

ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DE UN CICLÓN DE ALTA EFICIENCIA A TRAVÉS DE SIMULACIÓN DE FLUJO

Leonel O. Pico y Mirta R. Barbosa

*Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.
Av. Del Valle 5737. (7400) Olavarría, Argentina.
lpico@fio.unicen.edu.ar, <http://www.fio.unicen.edu.ar>*

Palabras Claves: Ciclones de alta eficiencia, Fluidodinámica Computacional (CFD).

Resumen. Los separadores ciclónicos se utilizan con dos finalidades principales: separación de polvo y clasificación de material particulado. Para lograr el primer objetivo se utilizan ciclones convencionales, en tanto que para la clasificación, son más adecuados los ciclones de alta eficiencia. Un parámetro fundamental en estos últimos es el tamaño de corte (x_{50}), definido como el tamaño de partícula para el cual la eficiencia fraccional de separación es del 50 %.

Actualmente, la industria demanda material de partículas finas que se emplean en la fabricación de pigmentos, refuerzos de materiales poliméricos, mezclas asfálticas, elementos de limpieza, industria alimentaria, etc. En este sentido, los ciclones de alta eficiencia presentan un rol importante porque las nuevas tecnologías aplicadas a estos dispositivos han perfeccionado su desempeño manteniendo su relativo bajo costo y fácil mantenimiento.

En las últimas décadas la investigación tecnológica ha enfocado el estudio a través de dos aspectos que se complementan: la experimentación física y la simulación computacional.

El desarrollo de la mecánica computacional ha contribuido notablemente a la optimización del diseño de los ciclones. La información que proporciona la Fluidodinámica Computacional (CFD) permite reducir la cantidad de experiencias requeridas para el diseño. Éstas, a su vez, son de gran importancia para la validación de los modelos establecidos por las simulaciones.

En este trabajo se utiliza la simulación del flujo en el interior del ciclón para analizar el efecto de las variables de operación (temperatura T , velocidad de entrada v_i , concentración de polvo c), sobre el tamaño de corte que se obtiene empleando un ciclón de alta eficiencia, tipo Stairmand.

Los resultados obtenidos permitieron definir una zona v_i/T recomendable para el funcionamiento del ciclón basada en la existencia de dos situaciones limitantes para las condiciones de operación: la diferencia de presiones generada en el dispositivo y el fenómeno de resuspensión de las partículas.

A fin de estudiar el comportamiento del flujo en diferentes condiciones de trabajo, se realizaron simulaciones para un rango de temperaturas entre 20 y 500 °C, velocidades de entrada entre 20 y 97 m/s y concentraciones de polvo entre 2 y 100 g/m³ de aire. Las simulaciones permiten la representación de las curvas de grado de eficiencia (GEC), de las cuales es posible establecer el x_{50} .

Se observa que las GEC y por consiguiente el valor de corte, son de mejor calidad en los casos en que las condiciones de operación corresponden a la zona de trabajo recomendada. Los resultados de las simulaciones muestran buena concordancia con los modelos semiempíricos establecidos en la literatura.

La CFD ha mostrado ser una valiosa alternativa en el estudio de este flujo complejo, permitiendo una sistematización de conocimientos que, hasta el momento, se ha basado fundamentalmente en empirismos.

1 INTRODUCCIÓN

Los separadores ciclónicos son ampliamente usados con dos propósitos principales: separación de polvo y clasificación de material particulado. Los ciclones convencionales son empleados para lograr el primer objetivo, especialmente en el campo del control de polución de aire y separación de polvo. Por su parte, para la clasificación de polvo son más adecuados los ciclones de alta eficiencia (Hoffmann y Stein, 2002).

Los ciclones se han vuelto uno de los aparatos más importantes para la remoción de partículas, debido a su relativa fácil construcción y a que no tienen partes móviles, a los bajos costos de operación y a la buena adaptabilidad para operar a altas temperaturas y presiones. Por otro lado, la industria demanda material particulado fino que se utiliza en la fabricación de pigmentos, en mezclas asfálticas, en limpieza, en industria de la alimentación, etc. Estos materiales son caros debido a que la separación y clasificación a menudo son procesos relativamente sofisticados. En el presente, este aspecto debería ser cubierto por los ciclones de alta eficiencia cuyos desarrollos basados en las nuevas tecnologías permiten la fabricación de equipos de bajo costo relativo y de fácil mantenimiento.

En las décadas recientes, la investigación tecnológica se ha focalizado en dos aspectos complementarios: la experimentación física y la simulación computacional. El desarrollo de la mecánica de fluidos computacional (Computational Fluid Dynamics, CFD) ha contribuido significativamente a la optimización del diseño de ciclones. La información provista por la CFD puede reducir la cantidad de experiencias requeridas por el diseño. Éstas, a su vez, son de gran importancia para la validación del modelo establecido por las simulaciones numéricas (Gimbun et al., 2005; Raoufi et al., 2008; Azadi y Azadi, 2012; Qiu et al., 2012; Tominaga y Stathopoulos, 2012).

El tamaño de corte x_{50} y la curva de grado de eficiencia son dos parámetros importantes que caracterizan la calidad de la separación de los ciclones de alta eficiencia. El x_{50} se define como el tamaño de partícula para el cual la eficiencia es del 50 % (Hoffmann y Stein, 2002).

En este trabajo se utiliza CFD a fin de establecer el efecto de las variables de operación (temperatura, velocidad de entrada y concentración de polvo) sobre el tamaño de corte y la GEC en un ciclón tipo Stairmand (Stairmand, 1951), bajo el control de la caída de presión. Por otra parte los resultados obtenidos a partir de las simulaciones son comparados con el comportamiento predicho por los modelos establecidos en la literatura.

2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

2.1 Geometría del ciclón

La Figura 1 muestra la geometría y las notaciones de las dimensiones del ciclón y la Tabla 1 presenta las relaciones de los parámetros geométricos. En este trabajo se usó un ciclón Stairmand de Alta Eficiencia de 0,20 m de diámetro, cuyo tamaño se muestra en la Tabla 1.

