Patrones de Flujo en un Sistema de Separación Ciclónico

José A. Jiménez, Claudia del C. Gutiérrez, Juan G. Barbosa, Luis A. Moreno

Instituto Politécnico Nacional, LABINTHAP-SEPI-ESIME, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Edificio 5, 3er. Piso, Col. Lindavista, 07738, México D.F.-México (e-mail: jjimenezb@ipn.mx)

Resumen

Se llevó a cabo la visualización de los patrones de flujo dentro de un separador tipo ciclón a diferentes condiciones ($Re=123720$ y 23860) para determinar la influencia de la velocidad de entrada del gas en el ciclón sobre dichos patrones. Para tal efecto, partículas de humo fueron inyectadas a la corriente de aire entrando a un ciclón construido de acrílico, dichas partículas fueron iluminadas con una luz láser y fotografiadas utilizando una cámara CCD con el fin de visualizar las estructuras turbulentas formadas dentro del ciclón. A partir de estas imágenes se realizó un análisis cualitativo y cuantitativo del cambio en el tamaño de las estructuras turbulentas al modificarse el número de Reynolds, encontrándose que al aumentar el número de Reynolds el tamaño de las estructuras observadas se reduce, modificando los patrones de flujo encontrados en el interior de los separadores ciclónicos.

Palabras Clave: ciclones, patrones de flujo, separación de partículas, optimización

Flow Patterns in a Cyclonic Separation System

Abstract

A visualization of the flow patterns within a cyclone separator was carried out. This visualization was performed under different conditions ($Re=123720$ y $Re=23860$) to determine the influence of cyclone inlet gas velocity on the flow patterns. Smoke particles were injected into the gas stream entering a cyclone built using cast acrylic. The smoke particles were illuminated using a laser light and images were taken using a CCD camera to visualize turbulent structures formed within the cyclone. From these images, qualitative and quantitative analyses of the changes in turbulent structure size were performed. It was found that as Reynolds number increases, turbulent structure size is reduced, modifying the flow patterns within a cyclone separator.

Keywords: cyclones, flow patterns, particle separation, optimization

INTRODUCCIÓN

Los separadores tipo ciclón son equipos ampliamente utilizados para control de la contaminación del aire, separación de sólidos y gases, muestreo de aerosoles y control de emisiones para aplicaciones industriales (Zhao et al., 2004). Estos equipos también son utilizados para muestreo selectivo de la calidad del aire en función del tamaño de las partículas suspendidas en el ambiente y que son capturadas por los mismos en lugares de trabajo, y en lugares cerrados en general (Kenny y Gussman, 2000).

El principio de operación de los separadores tipo ciclón es el siguiente: la mezcla gas-sólido entra por la sección superior del dispositivo. Entonces, el cuerpo cilíndrico induce un patrón de flujo giratorio en forma de vórtice descendente para la mezcla gas-sólido. La fuerza centrífuga separa el polvo de la corriente de gas. Las partículas viajan hacia las paredes del cilindro y se deslizan por la sección cónica hasta la salida de polvo, mientras que el gas sale a través del buscador de vórtices (Altmayer et al., 2004). Se han realizado varios trabajos de investigación con el fin de mejorar la eficiencia de separación del ciclón. Hoffman et al. (2001), investigaron los efectos de incrementar la longitud del segmento cilíndrico en el ciclón. Se encontró que la eficiencia mejoró hasta un cierto límite, pero el efecto más importante es la disminución en la caída de presión originada en el ciclón. Otro enfoque fue utilizado por Ravi et al. (2000), quienes utilizaron un algoritmo genético para optimizar separadores ciclones. Se buscó la maximización de la caída de presión, la cual no es una característica deseable en estos equipos, usando una combinación de nueve variables de decisión. Las soluciones obtenidas contribuyen a descartar condiciones de operación y diseño en la operación de ciclones, las cuales generarían resultados muy por debajo de condiciones óptimas de operación para los mismos.

