

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/44204849>

SIMULACIÓN DEL PATRÓN DE FLUJO EN FASE SIMPLE PARA DIFERENTES DISEÑOS DE SEPARADORES CICLÓNICOS

ARTICLE

Source: OAI

READS

119

3 AUTHORS, INCLUDING:



Daniel Bahamón

Matgas

3 PUBLICATIONS 1 CITATION

[SEE PROFILE](#)



Germán Camilo Quintana

Universidad Pontificia Bolivariana

21 PUBLICATIONS 116 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

SIMULACIÓN DEL PATRÓN DE FLUJO EN FASE SIMPLE PARA DIFERENTES DISEÑOS DE SEPARADORES CICLÓNICOS

Daniel Bahamón García*, **Hader Humberto Alzate Gil***, **Germán Camilo Quintana Marín**†**

**Facultad de Ingeniería Química. Universidad Pontificia Bolivariana, Cq. 1 #70-01
Medellín, Colombia,*

Recibido 12 Agosto 2009; aceptado 04 Diciembre 2009
Disponible en línea: 27 Diciembre 2009

Resumen: Los ciclones son equipos de separación gas-sólido que se emplean en la industria en diversas aplicaciones, sin embargo, son considerados equipos de baja eficiencia y su diseño se ha simplificado a modelos elementales sin mayor oportunidad de mejora. Este trabajo presenta un estudio numérico realizado mediante dinámica de fluidos computacional, de flujos en fase simple en dos diseños de ciclones de alta eficiencia: el Stairmand comúnmente empleado en la industria y uno propuesto por López y Trujillo que según cálculos preliminares presentó mejores desempeños. La turbulencia del flujo de gas se obtuvo mediante el modelo de esfuerzos de Reynolds. Se analizaron los campos de flujo y de presión obtenidos para ambas geometrías. Los resultados muestran que el diseño propuesto presenta menores caídas de presión y por lo tanto ahorro en costos de operación. *Copyright © 2009 UPB.*

Abstract: Cyclones are equipment for gas-solid separation which are used in industry for many applications, however, they are considered low-efficiency equipment and their design has been simplified to basic models without further improvement. This paper presents a numerical study by computational fluid dynamics in single phase flow for two designs of high efficiency cyclones: the Stairmand commonly used in industry and one proposed by Lopez and Trujillo that according to preliminary calculations showed better performances. The turbulence of the gas flow was obtained by the Reynolds stress model. The flow fields and pressure obtained for both geometries were analysed. The results showed that the proposed design had lower pressure drops and therefore savings in operating costs.

Keywords: Cyclones, Flow Pattern, Reynolds stress model, Computational Fluid Dynamics (CFD).

1. INTRODUCCIÓN

Debido a su bajo costo de operación, a la ausencia de partes móviles y ser adaptables a un amplio rango de operación, los separadores ciclónicos tienen aplicación en diferentes industrias como de cementos, de madera, químicas y de alimentos

([Peres, 2002](#)). Sin embargo, en estos dispositivos de separación se podría optimizar la relación costo-beneficio mediante la manipulación de sus parámetros de rendimiento, si se mejoran las condiciones de carácter técnico que se requieren en su diseño y posterior fabricación, lo cual se

† Autor al que se le dirige la correspondencia:
Tel. (+574) 415 9020 ext. 9582.
E-mail: german.quintana@hotmail.com (Germán Quintana).

puede lograr con un buen entendimiento de la dinámica de flujo en su interior.

A pesar de su aparente simplicidad, la dinámica del flujo en un ciclón es compleja ([Witt et al., 1999](#)), incluye características tales como vorticidad y en algunos casos la presencia de varias zonas anulares de flujo reverso, para las cuales las teorías de flujo de vórtice confinado no predicen satisfactoriamente los fenómenos observados ([Gimbun et al. 2005](#); [Bernardo, 2006](#)). Por otra parte, el problema asociado con el modelamiento matemático detallado de los perfiles de flujo involucra la solución de ecuaciones diferenciales parciales no lineales fuertemente acopladas -de conservación de momentum y masa-, cuya solución analítica completa aún no se conoce, sin embargo se pueden resolver con un método de discretización si se dispone de una herramienta apropiada para la solución numérica.

Los modelos de simulación mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) proporcionan un medio económico para la comprensión de la compleja dinámica de flujo en el interior de estos equipos y la forma como éstos son afectados por cambios en el diseño original o en las condiciones de operación. Pueden utilizarse estos cálculos en un amplio rango de flujos reduciendo la necesidad de pruebas experimentales, permitiendo realizar predicciones en el proceso de diseño y en la evaluación de procesos industriales, disminuyendo factores como costos, riesgos y tiempo ([Ranade, 2001](#)), logrando así fundamentar la toma de decisiones que conducen al diseño de sistemas con un mejor desempeño.

