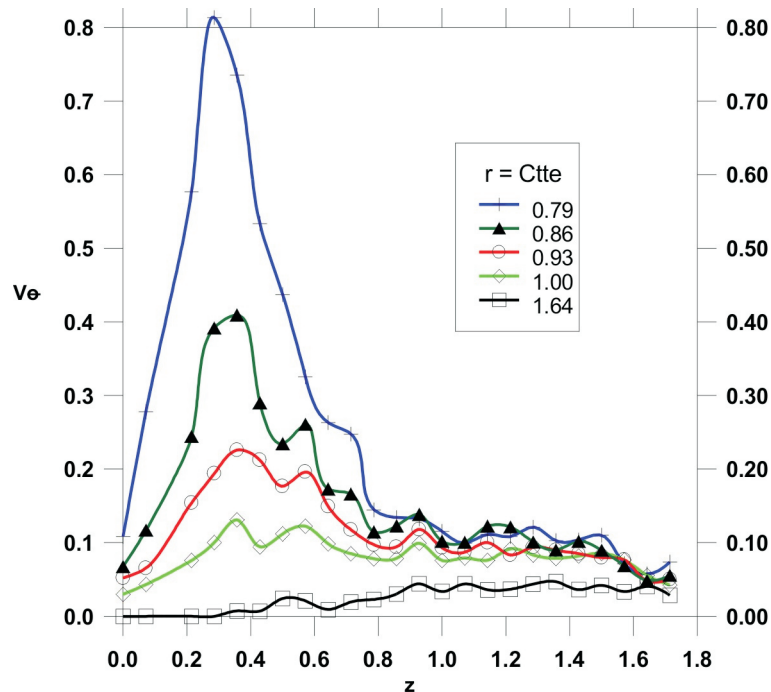


Figura 16. Velocidad tangencial adimensional sobre el plano derecho (zona 1) parametrizada según $r = \text{cte}$.

espacios cerrados.

Velocidad radial

En la figura 18 se muestran 7 contornos de velocidad radial constante e la zona 1, observándose que la mayor velocidad

radial está justamente en el frente del ventilador sobre los 200mm en el eje z , situación que indica la presencia de un torbellino causado por el arrastre que el flujo de descarga sufre por efecto de la succión del rotor. Así se confirma la presencia del fenómeno de recirculación que se manifiesta en el ventilador centrífugo de descarga libre.

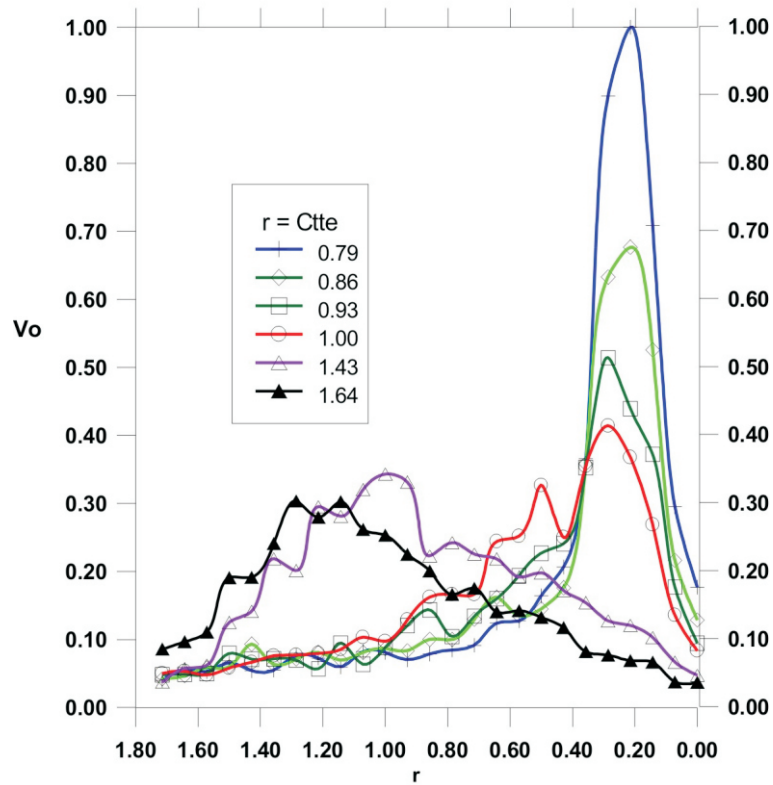


Figura 17. Velocidad tangencial adimensional sobre el plano izquierdo (zona 3) parametrizada según $r=ctte$.