Otros estudios como el de Gorton-Hülgerth et al. (2000), se enfocaron en los campos de flujo de las fases gaseosas y sólidas dentro de los ciclones usando un diagnóstico óptico de anemometría de láser Doppler. Ese trabajo se enfoca en una sección transversal vertical entre el buscador de vórtices y la pared del cilindro. Los resultados mostraron que el buscador de vórtices puede acortarse sin que se deteriore la eficiencia de separación. Por su parte, Hoekstra et al. (1999), llevaron a cabo un estudio experimental y numérico del flujo turbulento en forma de remolino en los ciclones. Se llevaron a cabo mediciones utilizando LDV de las velocidades axial y tangencial del gas en el ciclón, lo cual mostró que el campo de flujo del gas es altamente afectado los diámetros del tubo de salida o del buscador de vórtices. La disminución en el diámetro del tubo de salida resulta en una reducción del tamaño del vórtice central y un considerable incremento en la velocidad tangencial máxima. En el mismo estudio se compararon tres modelos de turbulencia utilizados en la simulación numérica para recrear el flujo en forma de torbellino dentro de los ciclones. Se encontró que con el modelo de transporte de esfuerzos de Reynolds (Reynolds stress transport model) se obtuvieron los mejores resultados, es decir los más cercanos a los datos experimentales. En una investigación posterior Peng et al. (2005), estudiaron la naturaleza del extremo del vórtice (punto donde el vórtice cambia de sentido en la dirección axial) en ciclones. Una luz estroboscópica y medidores de presión con alta resolución en el tiempo fueron utilizados para tal efecto. Se encontró que el vórtice central presenta una ligera inclinación hacia la pared del separador. Una relación entre la frecuencia de giro del vórtice con respecto al flujo de gas fue también encontrada.

Por otra parte Wang et al., (2006), aplicaron el modelo de los esfuerzos de Reynolds para simular numéricamente la turbulencia en el flujo de gas en el interior de un ciclón. Se encontró que existe un choque entre dos corrientes de gas dentro de un ciclón, una de ellas está formada por el gas y las partículas que han descrito una trayectoria circular (una vuelta) dentro del cuerpo del ciclón y la otra es la corriente de gas entrante. Este choque se produce cerca de la unión entre el ducto de entrada y el cuerpo del ciclón y produce una corriente de "corto circuito" dentro del separador. Además, se observó que una partícula que exceda un "diámetro crítico", el cual depende de la geometría del ciclón y de las condiciones de flujo, puede quedar suspendida en la pared de la sección cónica, lo cual puede conducir a incrustaciones en la superficie interior del ciclón. Posteriormente Qian et al. (2007), llevaron a cabo una simulación numérica para evaluar los efectos de la concentración de partículas a la entrada del ciclón. En este trabajo, se consideró a partículas de diferentes tamaños como fases distintas y se utilizó un coeficiente de colisión obtenido experimentalmente para

considerar la interacción entre las partículas. De los resultados obtenidos en la simulación se observó que las concentraciones más altas de partículas producen aglomeración entre las mismas.

La influencia de una contracción en la parte inferior del tubo de salida del gas limpio de un separador ciclón fue estudiado por Chen et al. (2007). Dicha contracción es generada añadiendo al extremo inferior de dicho tubo un borde angulado. Los resultados indican que la velocidad del gas a la entrada del ciclón tienen una gran influencia sobre la eficiencia de separación y la caída de presión, lo cual coincide con resultados experimentales obtenidos en un ciclón convencional en donde tanto la eficiencia como la caída de presión se incrementan con una mayor velocidad del gas. En el caso de la eficiencia de separación se observó primero un incremento y después una disminución al incrementar la longitud del tubo de salida del gas dentro del ciclón. Sin embargo, no existe una tendencia clara del efecto de la longitud del tubo de salida sobre la caída de presión. Otra observación fue que tanto la eficiencia de separación como la caída de presión cambian al cambiar la orientación del borde angulado y ambos parámetros tienen su máximo a 90° y su mínimo a 270°. Además, Brennan et al. (2007), utilizaron simulación numérica para predecir la clasificación y distribución de partículas de granito dentro de un ciclón utilizando Fluent™. Estos resultados presentan una buena predicción de la curva de eficiencia del ciclón y sugieren que este tipo de simulaciones presentan una buena alternativa en el diseño de estos equipos.

La visualización presentada en este trabajo tiene como objetivo la búsqueda de información acerca de los efectos de la velocidad de entrada en los patrones de flujo en el interior de un separador ciclón, con el fin de lograr un mejor entendimiento del proceso de separación que se lleva a cabo en el interior de dichos equipos.

METODOLOGÍA

La metodología aplicada en la visualización de los patrones de flujo en la sección de prueba seleccionada es presentada a continuación.

