

SIMULACION DE FLUJO TURBULENTO DENTRO DE UN SEPARADOR TIPO CICLON USANDO LARGE EDDY SIMULATION

Horacio A. Petit y Mirta R. Barbosa

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.
Avda. A. del Valle 5737, 7400 - Olavarría, Argentina.
E-mail: hpetit@fio.unicen.edu.ar, mbarbosa@fio.unicen.edu.ar

Palabras Clave: ciclones, CFD, LES, turbulencia.

Resumen. Los ciclones se utilizan en la industria con dos objetivos básicos: limpieza de aire y clasificación de material particulado. Son equipos constructivamente sencillos, de bajo costo y fácil mantenimiento. Sin embargo, el flujo en su interior es altamente turbulento, por lo que la fluidodinámica computacional (CFD) resulta el método ideal para abordar el problema desde el punto de vista numérico, a través de simulaciones del flujo. Para realizar las simulaciones se utilizan modelos de turbulencia, siendo uno de ellos el modelo “Large Eddy Simulation” (LES). El resultado de la simulación depende de diversos factores, entre ellos de la malla utilizada para el dominio.

En este trabajo se simula el flujo dentro de un separador ciclónico de tipo Stairmand empleando un software comercial de volúmenes finitos. Se utiliza una malla no estructurada y el modelo de turbulencia LES. Se analiza la calidad de las simulaciones comparándolas con datos experimentales de la bibliografía. Se considera que el ciclón opera en condiciones ambientales, con un número de Reynolds a la entrada de $2.8 \cdot 10^5$.

Los perfiles de velocidades tangenciales presentan un buen ajuste a los datos experimentales. El incremento en el número de volúmenes genera un importante aumento en el tiempo de cómputo que no se refleja notablemente en una mayor resolución de los perfiles de velocidad tangencial obtenidos.

El perfil de velocidad axial muestra mayor dependencia de malla en la zona central del separador. Por otra parte, esta zona es la más afectada por las fluctuaciones en el flujo. Los valores de caída de presión obtenidos a partir de las simulaciones resultan razonablemente comparables con el valor experimental y el de los modelos empíricos.

1. INTRODUCCIÓN

Los separadores ciclónicos son equipos ampliamente usados en la industria con dos objetivos básicos: limpieza de aire y clasificación de material particulado. Son esencialmente cámaras de sedimentación en las que la aceleración gravitacional se sustituye por la aceleración centrífuga. Estos equipos constituyen uno de los medios menos costosos de recolección de polvo, tanto desde el punto de vista de la inversión como de la operación. Son de simple construcción dado que no presentan partes móviles, lo que además facilita el mantenimiento. Se los puede fabricar en una amplia gama de materiales y pueden ser diseñados para altas temperaturas y presiones de operación. Existe una gran variedad de ciclones, de acuerdo a las proporciones geométricas de sus partes, siendo uno de los más utilizados el ciclón tipo Stairmand, porque experimentalmente se ha determinado una buena eficiencia de separación (Hoffmann and Stein, 2002; Stairmand, 1951).

El uso tradicional de estos dispositivos como separadores de polvo data de hace más de un siglo. Sin embargo el empleo como clasificadores de material particulado por tamaño ha exigido un especial desarrollo en su tecnología. En un principio, este aspecto se vió especialmente dificultado dado que, si bien los ciclones son constructivamente sencillos, el campo de flujo en su interior corresponde a un comportamiento altamente turbulento. Los gases cargados con polvo entran tangencialmente al equipo y se desplazan hacia abajo formando una helicoide descendente en la zona adyacente a las paredes externas del dispositivo; las partículas sólidas se separan del gas y caen hacia tolva de recolección. Cuando el flujo de gas alcanza la parte inferior del cono del equipo, sufre un cambio de dirección y se forma una helicoide interna que asciende por la parte central del ciclón hacia el tubo superior por donde el gas limpio sale del separador. El conocimiento del flujo y su dependencia con las variables de operación resulta imprescindible para el desarrollo de la tecnología necesaria para usarlo como clasificador.