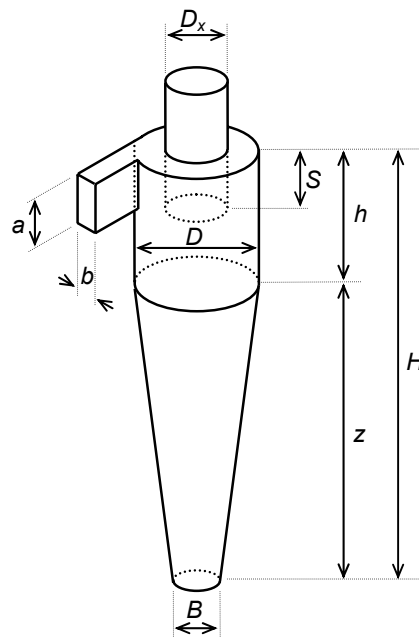


Figura 1: Esquema de un ciclón Stairmand de Alta Eficiencia (HE)

Tabla 1: Características de un ciclón Stairmand HE

Relación geométrica	Stairmand HE
a/D	0,5
b/D	0,2
S/D	0,5
D_x/D	0,5
h/D	1,5
z/D	2,5
H/D	4,0
B/D	0,375

2.2 Patrón de flujo

Por medio de la CFD, las ecuaciones de Reynolds-Navier-Stokes se resolvieron para flujo incompresible en régimen estacionario en ciclones. (Zhao et al., 2006). Es posible utilizar diferentes modelos de turbulencia que han sido investigados por diversos autores (Griffiths y Boysan, 1996; Hoekstra et al., 1999; Hoekstra, 2000; Sommerfeld y Ho, 2003; Bernardo et al., 2006; Chuah et al., 2006; Karagoz y Kaya, 2007; Wan, et al., 2008; Jawarneh et al., 2008; Kaya y Karagoz, 2008; Secchiaroli et al., 2009). Algunos de los modelos son más adecuados que otros para describir el flujo turbulento dentro de los ciclones. Por otro lado, es necesario considerar las posibilidades que brinda cada software y el requerimiento computacional que requiere cada modelo.

La Simulación de Grandes Remolinos (Large Eddy Simulation, LES) es uno de los modelos más utilizados y conocidos para resolver el flujo turbulento no estacionario (Chung, 2002).

Recientemente se han reportado en la literatura muy buenos resultados que muestran la capacidad del modelo LES para capturar las inestabilidades del flujo. (Ranga Dinesh y

Kirkpatrick, 2009). Particularmente en el caso de los separadores ciclónicos, el LES se ha utilizado para representar el flujo interno (Chung, 2002; Delgadillo y Rajamani, 2005; Elsayed y Lacor, 2013).

2.3 Modelos de tamaño de corte

Distintos modelos teórico-experimentales se han usado para evaluar la calidad del x_{50} obtenido de las simulaciones. Los modelos de Barth (Barth, 1956) y de Muschelknautz (Muschelknautz y Krambrock, 1970; Muschelknautz y Trefz, 1990) están basados en la velocidad tangencial en las cercanías de la pared y en la superficie de control CS, que representa aproximadamente la intensidad del flujo en el vórtice interno (Cortés y Gil, 2007).

Ambos modelos incorporan los efectos de la fricción asociados con la rugosidad y con la fricción debida a la carga de sólidos. La expresión del modelo de x_{50} de Barth se obtuvo a partir del balance de todas las fuerzas intervinientes sobre una partícula en la CS, Ec. 1.

$$x_{50} = \sqrt{\frac{9 \mu D_x v_{rCS}}{\rho_p v_{\theta CS}^2}} \quad (1)$$

El modelo de Muschelknautz surgió como continuación de los estudios desarrollados por Barth y conduce a la expresión del tamaño de corte, Ec. 2.

$$x_{50} = x_{fact} \sqrt{\frac{18 \mu 0,9 Q}{2 \pi (\rho_p - \rho) v_{\theta CS}^2 (H - S)}} \quad (2)$$

donde x_{fact} es un factor de corrección, usualmente entre 0,9 y 1,4 (Muschelknautz y Trefz, 1990).

La simulación numérica se desarrolló mediante un software comercial de volúmenes finitos (Fluent®). En este código se divide el dominio del flujo en volúmenes de control. Luego, las ecuaciones de transporte se integran sobre cada volumen de control.

La Figura 2 ilustra el dominio computacional empleado, que consta de grillas desestructuradas de tetraedros y hexaedros. La Tabla 2 muestra las características de la malla utilizada. En las cercanías de las paredes del ciclón se utilizó mayor densidad de mallado para capturar los efectos de capa límite. Se realizaron ensayos numéricos preliminares hasta lograr independencia del tamaño de malla, considerando como criterios de convergencia absolutos del orden de 0,0001, para continuidad y cantidad de movimiento. Las condiciones de borde impuestas a la entrada y a la salida del ciclón fueron “velocity inlet boundary” y “pressure-outlet boundary”, respectivamente.

Tabla 2: Características de la malla

Elementos	Cantidad
Nodos	35896
Caras	224890
Celdas	97512

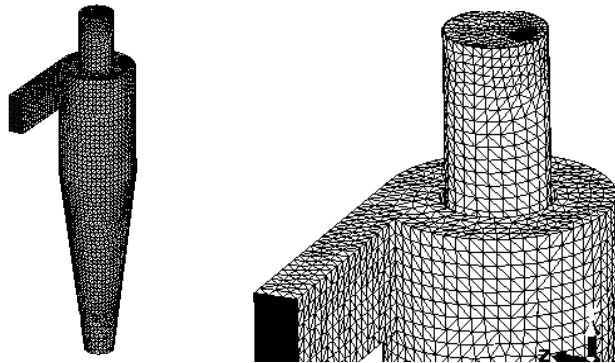


Figura 2: Malla utilizada y detalle de la parte superior del ciclón

Las simulaciones fueron desarrolladas considerando polvo de caliza como fase particulada. Se asumió régimen en estado estacionario para el sistema gas-partícula. La Figura 3 muestra la curva de distribución granulométrica de la caliza utilizada, cuya densidad es 2650 kg/m^3 .