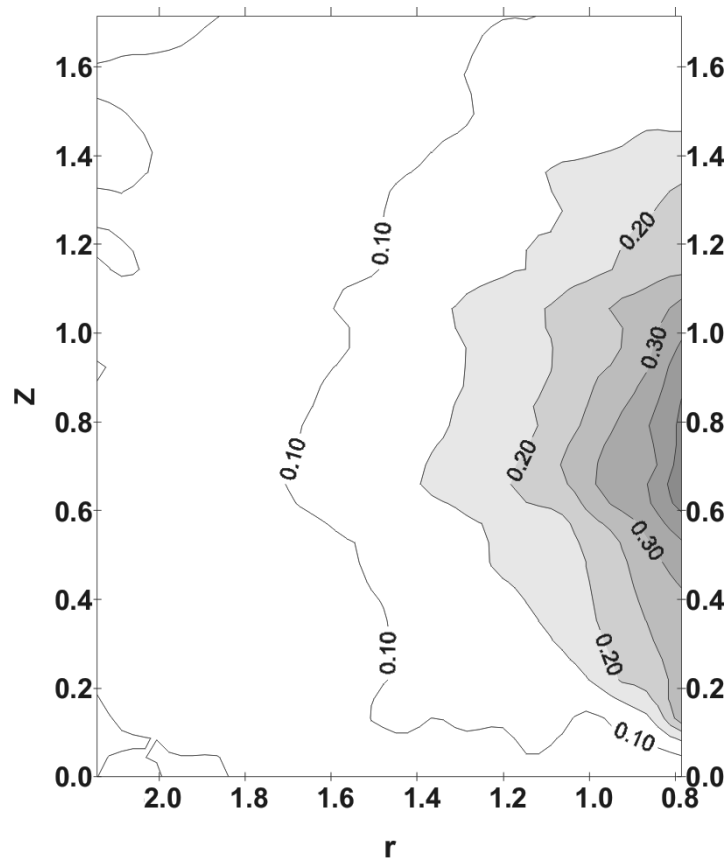


Figura 18. Contornos de velocidad radial $Vr=ctte$ en la zona 1.

La velocidad radial en la región de la gráfica 18 comprendida entre $z=150-250$ mm posee un sentido en el plano derecho, mientras que en la descarga (hasta $z=100$ mm) el sentido en el plano izquierdo es lo contrario, lo que lleva a inferir la presencia de una estructura de flujo tipo vórtice en dicha zona.

La existencia de un chorro cuasi-radial con componente radial en el plano derecho se confirma con lo mostrado en la figura 19, donde se presentan los contornos de la velocidad radial $V_r = \text{cte}$ (zona 3) de un chorro de descarga con características similares al encontrado en las gráficas homólogas de velocidad axial y tangencial.

De la gráfica 19 se puede inferir la presencia del chorro cuasi-radial delimitado con una velocidad de 1.2 m/s, aunque en zonas más alejadas, como la comprendida entre $z=300-400$ mm y $r=500-600$ mm, se presentan velocidades superiores que llegan hasta los 2 m/s.

Los perfiles de la velocidad radial de la zona 1 (figura 20) muestran un comportamiento similar entre sí, apreciándose que el máximo local de la velocidad radial de los perfiles se ubican sobre $z=0.8$. Los valores de la velocidad radial para esta zona son inferiores a los mostrados para la velocidad radial en la zona 3 (figura 21).

El máximo de la velocidad radial adimensional igual 0.45 (figura 20) se ubicó sobre la curva correspondiente a $r=0.79$ y equivale a 2.25 m/s para la velocidad absoluta.

Las curvas de la figura 21 ponen en evidencia un comportamiento peculiar del flujo que consiste en el corrimiento del máximo local de la velocidad radial por perfil de velocidad, este desplazamiento va de derecha a izquierda, o con respecto al ventilador, va desde las cercanías de la descarga del ventilador alejándose radialmente de éste.

El hecho antes descrito coincide con la posición del chorro

visualizado en la figura 19, confirmando la presencia de un chorro cuasi-radial, al mantenerse el máximo local de la velocidad radial sobre una línea diagonal que pasa por el centro del ventilador.

El máximo de la velocidad radial encontrado radialmente correspondió a 5.0 m/s, el cual representó la mayor velocidad registrada en todo el proceso de medición.