Este flujo puede describirse matemáticamente mediante las ecuaciones de Navier-Stokes. Sin embargo, la complejidad del movimiento hace que no sea posible la resolución de estas ecuaciones por vía analítica. Esta situación ha cambiado drásticamente a partir del desarrollo de la fluidodinámica computacional (CFD) que ha permitido abordar el problema desde el punto de vista numérico, a través de simulaciones del flujo (Xiang and Lee, 2005; Safikhani et al., 2010; Shalaby, 1999; Avci et al., 2003; Chung, 2002; Ferziger, 2002; Martignoni et al., 2007; Bernardo et al., 2006; Chu et al., 2011; Qiu et al., 2012; Raoufi et al., 2008.). La manera de simular el flujo mediante CFD es usar modelos de turbulencia y resolver las llamadas “Reynolds Average Navier Stokes Equations” (RANS) o URANS para el estado transitorio. Pero no cualquier modelo de turbulencia resulta adecuado para el flujo dentro de un separador tipo ciclón, para poder captar las principales características del flujo el modelo de turbulencia debe ser de segundo orden, como el Reynolds Stress Model (RSM) (Xiang and Lee, 2005; Cortes and Gil, 2007; Boysan, 1982; Jakirlic, 2002; Hogg et al., 1989; Ma et al., 2000; Zhao et al., 2006; Spalart, 2000). Es necesario aclarar que incluso este modelo tiene problemas para resolver el flujo. No puede predecir adecuadamente las oscilaciones en las velocidades ni la precesión del centro del vórtice (Cortes and Gil, 2007; Tominaga and Stathopoulos, 2012; Davidson, 2009).

Frente a esta situación el modelo “Large Eddy Simulation” (LES) se presenta como una buena alternativa, tiene un costo computacional más alto que las URANS pero logra una mejor resolución de las variables de flujo. LES se ha convertido en los últimos años en un estándar para la simulación de flujo dentro de ciclones (Cortes and Gil, 2007; Piomelli, 2008; Piomelli, 1999; Spalart, 2000; George and Tutkun, 2009; Salim and Cheah, 2009).

El resultado de la simulación depende de diversos factores, entre ellos de la malla utilizada para el dominio. Las mallas no estructuradas no son las más utilizadas por los autores. Sin embargo el uso de estas mallas tiene sus ventajas. Son mallas que pueden ser generadas muy rápidamente y con poca intervención del usuario. Pueden adaptarse a cualquier geometría compleja y se refinan muy fácilmente. Su desventaja es el requerimiento en la memoria necesaria para los cálculos y una menor exactitud en los resultados con algunos esquemas de discretización (Blazek, 2001).

Desde el punto de vista experimental, el flujo puede ser estudiado mediante anemometría de laser Doppler (LDA) o de alambre caliente (HWA) (Hoekstra, 2000; Hoekstra et al., 1999) Los resultados experimentales pueden emplearse para la validación de los modelos numéricos (Kegg, 2008).

En el presente trabajo se realizan simulaciones de flujo dentro de un separador ciclónico de tipo Stairmand. Se utiliza una malla no estructurada y el modelo de turbulencia LES. Se busca analizar la calidad de las simulaciones comparando estas respuestas con los datos experimentales de la bibliografía (Hoekstra, 1999).

2. MÉTODO NUMÉRICO

Los flujos turbulentos contienen un amplio rango de escalas de tiempo y longitud. Las grandes escalas de movimiento son mucho más energéticas que las pequeñas. Su tamaño y fuerza las hace el mecanismo predominante de transporte de propiedades. Las pequeñas escalas son mucho más débiles y tienen poca relevancia en el transporte de propiedades. Lo anterior indica que una simulación que trate con más detalle a los grandes remolinos que a los pequeños permite lograr buenos resultados. Esta simulación se puede lograr con el modelo LES. En este modelo, los grandes remolinos se resuelven directamente mientras que la turbulencia de pequeña escala se modela (Davidson, 2009; Jakirlic et al., 2002; Piomelli, 2008; Piomelli, 1999; Piomelli et al., 2003; Shalaby, 1999).

El uso de LES requiere un campo de velocidades que contenga sólo las componentes de gran escala (Blazek, 2001; Ferziger, 1996), para ello se utiliza un filtro de tipo presentado en las ecuaciones (1) y (2).

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (1)$$

donde \bar{u}_i es la velocidad media y u'_i la velocidad de fluctuación correspondientes a la componente u de la velocidad.

$$\bar{u}_i = \int G(x, x') u_i(x') dx' \quad (2)$$

Lo que indica que el campo de velocidades se descompone en una parte filtrada y otra de pequeña escala. El filtro, G , utilizado depende de una longitud característica, Δ , que determina el tamaño de las pequeñas escalas.