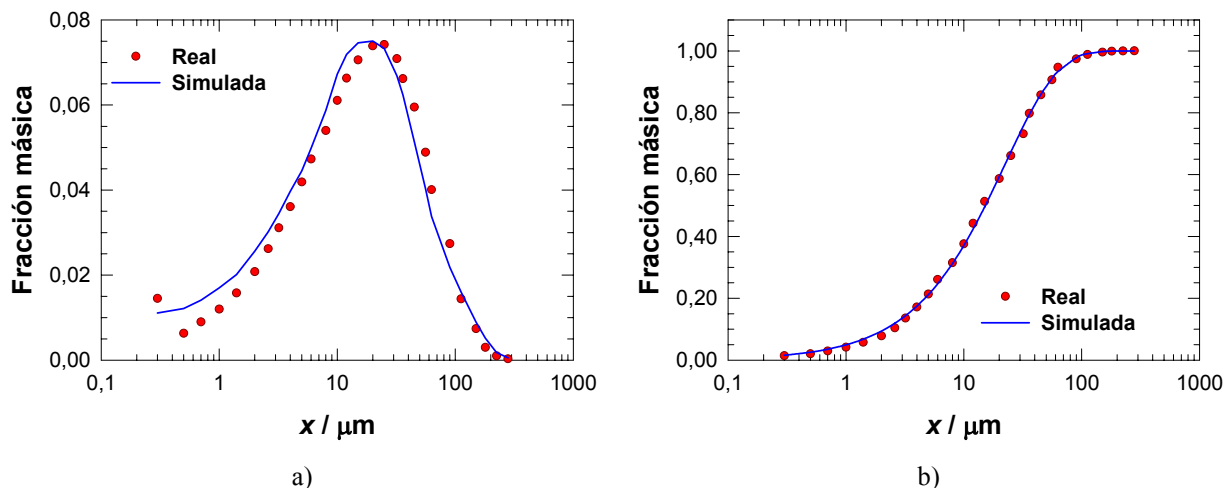


Figura 3: Distribución de partículas: a) Función densidad; b) Función acumulada

Para las simulaciones se utilizó el método "one-way coupling" porque las cargas de partículas utilizadas son bajas y, en consecuencia, los modelos no requieren la consideración de la interacción entre partículas.

Se asumió una distribución de partículas que sigue la ley de Rosin-Rammler Logarítmica, cuyo parámetro de propagación n calibrado es 0,96 y el tamaño medio de partícula x_{med} es $22,3 \mu\text{m}$. Las partículas se inyectaron considerando 36300 grupos de partículas, aproximadamente, distribuidas en 28 tamaños diferentes, desde $0,3 \mu\text{m}$ hasta $280 \mu\text{m}$.

Se consideró una duración total de evento de 4 s, discretizado en 8000 pasos. La inyección de partículas se realizó desde $t = 0,1 \text{ s}$, (en régimen estacionario del fluido) hasta $t = 1,1 \text{ s}$.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La caída de presión puede calcularse usando la Ec. 3 (Qian et al., 2006), que expresa una relación proporcional al cuadrado de la velocidad.

$$\Delta p = \frac{1}{2} \xi \rho v_i^2 \quad (3)$$

La máxima caída de presión admitida se fijó en 2500 Pa. Las temperaturas de operación usadas fueron 20, 100, 180, 250, 400 y 500 °C.

Se simularon distintos escenarios, usando distintas velocidades de entrada para cada temperatura estudiada. El límite impuesto por la caída de presión causa una velocidad límite para cada caso.

Las concentraciones de polvo utilizadas fueron de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 g/m³.

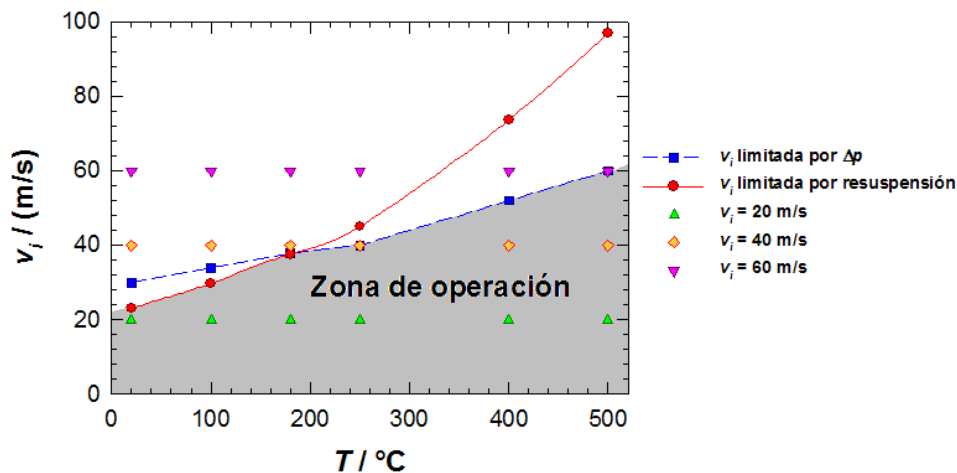


Figura 4: Velocidad de entrada en función de la temperatura

La Figura 4 muestra la dependencia de la velocidad de entrada con la temperatura, teniendo en cuenta la máxima caída de presión admisible.

Cuando la velocidad de entrada es lo suficientemente grande puede ocurrir el efecto de resuspensión de las partículas. Su velocidad correspondiente se denomina velocidad de saltación v_s , y es un parámetro crítico en el diseño de un ciclón. Kalen y Zenz definieron una expresión semi-empírica, Ec. 4, para la velocidad de saltación (Kalen y Zenz, 1974; Chen y Chen, 1995).

$$v_s = \frac{4,913 W \left(\frac{b}{d}\right)^{0,4} D^{0,067} \sqrt[3]{v_i^2}}{\sqrt[3]{1 - \frac{b}{d}}} \quad (4)$$

La velocidad equivalente W depende de las propiedades del fluido y de la partícula, Ec. 5. Las correlaciones experimentales obtenidas por Kalen y Zenz muestran que la máxima eficiencia se obtiene cuando $v_i = 1,25 v_s$. Por otra parte, si $v_i < 1,35 v_s$, la resuspensión no ocurre.

$$W = \left(\frac{4 g \mu (\rho_p - \rho)}{3 \rho^2} \right)^{1/3} \quad (5)$$

En la Tabla 3 se presentan los valores límites para la velocidad de entrada correspondientes para diferentes temperaturas. Los valores de la velocidad se calcularon teniendo en cuenta dos criterios: límite por caída de presión y límite impuesto por el fenómeno de resuspensión.

