



Estudio computacional de separadores ciclónicos de partículas

Ayala Espinoza Hernán Paúl

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

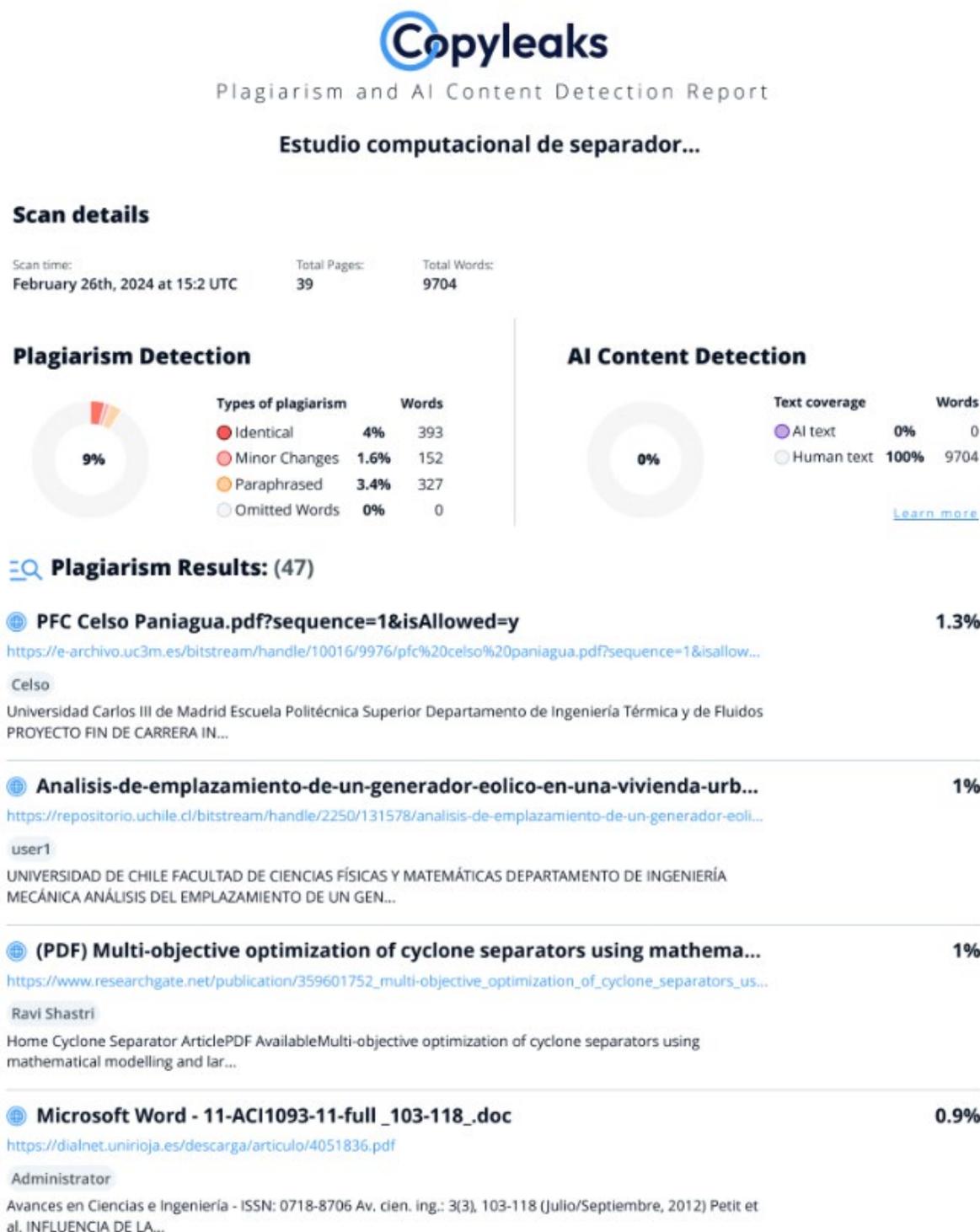
Carrera de Ingeniería Mecánica.

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico

Guerrero Hinojosa, Byron Andrés, PhD.

26 de febrero de 2024.

Resultados de la herramienta para verificación y/o análisis de similitud de contenidos





Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica.

Carrera de Ingeniería Mecánica.

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: “Estudio computacional de separadores ciclónicos de partículas” fue realizado por el señor Ayala Espinoza, Hernán Paúl; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 26 de febrero de 2024.

.....

Guerrero Hinojosa, Byron Andrés

C. C.: 1716659758



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica.

Carrera de Ingeniería Mecánica.

Responsabilidad de autoría

Yo, Ayala Espinoza, Hernán Paúl, con cédula de ciudadanía n°1804550844, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Estudio computacional de separadores ciclónicos de partículas** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 26 de febrero de 2024.

Ayala Espinoza, Hernán Paúl

C. C.: 1804550844



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica.

Carrera de Ingeniería Mecánica.

Autorización de Publicación

Yo Ayala Espinoza, Hernán Paúl, con cédula de ciudadanía n°1804550844, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Estudio computacional de separadores ciclónicos de partículas** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 26 de febrero de 2024.

Ayala Espinoza, Hernán Paúl

C. C.: 1804550844

Dedicatoria.

Este trabajo está dedicado a todas las personas que me motivaron y confiaron a lo largo de mi formación personal y profesional, especialmente a mis padres María Isabel y Hernán, quienes fueron mi pilar y mi motivo para conseguir cada objetivo con su infaltable apoyo y cariño en todo momento, de igual manera a mis hermanas, a mis primos Matías, Adrián y a Pauly que han sido mi empuje para poder luchar por mis sueños, por último, a mis amigos y amigas que estuvieron en los buenos y malos momentos de la carrera, gracias totales.

Agradecimiento.

La elaboración del presente trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo de mis tutores Byron Guerrero y Luis Carrión, quienes me brindaron los recursos intelectuales y la guía en todo momento para desarrollar de la mejor manera este proyecto. Además, agradezco a Fernando Almeida y su apertura al laboratorio de reología para realizar el presente trabajo.

Índice de contenidos.

Resumen.....	14
Abstract.	15
Capítulo I: Generalidades.....	16
Antecedentes.	16
Definición del problema.....	18
Objetivos.....	18
Objetivo General.....	18
Objetivo Específico.....	18
Alcance del proyecto.....	19
Justificación del proyecto.....	19
Capítulo II: Revisión bibliográfica.....	20
Separadores ciclónicos.....	20
Partes del separador.....	21
Eficiencia de separación.....	23
Estudios previos.....	24
Modelado de la fase continua.....	26
Modelo RANS.....	26
LES.....	31
Modelado de la fase discreta.....	32
Modelo DPM.....	34
Mallado.....	36

Calidad de malla.....	37
Independencia de malla.....	39
Caída de presión.....	40
Capítulo III. Metodología.....	41
Elaboración de modelos CAD.....	41
Preprocesamiento.....	45
Validación de datos.....	47
Capítulo IV: Análisis de resultados.....	53
Postprocesamiento.....	53
Resultados obtenidos.....	53
Capítulo V. Conclusiones y recomendaciones.....	74
Conclusiones.....	74
Recomendaciones y estudios futuros.....	74
Referencias.....	76

Índice de figuras.