Cuando las ecuaciones de Navier-Stokes se filtran queda un sistema dado por las ecuaciones (3) y (4).

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \nabla^2 \bar{u}_i - \frac{\partial \tau_{ij}^s}{\partial x_j} \quad (4)$$

donde p es la presión, ρ la densidad y ν la viscosidad cinemática del fluido.

En el contexto de LES se define el tensor SGS o Subgrid-scale Reynolds Stress (Nicoud and Ducros, 1999), según la ecuación (5).

$$\tau_{ij}^s = \overline{(u_i u_j)} - u_i u_j \quad (5)$$

Donde τ_{ij}^s es el flujo de momento causado por la acción de las pequeñas escalas. Los modelos usados para modelar el tensor SGS se denominan subgrid-scale models y el más común es el modelo de Smagorinsky (Blazek, 2001; Piomelli et al., 2003).

El modelo de Smagorinsky está basado en la viscosidad de remolino. Supone que los principales efectos del tensor son un incremento en el transporte y en la disipación. Esto implica que toda la energía que las pequeñas escalas reciben son instantáneamente disipadas. El tensor se define de acuerdo a la ecuación (6).

$$\tau_{ij}^s - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) = 2\nu_t \bar{S}_{ij} \quad (6)$$

La forma de la viscosidad de subgrilla es:

$$\nu_t = C_S^2 \Delta^2 |\bar{S}| \quad (7)$$

La constante C_S depende del tipo de flujo, normalmente se utiliza un valor obtenido teóricamente de 0.18.

En este trabajo, el separador a simular es un ciclón de tipo Stairmand de 0.29 m de diámetro (Figura 1a). El tamaño de malla utilizado para las simulaciones fue de $\Delta x^+ = 1\ 200$ (200.000 elementos), para la primera simulación y se probó la independencia de malla con una medida de $\Delta x^+ = 900$ (400.000 elementos), para la segunda (Figuras 1b y 1c). Siendo Δx^+ el tamaño de la grilla en unidades viscosas (Shalaby, 1999). Las simulaciones fueron hechas para una convergencia de $10E-4$ y el paso temporal se define a partir de la condición CFL con un número de Courant de 0.1. En todos los casos se utilizó LES a través del algoritmo de resolución SIMPLEC, el esquema "Bounded Central Differencing" para las ecuaciones de momentum y una discretización temporal implícita de segundo orden.

Las condiciones de borde utilizadas son las de "Velocity Inlet" a la entrada de aire y "Outflow" a la salida de aire. Las demás superficies son consideradas paredes en las cuales se utilizan "Wall Functions" para relacionar el flujo turbulento del centro con la región laminar.

El tiempo total del evento fue reducido considerablemente inicializando el modelo en estado estacionario con RSM y tomando esta solución como estado inicial para la resolución del transitorio con LES.