La metodología de solución para los modelos de CFD es subdividir el dominio en un gran número de volúmenes de control y convertir las ecuaciones diferenciales parciales por integración sobre estos volúmenes de control, en sus equivalentes algebraicos ([Patankar, 1980](#)). El resultado es un conjunto de ecuaciones algebraicas simultáneas que pueden ser resueltas empleando métodos iterativos para obtener el campo de distribuciones de variables dependientes relativas a las condiciones de frontera que definen el problema específico, tales como velocidades y presiones.

Estudios previos realizados por [López y Trujillo \(2005\)](#) plantean nuevas geometrías para los tres tipos de separadores ciclónicos existentes

mediante el empleo de correlaciones: ciclón de alta eficiencia, convencional y de alta capacidad; sin embargo, dado el carácter empírico de estas correlaciones, no se tiene un sustento teórico que las valide.

En este trabajo se simula y evalúa el funcionamiento de una de estas geometrías propuestas, con la ayuda del software especializado *FLUENT*®, que resuelve sistemas de ecuaciones diferenciales parciales mediante el método de discretización de volúmenes finitos, y permite observar el comportamiento del gas en el interior del ciclón, al comparar los perfiles de flujo de presión y velocidad en fase gaseosa, con los de un ciclón Stairmand tradicional.

2. MODELAMIENTO MATEMÁTICO

2.1 Descripción del Modelo

Usualmente, los flujos de fluidos se describen matemáticamente por un grupo de ecuaciones diferenciales parciales: la ecuación de continuidad que se obtiene del balance de masa, y las llamadas ecuaciones de Navier-Stokes, que son el resultado de la conservación de cantidad de movimiento. Para un flujo incompresible en ciclones de fase simple en estado estacionario, ambas ecuaciones se pueden expresar, en un enfoque Euleriano como:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \cdot u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \quad (2)$$

donde los subíndices $i, j=1,2,3$ indican los componentes en el sistema de coordenadas, ρ denota la densidad, u_i representa la velocidad del fluido, p la presión y μ es la viscosidad. El flujo puede considerarse isotérmico, por lo que la ecuación de energía no se tiene en cuenta.

Además

$$\tau_{ij} = -\rho \cdot \overline{u'_i u'_j}, \quad (3)$$

se define como el tensor de esfuerzos de Reynolds y representa el efecto de las fluctuaciones turbulentas en el flujo. Sin embargo, las ecuaciones anteriores no están completamente especificadas hasta que no se determine el tensor de esfuerzos de Reynolds mediante un modelo de turbulencia.

Para la turbulencia, hay dos modelos comúnmente utilizados en simulaciones con ciclones: el modelo $k-\varepsilon$ y el modelo de esfuerzos de Reynolds (RSM). El modelo $k-\varepsilon$ trabaja bajo la suposición de turbulencia isotrópica, por lo cual tiene sus limitaciones para flujos altamente rotantes como los de los ciclones. El modelo RSM se olvida de esta suposición isotrópica y resuelve una ecuación de transporte para cada componente del tensor de esfuerzos de Reynolds, por lo cual es el modelo turbulento más aplicable aún cuando tenga la desventaja de ser computacionalmente más dispendioso ([Wang et al., 2006](#)).

La ecuación exacta de transporte para el tensor de esfuerzos de Reynolds, $\rho \cdot \overline{u_i u_j}$, puede escribirse como:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \overline{u_i u_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho \overline{u_k u_i u_j}) = D_{ij} + P_{ij} + G_{ij} + \Phi_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (4)$$

Donde los dos términos de la izquierda son el tiempo local derivativo de esfuerzo y el término de transporte convectivo, respectivamente. Los cinco términos de la derecha son:

Término difusivo:

$$D_{L,ij} = -\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\frac{\mu_k}{\sigma_k} \cdot \frac{\partial}{\partial x_k} \overline{u_i u_j} \right], \quad (5)$$

Término de producción de esfuerzo:

$$P_{ij} = -\rho \left[\overline{u_i' u_k'} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u_j' u_k'} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right], \quad (6)$$

Término de producción de empuje:

$$G_{ij} = -\rho \cdot \beta \cdot \left(g_i \cdot \overline{u_j' \theta} + g_j \cdot \overline{u_i' \theta} \right), \quad (7)$$

Término de presión:

$$\Phi_{ij} = p \left(\frac{\partial \overline{u_i'}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j'}}{\partial x_i} \right), \quad (8)$$

Término de disipación:

$$\varepsilon_{ij} = -2\mu \frac{\partial \overline{u_i'}}{\partial x_k} \frac{\partial \overline{u_j'}}{\partial x_k}, \quad (9)$$

La energía cinética turbulenta, k , y la tasa de disipación turbulenta, ε , se resuelven mediante las siguientes ecuaciones, respectivamente:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{1}{2} (P_{ii} + G_{ii}) - \rho \cdot \varepsilon (1 + 2M_t^2) \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - C_{\varepsilon 1} \cdot \frac{1}{2} (P_{ii} + C_{\varepsilon 3} \cdot G_{ii}) \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2} \cdot \rho \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (11)$$

Donde M_t representa el número de Mach. La viscosidad turbulenta, μ_t , empleada en las ecuaciones (10) y (11), se determina mediante la fórmula:

$$\mu_t = \rho \cdot C_\mu \cdot \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (12)$$

Los valores de las constantes que aparecen en el modelo están usualmente asignadas así: $\sigma_k = 0.82$, $C_\mu = 0.09$, $\sigma_\varepsilon = 1.0$, $C_{\varepsilon 1} = 1.44$, y $C_{\varepsilon 2} = 1.92$. $C_{\varepsilon 3}$ se evalúa como una función de la dirección local del flujo en dirección al vector gravitacional.