Figura 1. Funcionamiento de un separador ciclónico de partículas	16
Figura 2. Configuraciones geométricas de entrada tangencial y axial.	21
Figura 3. Partes de un separador ciclónico de partículas.....	22
Figura 4. Velocidades consideradas en la descomposición de Reynolds.....	27
Figura 5. <i>Ejemplos de mallas de superficie y de volumen</i>	36
Figura 6. <i>Vectores para determinar la ortogonalidad</i>	37
Figura 7. <i>Representación de las distancias para determinar la relación de aspecto</i>	38
Figura 8. Celdas hexaédricas con oblicuidad óptima y alta oblicuidad.	39
Figura 9. Modelo de ciclón 1D3D.	42
Figura 10. Modelo de ciclón 2D2D.	43
Figura 11. Modelo de ciclón Stairmand.	44
Figura 12. <i>Comparación entre las curvas de velocidades tangenciales</i>	47
Figura 13. <i>Comparación entre curvas de velocidades axiales</i>	48
Figura 14. Convergencia de malla del ciclón 1D3D con sus mallados de 2E5, 4E5 y 6E5 celdas.	50
Figura 15. <i>Convergencia de malla del ciclón 2D2D con sus mallados de 2E5, 4E5 y 6E5 celdas</i>	50

Figura 16. Convergencia de malla del ciclón Stairmand con sus mallados de 2E5, 4E5 y 6E5 celdas.....	51
Figura 17. Mallado de los tres modelos de separadores con 4E5 celdas poliédricas.	52
Figura 18. <i>Perfiles de velocidad axial en el ciclón 1D3D, 2D2D y Stairmand con diferentes diámetros del buscador de vórtice.</i>	54
Figura 19. <i>Perfiles de velocidad axial en el ciclón 1D3D, 2D2D y Stairmand con diferentes diámetros del buscador de vórtice.</i>	55
Figura 20. <i>Contornos de presión estática de los tres modelos de ciclones con diámetro de buscador de vórtice de 0.04 m.</i>	56
Figura 21. <i>Contornos de presión estática de los tres modelos de ciclones con diámetro de buscador de vórtice de 0.07 m.</i>	57
Figura 22. <i>Contornos de presión estática de los tres modelos de ciclones con diámetro de buscador de vórtice de 0.1 m.</i>	58
Figura 23. <i>Contornos de presión estática de los tres modelos de ciclones con diámetro de buscador de vórtice de 0.13 m.</i>	59
Figura 24. <i>Contornos de presión estática de los tres modelos de ciclón con diámetro de buscador de vórtice de 0.16 m.</i>	60
Figura 25. <i>Contornos de velocidad axial de los tres modelos de ciclón con diámetro de buscador de vórtice de 0.04 m.</i>	61
Figura 26. <i>Contornos de velocidad axial de los tres modelos de ciclón con diámetro de buscador de vórtice de 0.07 m.</i>	62

Figura 27. <i>Contornos de velocidad axial de los tres modelos de ciclón con diámetro de buscador de vórtice de 0.1 m.</i>	63
Figura 28. <i>Contornos de velocidad axial de los tres modelos de ciclón con diámetro de buscador de vórtice de 0.13 m.</i>	64
Figura 29. <i>Contornos de velocidad axial de los tres modelos de ciclón con diámetro de buscador de vórtice de 0.16 m.</i>	65
Figura 30. <i>Contornos de energética cinética de turbulencia de los tres modelos de ciclón con diámetro de buscador de vórtice de 0.04 m.</i>	66
Figura 31. <i>Contornos de energética cinética de turbulencia de los tres modelos de ciclón con diámetro de buscador de vórtice de 0.07 m.</i>	67
Figura 32. <i>Contornos de energética cinética de turbulencia de los tres modelos de ciclón con diámetro de buscador de vórtice de 0.1 m.</i>	68
Figura 33. <i>Contornos de energética cinética de turbulencia de los tres modelos de ciclón con diámetro de buscador de vórtice de 0.13 m.</i>	69
Figura 34. <i>Contornos de energética cinética de turbulencia de los tres modelos de ciclón con diámetro de buscador de vórtice de 0.16 m.</i>	70
Figura 35. <i>Curvas de eficiencia y número de Euler para cada ciclón.</i>	72
Figura 36. <i>Relación de la eficiencia y el número de Euler de cada modelo.</i>	73

Índice de tablas

Tabla 1. <i>Dimensiones geométricas de los diseños de separadores ciclónicos (D=0.2m).....</i>	23
Tabla 2. <i>Calidad de malla determinada según el rango de valores de oblicuidad.....</i>	39
Tabla 3. <i>Condiciones de contorno.....</i>	45
Tabla 4. <i>Diámetro hidráulico e intensidad turbulenta de las secciones circulares y rectangulares de la salida del buscador de vórtice y la entrada tangencial del separador, respectivamente. ...</i>	46
Tabla 5. <i>Evaluación de criterios de mallado de los tres modelos de ciclones.</i>	49
Tabla 6. <i>Propiedades de las partículas.....</i>	52
Tabla 7. <i>Eficiencias y número de Euler de cada ciclón con diferentes diámetros del buscador de vórtice.....</i>	71
Tabla 8. <i>Relación entre el número de Euler y su eficiencia de cada modelo de separador.....</i>	72

Resumen

El presente trabajo, se centra en el estudio computacional y análisis de la eficiencia y caída de presión de tres modelos de separadores ciclónicos de partículas. El análisis computacional se realizó en el software ANSYS Fluent R2019, con el modelo de turbulencia de Reynolds y el uso del modelo de fase discreta (DPM) para el estudio de la interacción unidireccional del fluido con las partículas. En primer lugar, se validaron los resultados mediante la comparación de los datos de la simulación base con los de un estudio experimental llevado a cabo con un anemómetro Doppler de láser. Posterior a ello, se realizó el cálculo de la eficiencia de separación de partículas y se decidió tomar cinco dimensiones diferentes para el diámetro del buscador de vórtice del separador para conocer la incidencia en su eficiencia y caída de presión en los tres modelos de separadores. Las distintas dimensiones tomadas por el buscador de vórtice mostraron que mientras su diámetro disminuye, aumenta la eficiencia de separación y su caída de presión. Sin embargo, esto ocasiona un consumo de energía muy alto, por ende, se debe considerar que el modelo ideal es aquel que brinde una alta eficiencia y una caída de presión moderada.

Palabras clave: separadores ciclónicos, anemómetro, buscador de vórtice, eficiencia, caída de presión.

Abstract.