Tabla 3: Velocidades de entrada límites para cada temperatura de operación

$T / ^\circ\text{C}$	$v_i / (\text{m/s})$, limitada por Δp	$v_i / (\text{m/s})$, limitada por resuspensión
20	30,0	23,0
100	34,0	29,8
180	37,7	37,7
250	40,0	45,0
400	52,0	73,7
500	60,0	97,0

Para temperaturas menores que 180°C , el límite impuesto por el fenómeno de resuspensión es menor que el predicho por el límite de caída de presión. Por el contrario, para temperaturas superiores a 180°C , el límite impuesto por la saltación es mayor que el predicho por el límite de presión. El conjunto de las dos situaciones anteriores define una zona v_i/T recomendada para la operación del ciclón, que se muestra en la Figura 4.

La presencia de estas dos situaciones puede estudiarse a partir del análisis de las curvas de grado de eficiencia (GEC). Estas curvas se obtuvieron de simulaciones numéricas desarrolladas bajo diferentes condiciones de temperatura, velocidad de entrada y concentración de polvo.

La Figura 5 muestra las curvas GEC obtenidas. La GEC se desvía de la clásica forma de "S" cuando la velocidad de entrada aumenta. Este hecho ocurre para todas las temperaturas estudiadas. Por otra parte, la influencia del contenido de polvo es mayor para altas velocidades de entrada.

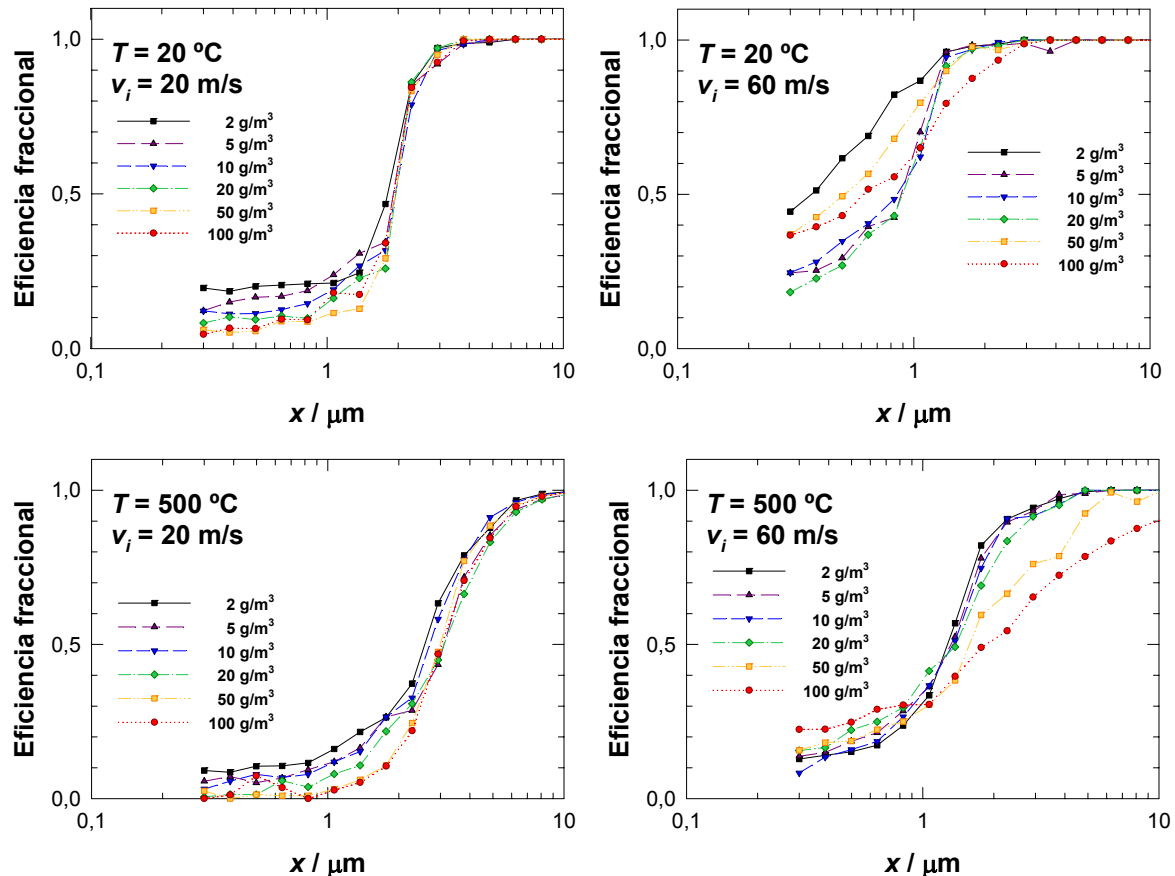


Figura 5: Curvas de grado de eficiencia obtenidas

En la Figura 4 se representan los puntos ubicados dentro y fuera de la zona de operación recomendada. Las curvas GEC correspondientes a los puntos ubicados en la zona sugerida (20 m/s) están bien definidas. Para temperaturas menores que 180 °C, la deformación de las GEC correspondientes a los puntos por encima de los límites puede atribuirse a la resuspensión. Para velocidad de entrada de 20 m/s, las GEC muestran un típico comportamiento de “S” con un muy bien definido tamaño de corte. Esta situación está relacionada a la ubicación de este escenario dentro de la zona de operación.

Para temperaturas por debajo de 180 °C, la GEC muestra altos valores de eficiencia para las partículas más pequeñas. Esto se puede relacionar con la resuspensión, debido a que las partículas grandes deberán arrastrar a las más pequeñas hacia la tolva inferior de recolección.

La eficiencia para separar partículas grandes decrece cuando el ciclón opera a las temperaturas más altas y a las velocidades más elevadas.

Este hecho está relacionado con el aumento de la viscosidad del aire. Por su parte, la disminución de la densidad del aire influye sobre el equilibrio de fuerzas (Shin et al., 2005). En consecuencia, la velocidad terminal disminuye y las partículas son arrastradas hacia afuera por el gas saliente en la parte superior del ciclón.