2.2 Condiciones de Simulación

Las ecuaciones presentadas en el numeral anterior, se resolvieron numéricamente empleando el código comercial *FLUENT*® en su versión 6.3, mediante el método de volúmenes finitos para discretizar las ecuaciones de transporte. Se utilizó el algoritmo SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*) para el acople de presión-velocidad. Este método segregado permite resolver las ecuaciones de Navier-Stokes partiendo de una presión supuesta para obtener valores de velocidad preliminares, que se emplearán para hallar una nueva presión, y así sucesivamente hasta lograr convergencia. Se empleó además un esquema de segundo orden para interpolar las variables en la superficie del volumen de control. Más detalles sobre discretización en [Patankar \(1980\)](#).

Las simulaciones se llevaron a cabo en un computador ACER 4720Z con un procesador Intel Pentium IV dual-core, de 1.46 GHz, de 3 GB de memoria RAM y 120 GB de disco duro, en el cual se precisaron aproximadamente 800 iteraciones para alcanzar convergencia en cada modelo, con una precisión de 10^{-5} en la norma.

En la Tabla 1 se lista la geometría de los diseños de ciclones empleados en la simulación: Ciclón Stairmand de alta eficiencia y López de alta eficiencia. Este segundo fue obtenido por [López y Trujillo \(2005\)](#), y según cálculos preliminares mediante correlaciones empíricas, genera menores caídas de presión, mejores eficiencias de separación de partículas menores de $14 \mu\text{m}$ y equipos más esbeltos que requieren menores espacios en planta. Para el diámetro de los ciclones, y en general las condiciones de operación, se tomaron valores característicos de ciclones industriales presentados por [Koch y Licht \(1986\)](#).

Tabla 1. Configuraciones geométricas

<i>DATOS GEOMÉTRICOS CICLONES</i>	<i>STAIRMAND ALTA EFICIENCIA</i>	<i>LOPEZ ALTA EFICIENCIA</i>
Diámetro del ciclón , D (m)	0.8382	0.7955
Altura del ducto de entrada (a)	0.5D	0.5D
Ancho del ducto de entrada (b)	0.2D	0.2D
Long. localizador de vórtice (S)	0.5D	0.725D
Diámetro localizador de vórtice (De)	0.5D	0.55D
Long. cuerpo cilíndrico (h)	1.5D	2.3D
Longitud total del ciclón (H)	4.0D	4.3D
Diámetro salida de sólidos (B)	0.375D	0.45D

Para realizar el mallado de ambos casos, se empleó el preprocesador *GAMBIT®*. Mediante una evaluación previa del efecto del refinamiento de la malla, se seleccionó finalmente una red nodal con elementos tetraédricos para la

simulación. En la [Fig. 1](#) se ilustra esquemáticamente la estructura para los ciclones Stairmand y López, los cuales cuentan con 91,280 y 93,993 nodos respectivamente, para garantizar una predicción razonable de los perfiles de velocidad y de presión en el interior del dispositivo.

Se asumió el flujo de gas a condiciones estándar de presión y temperatura (STP) y un flujo de alimentación de $1.59 \text{ m}^3/\text{s}$ como condición inicial. Se establecieron condiciones de frontera referidas a la velocidad del fluido de entrada al dominio, a la presión ambiente a la salida y a la condición de no deslizamiento en la interfase sólido fluido del ciclón.

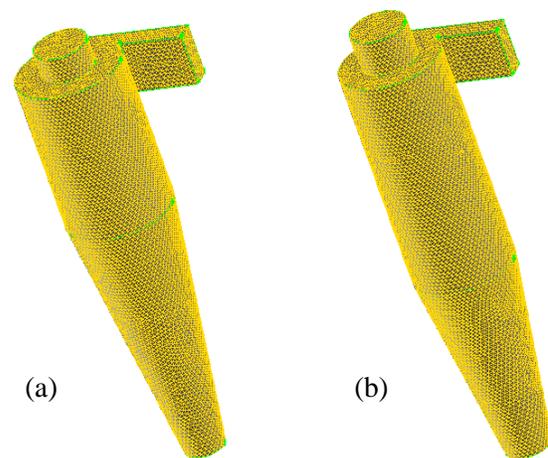


Fig. 1. Geometría y mallado de ciclón: (a) Stairmand de alta eficiencia, (b) López de alta eficiencia.