The present study focuses into the computational examination and assessment of the efficiency and pressure drop concerning to three distinct models of cyclonic separators designed for particle separation. The computational analysis was carried out using the ANSYS Fluent R2019 software, employing the Reynolds stress turbulence model (RSTM) and utilizing the Discrete Phase Model (DPM) to study the one-way coupling interaction of fluid with the particles. Initially, validation of the results was performed by the comparison of the simulation data with those from an experimental study conducted using a laser Doppler anemometer. Following validation, the determination of particle separation efficiency was carried out based on the validated data, then it was decided to explore five different dimensions for the vortex finder diameter of the cyclone separator to understand their impact on the efficiency and pressure drop across the three cyclone separator models. The varying of dimensions from the vortex finder diameter revealed that as this one decrease, the separation efficiency of particles and the pressure drop increases. In spite of that, this leads to a significant increase in energy consumption. As a result, it is essential to consider that the ideal model is the one which provides a high efficiency coupled with moderate values of pressure drop.

Key words: cyclone separator, anemometer, vortex finder, efficiency, pressure drop.

Capítulo I: Generalidades.

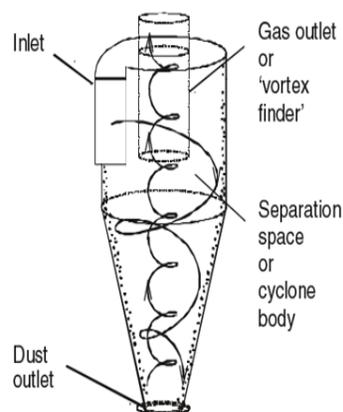
Antecedentes.

La separación de partículas ha sido ampliamente utilizada en el ámbito industrial ya que representa un componente sumamente importante en los procesos productivos, desempeñando una mejora en su eficiencia y previniendo el deterioro prematuro de equipos y máquinas, debido a que evita la contaminación en las líneas de producción y garantiza el cumplimiento de los estándares de calidad exigidos.

Los separadores ciclónicos de partículas son dispositivos esenciales para desviar las partículas sólidas de un flujo de gas o aire. Estos equipos permiten separar las partículas de diferentes tamaños y densidades mediante la fuerza centrífuga generada por la rotación del gas en un ciclón, permitiendo que el flujo de gas limpio salga por la parte superior, mientras que las partículas son acumuladas y descargadas por la parte inferior, un ejemplo de su funcionamiento se puede apreciar en la Figura 1.

Figura 1.

Funcionamiento de un separador ciclónico de partículas



Nota: Adaptado de Gas Cyclones and Swirl Tubes (p. 12), (Hoffman & Stein, 2008).

Estos equipos han sido utilizados en diferentes industrias (química, energética, cementera, maderera, entre otras) debido a su diseño simple y ausente de partes móviles, los cuales han sido sujeto de diversos experimentos e investigaciones teóricas. Sin embargo, aunque su funcionamiento parece sencillo, su diseño no es una tarea fácil, ya que se debe considerar que su principal objetivo está enfocado en la eficiencia de separación de partículas y la caída de presión. En este sentido, diferentes variables físicas y geométricas influyen de manera directa en su rendimiento, lo que hace este un proceso complejo y costoso de realizarlo manualmente en pruebas en laboratorio.

Las mejoras en el diseño y eficiencia de los separadores ciclónicos han dependido en su mayoría de la experimentación de muchos investigadores que han encontrado correlaciones de los datos experimentales para producir expresiones empíricas que relacionan la densidad de las partículas, la viscosidad del gas, las dimensiones geométricas del ciclón, el diámetro de corte de las partículas, la velocidad de entrada, entre otras. Lamentablemente, estas relaciones solo pueden utilizarse dentro de los límites que se obtuvieron, ya que sus extrapolaciones son cuestionables y su validez suele ser incierta. Por ello es importante un enfoque más general. (Suasnabar, 2000)

En los últimos años, la dinámica de fluidos computacional (CFD) se ha convertido en una herramienta esencial para realizar diseños de ciclones ya que tiene un gran potencial para predecir las características del campo de flujo y trayectorias de las partículas de manera tridimensional, así como la caída de presión dentro del ciclón (Griffiths & Boysan, 1996). El flujo turbulento y arremolinado en un ciclón impone grandes exigencias a las técnicas numéricas y modelos de turbulencia empleados en CFD. La predicción de caída de presión del ciclón y su eficiencia de recolección en diferentes configuraciones geométricas de los tres modelos de ciclones serán estudiadas en el presente trabajo.

Definición del problema.

El presente trabajo realiza un análisis de tres diseños diferentes de separadores ciclónicos, cuya configuración geométrica está representada por la relación que existe entre la altura total del ciclón y el diámetro (D) del mismo, las cuales son:

- 1D3D: La altura del cilindro es igual al diámetro del ciclón y la altura del cono es tres veces el diámetro del ciclón.
- 2D2D: La altura del cilindro y del cono es dos veces el diámetro del ciclón.
- Stairmand: La altura del cilindro es de 1.5 veces el diámetro del ciclón y la altura del cono es 2.5 veces el diámetro del ciclón.

Este análisis consiste en estudiar el desempeño de cada uno de los separadores ciclónicos y proponer soluciones para analizar la eficiencia de recolección de partículas y su caída de presión. Considerando esto, se realizarán diferentes simulaciones numéricas, donde se presentará el comportamiento del flujo (gas – partículas) dentro del separador, teniendo en cuenta los diferentes aspectos que logran aportar en un mejor rendimiento.

Objetivos.***Objetivo General***

- Estudiar numéricamente el desempeño de tres configuraciones de separadores ciclónicos de partículas.

Objetivo Específico.

- Analizar los parámetros geométricos que permiten optimizar la eficiencia de un separador ciclónico de partículas.

Alcance del proyecto.

El presente proyecto contempla el estudio y simulación computacional de un separador ciclónico de partículas, buscando su optimización con enfoque en la eficiencia de separación y caída de presión, descrita en artículos científicos actuales y profundizar en la importancia de las configuraciones geométricas, para alcanzar de esta manera un mejor desempeño en los separadores ciclónicos.

Justificación del proyecto

La justificación e importancia del proyecto radica en optimizar el diseño de los separadores ciclónicos de partículas con diferentes configuraciones geométricas, de forma que se asegure un rendimiento confiable, permitiendo a su vez la reducción de costos, minimizar el tiempo de residencia, junto con la mejora de la calidad y eficiencia de los procesos industriales que utilizan estos dispositivos.

De igual manera, la elaboración del presente trabajo permitirá ser una base de estudio para optimizar esta tecnología en el país, cuyo principal objetivo es disminuir el desecho de partículas contaminantes al ambiente.

Capítulo II: Revisión bibliográfica.

Separadores ciclónicos.

Los separadores ciclónicos son los equipos de eliminación de partículas más utilizados, debido a su diseño simple, bajos costos de mantenimiento y adaptabilidad a una amplia gama de condiciones operativas.

