

# ESTUDIO COMPUTACIONAL DEL EFECTO GEOMÉTRICO DE SEPARADORES CICLONES EN NUBES DE POLVO PARA PREVENIR EXPLOSIONES

## COMPUTATIONAL STUDY OF THE GEOMETRIC EFFECT OF CYCLONE SEPARATORS IN DUST CLOUDS TO PREVENT DUST EXPLOSION

**Edgar O. Castrejón-González<sup>1</sup>, Christian O. Díaz-Ovalle<sup>2\*</sup>, Seungho Jung<sup>3</sup>, José J. Cano-Gómez<sup>4</sup>, Florianne Castillo-Borja<sup>5</sup>, Ahuitzolt de J. Joaquín-Ramos<sup>2</sup>**

(1) Tecnológico Nacional de México/I.T. Celaya, Departamento de Ingeniería Química, Av. Tecnológico y A.G. Cubas s/n, Celaya, Guanajuato, 38010 – México

(2) Tecnológico Nacional de México/I.T. Roque, Departamento de Ingenierías, km 8 carretera Celaya-Juventino Rosas, Celaya, Guanajuato, 38110 – México

(3) Environmental and Safety Engineering, Ajou University, Suwon 16449 - Korea

(4) Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Químicas, Av. Universidad s/n, Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, 66451 - México

(5) Tecnológico Nacional de México/I.T. Aguascalientes, Departamento de Ingeniería Química, Av. Adolfo López Mateos 1801 Ote., Aguascalientes, Aguascalientes, 20256 - México

\*autor de contacto (e-mail: chdiaz@itroque.edu.mx)

*Recibido: 14/01/2019 - Evaluado: 22/01/2019 - Aceptado: 28/03/2019*

### RESUMEN

Los separadores ciclones presentan riesgo de explosión al generar nubes de polvo. Esto depende de su comportamiento hidrodinámico, el cual es influido por la geometría. Este trabajo propone un conjunto de geometrías para modificar el comportamiento hidrodinámico dentro del separador ciclón. Así, un caso con bajo riesgo de explosión fue obtenido considerando el menor tamaño de la nube de polvo. Algunas geometrías propuestas en este trabajo no han sido reportadas anteriormente. El análisis hidrodinámico y la determinación del tamaño de la nube fueron posibles con la herramienta ANSYS FLUENT sobre el proceso de leche en polvo. Los resultados indicaron las características geométricas que garantizan una nube de polvo con volumen bajo, esto fue restringido a casos que garanticen una aceptable separación de partículas. Adicionalmente, una validación experimental fue realizada con datos de la literatura. Esta propuesta es una estrategia válida para mejorar la seguridad en las unidades de proceso.

### ABSTRACT

Cyclone separators present risk by dust explosion. This depends on its hydrodynamic behavior, in which the geometry influences on. This work proposes a set of geometries in order to modify the hydrodynamic behavior inside the cyclone. Thus, a case with low risk was obtained by considering the lowest volume of the dust cloud. Some proposed geometries herein have not been reported previously. The hydrodynamic analysis and the determination of the dust cloud size were possible by the ANSYS FLUENT tool in a milk powder process. The results indicated the geometrical features to guarantee the lowest volume of the dust cloud; this was restricted to cases that guarantee an acceptable particle separation. Additionally, an experimental validation was carried out with literature data. This proposal is a valid strategy to improve the safety in process units.

Palabras clave: fase discreta, concentración de polvo, diseño geométrico, leche en polvo  
Keywords: discrete phase, dust concentration, geometrical design, milk powder

## INTRODUCCIÓN

La existencia de una nube de polvo dentro de un equipo de proceso es un riesgo de explosión, que depende del tamaño de las partículas, la aglomeración, la concentración de polvo y la intensidad de la turbulencia (Eckhoff, 2003). Amyotte (2014), explicó los principales factores de la explosión de polvo a través del pentágono de explosión; estos factores son el mezclado, el confinamiento, el oxidante, el combustible y la fuente de ignición. En muchos casos, la explosión de polvo podría evitarse mejorando el diseño del equipo. Para evitar la explosión de polvo Amyotte *et al.* (2009), sugirieron un análisis adecuado para indicar los principios inherentemente más seguros: minimización, sustitución, moderación y simplificación. Además, Di Benedetto *et al.* (2010), Amyotte *et al.* (2012) y Russo *et al.* (2013), demostraron la posibilidad de prevenir una explosión de polvo controlando el tamaño de las partículas y la longitud de los polvos floculantes. Además, el trabajo experimental ha descartado los mitos sobre los riesgos de explosión de polvo (Amyotte, 2014; Taveau, 2017).

La predicción de la intensidad y de la probabilidad de explosiones de polvo es un tema complejo debido a las incertidumbres de las condiciones de la ocurrencia. Hassan *et al.* (2014), conceptualizaron un modelo para calcular la intensidad de la explosión de polvo. Sin embargo, el escenario de explosión de polvo requiere un análisis exhaustivo de los parámetros hidrodinámicos. Esto es posible con herramientas como la Dinámica Computacional de Fluidos (CFD, por sus siglas en inglés) (Skjold & Eckhoff, 2016), la cual fue aplicada para analizar la hidrodinámica de nubes de polvo con riesgo de explosión (Di Sarli *et al.*, 2014; Murillo *et al.*, 2013; Tascón & Aguado, 2015). Incluso, el riesgo de explosión de polvo es proporcional al tamaño de la nube de polvo por encima del valor mínimo de explosión de la concentración de polvo (Eckhoff, 2009; Skjold *et al.*, 2005).

En la industria alimentaria, el manejo y el almacenamiento del grano y el proceso de la leche en polvo presentan un alto riesgo de explosión de polvo (Davis *et al.*, 2011; OSHS, 1993). Este último es un proceso que consiste en una cámara, donde las partículas son formadas a partir de un líquido asperjado, el cual entra en contacto con el aire caliente y el agua superficial es evaporada repentinamente. Las partículas son recolectadas en el fondo y el aire húmedo sale de la cámara con baja concentración de partículas, que se recolectan en un separador ciclónico (Barbosa-Cánovas & Vega-Mercado, 2000). Miranda *et al.* (2013), estudiaron la explosión de polvo de un secador de leche por aspersión y observaron: a) la necesidad de aumentar las áreas de venteo por explosión, y b) la existencia de explosiones secundarias en los separadores ciclónicos. Estas observaciones indicaron un riesgo en los ciclones, el cual aumenta con el sobrecalentamiento de la válvula rotativa y una falla en el aislamiento eléctrico (Febo Jr, 2015). La Figura 1 describe el proceso de secado de aspersión.

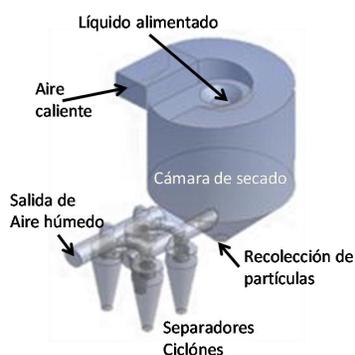


Fig. 1: Proceso de secado de aspersión con sistema de recolección.

Los separadores ciclónicos recolectan sólidos de una corriente de gas para evitar la pérdida de producto y la contaminación ambiental, y su eficiencia de recolección depende de la caída de presión y del diseño geométrico (Hoffmann & Stein, 2008). Su comportamiento hidrodinámico comienza con un flujo de entrada tangencial, seguido de un flujo de descenso rotacional a través de la forma cónica, que genera una componente inversa de

la velocidad axial; y el flujo termina en una salida superior central (Cortés & Gil, 2007). Este comportamiento ha sido modelado mediante ecuaciones algebraicas, formuladas como problemas de programación no lineal, que permiten determinar diseños óptimos con alta eficiencia y baja caída de presión (Elsayed, 2015; Elsayed & Lacor, 2010; Elsayed & Lacor, 2011; Elsayed & Lacor, 2012; Safikhani *et al.*, 2011; Singh *et al.*, 2016; Zhao & Su, 2010). Además de modelar el comportamiento hidrodinámico de los ciclones, otro tema tratado a través de CFD es el diseño de equipos con una baja caída de presión. Varias obras han relacionado el diseño geométrico de los ciclones con la caída de presión, la Tabla 1 contiene estos trabajos. Además, los diseños no convencionales han logrado diseños óptimos (Huang *et al.*, 2017; Mazyan *et al.*, 2017; Mazyan *et al.*, 2018; Pei *et al.*, 2017; Raoufi *et al.*, 2009; Safikhani *et al.*, 2018). No obstante, el efecto de los ciclones sobre la operatividad del secado de aspersión de leche fue analizado por Gamiño-Tovar *et al.* (2018), quienes concluyeron que el ciclón Tengbergen C beneficia la operatividad del secador.

