

# Estudio de los parámetros que afectan la eficiencia de separación de los separadores tipo ciclón

Claudia del C. Gutiérrez-Torres  
Juan G. Barbosa-Saldaña  
José A. Jiménez-Bernal  
Pedro Quinto-Diez

Sección de Estudios de Posgrado e Investigación (SEPI),  
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME)  
Instituto Politécnico Nacional (IPN)  
Unidad Profesional Adolfo López Mateos  
Edif. 5, 3er. Piso LABINTHAP,  
Col. Lindavista, CP 07738, México, DF.  
MÉXICO.

Recibido el 25 de octubre de 2004; aceptado el 22 de mayo de 2005.

## 1. Resumen

En este trabajo se presenta un estudio de la influencia de cuatro parámetros que intervienen en la eficiencia de separación de un ciclón con entrada tangencial. Se consideran los efectos de algunas propiedades del gas y de las partículas a separar, así como los efectos de algunas dimensiones geométricas de los ciclones. El estudio paramétrico se lleva a cabo utilizando un modelo matemático propuesto anteriormente por los autores, previamente comparado con resultados experimentales mostrando un buen desempeño en la predicción de la eficiencia de separación de estos equipos.

## 2. Abstract (Study of the Parameters Affecting Cyclone Separation Efficiency)

A study of the influence of four affecting parameters on the cyclone separation efficiency is presented in this work. Some gas and particle properties, as well as some geometric dimensions are taken into account. The parametric study was carried out using a mathematical model previously proposed by the authors. This model was compared with experimental results, showing a good agreement between separation efficiency predictions and experiments.

## 3. Introducción

Los separadores tipo ciclón, también conocidos simplemente como «ciclones» son probablemente los equipos más usados en el mundo para capturar partículas [1].

Los ciclones son mayormente usados para remover polvo o partículas sólidas del aire u otros gases. Estos equipos son principalmente utilizados en la industria en procesos de separación de sólidos de corrientes de gas.

Las principales ventajas de los ciclones son: bajo costo de operación (al no poseer partes móviles, los costos de mantenimiento son mínimos), simplicidad en su construcción y capacidad de operar a altas temperaturas y presiones [2].

Tradicionalmente, los ciclones se han usado en la industria para capturar partículas relativamente grandes ( $d_p > 10 \mu\text{m}$ ) [3]. Sin embargo, estos equipos también pueden usarse para capturar partículas con diámetros de 10, 2.5 e incluso  $1 \mu\text{m}$ , modificando sus dimensiones. Esto permite usarlos en tareas de monitoreo ambiental de partículas [4].

La amplia utilización de estos equipos crea la necesidad de contar con modelos matemáticos para evaluar su operación así como de contar con metodologías simples y efectivas para su diseño basadas en la influencia del flujo y de la configuración geométrica de estos equipos.

Sin embargo, los primeros modelos presentados para predecir la eficiencia de estos equipos fueron basados en simplificaciones que no incluían todos los parámetros que afectan su funcionamiento.

De igual manera, las metodologías de diseño de estos separadores estaban principalmente basadas en relaciones empíricas de las diferentes dimensiones del ciclón con respecto al diámetro del mismo.

Por lo anterior, el desarrollo de un modelo matemático para la evaluación del funcionamiento de los ciclones y el análisis del efecto que algunos parámetros del funcionamiento de

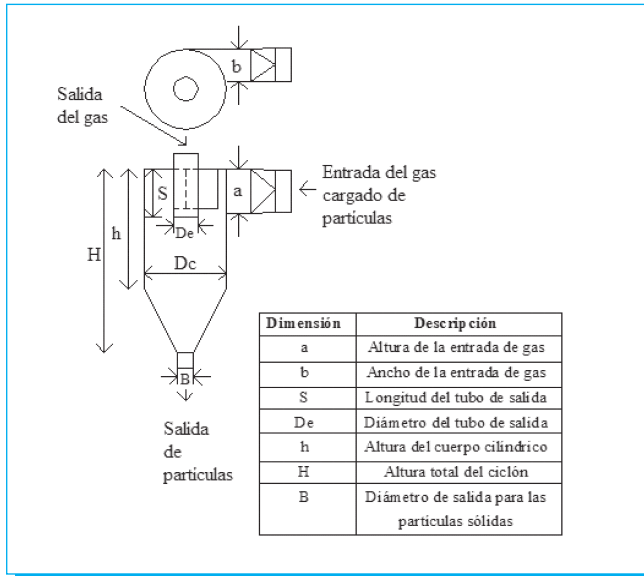


Fig. 1 Ciclón típico con entrada de gas tangencial.

los mismos tienen en su eficiencia son presentados en este trabajo.