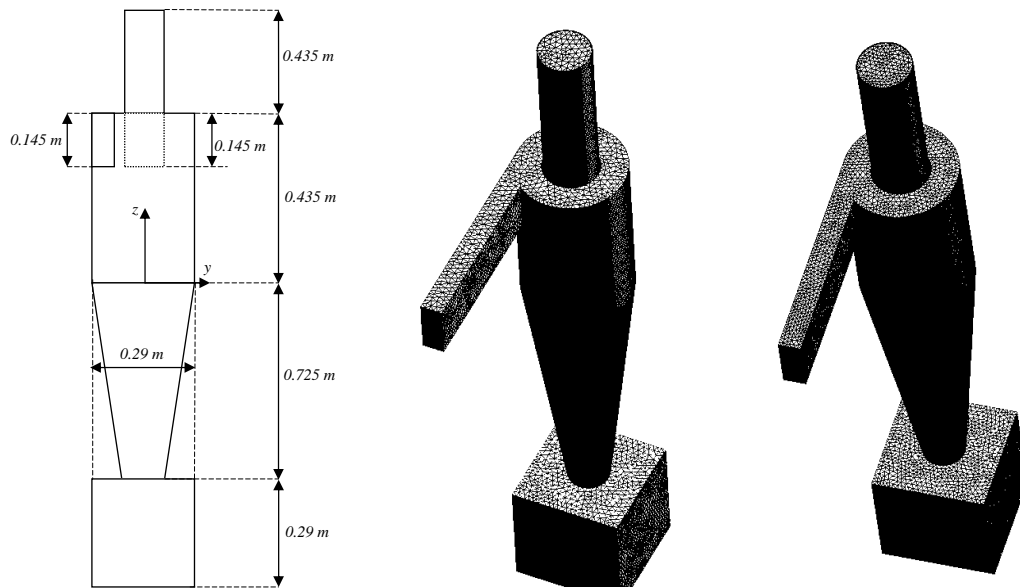


Figura 1: a. Esquema del ciclón. b. Malla para simulación 1. c. Malla para simulación 2.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las simulaciones se realizaron empleando un software comercial de volúmenes finitos (Ansys-Fluent®). Se consideró que el ciclón opera en condiciones ambientales, con un número de Reynolds a la entrada de $2.8 \cdot 10^5$. A efectos de modelar el flujo, se trabaja con una única fase (aire). Los planos en los cuales se analizarán los perfiles de velocidad son aquellos para los cuales $z = 0.25375 \text{ m}$; 0.2175 m ; -0.145 m y -0.29 m . Estos planos coinciden con los utilizados por Hoekstra para el análisis de los perfiles de velocidad con LDA.

Los resultados de la simulación con $\Delta x^+ = 1200$ se presentan en la figura 2, donde se muestran los perfiles de presión y velocidad, y las líneas de flujo.

Los resultados obtenidos de la primera simulación se comparan con los datos experimentales presentes en la literatura. En la figura 3a se observan los perfiles de velocidades tangenciales para $z = 0.2175 \text{ m}$, los resultados de la simulación muestran buena concordancia con los experimentales. En la figura 3b se presentan los datos para la primera y segunda simulación. El aumento significativo en el costo computacional para la segunda simulación con $\Delta x^+ = 900$ no se ve reflejado en un cambio notable en el perfil de velocidades obtenido.

La misma situación se repite para los planos $z = 0.25375 \text{ m}$ y $z = 0.2175 \text{ m}$. El perfil obtenido concuerda con el perfil de tipo "Rankine" característico de los ciclones. Este se compone de una zona central con un perfil clásico de un cuerpo sólido en rotación y una zona externa de vórtice libre. Los resultados de la simulación, comparados con los valores experimentales se muestran en la figura 4. A medida que se avanza en la dirección z , los perfiles subestiman el valor máximo de la velocidad tangencial. Otra diferencia con los datos experimentales es que este valor máximo no se encuentra en el mismo radio sino desplazado hacia la zona exterior salvo el caso del plano $z = 0.25375 \text{ m}$.