Tabla 1: Estudios sobre el efecto de los cambios geométricos sobre la caída de presión en separadores ciclónicos.

Efecto	Aspecto geométrico	Referencias
Inverso	Diámetro de la sección cónica	Gimbun <i>et al.</i> (2005); Chuah <i>et al.</i> (2006)
	Ángulo de la sección de entrada	Qian y Wu, (2009)
	Longitud de las secciones cónica y cilíndrica	Xiang y Lee(2005); Petit <i>et al.</i> (2012)
	Ancho de la entrada	Elsayed y Lacor (2011)
	Distancia de las paredes que rodean al ducto de salida	Wasilewski y Brar (2017)
	Diámetro del ducto de salida con forma cilíndrica o cónica	Lim <i>et al.</i> (2004)
	Longitud del tubo de salida	Kim y Lee (1990)
Directo	Longitud del tubo de descarga	Qian <i>et al.</i> (2006)
	Tamaño proporcional de los ciclones	Azadi <i>et al.</i> (2010)
	Excentricidad del ducto de salida	Parvaz <i>et al.</i> (2017)
	Longitud del ducto de salida	Ficici <i>et al.</i> (2010)

Los trabajos antes mencionados describen el efecto geométrico de los separadores ciclones sobre la caída de presión o la velocidad, pero no abordan el tema de formación de nubes de polvo por partículas sólidas con riesgo de explosión. En este trabajo, un conjunto de casos de estudios fue propuesto para analizar la formación de nubes de polvo, estos casos incluyeron cambios geométricos convencionales (como la longitud del cilindro) y no convencionales (como la modificación de la forma cónica del ciclón). Las siguientes secciones describen el procedimiento propuesto para este análisis con el uso de la herramienta CFD.

## METODOLOGÍA

El riesgo de explosión de polvo es reducido al disminuir el tamaño de la nube de polvo, en este caso en los separadores de ciclones. Esta nube es obtenida a partir del valor mínimo de explosión, el cual es conocido para la mayoría de los productos de polvo industrial en condiciones atmosféricas (Eckhoff, 2003). En este caso, el análisis numérico fue desarrollado en el interior de separadores ciclones de un proceso de secado por aspersión de leche. La estrategia siguió lo propuesto por la Dinámica Computacional de Fluidos y la solución fue posible con el paquete ANSYS FLUENT.

### Descripción del sistema

El sistema presentado en este trabajo corresponde al caso propuesto por Gamiño-Tovar *et al.* (2018). El proceso de la leche en polvo consiste en: a) cámara de secado de aspersión para atomizar la leche concentrada en contacto con el aire caliente, b) ducto de la cámara a los separadores de ciclones, c) batería de cuatro separadores ciclones para recuperar la leche en polvo, y d) conducto de salida de los ciclones. La Figura 1 muestra este proceso. El sistema es un secador por aspersión concurrente con entrada tangencial de aire caliente, y sus dimensiones corresponden a un equipo real: cámara cilíndrica, altura 3.6 m (A) y diámetro 4.2 m

(B); altura del cono de descarga, 2.1 m (C); conducto desde la cámara a los ciclones, longitud 3.54 m (D), diámetro 0.57 m (E), y posición sobre el punto de descarga del cono, 0.67 m (F); conducto de descarga, longitud 3.39 m (G) y diámetro 0.68 m (H); y separadores ciclónicos con 1,5 m de diámetro. La Figura 2 muestra un perfil del sistema e indica con las letras en paréntesis las secciones geométricas. Los volúmenes de la cámara de secado y de cada ciclón son 256.37 m<sup>3</sup> y 1.928 m<sup>3</sup> respectivamente. Durante la operación, el sistema funciona con: a) velocidad de entrada de aire caliente a 33 m/s y 450 K, y b) presión del ducto de descarga de los ciclones a -5000 Pa (esto equivale al ventilador centrífugo real).

- A: Altura cámara de secado, 3.6m
- B: Diámetro cámara de secado, 4.2 m
- C: Altura cono de descarga, 2.1 m
- D: Longitud conducto a ciclones, 3.54 m
- E: Diámetro conducto a ciclones, 0.57 m
- F: Posición conducto a ciclones, 0.67 m
- G: Longitud conducto descarga, 3.39 m
- H: Diámetro conducto descarga, 0.68 m

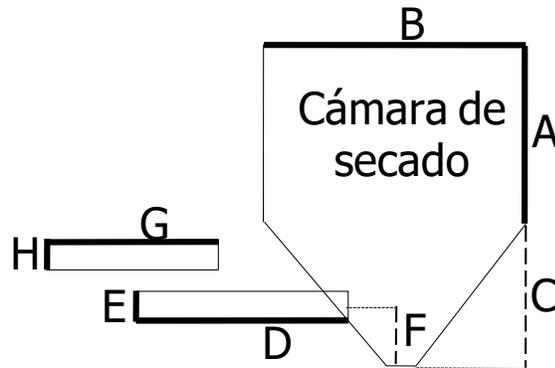


Fig. 2: Medidas del sistema de secado seleccionado.

El diseño geométrico de los separadores de ciclones sigue una relación proporcional respecto a su diámetro (Hoffmann & Stein, 2008). Hay algunos diseños validados con rendimiento aceptable, por ejemplo, Lapple, Vibco, Muschelknautz, etc. Gamiño-Tovar *et al.*(2018), determinaron que el ciclón Tengbergen C mejora la operatividad del secador de aspersión; sin embargo, este trabajo propone una serie de modificaciones geométricas que tienen mayor efecto de análisis partiendo del diseño de Lapple, las cuales son: 1) longitud del cilindro 50% de incremento, 2) longitud del ducto de salida: 50% de incremento, 3) forma del cono, estrecho o ancho, y 4) techo con borde circular interno. Un conjunto de combinaciones fue propuesto en la Tabla 2 y mostrado en la Figura 3.

Tabla 2: Combinaciones de los cambios geométricos al ciclón Lapple.

	Descripción		Descripción
A	Geometría Lapple	G	Aumento en longitudes del cilindro y ducto de salida
B	Aumento en longitud del cilindro	H	Aumento en longitud del cilindro con cono ancho
C	Aumento en longitud del ducto de salida	I	Aumento en longitud del cilindro y techo con borde circular
D	Cono estrecho	J	Aumento en longitud del ducto de salida y cono ancho
E	Cono ancho	K	Aumento en longitud del ducto de salida y techo con borde circular
F	Techo con borde circular	L	Cono ancho y techo con borde circular

Este trabajo plantea el análisis particular de cada modificación propuesta, pero las condiciones del secador de aspersión impactan la hidrodinámica de los separadores ciclones (Barbosa-Cánovas & Vega-Mercado, 2000), y viceversa (Gamiño-Tovar *et al.*, 2018). Por lo cual, las condiciones de frontera de los ciclones propuestos fueron tomadas de una simulación de la cámara de secado sin vaporización de gotas. Así, las partículas estuvieron en fase sólida bajo las propiedades de la leche en polvo (Westergaard, 2004): densidad de 660 kg m<sup>-3</sup>, distribución de tamaño de 50 μm, 25 μm y 75 μm para los diámetros promedio, mínimo y máximo respectivamente en una distribución Rosin-Rammler con 10 tamaños distintos con parámetro de distribución de 1. Por lo cual, primero fue simulada la cámara de secado y posteriormente sus resultados correspondieron a las condiciones de frontera de los ciclones.