Instalación Experimental

El sistema está formado por un ventilador, un conducto transparente de acrílico que conecta la salida del ventilador con la entrada de un separador tipo ciclón, y el separador ciclón transparente construido de acrílico (Figura 1). La salida del ventilador tiene 0.2m de alto y 0.175m de ancho, mientras que la entrada del gas al ciclón tiene 0.125m de alto y 0.053m de ancho. Debido a la diferencia de dimensiones de la salida del ventilador y la entrada del ciclón es necesario utilizar una contracción para conectar ambos elementos del sistema. La contracción fue diseñada de acuerdo a las normas AMCA 210-74, el ángulo de la contracción es de 3.6° y su longitud es de 0.6m. La longitud del ducto después de la contracción es de 1.1m. La inyección de las partículas de humo en el flujo de gas se llevó a cabo utilizando dos perforaciones realizadas al conducto. Una de ellas a 0.115m a partir de la entrada del ciclón y otra a 0.552m a partir de la entrada del ciclón.

El ciclón utilizado en esta investigación tiene entrada tangencial. En la figura 2 se muestra un diagrama de este equipo.

Este ciclón fue construido utilizando acrílico debido a las propiedades ópticas del material. Las dimensiones del ciclón mostrado en la figura 2, son las siguientes (Tabla 1):

Tabla 1: Dimensiones del ciclón

A	0.125 m
B	0.06 m
D _c	0.2 m
D _e	0.1 m
B	0.065 m
S	0.162 m
h	0.32 m
H	0.79 m

Fig. 1: Instalación experimental

Fig. 2: Separador ciclón

La velocidad del aire a la entrada del ciclón fue controlada utilizando un controlador de frecuencia conectado al motor del ventilador, el cual tiene una potencia de 0.75hp. La visualización presentada aquí fue llevada a cabo a 60Hz y 10Hz. Para conocer la velocidad del aire se usó un tubo Pitot tipo L encontrándose que la velocidad del aire a la entrada era aproximadamente 14m/s y 2.7m/s respectivamente.

Las partículas utilizadas en la visualización fueron producidas por un generador de humo marca Dantec 9010D0901. Dichas partículas fueron inyectadas a través de un orificio localizado en la parte superior del ducto antes de la entrada del ciclón. El área de visualización fue iluminada utilizando una hoja de luz verde de 1mm de espesor de longitud de onda de 532nm. La luz fue generada por un láser pulsante Nd-YAG. La hoja de luz láser fue posicionada horizontalmente, paralela a la pared superior del ciclón. La captura de imágenes se llevó a cabo utilizando una cámara CCD Megaplug ES 1.0 que puede capturar hasta 30 imágenes por segundo con una resolución de 1008x1016 pixeles.

Condiciones de Visualización

El área de visualización está localizada a una distancia de 6.25cm de la pared superior del ciclón y el área de visualización se muestra en detalle en la figura 3.

La visualización fue llevada a cabo en dos diferentes condiciones $Re=123720$ y $Re=23860$, calculados usando el diámetro del ciclón como longitud característica. Para ambas condiciones, se capturaron imágenes en pares con un tiempo entre ellas de $10\mu s$, el lapso de grabación de las imágenes fue 10 segundos y la frecuencia de captura fue 10Hz para cada par de imágenes. La producción de humo se mantuvo constante durante todo el experimento, de manera que para ambas condiciones la cantidad de humo inyectado al sistema fue la misma.

Fig. 3: Área de visualización

Medición del tamaño de las estructuras en el flujo

Las condiciones de flujo presentadas en este trabajo se encuentran en régimen turbulento. Tradicionalmente, la visualización de flujo se ha utilizado para obtener información del movimiento de las estructuras turbulentas a gran escala (Pope, 2000). Generalmente, esta información es del tipo cualitativo, aunque puede ser transformada en información cuantitativa del tamaño y comportamiento de los eddies más grandes. En este caso, los resultados de la visualización son utilizados para obtener un estimado del tamaño de los eddies dentro del flujo. Esto es posible ya que el tamaño de las imágenes obtenidas está predeterminada por la cámara utilizada (1008 x 1016 píxeles). Además, las dimensiones físicas del área de visualización son también conocidas (0.015 cm x 0.012 cm). En este caso, se denominan a_1 y a_2 a las dimensiones del área de visualización (a_1 para el ancho del área de visualización y a_2 para el alto de la misma).