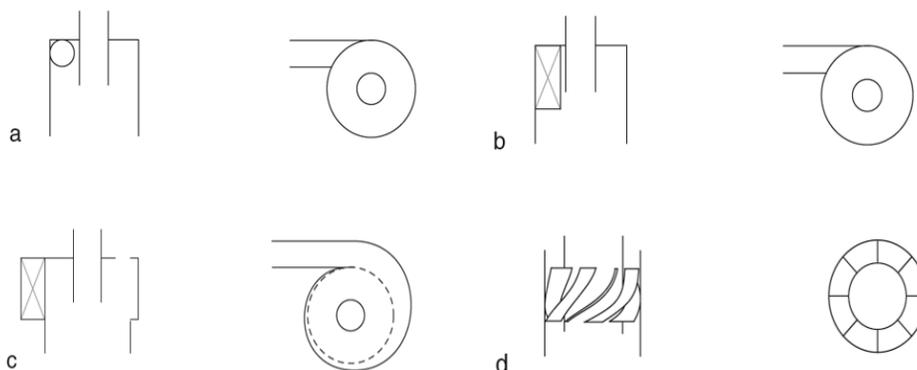
La física de las partículas es una de las materias más investigadas en todo el mundo porque está asociado con enfermedades cardiovasculares, cardíacas y respiratorias (Arciniégas, 2011). Por ello, es apropiado usar esta tecnología, procurando la salud de los operadores y de la población. Además, estos equipos no cuentan con partes móviles, requieren de menor mantenimiento, su bajo costo, y se adaptan fácilmente a presiones extremas, temperaturas y ambientes corrosivos (Stairmand, 1951).

Estos dispositivos presentan dos flujos, el externo e interno. El flujo externo rota a lo largo de la pared debido a la fuerza centrífuga, cuyo trayecto termina en la parte inferior del separador, mientras que el flujo interno es causado por la fuerza de arrastre, el cual empieza cuando el flujo externo invierte su dirección en el fondo del separador y descarga el flujo en la parte superior, en el buscador de vórtice.

Estos equipos industriales tienen dos formas de entrada de fluido con partículas: tangencial o axial, siendo la primera la más común. De igual manera, existen diferentes configuraciones geométricas, cuando se trata de entradas tangenciales, estas pueden ser de forma circular (Figura 2a), rectangular (Figura 2b) o envolvente (Figura 2c), mientras que en las entradas axiales se tratan de álabes de remolino (Figura 2d) (Hoffman & Stein, 2008).

Figura 2.

Configuraciones geométricas de entrada tangencial y axial.



Nota: Adaptado de *Gas Cyclones and Swirl Tubes* (p. 12), (Hoffman & Stein, 2008).

El ciclón estándar tiene normalmente una entrada de sección transversal rectangular. El movimiento de remolino se logra diseñando la entrada de tal manera que el gas ingrese de manera tangencial. A medida que el gas entra, transforma esta velocidad de entrada en un flujo turbulento exterior descendente, y en la parte cónica del ciclón, el gas es empujado lentamente hacia la región interna, donde el movimiento del flujo interior ascendente dirige al gas limpio hacia la salida superior del ciclón.

Partes del separador.

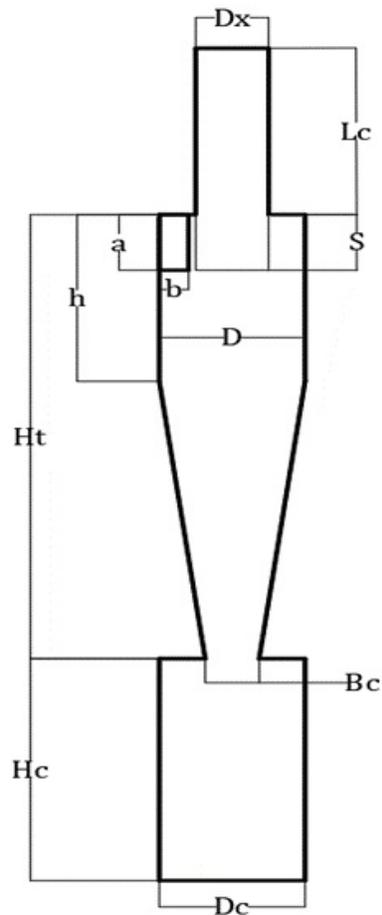
La geometría de estos equipos industriales viene determinada por las once dimensiones representadas en la Figura 3, especificadas a continuación.

- Diámetro de la sección cilíndrica, D
- Altura total del ciclón, H_t
- Altura del cilindro, h .
- Diámetro del buscador de vórtice, D_x

- Altura interna del buscador de vórtice, S
- Altura externa del buscador de vórtice, L_c
- Altura y anchura de la entrada, a y b , respectivamente
- Diámetro de la salida de partículas, B_c
- Altura del colector de partículas, H_c .
- Diámetro del colector de partículas, D_c .

Figura 3.

Partes de un separador ciclónico de partículas.



Nota: El gráfico presenta las diferentes nomenclaturas de los componentes que conforman un separador ciclónico de partículas.

Existen varios diseños de ciclones con diferentes dimensiones geométricas, en la Tabla 3 se presentan la relación de cada componente con respecto al diámetro del ciclón.

Tabla 1.

Dimensiones geométricas de los diseños de separadores ciclónicos ($D=0.2m$).

Dimensiones	1D3D	2D2D	Stairmand
a/D	0.5	0.5	0.5
b/D	0.25	0.25	0.2
Dx/D	0.5	0.5	0.5
Ht/D	4	4	4
h/D	1	2	1.5
S/D	0.625	0.625	0.5
Bc/D	0.25	0.25	0.375
Hc/D	2	2	2
Dc/D	1	1	1

Nota: La tabla presenta la relación de las dimensiones de cada modelo de ciclón con respecto a su diámetro D.

Eficiencia de separación.

La eficiencia de separación de partículas puede ser considerada como el aspecto más importante para el correcto diseño de un separador ciclónico, ya que es su principal función; para su cálculo es necesario tomar en consideración aspectos como:

- ✓ Tamaño de las partículas.
- ✓ Densidad de las partículas.
- ✓ Dimensionamiento del separador.

El tamaño de las partículas influye en las fuerzas ejercidas dentro del separador, ya que mientras más grandes son las partículas, la fuerza de arrastre es menor a la fuerza centrífuga, lo cual conduce las partículas hacia la pared, y posteriormente son depositadas en el colector. Si el

tamaño de las partículas se reduce, la fuerza de arrastre incrementa gradualmente, y la fuerza centrífuga reduce ligeramente, ocasionando una disminución en la cantidad de partículas recolectadas.

La eficiencia de separación también depende de la densidad de las partículas debido a su interacción con el gas, ya que mientras más densas son las partículas, estas tienden a ser empujadas hacia las paredes debido a las altas fuerzas centrífugas que experimentan, previniendo el ingreso de partículas al vórtice.