#### 4. Desarrollo

##### 4.1 Geometría y parámetros de evaluación de los ciclones

Aunque los ciclones pueden tener la entrada de gas en forma tangencial o radial, los de entrada tangencial son utilizados con más frecuencia. Este tipo de ciclón consta de un cuerpo cilíndrico vertical, una sección cónica inferior, una entrada tangencial y una salida superior compuesta por un tubo que penetra en el cuerpo cilíndrico. La salida de las partículas sólidas se hace por el fondo cónico. La porción del tubo de salida que se encuentra en el interior del cuerpo cilíndrico, se conoce como «buscador de remolinos» o «buscador de vórtices», el cual evita que la corriente de gas de alimentación entre directamente a la salida[5]. En la figura 1, se muestra el diagrama de un ciclón típico con entrada tangencial.

Para el diseño de estos equipos, diferentes configuraciones geométricas han sido propuestas. En todos los casos, se toma como longitud característica del equipo al diámetro del cuerpo cilíndrico principal y el resto de las dimensiones se obtiene a partir de relaciones empíricas o semiempíricas de las dimensiones restantes del ciclón con respecto al diámetro del mismo ( $D_c$ ). En la tabla 1 se muestran algunas de las configuraciones geométricas utilizadas para el diseño de los ciclones.

Tabla 1 [6].

| Relación      | Lapple (1939) | Stairmand (1951) | Swift (1969) |
|---------------|---------------|------------------|--------------|
| $K_a = a/D_c$ | 0.5           | 0.5              | 0.44         |
| $K_b = b/D_c$ | 0.25          | 0.2              | 0.21         |
| $S/D_c$       | 0.625         | 0.5              | 0.5          |
| $D_e/D_c$     | 0.5           | 0.5              | 0.4          |
| $h/D_c$       | 2.0           | 1.5              | 1.4          |
| $H/D_c$       | 4.0           | 4.0              | 3.9          |
| $B/D_c$       | 0.25          | 0.375            | 0.4          |

Los parámetros usados en la evaluación del comportamiento de un ciclón son: diámetro de corte ( $D_{50}$ ), eficiencia de separación ( $\eta_{(D_p)}$ ) y caída de presión a través del mismo ( $\Delta_p$ ).

El diámetro de corte se define como el diámetro de partícula para el cual se tiene un 50% de eficiencia de separación[7].

La eficiencia de separación de un ciclón ( $\eta_{(D_p)}$ ) se define como la fracción del peso o porcentaje de cada tamaño de partícula, que puede ser finalmente capturada por el ciclón [5].

La caída de presión a través del ciclón está compuesta principalmente por tres componentes: la caída de presión en el ducto de entrada al dispositivo, la caída de presión dentro del mismo y la caída de presión provocada por el ducto de salida del gas.

##### 4.2 Modelos matemáticos propuestos

Se proponen dos modelos matemáticos (GQJ) para la evaluación del comportamiento de los ciclones, uno para la eficiencia de separación  $\eta_{(D_p)}$  y otro para el diámetro de corte  $D_{50}$  mostrados respectivamente en las ecuaciones (1) y (2).

$$\eta_{(D_p)} = \frac{N\pi(\psi D_p)^2(\rho_p - \rho)V_c}{9\mu K_b D_c} \quad (1)$$

$$D_{50} = \sqrt{\frac{4.5\mu K_b D_c}{N\pi(\psi)^2(\rho_p - \rho)}} \quad (2)$$

Donde  $\mu$  es la viscosidad dinámica del gas,  $\psi$  es un factor de proporcionalidad propio de la geometría de la partícula,  $\rho$  es la densidad del gas,  $\rho_p$  es la densidad de las partículas,  $V_c$  es la velocidad del gas a la entrada del ciclón y  $N$  es el número de vueltas completas que da el gas a través del ciclón en el

vórtice externo transportando a las partículas con la finalidad de que éstas se impacten contra la pared del ciclón y puede calcularse a partir de la ecuación (3).

$$N = \frac{H + h}{2a} \quad (3)$$

El desarrollo de ambos modelos se basa en la suposición de equilibrio en la dirección radial de la partícula a separar de la corriente de gas dentro del ciclón en un instante dado y considera que las fuerzas más importantes actuando sobre la partícula son la fuerza centrífuga y la fuerza de arrastre [8].