Para determinar el tamaño aproximado de las estructuras, se utilizan las imágenes tomadas y cualquier software para la edición de imágenes que nos permita conocer las coordenadas de un punto en píxeles (por ejemplo Paint de Microsoft Windows™). Primero se obtienen las coordenadas para un punto en el primer extremo de la estructura a medir, después se obtienen coordenadas para el punto en el segundo extremo de la misma estructura, trazando una recta imaginaria. Posteriormente, se obtiene la longitud de esta recta imaginaria que une los extremos más lejanos de la estructura analizada para darnos una idea aproximada de su longitud de la siguiente manera:

$$L = \left(L_x^2 + L_y^2 \right)^{\frac{1}{2}} \tag{1}$$

Donde:

$$L_x = \frac{(x_2 - x_1)a_1}{1008} \tag{2}$$

$$L_y = \frac{(y_2 - y_1)a_2}{1016} \tag{3}$$

Teniendo, x_2 y x_1 como las coordenadas en píxeles sobre el eje x de los extremos inicial y final del vórtice, y_2 e y_1 como las coordenadas en píxeles sobre el eje y de los extremos inicial y final del vórtice y para este caso $a_1 = 1.5$ cm y $a_2 = 1.2$ cm.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las figuras 4, 5, 6 y 7 muestran las imágenes tomadas en el plano radial-tangencial a los tiempos $t = 0$, $t = 0.5s$, $t = 1s$ y $t = 1.5s$ respectivamente para $Re = 23860$. En todas las imágenes el flujo va de izquierda a derecha y se tiene la misma orientación del área de visualización, la parte inferior de la imagen está cercana al tubo central (buscador de vórtices) y la parte superior de la imagen está más cerca de la pared del ciclón. En esta secuencia de imágenes, es posible observar la evolución de los patrones de flujo que son mostrados en el área de visualización. Sin embargo, a partir de la observación directa de las imágenes también puede notarse que el tamaño de las estructuras observadas en las figuras 4, 5, 6 y 7 es aproximadamente el mismo.

Las figuras 8, 9, 10 y 11 muestran las imágenes tomadas en el plano radial-tangencial a $t = 0$, $t = 0.5s$, $t = 1s$ y $t = 1.5s$ respectivamente para $Re = 123720$.

En ambos casos, las estructuras de flujo pueden ser observadas. Sin embargo, es claro que para las imágenes tomadas a $Re = 23860$ la concentración de humo es mayor y las estructuras observadas son más grandes. Por otra parte, para las imágenes tomadas a $Re = 123720$, la concentración de humo en el área de visualización es visiblemente menor comparada con el caso previo. En este caso, las estructuras que pueden distinguirse son más pequeñas. Esto era esperado puesto que existe una diferencia significativa en el número de Reynolds entre ambas condiciones. Sin embargo, para poder cuantificar la diferencia entre las estructuras observadas en ambas condiciones de flujo se utilizó la técnica descrita previamente para medir de manera aproximada el tamaño de las estructuras encontradas en ambas condiciones, llegando a los resultados mostrados en la tabla 2.

Fig. 4: Visualización a $t=0$ s para $Re = 23860$

Fig. 5: Visualización a $t=0.5$ s para $Re = 23860$

Fig. 6: Visualización a $t=1$ s para $Re = 23860$

Fig. 7: Visualización a $t=1.5$ s para $Re = 23860$

Fig. 8: Visualización a $t=0$ s para $Re = 123720$

Fig. 9: Visualización a $t=0.5$ s para $Re = 123720$

A partir de los resultados mostrados en la tabla 2, puede observarse claramente que existe una diferencia notable en el tamaño de las estructuras turbulentas encontradas en el área de visualización seleccionada. El hecho de que al aumentar el número de Reynolds disminuya el tamaño de dichas estructuras concuerda con el hecho de que a medida que la turbulencia se incrementa en un flujo, la escala de longitud disipativa dentro de él disminuyen su tamaño; por lo que resulta lógico que también las estructuras mayores dentro del flujo modifiquen su tamaño, mostrando una disminución a medida que el número de Reynolds se incrementa.

Fig. 10: Visualización a t=1 s para Re = 123720

Fig. 11: Visualización a t=1.5 s para Re = 123720

Tabla 2: Dimensiones de las estructuras turbulentas

t [s]	L [m]	
	Re = 23860	Re = 123720
0	3.41×10^{-3}	2.34×10^{-3}
0.5	3.51×10^{-3}	2.62×10^{-3}
1	4.09×10^{-3}	2.47×10^{-3}
1.5	4.53×10^{-3}	2.51×10^{-3}

CONCLUSIONES

Se utilizó una técnica relativamente simple para obtener un tamaño aproximado de las estructuras turbulentas encontradas dentro del flujo que consiste en medir la distancia entre los extremos más lejanos entre sí de la estructura a analizar aprovechando las características de las imágenes obtenidas.