En la Ecuación 1 se muestra que la eficiencia de un ciclón está determinada por la razón entre las partículas atrapadas P_t y las partículas inyectadas P_i .

$$\eta = \frac{P_t}{P_i} \quad (1)$$

El dimensionamiento del separador es uno de los aspectos más estudiados, ya que impacta directamente en la eficiencia de recolección de partículas. La interacción entre los componentes geométricos subraya la importancia de su correcto dimensionamiento para lograr un rendimiento deseado.

Estudios previos.

En cuanto a la configuración de la entrada tangencial se han realizado investigaciones enfocadas en el incremento de sus dimensiones, aumentando su eficiencia y reduciendo el diámetro de corte. También se ha examinado la eficiencia de recolección y caída de presión en dos ciclones, uno de entrada singular y otro de entrada doble. De igual manera, se han realizado estudios en el rendimiento del ciclón variando el tamaño de partículas inyectadas en la entrada. Conjuntamente, estos estudios realizados por (Elsayed & Lacor, 2011), (Wang, Sun, & Jiao, 2020) y (Baharuddin, 2022), respectivamente, han contribuido a entender la influencia de la configuración de la entrada en la eficiencia y caída de presión del colector.

En el campo de la configuración del buscador de vórtice se han desarrollado investigaciones de cómo impacta una muesca en este componente a diferentes ángulos, en la velocidad tangencial, axial y radial. Se ha demostrado que un buscador de vórtice ranurado puede mejorar su eficiencia y disminuir la caída de presión hasta un 20%. Estas investigaciones realizadas por (Qiang, Qinggong, Weiwei, & Zilin, 2020) y (Guo, et al., 2023) permiten conocer la importancia de este componente en el separador.

Con respecto a la configuración del cuerpo del separador también se ha estudiado la relación que tiene este componente con el tamaño de la partícula y la tasa de flujo, y su respectiva eficiencia; se han realizado variaciones del diámetro del cono en relación al diámetro del buscador de vórtice incrementando su eficiencia con un aumento mínimo en la caída de presión. Se ha llegado a la conclusión que un cono más pequeño da lugar a velocidades axiales y tangenciales más altas, incrementando la eficiencia y caída de presión. Todos estos estudios realizados por (Kim & Lee, 1990), (Xiang, Park, & Lee, 2001) y (Chuah T.G., 2006) han contribuido información valiosa optimizar las configuraciones geométricas y mejorar el rendimiento del ciclón.

Los ciclones de alta eficiencia tienen mayores caídas de presión, sin embargo, esto requiere de mayores costos de energía para mover el aire con partículas a través del ciclón. Por lo general, el diseño del ciclón está determinado por una limitación en la caída de presión, en lugar de cumplir con alguna eficiencia de control especificada (Echeverri, 2006).

Algunos investigadores se han basado en la metodología de superficie de respuesta (MSR), la cual ha permitido optimizar y mejorar el diseño de la geometría de los ciclones. Esta metodología implica la optimización de los ajustes de las variables factoriales para alcanzar un valor de respuesta máximo o mínimo deseado, investigaciones realizadas por (Sun, 2017); (Wei, Sun, & Gao, 2020) y (Elsayed & Lacor, 2010) han tenido el objetivo de lograr una mayor eficiencia con una caída de presión mínima.

A pesar de que el entendimiento y conocimiento del campo de flujo dentro de los ciclones se ha ido desarrollando en los años recientes, el mecanismo de separación de partículas todavía necesita ser entendido en su totalidad (Chuah T.G., 2006) y para evaluar el rendimiento de los ciclones, el estudio tiene que considerar dos parámetros importantes: la eficiencia de separación y su respectiva caída de presión.

Modelado de la fase continua.

La dinámica computacional de fluidos (CFD) es una herramienta valiosa para abordar problemas que no tienen solución matemática exacta, como es el caso de la turbulencia. Este fenómeno, debido a su complejidad numérica y física, ha sido difícil de comprender con precisión. Sin embargo, se han desarrollado diferentes modelos y soluciones numéricas que permiten aproximarse al comportamiento real de los fluidos en condiciones turbulentas. El éxito de CFD recae en una correcta selección del modelo de turbulencia que desarrolla el flujo.

Los modelos de turbulencia existentes son tres, RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes), LES (Large Eddy Simulation) y DNS (Direct Numerical Simulation), siendo el DNS el modelo que mayor costo computacional requiere y a su vez el más preciso, seguido del LES y el RANS. Sin embargo, estos dos últimos pueden ser usados actualmente en softwares CFD, como ANSYS Fluent, CFX u Open FOAM.

Modelo RANS.

Las ecuaciones que describen el comportamiento de la fase continua corresponden a las ecuaciones de Navier – Stokes. Estas ecuaciones modelan los principios de conservación de masa y cantidad de movimiento. En consecuencia, considerando que el flujo del fluido en el separador es estacionario, tridimensional, turbulento, isotérmico e incompresible, las ecuaciones de Navier – Stokes se ajustan a representar la dinámica del sistema.

A pesar que la turbulencia es descrita mediante las ecuaciones de Navier Stokes, en la mayoría de las situaciones no es factible resolver la amplia gama de escalas en el tiempo y el espacio mediante simulación numérica directa, por ello, se debe aplicar procedimientos que promedien a las ecuaciones de Navier – Stokes para filtrar el espectro Reynolds. Lo que da lugar a las ecuaciones Navier – Stokes promediadas por Reynolds (RANS).

La Ecuación 2 indica que la velocidad del fluido u_i está dividida en dos componentes, la velocidad promediada en el tiempo \bar{u}_i y la fluctuante u'_i , también conocida como descomposición de Reynolds, como se presenta en la Figura 4. Por otro lado, las Ecuaciones 3 y 4 representan la continuidad y cantidad de movimiento.

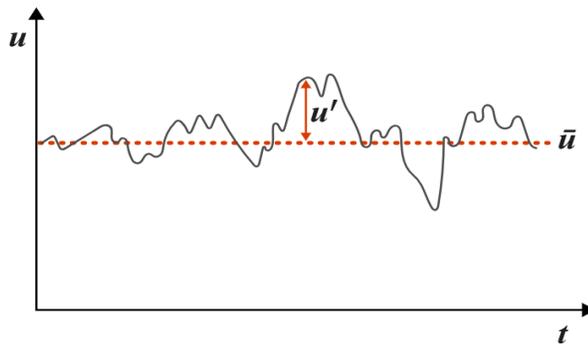
$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (4)$$

Figura 4.

Velocidades consideradas en la descomposición de Reynolds.



Las ecuaciones del modelo RANS incluyen el término $-\overline{\rho u'_i u'_j}$ a las ecuaciones de Navier-Stokes, el cual representa el tensor de los esfuerzos de Reynolds y, a su vez, refleja los efectos de la turbulencia.

El modelo RANS tiene diferentes métodos, entre los más populares se encuentra: $k - \varepsilon$, $k - \omega$, Spalart – Allmaras, Reynolds; y cada uno con diferente aplicación.