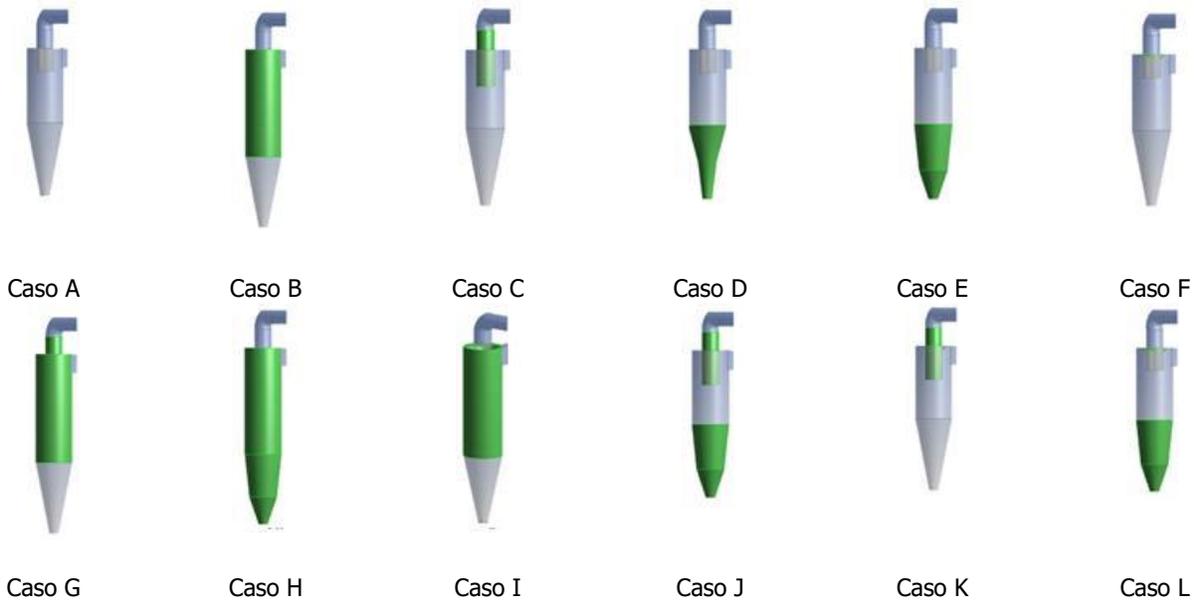


Fig. 3: Geometrías propuestas. Las superficies en verde corresponden a la modificación hecha para cada caso.

### Ecuaciones de gobierno

Los separadores ciclones son unidades continuas con un flujo isotérmico para un gas ideal, lo cual es representado por las ecuaciones de conservación de masa y momentum en estado estable:

$$\frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_j u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} - \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \quad (2)$$

donde  $u$  es un componente de velocidad,  $x$  es una coordenada,  $i$  y  $j$  son índices para las coordenadas,  $P$  es la presión del sistema,  $\rho$  y  $\mu$  son la densidad y viscosidad dinámica del aire respectivamente con los valores de  $1.125 \text{ kg m}^{-3}$  y  $2.47 \times 10^{-5} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  respectivamente a 450 K.

El movimiento de un fluido dentro de un separador ciclón es rotacional bajo turbulencia. La turbulencia es un movimiento irregular de los fluidos con un comportamiento estocástico de la velocidad (Davidson, 2015; Wilcox, 2006). Existen varios modelos para describir la turbulencia, para este caso el modelo de estrés de Reynolds es altamente recomendado debido al alto nivel de intensidad de giro (Rafiee & Sadeghiazad, 2017; Song *et al.*, 2016; Wasilewski, 2017). Este modelo corresponde a un conjunto de 7 ecuaciones diferenciales parciales provenientes de la simetría del tensor de Reynolds,  $\tau_{ij}$ , por lo cual solo la ecuación principal es mencionada aquí:

$$\frac{\partial \rho u_k \tau_{ij}}{\partial x_k} = -\rho \left( \tau_{ik} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \tau_{jk} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) - \varepsilon_{ij} + \Pi_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_k} \right) + \frac{\partial C_{ijk}}{\partial x_k} \quad (3)$$

Los términos de izquierda a derecha corresponden a: convección, producción de estrés (dos términos), disipación, estrés por efecto de presión, difusión molecular y difusión por turbulencia. En este caso, el término  $\Pi_{ij}$  proviene de una correlación lineal conocida como modelo de Launder-Reece-Rodi (Launder *et al.*, 1975). El término de disipación equivale a la disipación descrita en el modelo de  $\kappa$ - $\varepsilon$  (Launder & Sharma, 1974).

Adicionalmente, el efecto de la pared sobre los parámetros de turbulencia es muy importante y su modelado debe considerar el cambio de la velocidad a bajas escalas de tiempo y longitud; por lo cual, Launder y Spalding (1974), propusieron un análisis bajo el modelo de Ley de pared, el cual fue usado en este trabajo.

Las partículas sólidas (fase discreta) interactuaron con el fluido compartiendo el campo de velocidad y fue representado como una suspensión diluida (Bhandari *et al.*, 2008); esta interacción es conocida como acoplamiento bidireccional (two-way coupling, en inglés) debido a la concentración diluida de las partículas (Elghobashi, 2006). Esta interacción ha sido modelada por la segunda ley de movimiento de Newton para la predicción de trayectorias de las partículas, la cual es un balance de fuerzas de: arrastre, masa agregada, flotación, etc. Básicamente, en este caso, el balance de fuerzas incluye un término inercial y otro de arrastre como:

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{(u - u_p)}{\tau_D} + g \frac{(\rho_p - \rho)}{\rho} \quad (4)$$

donde el término de la izquierda es la fuerza de aceleración de la partícula y los términos de la derecha son fuerza de arrastre y de flotación por efecto de la gravedad respectivamente. En particular,  $u_p$  es la velocidad de la partícula,  $\rho_p$  es la densidad de la partícula y  $\tau_D$  es el tiempo de relajación, el cual relaciona la aceleración con la velocidad relativa entre la partícula y el fluido (Yeoh & Tu, 2010). Este parámetro es aproximado a  $4d_p^2\rho_p/(3\mu Re_p C_D)$ , donde  $d_p$  es el diámetro de la partícula,  $Re_p$  es el número de Reynolds relativo,  $\rho d_p |u_p - u|/\mu$ , y  $C_D$  el coeficiente de arrastre. El cálculo de este coeficiente es fundamental para sistemas multifásicos acoplados, la literatura presenta diversos modelos, siendo el básico el propuesto por Schiller y Naumann. No obstante Morsi y Alexander (1972), presentaron un modelo más elaborado con un amplio rango de valores del número de Reynolds. Estos modelos para una esfera particular y suavizada son series de potencias del número de Reynolds como  $a_1 + a_2 Re_p^{-1} + a_3 Re_p^{-2}$ , donde los parámetros  $a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$  dependen del valor del número de Reynolds.

## ESTRATEGIA DE SOLUCIÓN

La metodología CFD consiste en los siguientes pasos: 1) discretización de las ecuaciones de gobierno sobre el dominio computacional y 2) solución numérica. El primer paso convierte las ecuaciones diferenciales parciales en ecuaciones algebraicas no lineales a través del método de volumen finito. Así, estas ecuaciones son relacionadas con los volúmenes de control o elementos. El segundo paso resuelve las ecuaciones algebraicas siguiendo algoritmos numéricos adecuados. El paquete comercial ANSYS FLUENT fue seleccionado para desarrollar la metodología CFD. Además, este estudio incluyó: a) la simulación del secador por aspersión para proporcionar las condiciones de frontera en los separadores ciclones, y b) las pruebas de malla e iteraciones de los ciclones para garantizar la independencia numérica de los resultados. Las siguientes secciones explican sucintamente cada paso. La solución fue posible con un procesador Intel® Core™ i7-3770 a 3.4 GHz en una computadora de 8 GB de RAM.

### *Obtención de los perfiles para los ciclones*

El sistema de secado por aspersión fue discretizado bajo una malla no estructurada con 506,459 elementos, la mayoría de ellos tetraedros. Este sistema no involucró fase discreta y la solución fue posible mediante la configuración de solución: a) algoritmo de esquema SIMPLE y enfoque de segundo orden para la discretización espacial y b) inicialización híbrida (los valores iniciales de velocidad provienen de la solución de la ecuación de Laplace para un potencial de velocidad). El cálculo requirió 6.8 h para alcanzar 4000 iteraciones. La Figura 4 a) representa los resultados hidrodinámicos de todo el sistema de secado por aspersión, los cuales corresponden a un flujo esperado para una entrada tangencial. Los perfiles de entrada y salida de todos los ciclones fueron promediados a los perfiles mostrados en la Figura 4 b).