El parámetro  $\psi$  es la relación entre el diámetro equivalente y el diámetro de la partícula. El procedimiento para obtener este diámetro se muestra a continuación [8].

$$V_{esf} = \frac{\pi}{6} \quad (4)$$

Asumiendo que el volumen de la esfera es igual al volumen de la partícula analizada ( $V_{esf} = V_p$ ), entonces

$$V_p = \frac{\pi}{6} D_{eq}^3 \quad (5)$$

Despejando  $D_{eq}$ , se tiene

$$D_{eq} = \left( \frac{6V_p}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

Por lo que el cálculo de  $\psi$  sería,

$$\psi = \frac{D_{eq}}{D_p} = \left( \frac{6V_p}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{1}{D_p} \right) \quad (7)$$

En este caso,  $D_p$  es el diámetro de la partícula (la mayor longitud de la misma, en el caso de partículas de geometría irregular),  $D_{eq}$  es el diámetro equivalente de una esfera con el mismo volumen que el de la partícula analizada,  $V_p$  es el volumen de la partícula y  $V_{esf}$  es el volumen de la esfera.

#### 4.2 Efecto de la densidad de la partícula sobre la eficiencia de separación

Para conocer los efectos de los diferentes parámetros en la eficiencia de un ciclón se utilizan las dimensiones de un ciclón con el cual se llevaron a cabo experimentos previamente. Las dimensiones de este equipo se muestran en la tabla 2.

La experimentación se llevó a cabo utilizando partículas de forma irregular (hojuelas) para las cuales se tiene  $\psi = 0.21$ . El gas es aire a temperatura ambiente con una densidad aproxi-

Tabla 2.

| Dimensión            | Longitud (m) |
|----------------------|--------------|
| <i>a</i>             | 0.165        |
| <i>b</i>             | 0.11         |
| <i>S</i>             | 0.195        |
| <i>D<sub>e</sub></i> | 0.16         |
| <i>h</i>             | 0.35         |
| <i>H</i>             | 1.05         |
| <i>B</i>             | 0.18         |

mada de  $1.22 \text{ kg/m}^3$  y una viscosidad dinámica  $\mu = 1.8 \times 10^{-5} \text{ N-s/m}^2$ , las partículas tienen una densidad de  $8250 \text{ kg/m}^3$  y una velocidad del aire a la entrada del ciclón de  $14.9 \text{ m/s}$ .

El  $D_{50}$  medido en el ciclón bajo estas condiciones fue de  $10.91 \mu\text{m}$  y el obtenido utilizando el modelo propuesto para el  $D_{50}$  fue  $11.10 \mu\text{m}$ , el cual es bastante cercano al experimental con un error de  $1.74\%$ . Puesto que el modelo para el cálculo del  $D_{50}$  fue derivado directamente del modelo de eficiencia de separación ( $\eta_{(D_p)}$ ) [8], este último se utiliza para la evaluación de la influencia de los diferentes parámetros analizados sobre la eficiencia de separación del ciclón estudiado.

Para analizar la influencia de la densidad de la partícula sobre la eficiencia de separación, se evalúa la eficiencia de separación del ciclón antes descrito con las condiciones mencionadas para partículas con  $\psi = 0.21$  y diámetro de  $10 \mu\text{m}$  variando la densidad del material del cual están hechas las partículas. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 2.

Como puede observarse en la figura 2, el aumento en la densidad de las partículas a separar resulta benéfico para la efi-

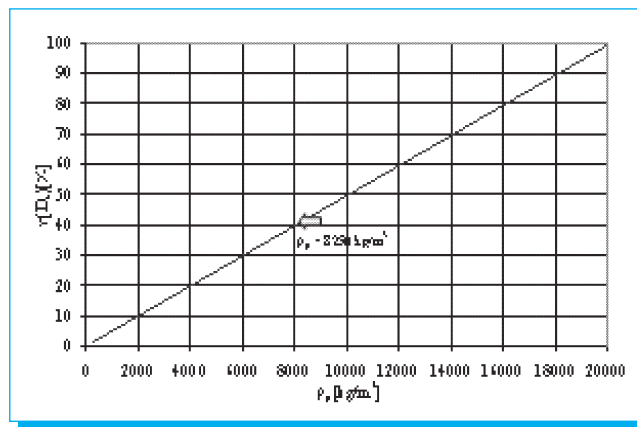
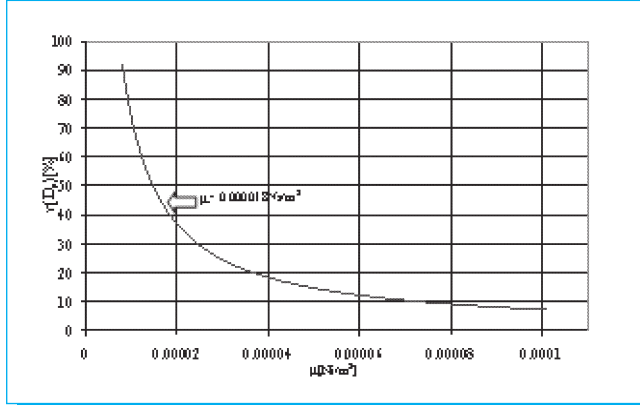


Fig. 2. Variación de la eficiencia de separación con respecto a la densidad de la partícula.