$k - \varepsilon$: Es un modelo basado en las ecuaciones de transporte para la energía cinética de turbulenta (k), y la tasa de disipación de turbulencia (ε), cada valor se obtiene de la Ecuación 5 y 6, respectivamente

En las Ecuaciones 5 y 6, se presentan cuatro constantes, $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$, σ_k y σ_ε , que toman los siguientes valores: 1.44, 1.92, 1.0 y 1.3, respectivamente, o pueden ser definidas por el usuario (FLUENT User's Guide, 2016).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (6)$$

Y se calcula una viscosidad turbulenta a partir de estos dos parámetros, como se muestra en la Ecuación 7, donde C_μ es una constante de valor 0.09.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

$k - \omega$: Es un modelo empírico basado en ecuaciones de transporte para la energía cinética de la turbulencia (k) y la tasa de disipación específica (ω), cada valor se obtiene de la Ecuación 8 y 9.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (9)$$

En las Ecuaciones 8 y 9, G_k representa la generación de energía cinética de la turbulencia debida a los gradientes de velocidad media. G_ω representa la generación de ω . Γ_k y Γ_ω representan la difusividad efectiva de k y ω , respectivamente. Y_k y Y_ω representan la disipación de k y ω debida a la turbulencia. Por último S_k y S_ω son términos definidos por el usuario que representan las fuerzas de empuje (FLUENT User's Guide, 2016).

Spalart – Allmaras: Este modelo resuelve una sola ecuación que resuelve el transporte de la viscosidad cinemática turbulenta $\tilde{\nu}$ (FLUENT User's Guide, 2016). Como se muestra en la Ecuación 10.

Este modelo se ha implementado para usarlo en aplicaciones cuando la resolución de la malla no es lo suficientemente fina, es decir, para simulaciones relativamente rudimentarias con mallas gruesas donde los cálculos precisos del flujo turbulento no son críticos (FLUENT User's Guide, 2016).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}(\rho \tilde{\nu}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \tilde{\nu} u_i) = G_\nu + \frac{1}{\sigma_{\tilde{\nu}}} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu + \rho \tilde{\nu}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right\} + C_{b2} \rho \left(\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right)^2 \right] - Y_\nu + S_{\tilde{\nu}} \quad (10)$$

Donde G_ν es la producción de la viscosidad turbulenta, Y_ν representa la destrucción la misma, por otro lado, $\sigma_{\tilde{\nu}}$ y C_{b2} son constantes.

Para la resolución de los términos G_ν , Y_ν y μ_t se necesita el uso de ciertas constantes como: C_{b1} , C_{b2} , $\sigma_{\tilde{\nu}}$, C_{v1} , C_{w2} , C_{w3} y k . El software ANSYS Fluent por defecto da los siguientes

valores: 0.1355, 0.622, 2/3, 7.1, 0.3, 0.2 y 0.4187, por último, la constante C_{w1} se especifica en la Ecuación 11 (FLUENT User's Guide, 2016).

$$C_{w1} = \frac{C_{b1}}{k^2} + \frac{(1 + C_{b2})}{\sigma_{\bar{v}}} \quad (11)$$

Reynolds: Este modelo de esfuerzos de Reynolds es el más elaborado proporcionado por ANSYS Fluent. Este modelo abandona la hipótesis de una turbulencia isotrópica y se acerca a las ecuaciones de Navier Stokes promediadas por Reynolds mediante la resolución de las ecuaciones de transporte para los esfuerzos de Reynolds, en conjunto con una ecuación para la tasa de disipación. Requiriendo de cinco ecuaciones de transporte adicionales en flujos 2D, y de siete ecuaciones adicionales en flujos 3D. Entre las aplicaciones más comunes están los flujos en ciclones, alta vorticidad en cámaras de combustión, en conductos de flujos giratorios, y otros (FLUENT User's Guide, 2016).

Las ecuaciones para el tensor de los esfuerzos de Reynolds, $\overline{\rho u'_i u'_j}$ pueden ser escrito como en la Ecuación 12.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\overline{\rho u'_i u'_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{\rho u_k u'_i u'_j}) = D_{T,ij} + D_{L,ij} + P_{ij} + G_{ij} + \phi_{ij} - \varepsilon_{ij} + F_{ij} + S_{user} \quad (12)$$

Los siete términos de la derecha en la Ecuación 11 corresponden a los siguientes: difusión turbulenta, difusión molecular, producción de esfuerzos, producción de flotabilidad, esfuerzo debido a la presión, la disipación, producción debido a la rotación del sistema, respectivamente (FLUENT User's Guide, 2016). Los cuales son representados desde la Ecuación 13 a la 19.

$$D_{T,ij} = -\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\overline{\rho u'_i u'_j u'_k} + \rho (\delta_{kj} u'_i + \delta_{ik} u'_j) \right] \quad (13)$$

$$D_{L,ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u'_i u'_j}) \right] \quad (14)$$

$$P_{ij} = -\rho \left(\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) \quad (15)$$

$$G_{ij} = \rho \beta \left(g_i \overline{u'_j \theta} + g_j \overline{u'_i \theta} \right) \quad (16)$$

$$\phi_{ij} = p \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) \quad (17)$$

$$\varepsilon_{ij} = 2\mu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} \quad (18)$$

$$F_{ij} = -2\rho\Omega_k \left(\overline{u'_j u'_m} \varepsilon_{ikm} + \overline{u'_i u'_m} \varepsilon_{jkm} \right) \quad (19)$$

LES.

El modelo LES es un modelo de turbulencia cuyas ecuaciones de gobierno son las de Navier – Stokes, las cuales se derivan de la conservación de masa, cantidad de movimiento. El modelo de turbulencia LES se centra en los grandes vórtices de un flujo, influidos por la geometría del mismo, mientras que los vórtices más pequeños que la malla computacional, se modelan mediante una metodología a escala de submalla (SGS).

La metodología a escala de submalla permite incluir los efectos de pequeña escala de movimientos del fluido en las ecuaciones que describen los movimientos a mayor escala, evitando la necesidad de simular esos detalles minuciosos en todo el dominio.

Este modelo se obtiene realizando un filtro de las ecuaciones promediadas de Navier – Stokes, obteniendo las Ecuaciones 20 y 21, representando las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (20)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\sigma_{ij}) - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (21)$$

En la Ecuación 21, se presenta el término σ_{ij} el cual, es el tensor de esfuerzos debido a la viscosidad molecular, definido en la Ecuación 22, en la cual se encuentra el esfuerzo de escala de submalla τ_{ij} , descrito en la Ecuación 23.

$$\sigma_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \quad (22)$$

$$\tau_{ij} = \rho \overline{u_i u_j} - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (23)$$

Modelado de la fase discreta.

Una vez especificado las ecuaciones de gobierno para la fase continua (fluido) es necesario profundizar en la fase discreta (partículas), cuyo flujo puede ser modelado de dos maneras: usando el enfoque Euler – Euler o Euler – Lagrange. El primero considera que las partículas son un segundo flujo interactuando con el flujo de gas siguiendo la ley de arrastre de Stokes.