Mediante los gráficos detallados de perfiles de velocidad y presión en fase simple que se generan para las diferentes geometrías, se evalúa el desempeño de cada tipo de ciclón, y se comparan entre sí.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos para las dos simulaciones se muestran en los siguientes apartados, por medio de figuras que contienen los campos de velocidades resultantes, el contorno de las presiones y los perfiles para ambas variables. La ausencia de soluciones analíticas y pruebas experimentales no permite la validación de resultados, sin embargo, en términos cualitativos, lo obtenido proporciona una buena representación del flujo rotacional en el interior de separadores

ciclónicos, y la forma de los perfiles de velocidad y presión son coherentes con los que se encuentran en la literatura, debido a la física del problema y las condiciones de frontera aplicadas (Xiang y Lee, 2005; Bernardo et al., 2005; Wang et al. 2006; Zhao et al., 2006).

3.1 Campo de Presiones

En las Figs. 2 y 3 se presentan los contornos de presión estática y total para ambos diseños. En el lado izquierdo se encuentra el ciclón Stairmand de alta eficiencia y en el lado derecho el ciclón López de alta eficiencia.

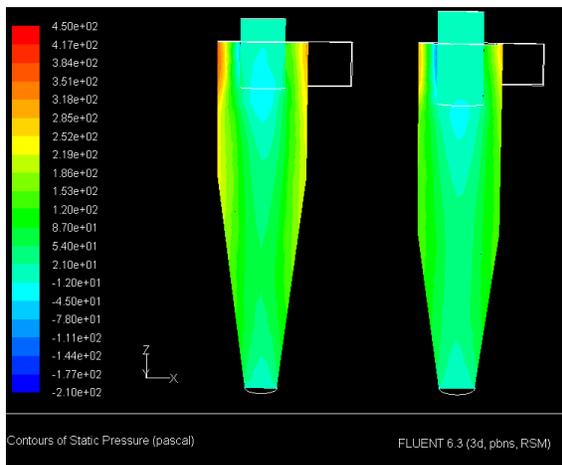


Fig. 2. Mapas de Presión Estática para ciclones Stairmand / López.

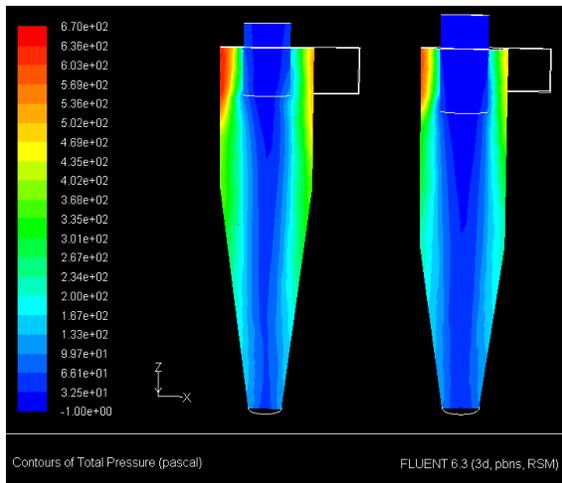


Fig. 3. Mapas de Presión Total para ciclones Stairmand / López.

Los contornos de presión ilustran un comportamiento esperado. Se observa que la presión tiene su valor máximo en la pared y

decrece radialmente hacia el centro -lo cual se contempla mejor en las distribuciones para diferentes posiciones axiales de la Fig. 4-, además aparece una zona de presión negativa en el eje central debida a la fuerza centrífuga que genera el flujo en el equipo.

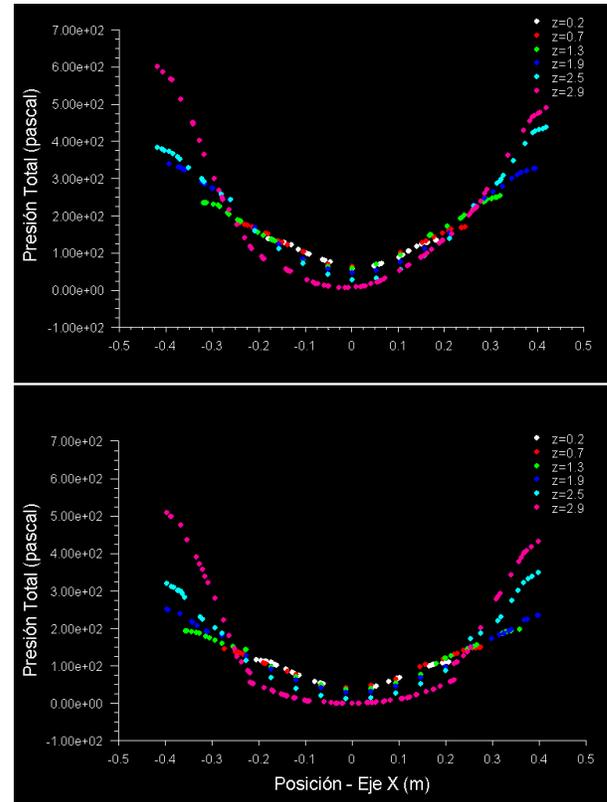


Fig. 4. Distribuciones de Presión Total para diferentes posiciones axiales en los ciclones: Stairmand (arriba) y López (abajo).