La Figura 6 muestra la dependencia del x_{50} con la velocidad de entrada para concentraciones de polvo de 2 g/m³ y 100 g/m³. Se observa que el tamaño de corte disminuye con la velocidad de entrada, hecho que se corresponde totalmente con las experiencias de la literatura (Hoekstra, 2000; Hoffmann y Stein, 2002).

Para altas concentraciones se aprecia un mejor acuerdo entre los resultados de las simulaciones y los obtenidos de los modelos de la literatura. Por otra parte, puede observarse más claramente la influencia de la temperatura.

Las Figuras 7 y 8 muestran la evolución en el tiempo del proceso de separación que ocurre en el ciclón, para $T = 20$ °C y velocidades de entrada de 20 m/s y 60 m/s. Para 3 s de duración del evento, se advierte que la separación es mayor a 20 m/s que a 60 m/s. Este hecho es consistente con las curvas GEC correspondientes. A 20 m/s no hay resuspensión y su GEC presenta la forma clásica en “S”. Para $v_i = 60$ m/s el flujo es altamente turbulento e inestable, lo que implica disminución de la calidad de separación por el fenómeno de resuspensión y en consecuencia, mayor deformación de su GEC.

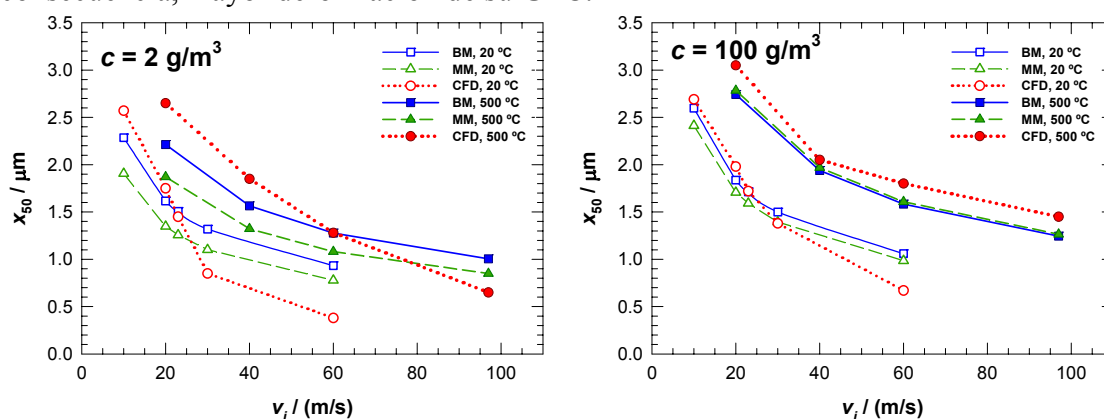


Figura 6: Tamaño de corte en función de la velocidad de entrada. Ref.: BM: modelo de Barth; MM: modelo de Muschelknautz; CFD: simulación numérica

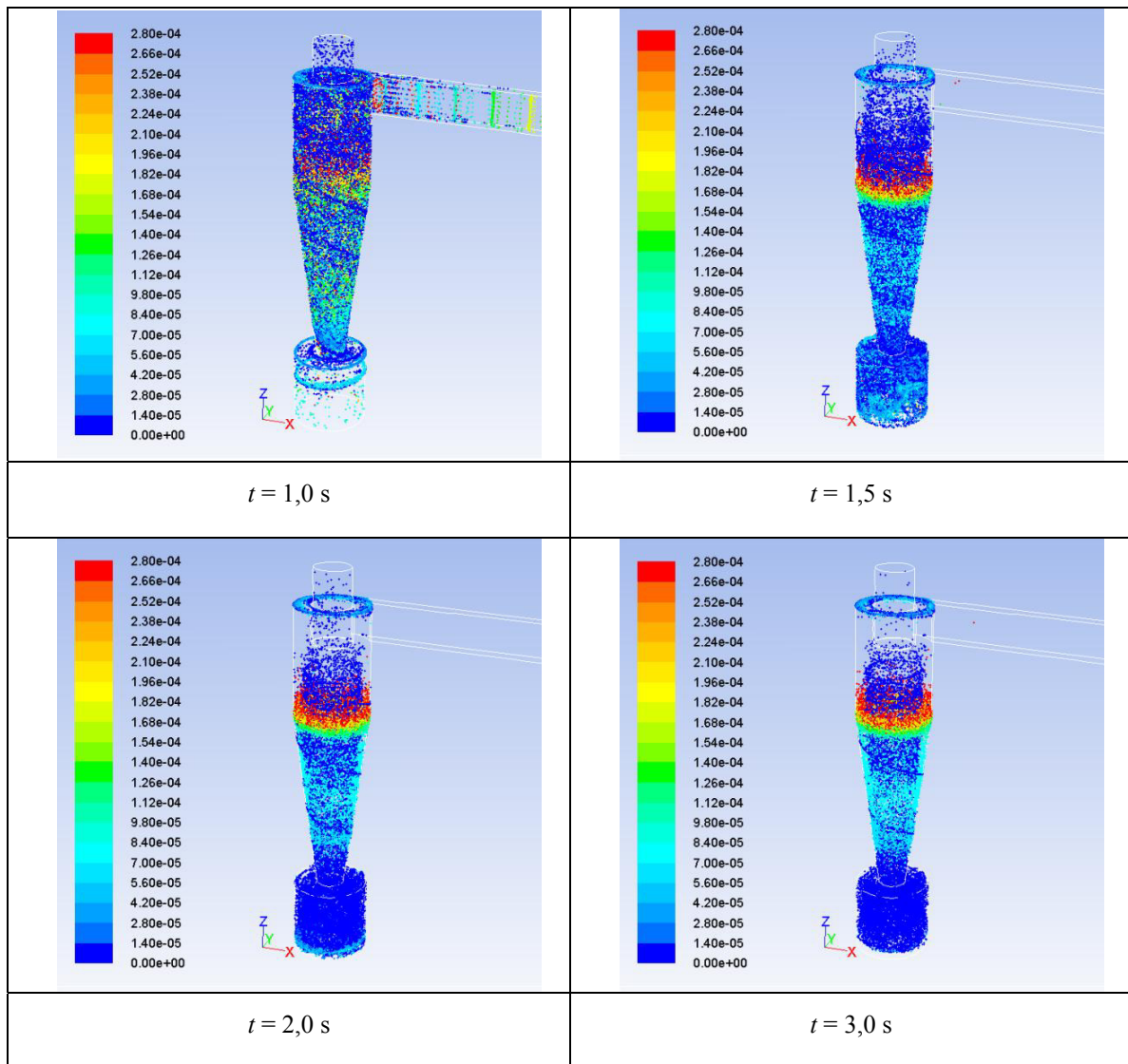


Figura 7: Distribución espacial de partículas por tamaños, en m. Evolución temporal del proceso de separación, para $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $v_i = 20\text{ m/s}$