En la figura 22 se puede apreciar una representación tridimensional de la velocidad tangencial en la zona 3, visualizándose el chorro cuasi-radial, dirigido según la diagonal de la zona 3.

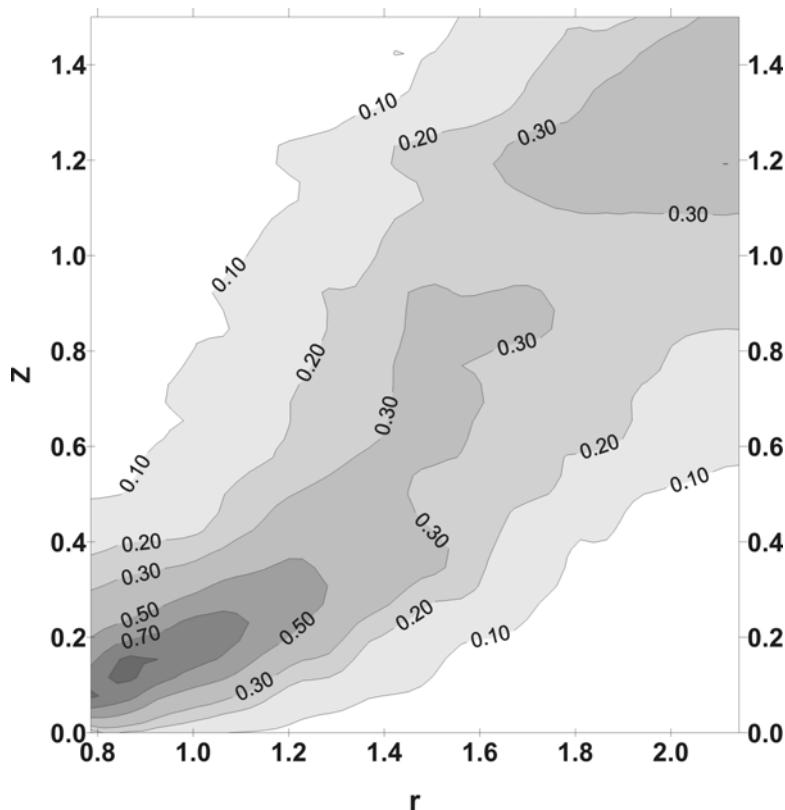


Figura 19. Contornos de velocidad radial adimensional $V_r = \text{cte}$ en la zona 3.