Se puede apreciar que los perfiles son prácticamente iguales entre sí para cada diseño de ciclón, con diferencias en el pico de presión que se genera en las paredes. Asimismo, se distingue una zona de mayor presión en la región donde el fluido choca con el cuerpo cilíndrico del ciclón e inicia su movimiento rotacional descendente.

Haciendo una comparación entre los dos diseños, se tiene que el ciclón López exhibe un vórtice central de mayor diámetro y con menos fluctuaciones con respecto al eje axial que el Stairmand. Al tener una mayor región de presiones bajas, es posible que en el ciclón López ocurra una disminución en la eficiencia de colección, debido a que con el incremento en la fuerza de arrastre a las partículas de menor

tamaño se les hace más difícil permanecer en las paredes del dispositivo.

La definición de caída de presión total en un ciclón es la diferencia entre la presión total a la entrada y a la salida del dispositivo ([Bernardo et al., 2006](#)), que para este caso es la presión atmosférica. Los valores obtenidos de caída de presión para ambos diseños se presentan en la Tabla 2, lográndose una disminución de prácticamente 50 Pa con la geometría propuesta por [López y Trujillo \(2005\)](#). Esta reducción se traduce en ahorros en costos de operación del equipo. Sin embargo, éste es sólo uno de los parámetros de rendimiento en estos dispositivos; hay que tener en cuenta la eficiencia que se pueda lograr.

Tabla 2. Parámetro de rendimiento para ambos diseños de ciclones

<i>Tipo de Ciclón</i>	<i>Caída de Presión Total (Pa)</i>
Stairmand de alta eficiencia	665.7
López de alta eficiencia	618.1

Por tal motivo, para poder determinar si el ciclón López genera mejores rendimientos que el Stairmand, es necesario una simulación gas-sólido, teniendo en cuenta las interacciones entre las fases, lo cual demanda mayor capacidad computacional.

3.2 Velocidad Tangencial

Los perfiles y distribuciones de velocidad tangencial se presentan en las [Figs. 5 y 6](#). De acuerdo con los valores en el extremo izquierdo de la [Fig. 5](#), la región coloreada de rojo indica que el gas a la entrada del separador es acelerado hasta 1.5 veces su velocidad inicial en el punto donde el fluido empieza a experimentar flujo rotacional –lo que concuerda con la distribución presión obtenida, constatando la relación directa entre velocidad y presión-. Luego, la velocidad va disminuyendo a medida que el gas gira y va descendiendo por la pared.

De la [Fig. 5](#) se observa –principalmente en el ciclón Stairmand- que se presenta una oscilación en el vórtice central, que da pie a pensar que se presenta el fenómeno cuasi-periódico conocido

como Precesión del Vórtice Central (PVC). Éste se debe a la estructura inestable del vórtice y puede ser muy perjudicial para el objetivo final de los ciclones, debido a que altera las corrientes de material particulado en la pared del dispositivo y por tanto se ve afectada la eficiencia de colección.

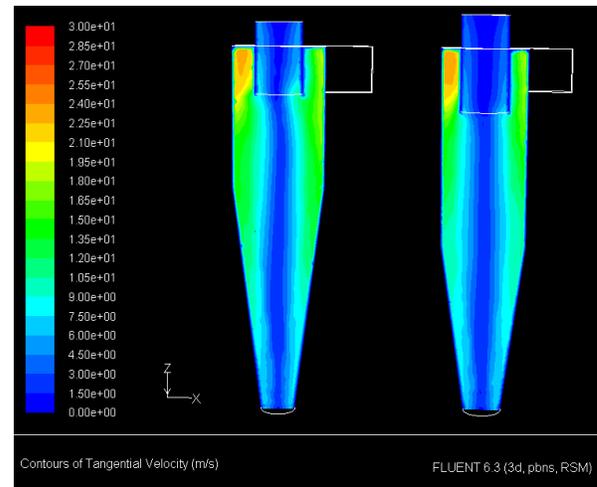


Fig. 5. Mapas de Velocidad Tangencial para ciclones Stairmand / López.

La simulación se llevó a cabo en estado estacionario, mostrando un perfil promedio que esboza un comportamiento medio del vórtice central, el cual tiende a rotar hacia el final del separador. Para el ciclón López se observa un vórtice central más estable y no se alcanza a percibir este fenómeno, sin embargo no es prueba contundente de que no ocurra. Para tal caso, es necesario realizar un análisis más minucioso en estado transitorio, posiblemente empleando un modelo de turbulencia como el *Large Eddy Simulation* (LES), el cual es muy útil para detectar estructuras turbulentas microscópicas en flujos transitorios ([Martignoni et al., 2007](#)).