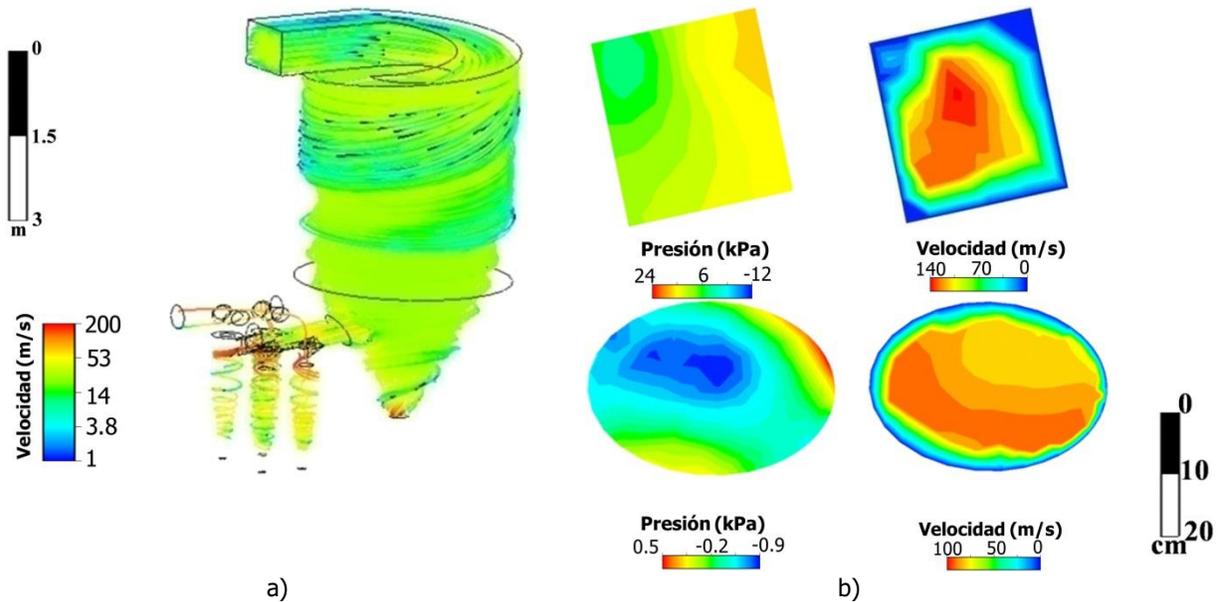


Fig. 4: Resultados hidrodinámicos del secador por aspersión: a) líneas de corriente y b) perfiles para los separadores ciclones (cuadro: frontera de entrada y elipse: frontera de salida).

#### Pruebas de independencia de malla e iteraciones

El ciclón de Lapple fue usado en estas pruebas sin fase discreta. La malla fue tetraédrica para todos los casos debido a su flexibilidad en geometrías complejas y circulares. Además, el tratamiento de turbulencia cercano a las paredes fue apoyado con una inflación de malla como: cinco capas con relación de crecimiento de 1.2 y escala de transición de 0.27. Además, las siguientes características de mallas fueron aplicadas: a) algoritmo de curvatura-proximidad, b) diferencia en el centro de relevancia y c) transición del crecimiento. La Figura 5 muestra estas mallas bajo distintos cortes dentro del ciclón.

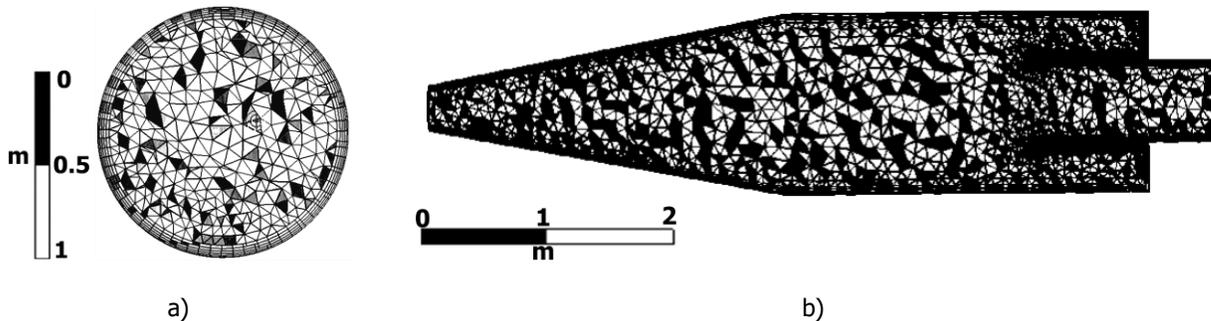


Fig. 5: Vistas de la malla aplicada en el ciclón estándar: a) corte transversal y b) corte longitudinal.

La prueba de malla es necesaria para determinar la independencia numérica de los resultados respecto a la cantidad de elementos. Esta prueba partió con tres candidatos de malla cuyos números de elementos fueron: a) malla fina 174310, b) malla media 72961 y c) malla gruesa 36173. La calidad de las mallas fue obtenida para garantizar una reducción en el error numérico de la solución; para esto el parámetro de distorsión fue obtenido (la mejor calidad de malla tiene valor de distorsión cercano a cero). Todas las mallas propuestas presentaron valores de distorsión alrededor de 0.23, lo cual también ocurrió para las geometrías propuestas de la Figura 3. Una simulación con 1000 iteraciones fue realizada para cada malla. Las mallas candidatas fueron comparadas con la presión dentro del ciclón, sin embargo el comportamiento tridimensional de esta sugirió el uso de una isóbara de

10 kPa. Así, la herramienta iso-volumen de ANSYS Post fue usada y no existió una diferencia notable entre las mallas media y fina, como muestra la Figura 6 a). Esto sugirió a la malla media para ser usada. Por otro lado, la segunda prueba partió de tres valores de iteraciones: 500, 1000 y 2000. El iso-volumen a 10 kPa de 1000 iteraciones no presentó diferencia con el iso-volumen de 2000 iteraciones, por lo que se tomaron las 1000 iteraciones en cuenta. Esta comparación se muestra en la Figura 6 b).

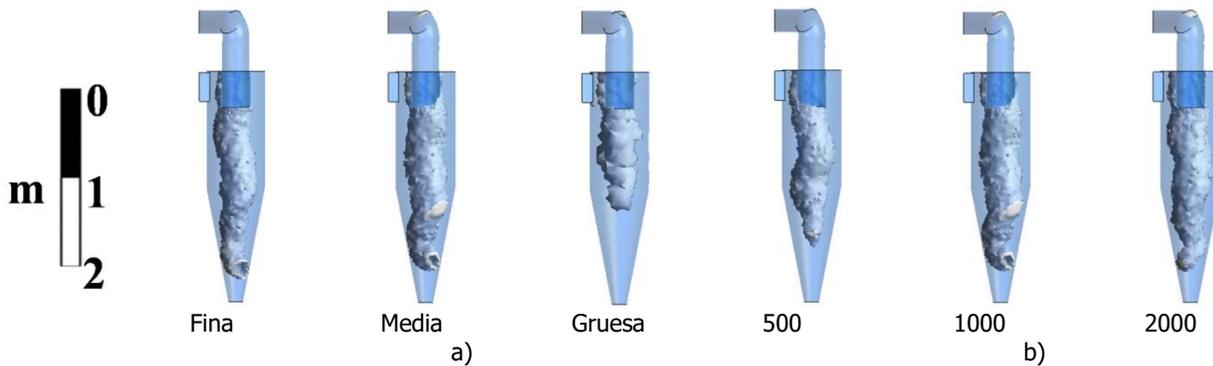


Fig. 6: Iso-volumen de presión a 10 kPa para las pruebas de: a) independencia de malla e b) independencia de iteraciones.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Esta sección analiza las geometrías propuestas considerando: comportamiento hidrodinámico, tamaño de la nube de partículas y grado de eficiencia de recolección. Estos resultados proporcionaron información notable para alcanzar el objetivo de este trabajo: proponer un separador de ciclones con el menor tamaño de nube de polvo bajo un comportamiento aceptable.

### *Hidrodinámica de los ciclones*

Una característica fundamental en los ciclones es un perfil de presión con un bajo valor de presión en el centro debido a la fuerza centrífuga (Cortés & Gil, 2007; Hoffmann & Stein, 2008). La Figura 7 muestra el perfil de presión de las geometrías propuestas. Todos los casos propuestos mostraron una sección de vacío en el centro del ciclón, sin embargo un comportamiento aceptable corresponde al de geometrías validadas experimentalmente (como el diseño Lapple, caso A). Así, todos los casos fueron contrastados con el caso A por medio de la medición transversal de la presión a 2.4 m arriba de la descarga, donde los casos C, D, E, J y K presentaron un perfil de presión cercano al del caso A, como se muestra en la Figura 8 Esto indicó un comportamiento hidrodinámico aceptable para esos casos.