**Fig. 3.** Variación de la eficiencia de separación con respecto a la viscosidad de la partícula.

ciencia de separación del ciclón manteniendo constantes el resto de las variables que influyen la separación.

#### 4.3 Efecto de la viscosidad del gas sobre la eficiencia de separación

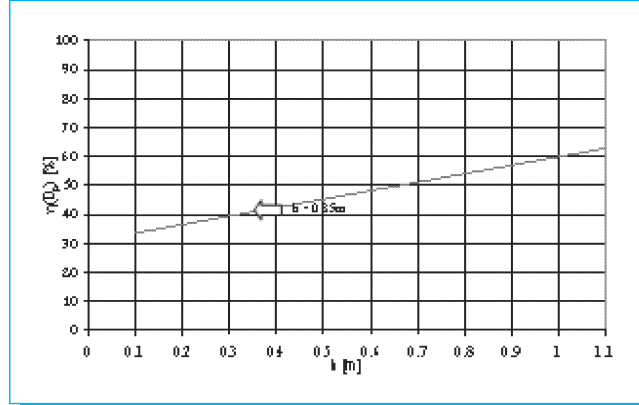
A continuación se analiza la influencia de la viscosidad del gas en la eficiencia de separación. El efecto del cambio en la viscosidad dinámica del gas en la eficiencia de separación del ciclón para las condiciones anteriormente establecidas se presenta en la figura 3.

Al observar la figura 3 se puede notar que el efecto del incremento en la viscosidad del gas es el de una disminución en la eficiencia de separación. Esto está directamente relacionado con la temperatura del gas, por lo que podemos afirmar que un incremento en la temperatura del gas producirá una disminución en la eficiencia de separación del ciclón.

Esto puede explicarse fácilmente relacionando el aumento en la viscosidad del gas con un aumento en el arrastre sobre la partícula. La fuerza de arrastre actúa en la misma dirección pero en sentido contrario a la fuerza centrífuga, por lo que al aumentar la magnitud del arrastre se hace más difícil que la partícula alcance la pared del ciclón y sea capturada.

#### 4.4 Efecto de la altura del cilindro ( $h$ ) en la eficiencia del ciclón

Para tratar de entender el efecto de las dimensiones geométricas del ciclón sobre la eficiencia de separación se presenta el efecto de la variación de la altura del cilindro sobre la eficiencia del ciclón en la figura 4.

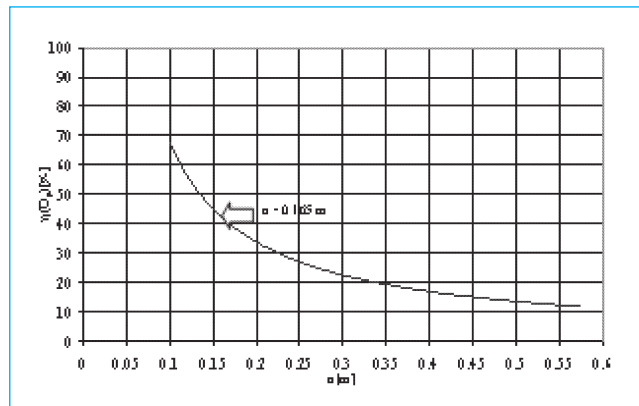


**Fig. 4.** Variación de la eficiencia de separación con respecto a la altura del cilindro en el ciclón.

Se puede observar que el incremento en la altura del cilindro nos produce un incremento en la eficiencia de separación del ciclón. Esto concuerda con los resultados obtenidos por Hoffmann *et al.* en 2001 [9], en los cuales encuentran que el incremento en la altura del cilindro produce un incremento en la eficiencia de separación. Sin embargo, también se reporta haber encontrado un límite para ese incremento después del cual, la eficiencia disminuye en lugar de crecer.

#### 4.5 Efecto de la altura de la entrada del gas ( $a$ ) en la eficiencia de separación

Finalmente, queriendo evaluar el efecto de otro parámetro geométrico se varía la altura de la entrada del ciclón para observar los efectos de esa variación. En la figura 5 se muestran estos efectos.