Por otro lado, en la [Fig. 6](#) se hace una comparación mediante los perfiles de velocidad para 7 posiciones axiales en ambos ciclones, ciclón Stairmand arriba y ciclón López abajo: $z = 0.2\text{m}$, $z = 0.7\text{m}$, $z = 1.3\text{m}$, $z = 1.9\text{m}$, $z = 2.5\text{m}$, $z = 2.9\text{m}$ y $z = 3.5\text{m}$. Se observa la esperada combinación de vórtice tipo Rankine, y se logra apreciar para el ciclón Stairmand, que el eje del vórtice no coincide con el eje geométrico del ciclón, fenómeno reportado por [Cortés y Gil \(2007\)](#), que ocurre cuando la velocidad tangencial se ve afectada por la PVC. Esta puede ser una de las principales razones para instalar localizadores

de vórtice excéntricos en algunos ciclones y así reducir el flujo caótico y por tanto la caída de presión.

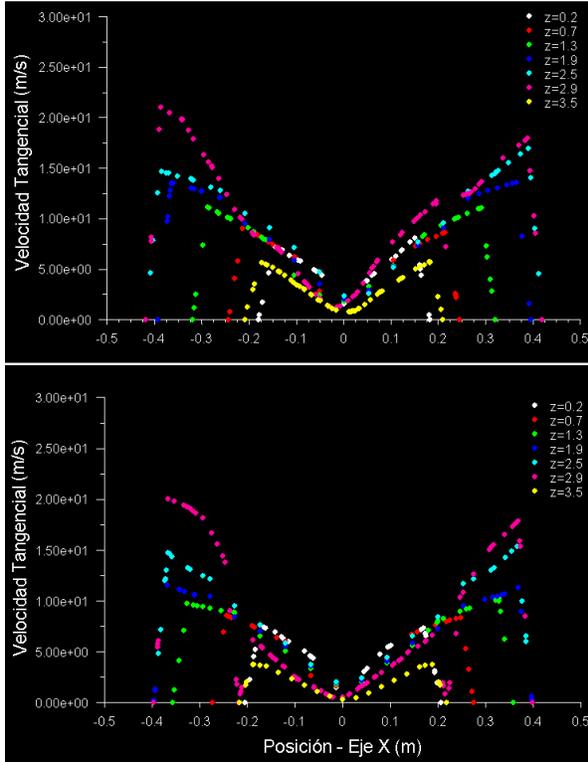


Fig. 6. Distribuciones de Velocidad Tangencial para diferentes posiciones axiales en los ciclones: Stairmand (arriba) y López (abajo).

3.3 Velocidad Axial

En las Fig. 7 se presentan distribuciones radiales de velocidad axial en ambos diseños, y se observa que el vórtice forzado no es completamente axisimétrico, esto debido a los flujos secundarios que se desarrollan en los alrededores del localizador de vórtice –como el que se percibe en la parte posterior de ambos dispositivos-.

Antes que el fluido llegue al localizador de vórtice, éste colisiona con el gas que está entrando y se forma un flujo caótico en las afueras del localizador; en el mismo momento, la velocidad del gas disminuye fuertemente y puede dirigirse en la dirección opuesta. Esto incrementa la pérdida de energía y de caída de presión en el ciclón, y en este caso, concuerda con lo obtenido anteriormente para los campos de presión, es decir, ante un flujo más desordenado como el que presenta el ciclón Stairmand (a la derecha en la Fig. 7), es mayor la caída de presión en el

dispositivo. De la misma forma, para el ciclón López se tiene un perfil más ordenado y menos desarrollado en la salida de gas por el localizador de vórtice, que genera menores caídas de presión.

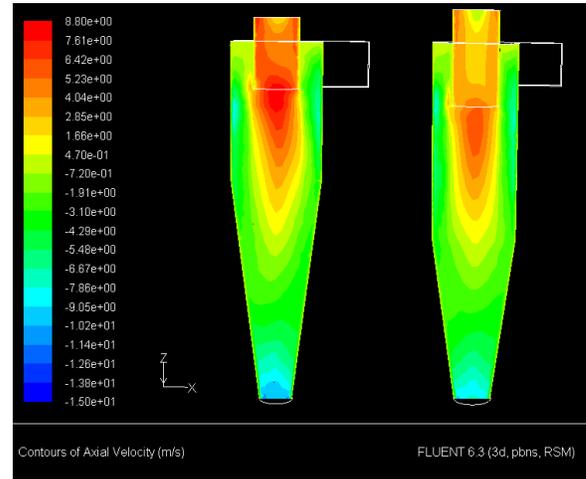


Fig. 7. Mapas de Velocidad Axial para ciclones Stairmand / López.

La Fig. 8 presenta la distribución de la velocidad axial en diferentes zonas dentro del dispositivo. Se observa que el flujo es descendente en el eje central hasta una altura un poco mayor a 1 m desde la base en ambos ciclones, y posteriormente cambia de dirección y se dirige completamente hacia arriba.