La caída de presión existe debido a las pérdidas por la fricción del fluido y debe ser lo más baja posible para un diseño adecuado. La Figura 7 muestra los valores de caída de presión para todos los casos, donde: a) los valores más bajos son en los casos B, G, H e I (longitud cilíndrica grande), como Safikhani *et al.* (2011), mencionaron, y b) la mayor caída de presión es en los casos F y L (techo de ciclón modificado) debido al alto nivel de fricción en el techo. Fici *et al.* (2010) y Safikhani *et al.* (2011) indicaron que la caída de presión aumenta con la longitud del ducto de salida, como lo demostraron las comparaciones de los casos B-G y casos E-J. Además, la literatura indica modelos para predecir la caída de presión, estos modelos involucran las mediciones geométricas en ciclones convencionales. El modelo de Stairmand predice la caída de presión a partir de un balance de momentum e incluir las pérdidas de presión debida al efecto de giro en el ciclón y sus características geométricas (Hoffmann & Stein, 2008). Este modelo fue modificado por Iozia & Leith (1989) y es válido para ciclones con geometrías sin modificaciones en la forma (casos A, B, C y G). El modelo de Stairmand fue aplicado en estos casos y definió las caídas de presión como: caso A (47.9 kPa), caso B (43.4 kPa), caso C (47.1 kPa) y caso G (42.9 kPa). Estos resultados indicaron una diferencia de 6 kPa entre el CFD y el modelo.

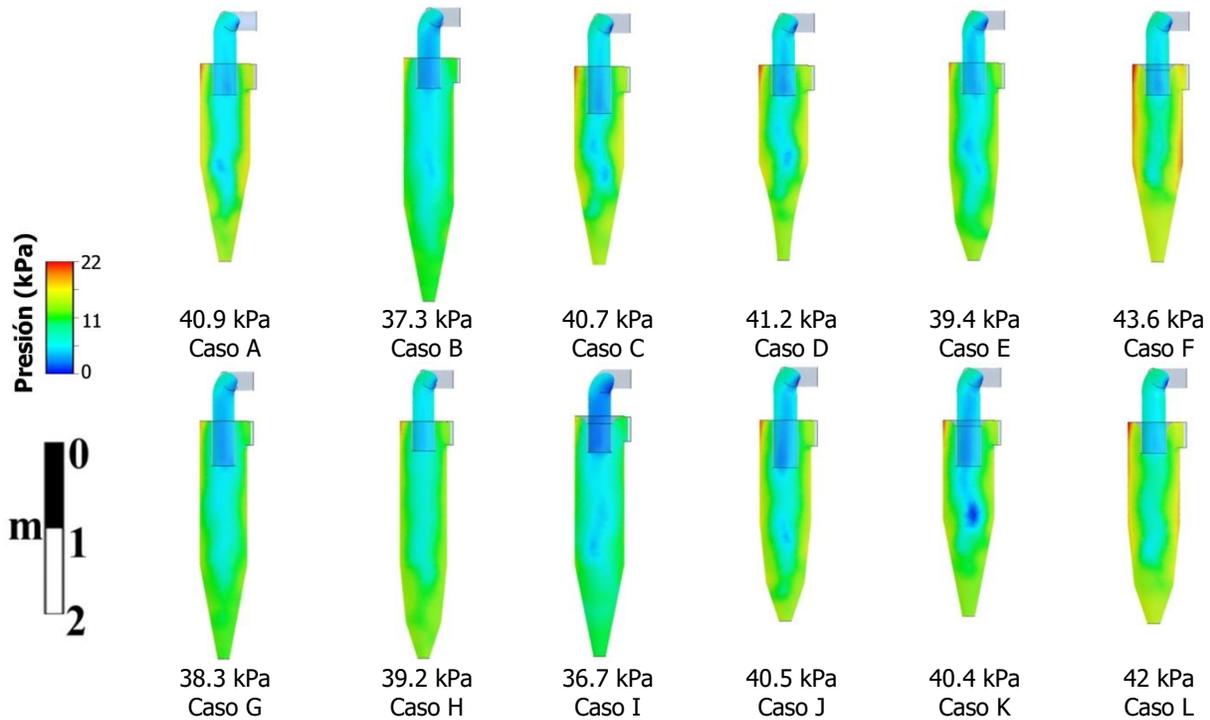


Fig. 7: Perfil de presión de las geometrías propuestas. Los valores indican la caída de presión.

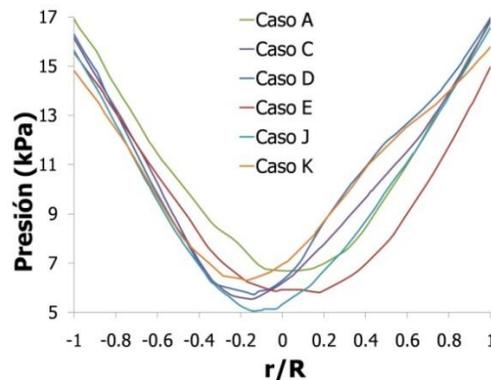


Fig. 8: Perfil de presión transversal a 2.4 m del fondo del ciclón.

El análisis hidrodinámico de los ciclones incluyó líneas de corriente para mejorar la perspectiva del flujo, como lo muestra la Figura 9. La aplicación de las líneas de corriente describe que: a) los casos C, E, J y K fueron similares al ciclón Lapple (caso A), b) el caso D experimentó obstrucción, c) los casos B, G, H y I no completaron el flujo a través del ciclón, d) el caso F contenía inestabilidades y e) el caso L tenía la velocidad más alta.

#### Fase dispersa

La trayectoria de una partícula proviene de equilibrios de fuerzas dentro del flujo de fluido, y corresponde al nivel de flotabilidad. Los resultados indicaron que las partículas: a) descendieron (casos E, H, J y G), b) dejaron el ciclón a través del ducto de salida (casos B e I, casos inoperables) debido a la baja caída de presión, c) lograron acumulación en la zona del techo (casos F y L) y la zona cónica (caso D), esta última con riesgo de

bloqueo y ambos fueron el resultado de altas caídas de presión, y d) experimentaron un alto nivel de flotabilidad en el centro del ciclón (caso K). La Figura 10 contiene estos resultados.

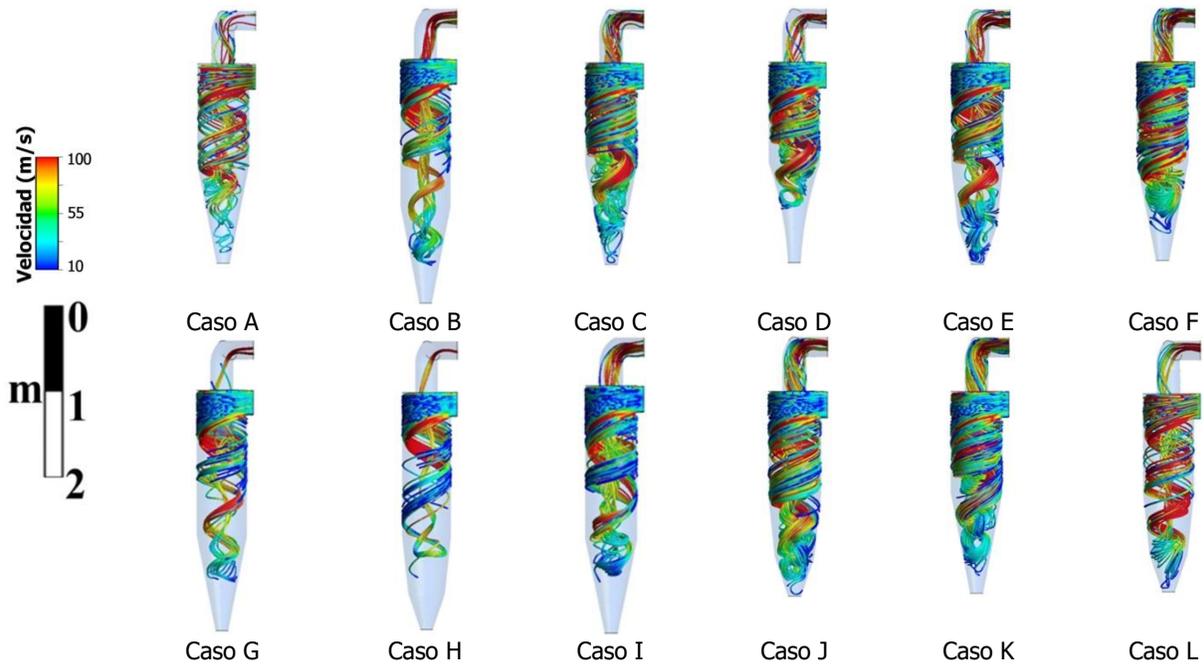


Fig. 9: Líneas de corriente de las geometrías propuestas en este trabajo.