Las condiciones establecidas por la zona de operación (Figura 4) restringen la velocidad de entrada a 23 m/s para $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 60 m/s para $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esta situación determina el valor más pequeño de x_{50} que se puede obtener, es decir, es prácticamente imposible obtener un x_{50} de $1,5\text{ }\mu\text{m}$ para el ciclón estudiado a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. La Figura 6 muestra el buen acuerdo existente el x_{50} obtenido de las simulaciones y los correspondientes valores de los modelos semiempíricos.

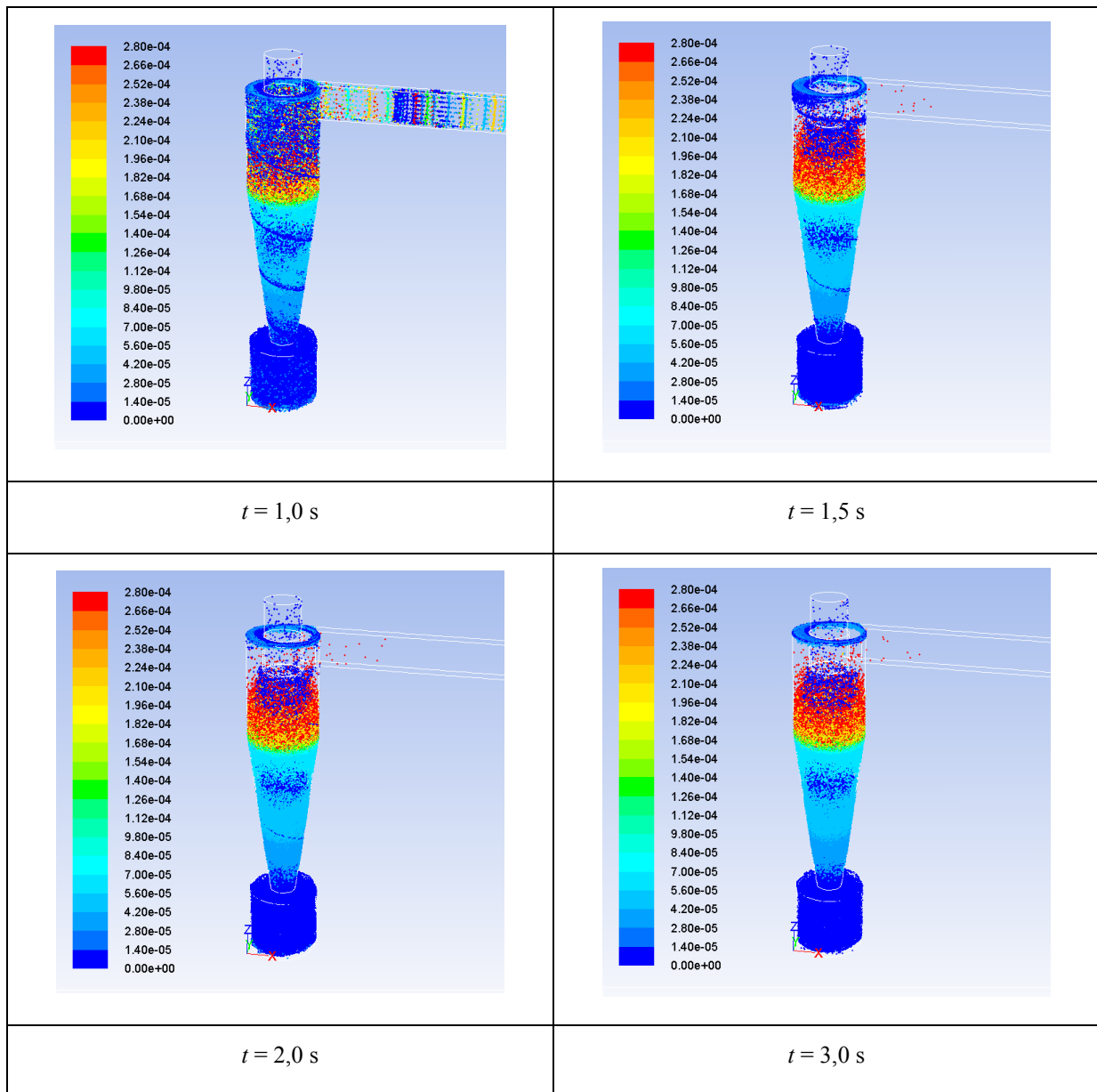


Figura 8: Distribución espacial de partículas por tamaños, en m. Evolución temporal del proceso de separación, para $T = 20$ °C y $v_i = 60$ m/s

La Figura 9 muestra el tamaño de corte en función de la concentración de sólidos. Los resultados indican que existen dos regiones bien definidas para el tamaño de corte en función de la concentración de polvo, a temperatura constante. Para bajas concentraciones de polvo, la variación de x_{50} es más importante que para altas concentraciones. Esto conduce a pensar que un ciclón de alta eficiencia logra un producto de mejor calidad cuando opera a bajas concentraciones. Sin embargo, esta situación implica una muy baja producción. Cuando la concentración supera los 20 g/m^3 aproximadamente, el efecto es menos pronunciado. Así, puede resultar beneficioso que el ciclón opere con las más altas concentraciones. Bajo estas condiciones, el ciclón logra mejor producción sin afectar significativamente el tamaño de corte.