Para las distancias más cercanas a la salida de sólidos, no se observan perfiles en forma de W, por lo que no hay recirculación de las partículas ya colectadas tal que afecte el rendimiento de estos ciclones, como suele ocurrir en equipos mal diseñados (Lee et al. 2006).

Por otro lado, en los perfiles para $z = 3.4\text{m}$ -prácticamente en la salida del gas- se aprecia una característica muy particular, ya que el fluido abandona el dispositivo con mayor velocidad por las paredes del localizador de vórtice que por el centro mismo, y comparativamente, con una magnitud 1.5 mayor en el ciclón Stairmand que en el López.

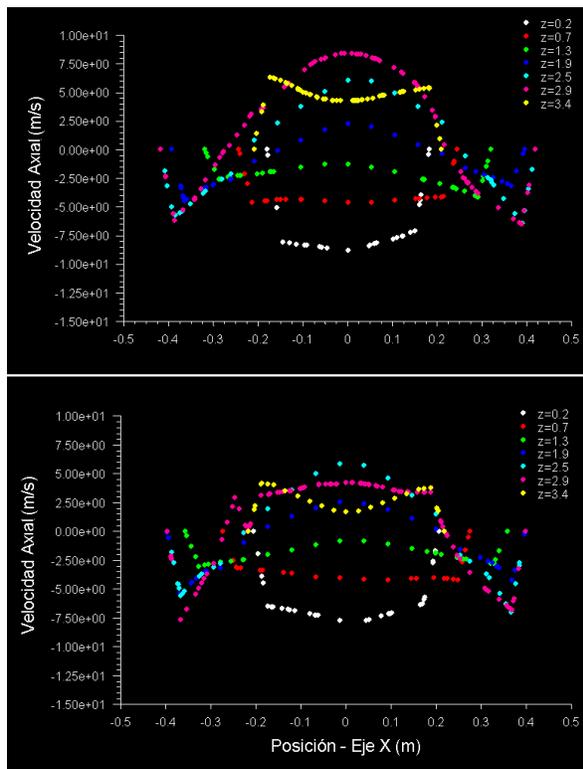


Fig. 8. Distribuciones de Velocidad Axial para diferentes posiciones axiales en los ciclones: Stairmand (arriba) y López (abajo).

Considerando todas las características presentadas en este trabajo, los resultados numéricos con el modelo de turbulencia RSM proporcionan una buena representación del flujo turbulento en remolinos que se presenta en los separadores ciclónicos, y son cualitativamente similares a los obtenidos por [Wang et al. \(2006\)](#).

4. CONCLUSIONES

Se empleó el modelo de esfuerzos de Reynolds para simular el flujo turbulento anisotrópico, en fase simple, en dos tipos de ciclones: Stairmand de alta eficiencia y López de alta eficiencia; y se verificó su aplicabilidad mediante la buena relación cualitativa de perfiles de presiones y velocidades con lo obtenido por otros autores ([Xiang y Lee, 2005](#); [Bernardo et al., 2005](#); [Wang et al., 2006](#); [Zhao et al., 2006](#)).

El método de volúmenes finitos aplicado a problemas de dinámica de fluidos constituye una herramienta básica, cuyo desarrollo se dificulta por el procesamiento de datos, creación y

depuración de algoritmos; pero que permite una conceptualización del fenómeno desde su formulación, estableciendo así una relación comprensible entre los esquemas de aproximación utilizados y los efectos físicos ligados a los fenómenos de transporte analizados.

Se verifica que el diseño propuesto por López y Trujillo genera menores caídas de presión. Esta disminución es un punto muy importante a considerar para mejorar el parámetro de rendimiento de los ciclones. Sin embargo, extensiones de este trabajo incluirán análisis de flujos gas-sólidos, con la cual se determinará el efecto que generan las partículas sobre el campo de flujo y cómo se ven afectados los parámetros de rendimiento en ambos ciclones.

Los resultados de estos primeros modelamientos realizados con CFD, en ciclones en estado estacionario, son relativamente exitosos. Sin embargo, es necesario utilizar métodos de simulación transitorios con alta precisión en la discretización numérica, para capturar toda la complejidad del flujo de gas dentro de estos equipos y estimar razonablemente fenómenos aún no predichos como: la longitud natural del ciclón, y por lo tanto, la longitud geométrica recomendable, las circunstancias y los efectos de una pérdida de coherencia del vórtice y el consiguiente flujo caótico, el efecto de dispositivos de estabilización de remolinos, entre otros. Evidentemente, es necesaria más investigación sistemática en este sentido.