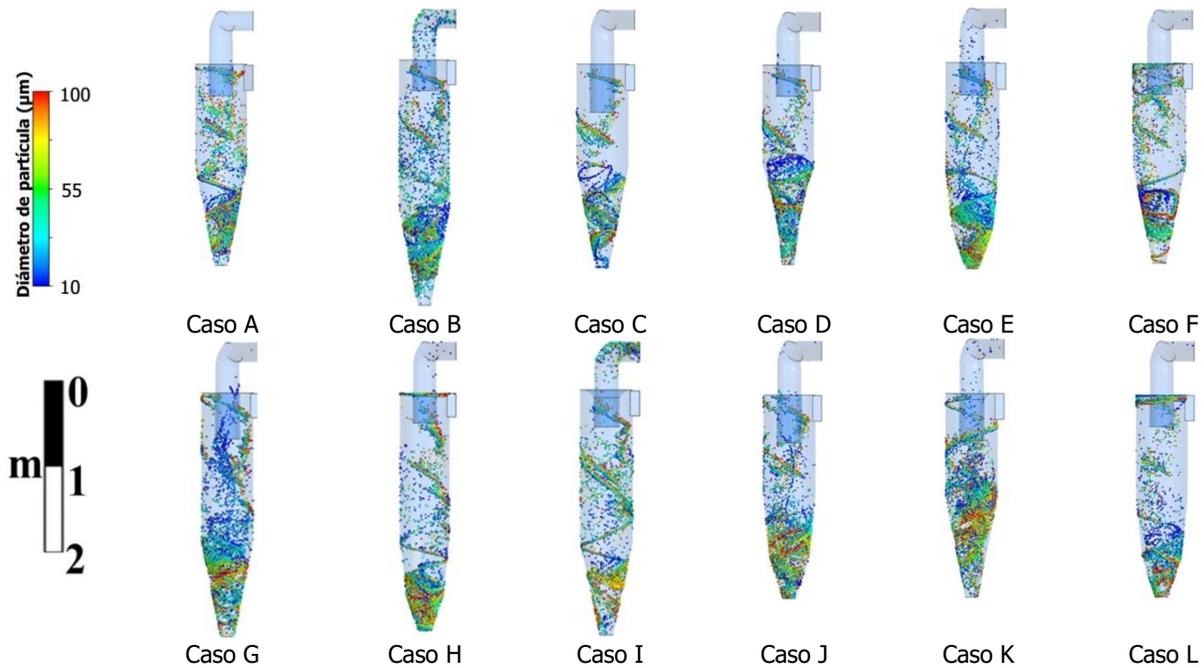


Fig. 10: Distribución de partículas por tamaño en las geometrías propuestas en este trabajo.

*Grado de eficiencia*

La eficiencia de la separación de partículas es tratada como una partición para cada tamaño de partícula. Generalmente, las partículas de mayor tamaño logran altos niveles de recolección, lo cual no es común en las de menor tamaño. Por lo cual, el mejor grado de eficiencia existe cuando las partículas pequeñas aumentan su eficiencia. Esto sigue una distribución del tamaño de partícula en un sentido acumulativo y está representado por la curva de grado de eficiencia (Cortés & Gil, 2007; Hoffmann & Stein, 2008). Este tipo de curva de eficiencia fue desarrollado en este trabajo para todos los casos, como se muestra en la Figura 11. El mayor grado de eficiencia fue obtenido en los casos G y J en contraste con los casos H y B.

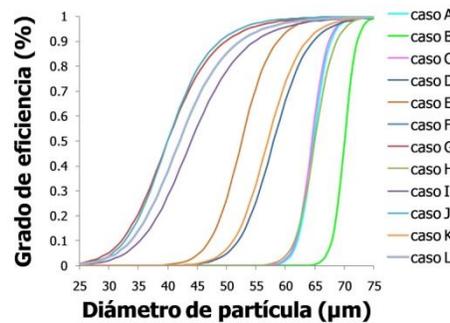


Fig. 11: Curva de grado de eficiencia para las geometrías propuestas en este trabajo.

Tabla 3: Resultados de volumen de la nube de polvo, caída de presión y comportamiento hidrodinámico en cada caso.

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	Observaciones	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	Observaciones
A	37	40.9	Comportamiento aceptable	G	63	38.3	Baja caída de presión y mayor grado de eficiencia
B	51	37.3	Baja caída de presión y partículas en ducto de salida	H	68.1	39.2	Baja caída de presión y menor grado de eficiencia
C	17.1	40.7	Similitud a caso A	I	22.1	36.7	Menor caída de presión y partículas en ducto de salida
D	33.1	41.2	Riesgo de bloqueo	J	27.8	40.5	Mayor grado de eficiencia
E	43	39.4	Similitud a caso A	K	34.1	40.4	Similitud a caso A y suspensión de partículas
F	35.5	43.6	Mayor caída de presión, partículas en techo e inestabilidades	L	23.4	42	Alta caída de presión, partículas en techo y velocidad mayor

Notación: **1**: Caso; **2**: Volumen nube (dm<sup>3</sup>); **3**: Caída de presión (kPa).

*Tamaño de la nube de polvo*

El tamaño de la nube de polvo es el volumen de que ocupa la nube con una concentración másica de partículas por encima del valor mínimo de explosión. La literatura indica un valor mínimo de explosión para la leche en polvo en condiciones atmosféricas de 60 g/m<sup>3</sup> (Eckhoff, 2003; OSHS, 1993). Así, la nube de polvo fue identificada dentro del ciclón con un iso-volumen, el cual agrupa elementos con valores de concentración másica superiores a 60 g/m<sup>3</sup>, como muestra la Figura 12 en cada caso y donde los volúmenes son indicados y la Tabla 3 resume estos valores y las observaciones del comportamiento hidrodinámico de cada caso. El caso H logró el mayor volumen de nube de polvo, seguido de los casos G y B; estos casos tienen en común la mayor longitud cilíndrica y la menor caída de presión. En contraste, los casos C y I presentaron el menor volumen de nube de polvo. Las geometrías restantes mostraron un tamaño promedio aproximado de 34 dm<sup>3</sup>, la mayoría de ellas estaban constituidas por geometrías de corta longitud del cilindro. Los casos con menor caída de presión (casos B, G y H) produjeron la nube más grande, excepto el caso I. Esto propone al caso I como candidato, pero fue inoperable debido a la salida de partículas. El caso L fue otra opción para alcanzar bajos volúmenes de nubes, pero estuvo limitado por la acumulación de

partículas en el techo, debido a la alta caída de presión. Con base a los volúmenes y la hidrodinámica, las geometrías recomendadas fueron los casos C y J. En términos de eficiencia, el caso J fue el caso con el mayor grado de eficiencia y el caso C logró un grado de eficiencia cercano al caso A.