**Fig. 5.** Variación de la eficiencia de separación con respecto a la altura de la entrada de gas en el ciclón.

Puede observarse que el incremento de la altura de la entrada del gas en el ciclón produce una disminución en la eficiencia de separación del ciclón.

Esto puede explicarse ya que al aumentar la altura de la entrada del gas al ciclón, disminuye la velocidad a la entrada del mismo si se mantiene un caudal constante de gas. Al disminuir la velocidad del gas a la entrada del ciclón disminuirá la velocidad tangencial y, por lo tanto, la fuerza centrífuga dentro del separador, lo cual provoca una disminución de las posibilidades de las partículas de ser proyectadas contra la pared del separador y ser, en consecuencia, capturadas.

## 5. Conclusiones

El análisis paramétrico realizado de la influencia de cuatro variables que intervienen de manera directa en la eficiencia de separación de los ciclones muestra que tanto las propiedades del gas y las partículas a separar como las dimensiones de los separadores tienen un efecto definido sobre la operación de los mismos.

El modelo utilizado para llevar a cabo la evaluación de la influencia de dichos parámetros fue previamente comparado con resultados experimentales obteniendo buenos resultados en la predicción del comportamiento de estos equipos en procesos industriales.

El aumento en la eficiencia de separación del ciclón al incrementarse la densidad de las partículas a separar es un resultado lógico ya que si se tienen partículas con un volumen muy pequeño, un aumento en la densidad del material significa un aumento en la masa de dichas partículas, lo cual se traduce en un aumento en la fuerza centrífuga con la que serán proyectadas hacia la pared del separador, mejorando la eficiencia de separación.

La influencia de la viscosidad del gas en la eficiencia de separación puede fácilmente extrapolarse a la influencia de la temperatura del mismo en la operación de los ciclones, ya que existe una dependencia directa entre la viscosidad de los gases y su temperatura. Por lo anterior, puede afirmarse que un aumento en la temperatura del gas repercutirá en la eficiencia de separación debido al aumento en la fuerza de arrastre ejercida sobre la partícula.

Al analizar dos dimensiones de la geometría del separador, se puede observar que el incremento en la longitud del cilindro aumenta la eficiencia de separación. El aumento en la longitud del cilindro incrementa la longitud del vórtice exterior y con esto se aumentan las probabilidades de que las partículas que no fueron inmediatamente proyectadas contra la pared del ciclón, sean capturadas en un tiempo posterior.

El cambio en el área de la entrada de gas, en este caso ocasionado por el incremento en la altura de dicha entrada, produce una disminución en la velocidad del gas a la entrada del ciclón (para un caudal de gas constante), lo cual repercute directamente en la fuerza centrífuga ejercida sobre las partículas y por ende en la eficiencia de separación del dispositivo.

## 6. Referencias

- [1] Noel De Nevers, *Air Pollution Control Engineering*, 2a ed., McGraw-Hill, 2000.
- [2] S. Altmeyer, V. Mathieu, S. Jullemier, P. Contal, N. Midoux, S. Rode, J. -P. Leclerc, «Comparison of different models of cyclone prediction performance for various operating conditions using a general software», *Chemical Engineering and Processing*, **43**, 2004, pp. 511-522.
- [3] K. Pant, C.T. Crowe, P. Irving, «On the design of miniature cyclones for the collection of bioaerosols», *Powder Technology*, **125**, 2002, pp. 260-265.
- [4] L. C. Kenny, R. A. Gussman, «A direct approach to the design of cyclones for aerosol-monitoring applications», *J. Aerosol Sci.*, Vol. 31, No. 12, pp. 1407-1420, 2000.
- [5] B. A. Wills, *Tecnología de procesamiento de minerales. Tratamiento de menas y recuperación de minerales*, Prentice Hall, 1977.
- [6] Benítez, J., *Process Engineering and Design for Air Pollution Control*, Prentice Hall, 1993.
- [7] Doerschlag C., Miczek G., «How to choose a Cyclone Dust Collector», *Chemical Engineering Magazine*, Febrero 14, 1977.
- [8] Gutiérrez-Torres, C. del C., *Estudio del Comportamiento de un Sistema de Separación de Partículas Metálicas por Medio de Separadores Tipo Ciclón*, Tesis de maestría, 2000.
- [9] Hoffmann, A. C., de Groot, M., Peng, W., Dries, H. W. A., Kater J., «Advantages and risks in increasing cyclone separator length», *AIChE Journal*, Vol. 47, No. 11, pp. 2452-2460, 2001.