NOMENCLATURA

- a Altura de la entrada del ciclón (m)
- b Ancho de la entrada del ciclón (m)
- B Diámetro de salida de sólidos (m)
- C_D Coeficiente de arrastre
- D Diámetro del cuerpo del ciclón (m)
- D_e Diámetro del localizador de vórtice (m)
- d_p Diámetro de partícula (m)
- F_D Fuerza de arrastre por unidad de masa de partículas

h	Longitud del cuerpo cilíndrico (m)	Cortés, Cristóbal y Gil, Antonia. (2007). Modelling the gas and particle flow inside cyclone separators. <i>Progress in Energy and Combustion Science</i> . 33 : 409-452.
H	Longitud total del ciclón (m)	Gimbun, J., Chuah, T.G., Fakhru'l-Razi, A. y Choong, Thomas S.Y. (2005). The influence of temperature and inlet velocity on cyclone pressure drop: a CFD study. <i>Chemical Engineering and Processing</i> , 44 : 7-12.
k	Energía cinética turbulenta por unidad de masa (J/Kg)	Koch, W. y Licht, W. (1977). New design approach boosts cyclone efficiency. <i>Chemical Engineering</i> . New York. 84 : 241-249.
Re	Número de Reynolds, $\rho.v.d / \mu$	Lee, Jin W., Yang Hoe J. y Lee, Dong Y. (2006). Effect of the cylinder shape of a long-coned cyclone on the stable flow-field establishment. <i>Powder Technology</i> . 165 : 30-38.
S	Longitud del localizador de vórtice (m)	López B., Gloria M., Trujillo Vera, Diego A. y Quintana M., Germán C. (2005) Nueva propuesta para el análisis y la selección de ciclones. <i>Ingeniería Química, Uruguay</i> . 27 .
u	Velocidad del fluido (m/s)	Martignoni, W. P., Bernardo, S. y Quintani, C. L. (2007). Evaluation of cyclone geometry and its influence on performance parameters by computational fluid dynamics (CFD). <i>Brazilian Journal of Chemical Engineering</i> . 24 : 83 – 94.
Vt	Componente tangencial de la velocidad del fluido en el ciclón (m/s)	Patankar, Suhas. (1980). <i>Numerical heat transfer and fluid flow</i> . Estados Unidos: Taylor & Francis. 197 p. (Computational and Physical Processes in Mechanics and Thermal Sciences).
Vz	Componente axial de la velocidad del fluido en el ciclón (m/s)	Peres, A. P. (2002). Técnicas de fluidodinámica computacional (CFD) aplicadas a escoamientos em ciclones. PhD Tesis. Campinas State University (UNICAMP), Campinas-SP-Brazil. 168 p.
ΔP	Caída de presión a través del ciclón (Pa)	Ranade, V. (2001) <i>Computational flow modeling for chemical reactor engineering</i> . San Diego, California: Academic Press.
ε	Tasa de disipación de la turbulencia por unidad de masa (J/Kg.s)	Wang, B., Xu, D. L., Chu, K. W. y Yu, A. B. (2006). Numerical study of gas-solid flow in a cyclone separator. <i>Applied Mathematical Modelling</i> , 30 :1326-1342.
μ	Viscosidad (Kg/m.s)	Witt, P.J., Mittoni, L.J., Wu, J. y Shepherd, I.C. (1999). Validation of a CFD model for predicting gas flow in a cyclone. <i>Proceedings of CHEMECA99</i> , Australia.
μ_t	Viscosidad turbulenta (Kg/m.s)	Xiang, R.B. y Lee, K.W. (2005) Numerical study of flow field in cyclone of different height. <i>Chem. Eng Proc</i> , 44 : 877–883.
ρ	Densidad del fluido (Kg/m ³)	Zhao, B., Shen, H. y Kang, Y. (2004). Development of a symmetrical spiral inlet to improve cyclone separator performance. <i>Powder Technology</i> . 145 : 47-50.
ρ_p	Densidad de la partícula (Kg/m ³)	

AGRADECIMIENTO

Los autores expresan su agradecimiento al grupo de investigación Pulpa y Papel de la Universidad Pontificia Bolivariana por las herramientas brindadas.

REFERENCIAS

Bernardo, S., Peres, A.P. y Mori, M. (2005). Computational study of cyclone flow fluid dynamics using a different inlet section angle. *Thermal Engineering*, **4**: 18-23.

Bernardo, S., Mori, M., Peres, A.P. y Dionisio, R. P. (2006). 3-D computational fluid dynamics for gas and gas-particle flows in a cyclone with different inlet section angles. *Powder Technology*, **162**: 190-200.

SOBRE LOS AUTORES

Daniel Bahamón García

Estudiante de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Pontificia Bolivariana. Áreas de interés investigativo: Tecnología de partículas.

Hader H. Alzate Gil

Profesor Asistente de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Pontificia Bolivariana. Ingeniero Químico de la Universidad Pontificia Bolivariana. Estudiante de Doctorado en Ingeniería, de la Universidad Pontificia Bolivariana. Áreas de interés investigativo: Pulpa y Papel, Tecnología de partículas.

Germán C. Quintana Marín

Profesor Asociado de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Pontificia Bolivariana. Ingeniero Químico de la Universidad Pontificia Bolivariana. Maestro en Sistemas Energéticos, graduado de la Universidad de Pontificia Bolivariana. Doctor en Ingeniería, de la Universidad Pontificia Bolivariana. Áreas de interés investigativo: Pulpa y Papel, Tecnología de partículas.