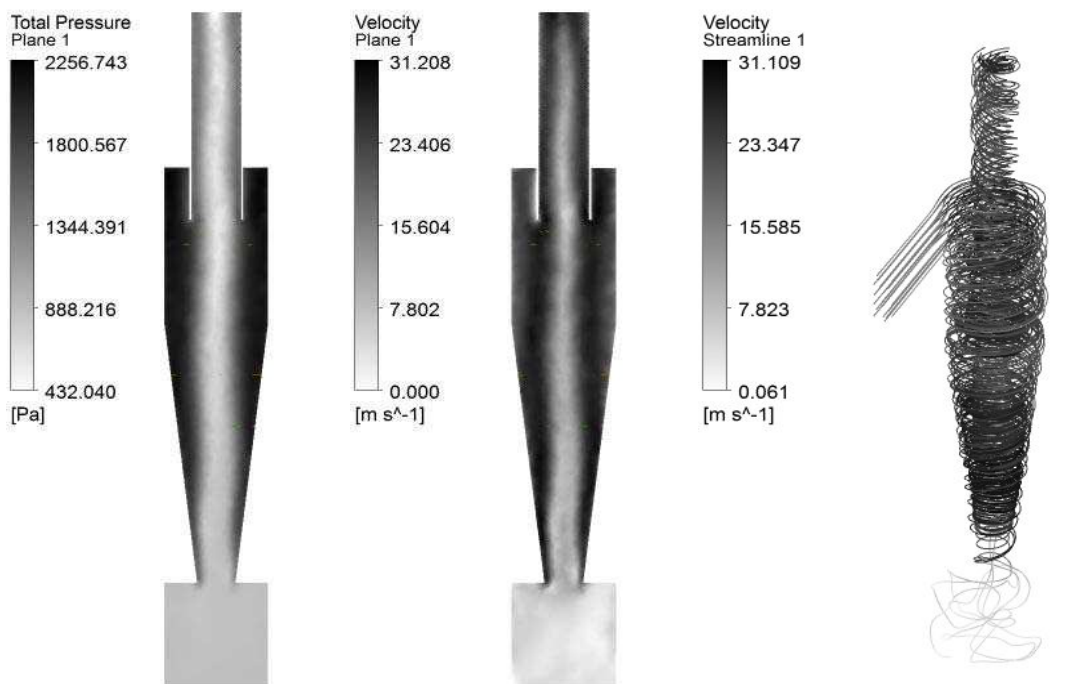


Figura 2: a. Perfiles de presión. b. Perfiles de velocidad. c. Líneas de flujo. Obtenidos por simulación con $\Delta x = 1200$

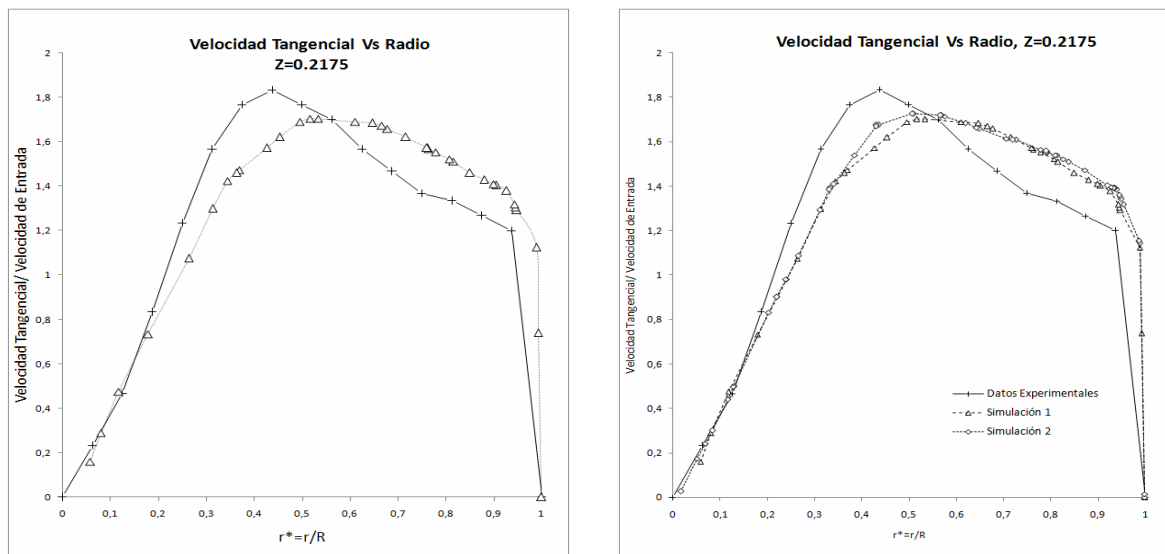


Figura 3: a. Resultados simulación 1. b. Resultados simulación 2.

La figura 4 muestra también que el valor de la velocidad tangencial en el eje del ciclón no concuerda con el perfil de velocidades experimental. El error en la simulación hace que los resultados no tengan la forma de "W" invertida que se encuentra en la literatura. Sin embargo la zona del centro del separador es considerada muy inestable y difícil de modelar (Qian and Wu, 2009).

Nuevamente se observa que un incremento en la densidad de la malla no se ve reflejado en aumento significativo en la exactitud del perfil, sin embargo la segunda simulación muestra un valor en el centro más cercano al obtenido experimentalmente.