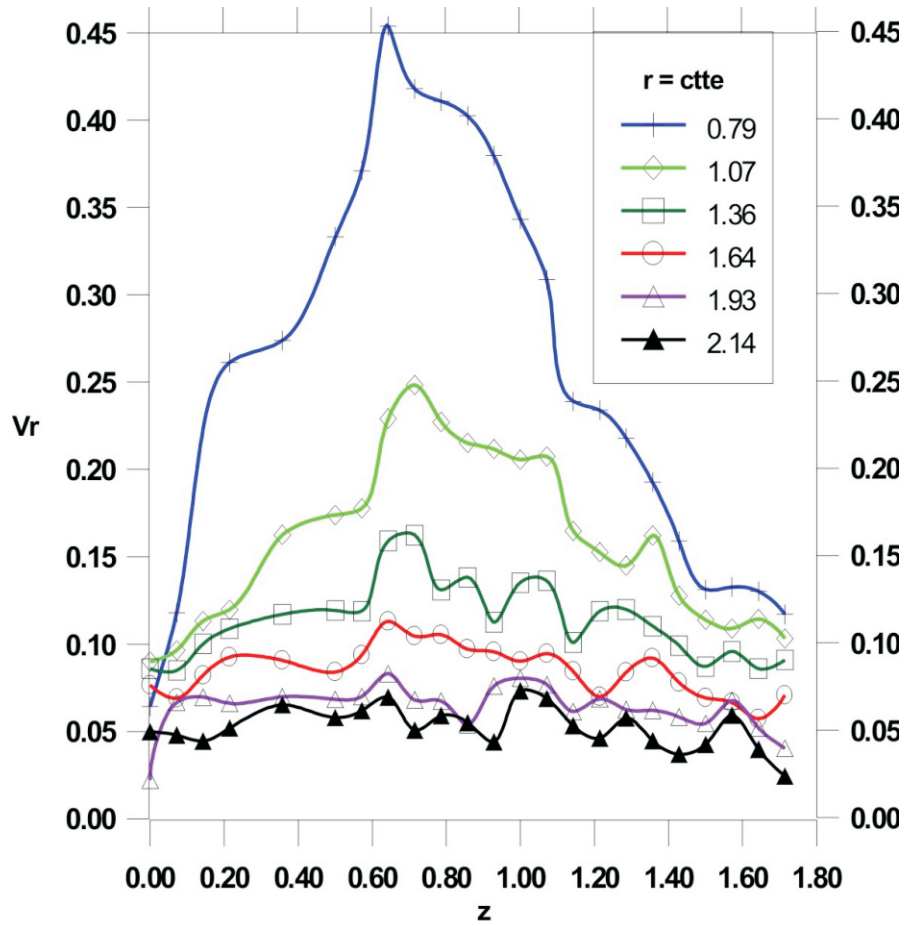


Figura 20. Velocidad radial adimensional vs. Z sobre la zona 1, parametrizada según $r=ctte$.

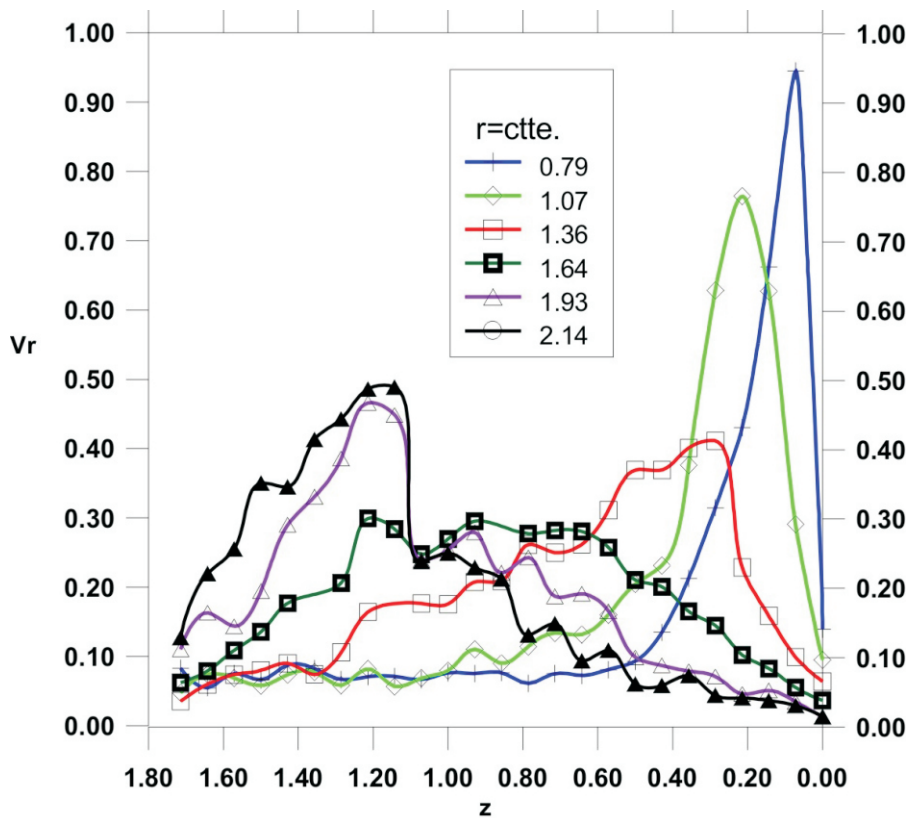


Figura 21. Velocidad radial adimensional vs. Z en la zona 3, parametrizada según $r=ctte$.