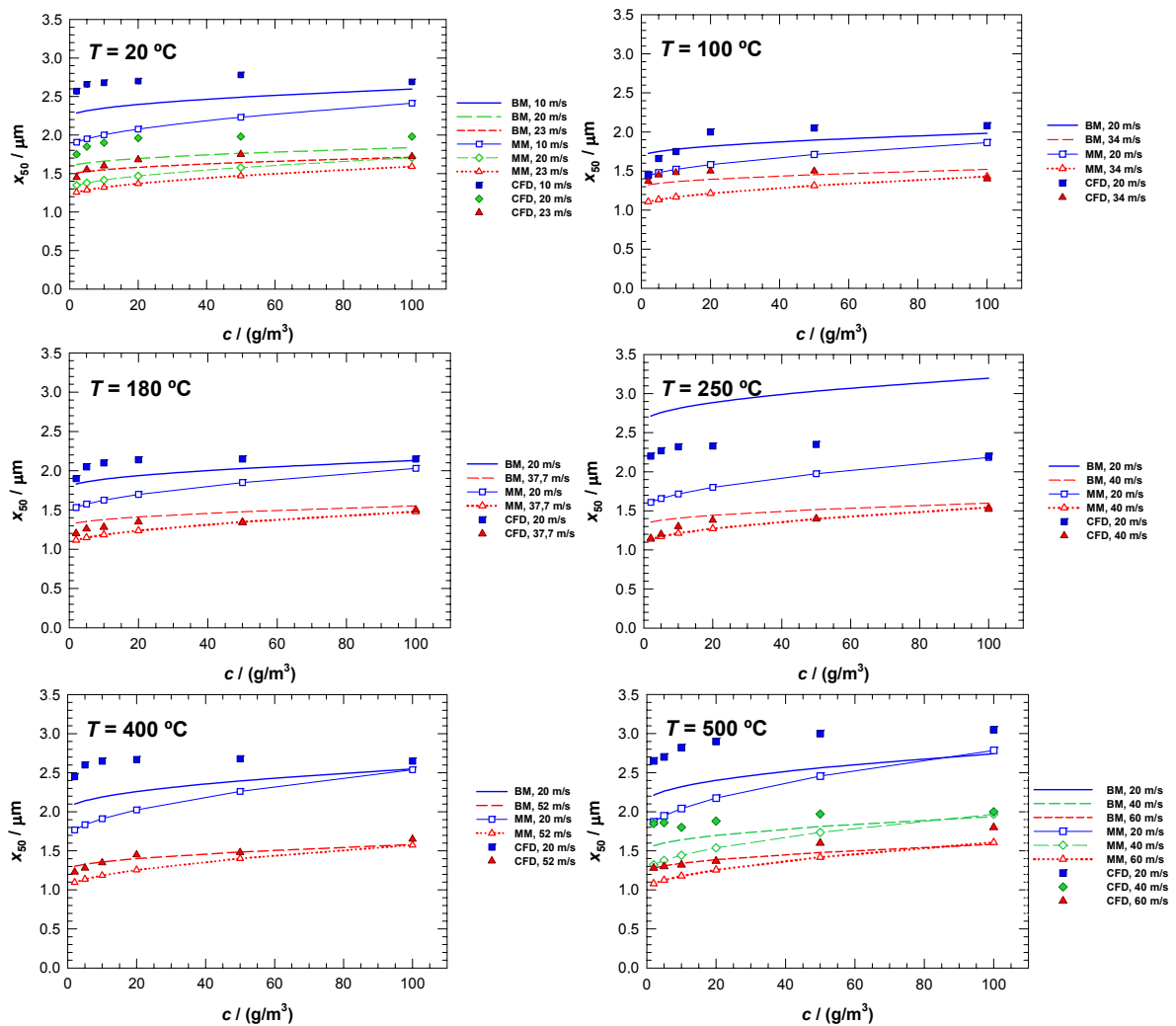


Figura 9: Tamaño de corte en función de la concentración de polvo. Ref.: BM: modelo de Barth; MM: modelo de Muschelknautz; CFD: simulación numérica

4 CONCLUSIONES

El análisis microscópico aportado por las simulaciones obtenidas empleando CFD otorga verdadero respaldo a las consideraciones macroscópicas realizadas para establecer una región óptima de operación en un ciclón Stairmand de 0,20 m de diámetro. Los diferentes escenarios velocidad de entrada versus temperatura de operación utilizados en las simulaciones permiten arribar a las siguientes conclusiones:

- El aumento de la velocidad de entrada conduce a un menor tamaño de corte y mejora la eficiencia fraccional. Sin embargo, el incremento del caudal de entrada está limitado por el fenómeno de resuspensión y por la caída de presión.
- Para el rango de temperaturas estudiado, el tamaño de corte aumenta con la temperatura para todas las concentraciones de polvo. En consecuencia, se sugiere que el ciclón opere a la más baja temperatura.
- Los valores de tamaño de corte obtenidos de las simulaciones presentan buena concordancia con los predichos por los modelos establecidos en la literatura. Esta concordancia se acentúa cuando se opera a mayores velocidades de entrada y mayores concentraciones de polvo.

5 NOMENCLATURA

D	: Diámetro del ciclón (m)
a	: Altura de la entrada (m)
b	: Ancho de la entrada (m)
S	: Longitud del tubo de salida (m)
D_x	: Diámetro del tubo de salida (m)
h	: Altura del cilindro (m)
z	: Altura del cono (m)
H	: Altura total del ciclón (m)
B	: Diámetro de descarga (m)
x	: Tamaño de partícula (μm)
Q	: Caudal del gas (m^3/s)
c	: Concentración de polvo ($\text{g}_{\text{sólidos}}/\text{m}^3_{\text{gas}}$)
v_i	: Velocidad de entrada (m/s)
$v_{\theta CS}$: Velocidad tangencial en la CS (m/s)
$v_{r CS}$: Velocidad radial en la CS (m/s)
Δp	: Caída de presión (Pa)
ζ	: Coeficiente de caída de presión
v_s	: Velocidad de saltación (m/s)
W	: Velocidad equivalente (m/s)
ρ	: Densidad del gas (kg/m^3)
μ	: Viscosidad dinámica del gas ($\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$)
ρ_p	: Densidad de la partícula (kg/m^3)
g	: Aceleración de la gravedad (m/s^2)