Por otro lado, el segundo enfoque adopta el seguimiento de partículas de Lagrange, donde se sigue el movimiento de una sola partícula, resolviendo las ecuaciones de movimiento a medida que se sigue a través del campo de flujo de gas. Este modelo es apropiado para modelar la separación y clasificación de partículas en secadores ciclónicos y por aspersión, combustión de carbón y combustibles líquidos, y algunos flujos cargados de partículas (Cokljat, Slack, Vasquez, Bakker, & Montante, 2006)

Por lo tanto, usando esta técnica, el efecto del fluido sobre el movimiento de las partículas se calcula directamente (Hoffman & Stein, 2008).

Cuando se produce la interacción entre la fase continua y la fase dispersa, la interacción dinámica entre ambas fases puede ser unidireccional o bidireccional. Debido a la baja fracción volumétrica de la fase dispersa en este caso de estudio (3-5%), se supone que el acoplamiento

entre las fases es unidireccional (acoplamiento unidireccional), las partículas no tienen un efecto considerable sobre las propiedades físicas del fluido (Camilo Zabala-Quintero, 2021).

De acuerdo al enfoque Euler – Lagrange (acoplamiento unidireccional), la Ecuación 24 representa el equilibrio entre partículas dispersas, y está dado por (Zhao, Su, & Zhang, 2006):

$$\frac{\partial u_{pi}}{\partial t} = F_D(u_i - u_{pi}) + \frac{(\rho_p - \rho)g_i}{\rho_p} + F_i \quad (24)$$

Donde u_{pi} es la velocidad de las partículas, $F_D(u_i - u_{pi})$ es la fuerza de arrastre que actúa en las partículas, ρ_p es la densidad de las partículas, g_i es la aceleración de la gravedad, y F_i corresponde a las fuerzas adicionales que pueden actuar sobre la partícula, como la fuerza browniana, la fuerza de Saffman y Magnus, la fuerza de masa agregada, las fuerzas electromagnéticas o la fuerza de Basset (Zhao, Su, & Zhang, 2006).

Para partículas esféricas, la fuerza de arrastre viene dada por la Ecuación 25.

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D R_e}{24} \quad (25)$$

Y el número de Reynolds es expresado como se presenta en la Ecuación 26.

$$R_e = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad (26)$$

Donde d_p es el diámetro de la partícula, u es la velocidad del fluido, u_p es la velocidad de las partículas, ρ es la densidad del fluido, y μ es la viscosidad dinámica del fluido.

En FLUENT, el coeficiente de arrastre para partículas esféricas es calculado mediante las correlaciones desarrolladas por (S.A Morsi, 1972), representado en las Ecuaciones 27 y 28.

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \quad (27)$$

$$C_D = 0.5195 - \frac{1662.5}{Re} + \frac{5.4167 \times 10^6}{Re^2}; \quad Re \geq 10000 \quad (28)$$

Debido a que el modelado de dispersión de partículas es unidireccional y la interacción entre partículas no es considerada, únicamente el peso, la fuerza de sustentación y la fuerza de arrastre en las partículas son consideradas en el cálculo.

Modelo DPM.

El modelo de fase discreta (DPM) resuelve la fase continua (fluido) a través de las ecuaciones de Navier – Stokes, mientras que la fase dispersa (sólida) que pueden ser partículas, gotas o burbujas, es simulada mediante la segunda ley de Newton.

La dispersión de pequeñas partículas está fuertemente afectada por las fluctuaciones turbulentas instantáneas de la velocidad del fluido. Estas son funciones aleatorias del espacio y tiempo.

Para ello, en el presente estudio se utiliza un modelo de trayectoria aleatorias para evaluar estas fluctuaciones de velocidades instantáneas. La velocidad instantánea del fluido, u , puede ser dividida en dos componentes, como lo muestra la ecuación 29.

$$u = \bar{u} + u' \quad (29)$$

Donde \bar{u} y u' son las velocidades promediadas en el tiempo y fluctuantes del gas, respectivamente. Los valores de u', v' y w' que prevalecen durante el tiempo de vida de la turbulencia de un remolino τ_e , son ejemplificados asumiendo que obedecen una distribución de probabilidad Gaussiana, entonces, cada velocidad responde a las ecuaciones 30, 31 y 32.

$$u' = \zeta \sqrt{\overline{u' \cdot u'}} \quad (30)$$

$$v' = \zeta \sqrt{\overline{v' \cdot v'}} \quad (31)$$

$$w' = \zeta \sqrt{\overline{w' \cdot w'}} \quad (32)$$

donde ζ es un número aleatorio de una distribución normal y toma un valor entre -1 y 1, los términos de $\sqrt{\overline{u' \cdot u'}}$, $\sqrt{\overline{v' \cdot v'}}$ y $\sqrt{\overline{w' \cdot w'}}$ son velocidad de fluctuación cuadrática media local en la dirección axial, radial y tangencial, respectivamente (Guangcai Gong, 2011).

La partícula es transportada por un remolino hasta que se disipa o hasta que haya pasado a través del remolino y luego viaje con otro remolino. La vida útil de los remolinos se calcula utilizando la escala de tiempo integral lagrangiana definida en la Ecuación 33.

$$T_L = C_L k / \varepsilon \quad (33)$$

donde C_L es una constante que toma un valor aproximado de 0.30 cuando se usa el modelo de turbulencia de Reynolds.

El tiempo de vida característico del remolino es definido por otra constante, como se muestra en la ecuación 34.

$$\tau_e = 2T_L \quad (34)$$

o como una variación aleatoria de T_L , como en la ecuación 35.

$$\tau_e = -T_L \ln(r) \quad (35)$$

donde r es un número aleatorio uniforme que toma valores entre 0 y 1. Donde el cálculo aleatorio de τ_e brinda una descripción más realista de la función de correlación (FLUENT User's Guide, 2016).

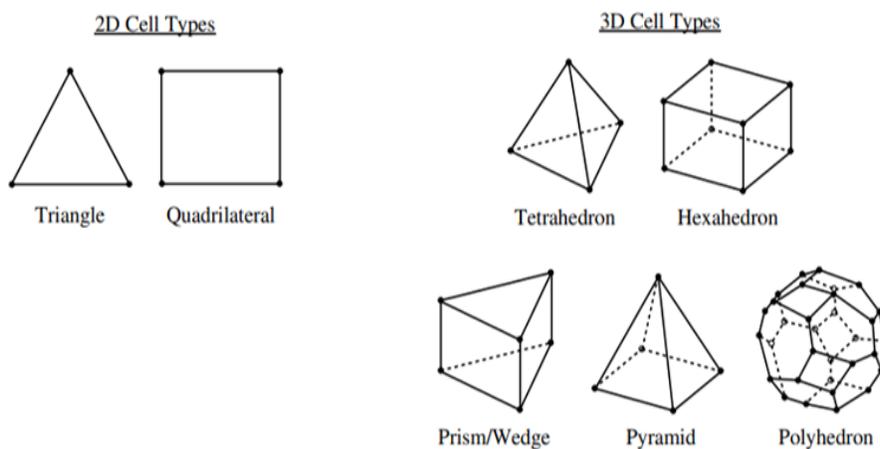
Mallado

La precisión de la simulación depende crucialmente del modelo de turbulencia seleccionado, de igual manera, el mallado juega un papel importante en la dinámica de fluidos computacional (CFD) ya que influye en la precisión de resolución de modelos matemáticos a partir del método del volumen finito.