Los resultados obtenidos muestran un cambio significativo en el tamaño de las estructuras al incrementarse el número de Reynolds, lo cual es congruente con la modificación del tamaño de las escalas de longitud en el flujo al incrementarse la turbulencia.

La técnica utilizada para cuantificar los cambios en los patrones de flujo (tamaño de las estructuras turbulentas) utilizada en este trabajo es simple y aprovecha las características de los instrumentos utilizados en la visualización de dichos patrones, mientras que al mismo tiempo permite no sólo obtener información cualitativa de los patrones de flujo a través de la observación de las imágenes, sino también información cuantitativa (dimensiones aproximadas de las estructuras turbulentas) en un mismo proceso.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por su apoyo para esta investigación.

NOMENCLATURA

- a Altura de la sección transversal de la entrada [m]
- a₁ Ancho del área de visualización [m]
- a₂ Alto del área de visualización [m]
- b Ancho de la sección transversal de la entrada [m]
- D_c Diámetro del ciclón [m]
- D_e Diámetro de la salida del gas[m]
- B Diámetro de la salida de las partículas [m]
- S Longitud del buscador de vórtices [m]
- h Longitud del cilindro [m]

H	Longitud del ciclón [m]
L	Longitud entre los puntos más alejados de una estructura turbulenta [m]
L_x	Proyección sobre el eje x de la distancia entre los puntos más alejados de una estructura turbulenta [m]
L_y	Proyección sobre el eje y de la distancia entre los puntos más alejados de una estructura turbulenta [m]
V	Velocidad de entrada del aire [m/s]
x_1	Posición inicial en el eje x [píxeles]
x_2	Posición final en el eje x [píxeles]
y_1	Posición inicial en el eje y [píxeles]
y_2	Posición final en el eje x [píxeles]
ρ_g	Densidad del gas [kg/m ³]
μ	Viscosidad del gas [kg/m s]
Re	Número de Reynolds $\frac{D_c \rho_g V}{\mu}$

REFERENCIAS

- Altmayer, S. y otros seis autores; *Comparison of different models of cyclone prediction performance for various operating conditions using a general software*, Chemical Engineering and Processing, 43(4), 511-522 (2004).
- Brennan, M.S., M. Narashima y P.N. Holtman; *Multiphase modeling of hydrocyclones, prediction of cut size*, Minerals Engineering, 20(4), 395-406 (2007).
- Chen, J., X. Lu, H. Liu y C. Yang; *Effect of the bottom contracted and edge sloped vent-pipe on the cyclone separator performance*, Chemical Engineering Journal, 129(3), 85-90 (2007).
- Gorton-Hülgerth, A., J. Woisetschläger, G. Wigley y G. Staudinger; *Investigation of the flow field in the upper part of a cyclone with laser and phase Doppler anemometry*, Part. Syst. Charact., 17(1), 21-27 (2000).
- Hoekstra, A.J., J.J. Derksen y H.E.A. Van Den Akker; *An Experimental and Numerical Study of Turbulent Swirling Flow in Gas Cyclones*, Chemical Engineering Science, 54(13), 2055-2065 (1999).
- Hoffmann, A.C. y otros cuatro autores; *Advantages and risks in increasing cyclone separator length*, AIChE Journal, 47(11), 2452-2460 (2001).
- Kenny, L.C. y R.A. Gussman; *A direct approach to the design of cyclones for aerosol-monitoring applications*, J. Aerosol Sci., 31(12), 1407-1420 (2000).
- Peng, W. y otros cuatro autores; *Experimental study of the vortex end in centrifugal separators: The nature of the vortex end*, Chemical Engineering Science, 60(24), 6919-6928 (2005).
- Pope, S.B.; *Turbulent Flows*, 1ª edición, 197-199,. Cambridge University Press, Cambridge, Inglaterra (2000).
- Quian F., Z. Huang, G. Chen y M. Zhang; *Numerical study of the separation characteristics in a cyclone of different inlet particle concentrations*, Computers and Chemical Engineering, 31(9), 1111-1122 (2007).
- Ravi, G., S.K. Gupta y M.B. Ray; *Multiobjective optimization of cyclone separators using genetic algorithm*, Ind. Eng. Chem. Res., 39(11), 4272-4286 (2000).
- Wang, B., D.L. Xu, K.W. Chu y A.B. Yu; *Numerical Study of gas-solid flow in a cyclone separator*, Applied Mathematical Modeling, 30(11), 1326-1342 (2006).
- Zhao, B., H. Shen y Y. Kang; *Development of a symmetrical spiral inlet to improve cyclone separation performance*, Powder Technology, 145(1), 47-50 (2004).