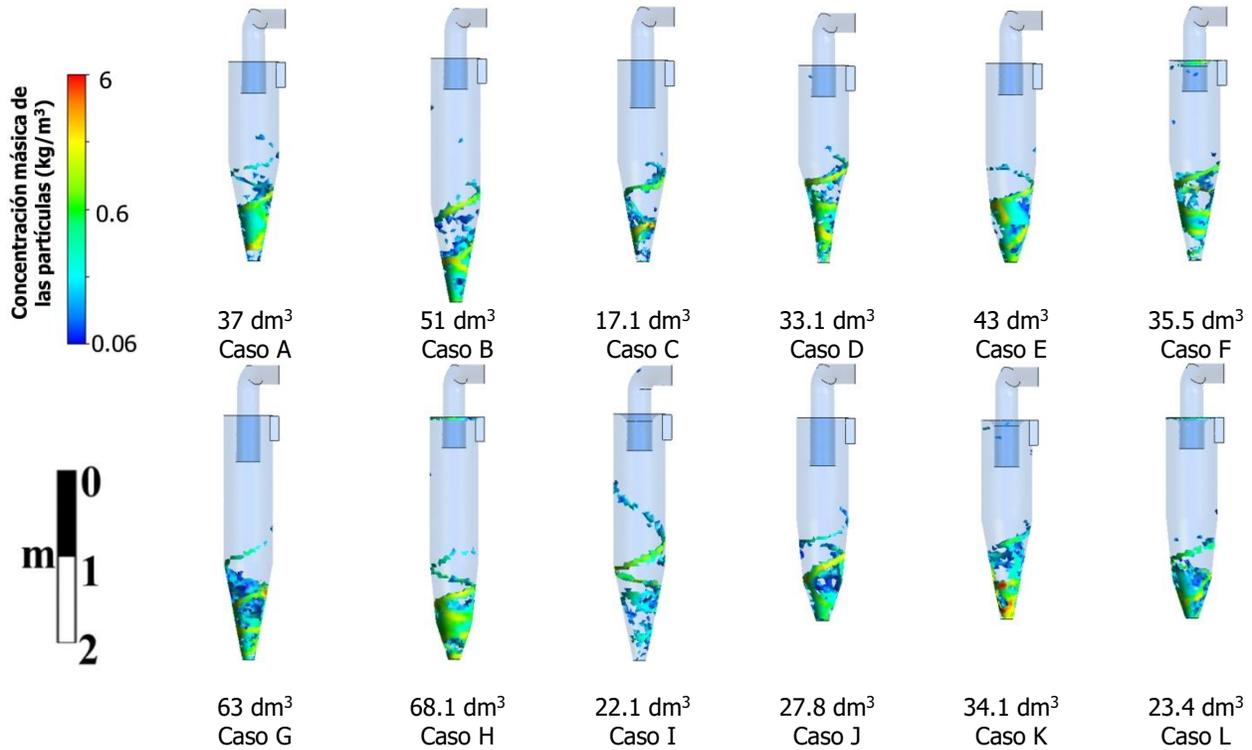


Fig. 12: Nubes de polvo formadas para las geometrías propuestas con variación de la concentración másica de las partículas.

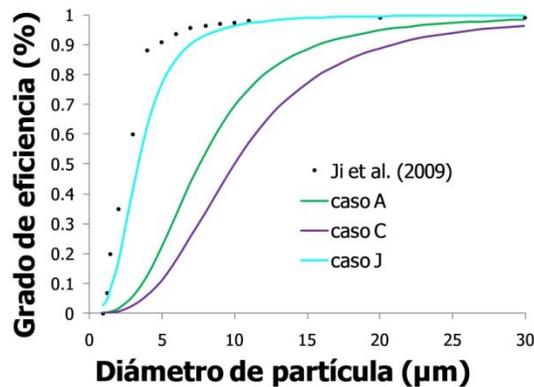


Fig. 13: Validación del grado de eficiencia de las geometrías que lograron el menor volumen de nube de polvo.

### Validación experimental

El grado de eficiencia, obtenido por los casos con el menor volumen de polvo (Casos C y J) y el caso A, fue validado. La validación fue posible con los datos experimentales presentados por Ji *et al.* (2009). Estos datos

indican el grado de eficiencia para ciclones con baja concentración de partículas, como lo presentado en este trabajo. No obstante, los experimentos utilizaron un ciclón de un tamaño equivalente al 10% del tamaño de los ciclones aquí propuestos; por lo cual, las dimensiones de los casos A, C y J fueron reducidas a su 10% para equiparar las mediciones experimentales. Esto fue posible con las herramientas de escala existentes en ANSYS FLUENT, esto no modificó la malla. Así, las simulaciones realizadas para los casos C y J tomaron en cuenta los datos de partículas y velocidad indicados por Ji *et al.* (2009). Los resultados de estas simulaciones se muestran en la Figura 13, donde el caso J logró valores de grado de eficiencia cercanos a los experimentales. Esto indica que el caso J cuenta con un nivel de operatividad aceptable para garantizar bajos volúmenes de nubes de polvo.

## CONCLUSIONES

Este trabajo presentó una estrategia para analizar el efecto de la geometría de separadores ciclones sobre la formación de nubes de polvo. El caso de la leche en polvo fue seleccionado para demostrar la aplicabilidad de esta estrategia. Los cambios geométricos propuestos incluyeron algunos indicados por la literatura y varios con cambios de forma. El impacto de estos cambios fue notorio sobre el tamaño de la nube de polvo y en consecuencia sobre el riesgo de explosión. La herramienta ANSYS FLUENT fue factible para lograr los resultados en estos casos de estudio. Los casos con el menor tamaño de nube siguieron un comportamiento hidrodinámico similar al del ciclón tipo Lapple. No obstante, los resultados de los casos con menor volumen de nube fueron validados con datos experimentales, donde el grado de eficiencia de separación fue considerada. Esta estrategia demostró que los equipos con riesgo de explosión de polvo pueden ser modificados geométricamente para reducir su riesgo bajo un comportamiento hidrodinámico aceptable.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONACyT por su apoyo y a los revisores por sus comentarios.

## REFERENCIAS

- Amyotte, P.R. (2014). Some myths and realities about dust explosions. *Process Safety and Environmental Protection*, 92(4), 292-299.
- Amyotte, P.R., Cloney, C.T., Khan, F.I. & Ripley, R.C. (2012). Dust explosion risk moderation for flocculent dusts. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 25(5), 862-869.
- Amyotte, P.R., Pegg, M.J. & Khan, F.I. (2009). Application of inherent safety principles to dust explosion prevention and mitigation. *Process Safety and Environmental Protection*, 87(1), 35-39.
- Azadi, M., Azadi, M. & Mohebbi, A. (2010). A CFD study of the effect of cyclone size on its performance parameters. *Journal of Hazardous Materials*, 182(1-3), 835-841.
- Barbosa-Cánovas, G. & Vega-Mercado, H., (2000). *Deshidratación de alimentos*, Acribia SA, Zaragoza, España.
- Bhandari, B.R., Patel, K.C. & Chen, X.D. (2008). "Spray drying of food materials-process and product characteristics." En: *Drying technologies in food processing*, Chen, X. D. and Mujumdar, A. S., eds., Blackwell Publishing, 113-159.
- Cortés, C. & Gil, A. (2007). Modeling the gas and particle flow inside cyclone separators. *Progress in Energy and Combustion Science*, 33(5), 409-452.
- Chuah, T.G., Gimbin, J. & Choong, T.S.Y. (2006). A CFD study of the effect of cone dimensions on sampling aerocyclones performance and hydrodynamics. *Powder Technology*, 162(2), 126-132.

- Davidson, P.A. (2015). *Turbulence: an introduction for scientists and engineers*, Oxford University Press, Oxford, UK.
- Davis, S.G., Hinze, P.C., Hansen, O.R. & van Wingerden, K. (2011). Does your facility have a dust problem: Methods for evaluating dust explosion hazards. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 24 (6), 837-846.
- Di Benedetto, A., Russo, P., Amyotte, P. & Marchand, N. (2010). Modelling the effect of particle size on dust explosions. *Chemical Engineering Science*, 65 (2), 772-779.
- Di Sarli, V., Russo, P., Sanchirico, R. & Di Benedetto, A. (2014). CFD simulations of dust dispersion in the 20L vessel: Effect of nominal dust concentration. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 27, 8-12.
- Eckhoff, R. (2003). *Dust explosions in the process industries, third Edition: Identification, assessment and control of dust hazards*, Elsevier Science.
- Eckhoff, R.K. (2009). Understanding dust explosions. The role of powder science and technology. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22 (1), 105-116.
- Elgobashi, S. (2006). An Updated Classification Map of Particle-Laden Turbulent Flows. In: Balachandar S., Prosperetti A. (eds) IUTAM Symposium on Computational Approaches to Multiphase Flow. Fluid Mechanics and Its Applications, vol 81. Springer, Dordrecht.
- Elsayed, K. (2015). Optimization of the cyclone separator geometry for minimum pressure drop using Co-Kriging. *Powder Technology*, 269, 409-424.
- Elsayed, K. & Lacor, C. (2010). Optimization of the cyclone separator geometry for minimum pressure drop using mathematical models and CFD simulations. *Chemical Engineering Science*, 65 (22), 6048-6058.
- Elsayed, K. & Lacor, C. (2011). The effect of cyclone inlet dimensions on the flow pattern and performance. *Appl. Math Modelling*, 35, 1952-1968.
- Elsayed, K. & Lacor, C. (2012). Modeling and Pareto optimization of gas cyclone separator performance using RBF type artificial neural networks and genetic algorithms. *Powder Technology*, 217(0), 84-99.
- Febo Jr, H.L. (2015). Drying of combustible powders – Risk and mitigation. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 36, 252-257.
- Ficici, F., Ari, V. & Kapsiz, M. (2010). The effects of vortex finder on the pressure drop in cyclone separators. *Int. J. of the Phys. Sci.*, 5(6), 804-813.
- Gamiño-Tovar, M.S., Castillo-Borja, F., Vázquez-Román, R., Díaz-Ovalle, C.O., Guzmán-Zazueta, A. & Herrera-Enciso, F. (2018). Análisis del efecto geométrico de ciclones en el secado por aspersion de leche usando CFD. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 9(1), 11-23.
- Gimbun, J., Chuah, T.G., Choong, T.S.Y. & Fakhru'l-Razi, A. (2005). Prediction of the effects of cone tip diameter on the cyclone performance. *Journal of Aerosol Science*, 36 (8), 1056-1065.
- Hassan, J., Khan, F., Amyotte, P. & Ferdous, R. (2014). Industry specific dust explosion likelihood assessment model with case studies. *Journal of Chemical Health and Safety*, 21 (2), 13-27.