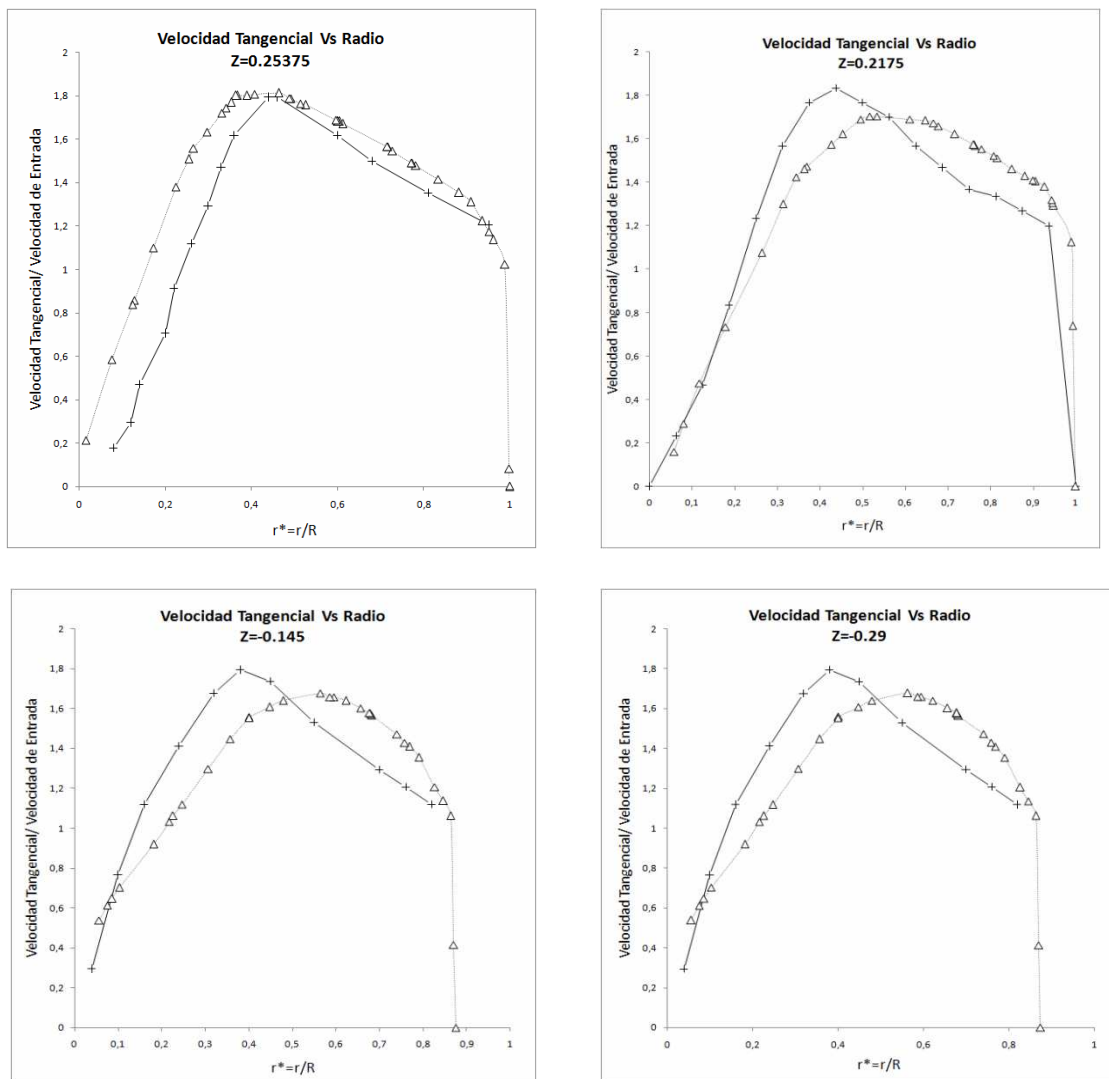


Figura 4: Perfiles de velocidades a distintos valores de z : a. $z = 0.25375$ m; b. $z = 0.2175$ m; c. $z = -0.145$ m; d. $z = -0.29$ m. + datos experimentales; Δ datos de simulación.

En el caso de la velocidad axial las diferencias entre la simulación y la respuesta experimental son más notorias. La simulación no logra describir el valor de la velocidad cerca de la pared, sobrevalorándola. Esta situación podría resultar conflictiva en un estudio en el que la simulación emplee flujo bifásico (aire y partículas de sólido) ya que en esta zona es donde el polvo es arrastrado hacia el colector ubicado en la parte inferior del ciclón.