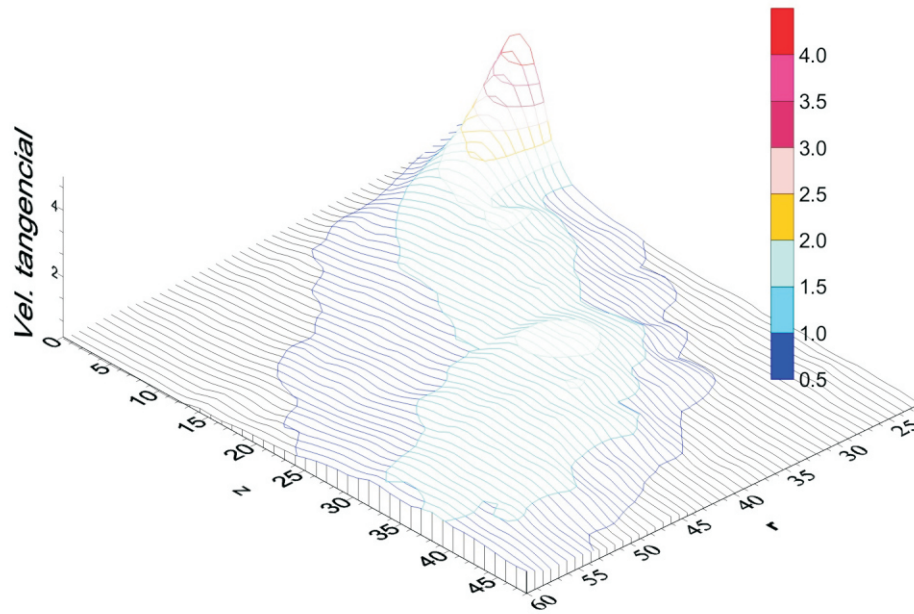


Figura 22. Representación 3-D de la velocidad tangencial en el plano derecho (zona 3).

El mayor valor de las velocidades se registró en la componente radial sobre el plano derecho, llegando a ser de hasta 5 m/s.

CONCLUSIONES

El estudio experimental realizado permite formular las siguientes conclusiones:

Las graficas bidimensionales de cada una de las tres componentes de la velocidad permitieron cuantificar e ilustrar el comportamiento del flujo alrededor del ventilador estudiado.

Las curvas de isovelocidad ofrecen información adicional sobre la distribución tridimensional de las velocidades y ayudan en la definición de la estructura cinemática de los flujos analizados.

Existencia de un chorro cuasi-radial de carácter tridimensional del lado derecho del ventilador centrifugo de confort.

Presencia marcada de un torbellino en el lado izquierdo, por motivo de la recirculación entre la descarga y la succión del rotor del ventilador.

El perfil de la velocidad axial a la succión es aproximadamente simétrico.

El chorro cuasi-radial de descarga tiene un marcado carácter rotacional.

REFERENCIAS

- HESSAMI AZIZI, M. H., MONTAZERIN, N., AND DAMANGIR, A. (2005). A combined noise-Laser Doppler velocimetry study of the squirrel-cage fan. *Journal Mechanical Engineering*, Trans. ISME, 6(1), 5-17.
- HOWARD J. & LENNEMANN E. (1971). Measured and predicted secondary flows in a centrifugal impeller. *Journal of Engineering for Power*, ASME, p126.
- HOWARD J., MCDONALD G. & LENNEMANN, E. (1971). Measured and predicted flow near the exit of a radial-flow impeller. *Journal of Engineering for Power*, ASME, p 441.
- KJÖRK A. & LÖFDAHL, L. (1989). Hot-wire measurements inside a centrifugal fan impeller. *Journal of Fluids Engineering*, ASME, vol. 111, p. 363.
- LITVAL, E. & PRESZLER, L. (1969). The velocity profile of a turbulent boundary layer on the blading of radial impellers. *Proceeding of the third conference on Fluid Mechanics and Fluid Machinery*, Budapest p. 348.
- MARVAL J.P. (1999). Evaluación aerodinámica de un ventilador centrifugo de confort. Tesis de maestría. Tutor: Prof. S. Zarea. Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela.
- PETERSSON P., LARSON M. & JÖNSSON, L. (1996). Measurement of the velocity field downstream of an impeller. *Journal of Fluids Engineering*, ASME, vol. 118(9), pp 602-610.
- RAJ D. & SWIN W. (1981). Measurements of the mean flow velocity fluctuations at the exit of an FC centrifugal fan

rotor. *Journal of Engineering for Power*, ASME, 103(1), pp 393-399.

VELARDE-SUAREZ, S., BALLASTEROS-TAJADURA, R., SANTOLARIA-MORROS, C., AND GONZALEZ-PEREZ, J. (2001). Unsteady flow pattern characteristics downstream of a forward curved blades centrifugal fans. *Journal of Fluids Engineering*, 123, 265-270.

ZAREA S. & MARVAL J.P. (2004). Visualización del flujo absoluto en el exterior de un ventilador centrifugo de confort. *Revista de la Facultad de Ingeniería (UCV, Caracas)*, 19(1); pp 65-77.