- Hoffmann, A.C. & Stein, L.E. (2008). *Gas cyclones and swirl tubes. Principles, design and operation*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Huang, A.-N., Maeda, N., Shibata, D., Fukasawa, T., Yoshida, H., Kuo, H.-P., *et al.* (2017). Influence of a laminarizer at the inlet on the classification performance of a cyclone separator. *Separation and Purification Technology*, 174, 408-416.
- Iozia, D.L. & Leith, D. (1989). Effect of Cyclone Dimensions on Gas Flow Pattern and Collection Efficiency. *Aerosol Science and Technology*, 10 (3), 491-500.
- Ji, Z., Xiong, Z., Wu, X., Chen, H. & Wu, H. (2009). Experimental investigations on a cyclone separator performance at an extremely low particle concentration. *Powder Technology*, 191 (3), 254-259.
- Kim, J.C. & Lee, K.W. (1990). Experimental Study of Particle Collection by Small Cyclones. *Aerosol Science and Technology*, 12 (4), 1003-1015.
- Launder, B.E., Reece, G.J. & Rodi, W. (1975). Progress in the development of a Reynolds-stress turbulence closure. *J. Fluid Mechanics*, 68 (3), 537-566.
- Launder, B.E. & Sharma, B.I. (1974). Application of the Energy-Dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc. *Letters in Heat and Mass Transfer*, 1 (2), 131-138.
- Launder, B.E. & Spalding, D.B. (1974). The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied mechanics and Engineering*, 3, 269-289.
- Lim, K.S., Kim, H.S. & Lee, K.W. (2004). Characteristics of the collection efficiency for a cyclone with different vortex finder shapes. *Journal of Aerosol Science*, 35 (6), 743-754.
- Mazyan, W.I., Ahmadi, A., Ahmed, H. & Hoorfar, M. (2017). Increasing efficiency of natural gas cyclones through addition of tangential chambers. *Journal of Aerosol Science*, 110, 36-42.
- Mazyan, W.I., Ahmadi, A., Brinkerhoff, J., Ahmed, H. & Hoorfar, M. (2018). Enhancement of cyclone solid particle separation performance based on geometrical modification: Numerical analysis. *Separation and Purification Technology*, 191, 276-285.
- Miranda, J.T., Camacho, E.M., Formoso, J.A.F. & Rodríguez García, J.d.D. (2013). A case study: An explosion in a milk spray dryer, CAPSA, NW Spain. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 26 (4), 696-704.
- Morsi, S.A. & Alexander, A.J. (1972). An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems. *J. Fluid Mechanics*, 55 (2), 193-208.
- Murillo, C., Dufaud, O., Bardin-Monnier, N., López, O., Muñoz, F. & Perrin, L. (2013). Dust explosions: CFD modeling as a tool to characterize the relevant parameters of the dust dispersion. *Chemical Engineering Science*, 104, 103-116.
- OSHS (1993). *Approved code of practice for the prevention, detection and control of fire and explosion in New Zealand dairy industry spray drying plant*. Occupational Safety and Health Service, D. o. L., ed., Wellington, New Zealand, 63.
- Parvaz, F., Hosseini, S.H., Ahmadi, G. & Elsayed, K. (2017). Impacts of the vortex finder eccentricity on the flow pattern and performance of a gas cyclone. *Separation and Purification Technology*, 187, 1-13.

- Pei, B., Yang, L., Dong, K., Jiang, Y., Du, X. & Wang, B. (2017). The effect of cross-shaped vortex finder on the performance of cyclone separator. *Powder Technology*, 313, 135-144.
- Petit, H.A., Pico, L.O. & Barbosa, M.R. (2012). Influence of the cyclone cone length on flow variables. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 3 (3), 103-118.
- Qian, F. & Wu, Y. (2009). Effects of the inlet section angle on the separation performance of a cyclone. *Chemical Engineering Research and Design*, 87 (12), 1567-1572.
- Qian, F., Zhang, J. & Zhang, M. (2006). Effects of the prolonged vertical tube on the separation performance of a cyclone. *Journal of Hazardous Materials*, 136 (3), 822-829.
- Rafiee, S.E. & Sadeghiazad, M.M. (2017). Efficiency evaluation of vortex tube cyclone separator. *Applied Thermal Engineering*, 114, 300-327.
- Raoufi, A., Shams, M. & Kanani, H. (2009). CFD analysis of flow field in square cyclones. *Powder Technology*, 191 (3), 349-357.
- Russo, P., Amyotte, P.R., Khan, F.I. & Di Benedetto, A. (2013). Modelling of the effect of size on flocculent dust explosions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 26 (6), 1634-1638.
- Safikhani, H., Hajiloo, A. & Ranjbar, M.A. (2011). Modeling and multi-objective optimization of cyclone separators using CFD and genetic algorithms. *Computers & Chemical Engineering*, 35 (6), 1064-1071.
- Safikhani, H., Zamani, J. & Musa, M. (2018). Numerical study of flow field in new design cyclone separators with one, two and three tangential inlets. *Advanced Powder Technology*, 29, 611-622.
- Singh, P., Couckuyt, I., Elsayed, K., Deschrijver, D. & Dhaene, T. (2016). Shape optimization of a cyclone separator using multi-objective surrogate-based optimization. *Applied Mathematical Modelling*, 40 (5), 4248-4259.
- Skjold, T., Arntzen, B.J., Hansen, O.R., Taraldset, O.J., Storvik, I.E. & Eckhoff, R.K. (2005). Simulating Dust Explosions with the First Version of DESC. *Process Safety and Environmental Protection*, 83 (2), 151-160.
- Skjold, T. & Eckhoff, R.K. (2016). Dust explosions in the process industries: research in the twenty-first century. *Chemical Engineering Transactions*, 48, 337-342.
- Song, C., Pei, B., Jiang, M., Wang, B., Xu, D. & Chen, Y. (2016). Numerical analysis of forces exerted on particles in cyclone separators. *Powder Technology*, 294, 437-448.
- Tascón, A. & Aguado, P.J. (2015). CFD simulations to study parameters affecting dust explosion venting in silos. *Powder Technology*, 272 (0), 132-141.
- Taveau, J. (2017). Dust explosion propagation and isolation. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 48, 320-330.
- Wasilewski, M. (2017). Analysis of the effect of counter-cone location on cyclone separator efficiency. *Separation and Purification Technology*, 179, 236-247.
- Wasilewski, M. & Brar, L.S. (2017). Optimization of the geometry of cyclone separators used in clinker burning process: A case study. *Powder Technology*, 313, 293-302.

Westergaard, V., (2004). *Tecnología de la leche en polvo. Evaporación y secado por atomización.*, Niro A/S, Copenhagen.

Wilcox, D.C. (2006). *Turbulence Modeling for CFD*, DCW Industries Inc.

Xiang, R.B. & Lee, K.W. (2005). Numerical study of flow field in cyclones of different height. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 44 (8), 877-883.

Yeoh, G.-H. & Tu, J., (2010). *Computational techniques for multi-phase flows*, Butterworth-Heinemann.

Zhao, B. & Su, Y. (2010). Artificial neural network-based modeling of pressure drop coefficient for cyclone separators. *Chemical Engineering Research and Design*, 88 (5-6), 606-613.