Otro parámetro que puede utilizarse para caracterizar la simulación es la caída de presión que ocurre en el separador. Esta caída se define como la diferencia de presión estática entre la salida y la entrada del dispositivo. Puede calcularse a partir de modelos macroscópicos sencillos, como los de Shepherd y Lapple (Shepherd and Lapple, 1940) y Casal y Martínez (Casal and Martínez-Benet, 1983; Cortes and Gil, 2007). En la tabla 1 se presentan los valores obtenidos a partir de las simulaciones realizadas en este trabajo, el medido experimentalmente por Hoekstra (Hoekstra, 2000) y los obtenidos a partir de los modelos de Shepperd y Lapple y Casal y Martínez.

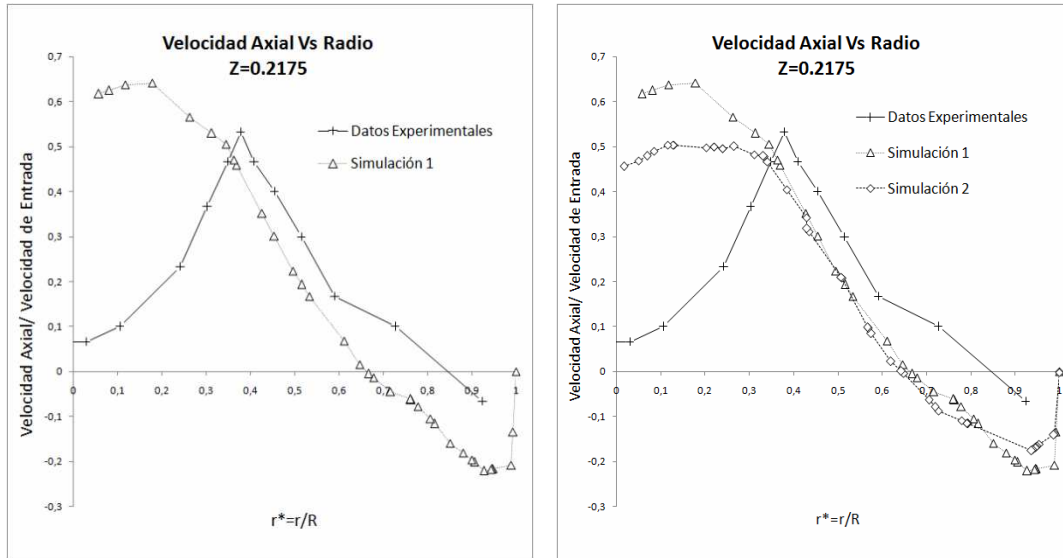


Figura 5: Perfiles de velocidades axiales para $z = 0.2175$ m

| | ΔP (Pa) |
|-------------------|-----------------|
| Simulación 1 | 1272 |
| Simulación 2 | 883 |
| Hoekstra | 769 |
| Shepperd y Lapple | 995 |
| Casal y Martinez | 643 |

Tabla 1: Valores de caída de presión.

Se puede observar que la primera simulación tiene una diferencia mucho mayor con el valor experimental que la realizada con una malla refinada. Sin embargo ambos valores se encuentran cercanos al valor experimental y el de los modelos.

CONCLUSIONES

Las simulaciones realizadas empleando mallas no estructuradas logran un buen ajuste con los valores experimentales.

El uso del modelo LES para $\Delta x^+ = 1200$ se considera adecuado para fines de investigación en ingeniería dado que si bien se utilizan mallas menos densas que las generalmente empleadas, $150 < \Delta x^+ < 300$, la prueba de independencia de malla muestra que el aumento de la cantidad de elementos no lleva a cambios significativos en los perfiles de velocidad. Por otra parte, el uso de modelos URANS de segundo orden como el RSTM es una alternativa que necesitaría menos elementos pero lograría una menor resolución del flujo.

El perfil de velocidad axial muestra mayor dependencia de malla en la zona central del separador. Por otra parte, esta zona es la más afectada por las fluctuaciones en el flujo.

Los perfiles de velocidades obtenidos a partir de las simulaciones presentan un buen ajuste a los datos experimentales. Este hecho es relevante, ya que en particular la velocidad tangencial, es muy importante para el conocimiento del proceso de separación y su simulación.

Los valores de caída de presión resultan razonablemente comparables con el valor experimental y el de los modelos empíricos.