REFERENCIAS

- Azadi, Mo., Azadi, Me., An analytical study of the effect of inlet velocity on the cyclone performance using mathematical models. *Powder Technology*, 217: 121–127, 2012.
- Barth, W., Berechnung und auslegung von Zyklonabscheidern auf Grundneuerer Untersuchungen, *Brennstoff-Wärme-Kraft*, 8: 1, 1–9, 1956.
- Bernardo, S., Mori, M., Peres, A., Dionisio, R., 3-D computational fluid dynamics for gas and gas-particle flows in a cyclone with different inlet section angles, *Powder Technology*, 162:3: 190–200, 2006.
- Chen, X. D., Chen, J.J.J., On gas recycling as a means of improving the operation of cyclones, *Chemical Engineering and Processing*, 34: 379–383, 1995.
- Chuah, T., Gimbut, J., Choong, T.S., A CFD study of the effect of cone dimensions on sampling aerocyclones performance and hydrodynamics, *Powder Technology*, 162: 126–132, 2006.
- Chung, T.J., *Computational Fluid Dynamics*, Cambridge University Press, U.K. Part Five, Chapter Twenty-One, 683–705, 2002.
- Cortés, C., Gil, A., Modeling the gas and particle flow inside cyclone separators. *Progress in Energy and Combustion Science*. 33: 409–452, 2007.
- Delgadillo, J.A., Rajamani, R.K., A comparative study of three turbulence-closure models for the hydrocyclone problem, *International Journal of Mineral Processing*, 77:4: 217–230, 2005.
- Elsayed, K., Lacor, C., The effect of cyclone vortex finder dimensions on the flow pattern and performance using LES, *Computers & Fluids*, 71: 224–239, 2013.
- Gimbut, J., Choong, T.S.Y., Chuah, T.G.; Fakhru'l-Razi, A. A CFD study on the prediction of cyclone collection efficiency, *Int. J. Comput. Eng. Sci.* 6: 161–168, 2005.
- Griffiths, W.D., Boysan, F., Computational fluid dynamics (CFD) and empirical modelling of the performance of a number of cyclone samplers, *Journal of Aerosol Science*, 27:2: 281–304, 1996.
- Hoekstra, A.J., Gas Flow Field and Collection Efficiency of Cyclone Separators, *Ph.D. thesis*,

- Technical University Delft, 2000.
- Hoekstra, A.J., Derksen, J.J., Van den Akker, H.E.A., An experimental and numerical study of turbulent swirling flow in gas cyclones, *Chem. Eng. Sci.*, 54: 2055-2065, 1999.
- Hoffmann, A.C., Stein, L.E., *Gas Cyclones and Swirl Tubes*, Springer-Verlag, Berlin, 2002.
- Jawarneh, A.M., Tlilan, H., Al-Shyyab, A., Ababneh, A., Strongly swirling flows in a cylindrical separator, *Minerals Engineering*, 21:5, 366–372, 2008.
- Kalen, B., Zenz, F.A., Theoretical Empirical Approach to Saltation Velocity in Cyclone Design. *AIChE Symp.*, 70:137: 388–396, 1974.
- Karagoz, I., Kaya, F., CFD investigation of the flow and heat transfer characteristics in a tangential inlet cyclone, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 34:9-10: 1119–1126, 2007.
- Kaya, F., Karagoz, I., Performance analysis of numerical schemes in highly swirling turbulent flows in cyclones, *Current Science*, 94:10, 1273–1278, 2008.
- Muschelknautz, E., Krambrock, W., Aërodynamische Beiwertedes Zyklonabscheidern aufgrund neuer und verbesserte Messungen, *Chem. Ing. Techn.*, 42:5: 247–255, 1970.
- Muschelknautz, E., Trefz, M., Design and calculation of higher and highest loaded gas cyclones, *Proceedings of Second World Congress on Particle Technology*, 52–71. Kyoto, Japan. 1990.
- Muschelknautz, E., Trefz, M., Druckverlust und Abscheidegrad in Zyklonen, *VDI-wärmeatlas* 6: 1-9, 1991.
- Ranga Dinesh, K.K.J., Kirkpatrick, M.P., Study of jet precession, recirculation and vortex breakdown in turbulent swirling jets using LES, *Computers & Fluids*, 38:6: 1232-1242, 2009.
- Raoufi, A., Shams, M., Farzaneh, M., Ebrahimi, R., Numerical simulation and optimization of fluid flow in cyclone vortex finder, *Chemical Engineering and Processing*, 47: 128–137, 2008.
- Secchiaroli, A., Ricci, R., Montelpare, S., D'Alessandro, V., Numerical simulation of turbulent flow in a Ranque–Hilsch vortex tube, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52:23-24: 5496–5511, 2009.
- Shin, M.S., Kim, H.S., Jang, D.S., Chung, J.D., Bohnet, M., A numerical and experimental study on a high efficiency cyclone dust separator for high temperature and pressurized environments, *Applied Thermal Engineering*, 25: 1821–1835, 2005.
- Sommerfeld, M., Ho, C.A., Numerical calculation of particle transport in turbulent wall bounded flows, *Powder Technology*, 131:1: 1–6, 2003.
- Stairmand, C.J. The design and performance of cyclone separators, *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 29: 356–383, 1951.
- Tominaga, Y., Stathopoulos, T., CFD Modeling of Pollution Dispersion in Building Array: Evaluation of turbulent scalar flux modeling in RANS model using LES results, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 104–106. 2012.
- Qian, F., Zhang, J., Zhang, M., Effects of the prolonged vertical tube on the separation performance of a cyclone, *Journal of Hazardous Materials*, B136: 822–829, 2006.
- Qiu, Y., Deng, B., Kim, C.N., Numerical study of the flow field and separation efficiency of a divergent cyclone, *Powder Technology*, 217: 231–237, 2012.
- Wan, G., Sun, G., Xue, X., Shi, M., Solids concentration simulation of different size particles in a cyclone separator, *Powder Technology*, 183: 94–104, 2008.
- Zhao, B., Su, Y., Zhang, J., Simulation of gas flow pattern and separation efficiency in cyclone with conventional single and spiral double inlet configuration, *Chemical Engineering Research and Design*, 84: 1158–1165, 2006.