REFERENCIAS

- Avci, A.; Karagoz, I. Effects of flow and geometrical parameters on the collection efficiency in cyclone separators. *Aerosol Science*, 34, 937-955, 2003.
- Blazek, J. *Computational Fluid Dynamics: Principles and applications*. Elsevier Science. 2001.
- 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, 190–200. 2006.
- Boysan, F.; Ayers, W.H.; Swithenbank, J. Fundamental mathematical-modelling approach to cyclone design. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, 60, 222–230, 1982.
- Casal, J. and Martínez-Benet, J.M. *Chemical Engineering*. Jan. issue, 99-100, 1983.
- Cortés, C.; Gil, A. Modeling the gas and particle flow inside cyclone separators. *Prog. Energy Comb. Sci*, 33, 409-452, 2007.
- Chu, K.W.; Wang, B.; Xu, D.L.; Chen, Y.X.; Yu, A.B. CFD–DEM simulation of the gas–solid flow in a cyclone separator. *Chemical Engineering Science*, 66, 834–847, 2011.
- Chung, T.J. *Computational Fluid Dynamics*, Cambridge University Press, U.K. Part Five, Chapter Twenty-one. Pages 683-705. 2002.
- Davidson, L. Large eddy simulations: how to evaluate resolution. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 30, 1016-1025, 2009.
- Ferziger, J.H.; Péric, M. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Volume 3. Springer. Berlín. 1996.
- Ferziger, J.H.; Perić, M. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Third Edition Springer-Verlag. Berlín. 2002.
- George, W.K. and Tutkun, M. Mind the gap: a guideline for large eddy simulation. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 367, 2839-2847, 2009.
- 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.
- Hogg S.; Leschziner, M.A. Computational of highly swirling confined flow with a Reynolds stress turbulence model. *AIAA*, 27, 57–63, 1989.
- Jakirlic, S.; Hanjalic, K. Modeling rotating and swirling turbulent flows: a perpetual challenge. *AIAA*; 40: 1984–1996. 2002.
- Kegg, S.W. *A Numerical Investigation of Gas Cyclone Separation Efficiency with Comparison to Experimental Data and Presentation of a Computer-Based Cyclone Design Methodology*. PhD thesis, University of Akron, 2008.
- Ma, L.; Ingham, D.B.; Wen, X. Numerical modeling of the fluid and particle penetration through small sampling cyclones. *J. Aerosol Sci.*, 31, 1097–1119. 2000.
- Martignoni, W.P.; Bernardo, S.; Quintani, C.L. Evaluation of cyclone geometry and its influence on performance parameters by computational fluid dynamics (CFD). *Braz. J.Ch. Eng.*, Vol. 24, 1, 83-94. 2007.

- Nicoud, F. and Ducros, F. Subgrid-scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor. *Flow, Turbulence and Combustion*, 62, 183-200, 1999.
- Piomelli, U. Wall-layer models for large-eddy simulations. *Progress in aerospace sciences*, 44, 437-446, 2008.
- Piomelli, U. Large-eddy simulation: achievements and challenges. *Progress in Aerospace Sciences*, 35, 335-362, 1999.
- Piomelli, U.; Balaras, E.; Pasitano, H.; Squires, K.D.; Spalart, P. The inner-outer layer interface in large eddy simulations with wall layer-models. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 24, 538-550, 2003.
- Qian, F.; Wu, Y. Effects of the inlet section angle on the separation performance of a cyclone. *Chemical Engineering Research and Design*, 87, 1567-1572, 2009.
- 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.
- 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.
- Safikhani, H.; Akhavan-Behabadi, M.A.; Shams, M.; Rahimyan, M.H. Numerical simulation of flow field in three types of standard cyclone separators. *Advanced Powder Technology*, 435-442, 2010.
- Salim, S.M. and Cheah, S.C. Wall y strategy for dealing with wall-bounded turbulent flows. In Proceedings of the *International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*, Volume 2. Citeseer, 2009.
- Shalaby, H.H. *On the potential of large eddy simulation to simulate cyclone separators*. PhD Thesis. University of Chemnitz. 1999.
- Shepherd, C.B. and Lapple, C.E. *Ind. and Eng.* 31, 972-984, 1940.
- Spalart, P.R. Strategies for turbulence modelling and simulations. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 21, 252-263, 2000.
- 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.
- Xiang, R.B.; Lee, K.W. Numerical study of flow field in cyclones of different height. *Chemical Engineering and Processing*, 44, 877-883, 2005.
- 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.