Una malla es la representación discretizada del modelo de estudio, está formada por un conjunto de nodos y aristas que forman superficies. La unión de todas estas superficies se la denomina malla de superficie, que pueden ser: triángulos, cuadriláteros o una mezcla de ambos. Y a su vez, estas nuevas superficies tomarán la malla de volumen, que estará compuesta por tetraedros, hexaedros, pirámides o poliedros. La Figura 5, muestra la representación de cada tipo de malla.

Figura 5.

Ejemplos de mallas de superficie y de volumen



Nota. Adaptado de *FLUENT 6.3 User's Guide* (p. 6.1), por ANSYS, 2006, ANSYS Inc.

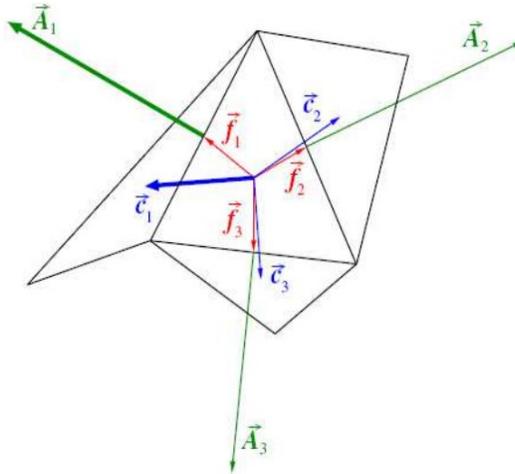
Calidad de malla.

Es importante conservar una buena calidad de malla, para ello se debe tomar algunas consideraciones, entre las más importantes se mencionan las siguientes:

Ortogonalidad. Determina la alineación y la igualdad de las celdas adyacentes con respecto a una celda común. La ortogonalidad se calcula mediante la Ecuación 36 y Ecuación 37, y la ortogonalidad se toma del valor mínimo entre estos dos, el cual debe ser mayor a 0.1. En la Figura 6 se muestra una celda con los vectores para determinar su ortogonalidad.

Figura 6.

Vectores para determinar la ortogonalidad.



Nota. Adaptado de *Meshign User's Guide* (p. 117), por ANSYS, 2010, ANSYS Inc.

$$\frac{\vec{A}_i \cdot \vec{f}_i}{|\vec{A}_i| |\vec{f}_i|} \quad (36)$$

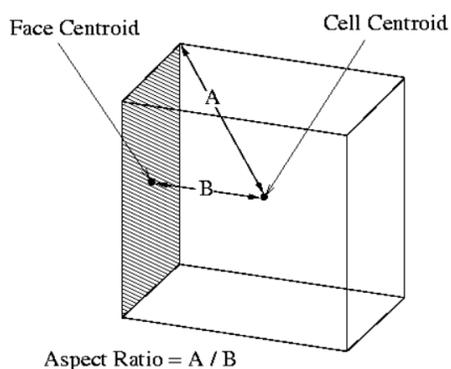
$$\frac{\vec{A}_i \cdot \vec{c}_i}{|\vec{A}_i| |\vec{c}_i|} \quad (37)$$

Donde \vec{A}_i es el vector normal a la cara de la celda, \vec{f}_i es el vector que va desde el centroide de la celda hacia el centroide de su cara, y \vec{c}_i representa al vector que va desde el centroide de la celda, hacia el centroide de la cara adyacente.

Relación de aspecto. Es una medida del estiramiento de una celda y está determinada por la relación entre el valor máximo y mínimo de la distancia entre el centroide de la celda y el centroide de su cara, o la distancia entre el centroide de la celda y sus nodos, como se muestra en la Figura 7 (FLUENT User's Guide, 2016).

Figura 7.

Representación de las distancias para determinar la relación de aspecto.



Nota. Adaptado de *FLUENT 6.3 User's Guide* (p. 6.2.2), por ANSYS, 2006, ANSYS Inc.

Oblicuidad. Es la desviación entre el tamaño de la celda óptimo y el tamaño de la celda existente. Esta oscila entre 0 (ideal) y 1 (peor). Las celdas con una oblicuidad muy alta no son preferidas ya que proporcionan resultados con escasa precisión.

El manual de ANSYS Meshing, cataloga la calidad del mallado haciendo referencia a la oblicuidad en la Tabla 2. La figura 8 presenta una comparación de una celda con oblicuidad óptima y con alta oblicuidad.

Tabla 2.

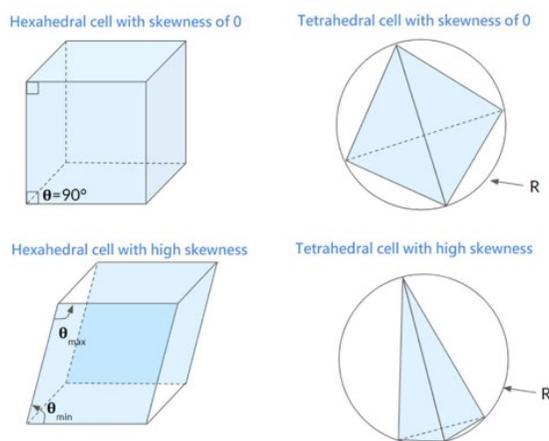
Calidad de malla determinada según el rango de valores de oblicuidad.

Valor de oblicuidad	Calidad de celda
1	Degenerada
0.9 – 1	Mala
0.75 – 0.9	Pobre
0.5 – 0.75	Justa
0.25 – 0.5	Buena
<0 – 0.25	Excelente
0	Ideal

Nota: Adaptado de *Meshing User's Guide* (p. 115), por ANSYS, 2010, ANSYS Inc.

Figura 8.

Celdas hexaédricas con oblicuidad óptima y alta oblicuidad.



Nota. Adaptado de Simscale, Mesh Quality – Comparison of high and low skewness per element type.

Independencia de malla.

El estudio de independencia de malla se lleva a cabo con la finalidad de determinar el tamaño óptimo de la malla computacional, donde se busca que esta sea lo suficientemente fina para proporcionar predicciones precisas. Este análisis implica comparar las predicciones del

modelo computacional utilizando diferentes tamaños de malla, identificando el punto de convergencia donde la reducción de la malla no influye en los resultados.

La evaluación de la independencia de malla es un procedimiento laborioso, ya que implica la realización de diversas simulaciones con mallas que pueden ser muy finas, generando tiempos extensos de simulación.

Caída de presión.

En la mayoría de aplicaciones industriales, la medida convencional de la caída de presión es calculada mediante la diferencia entre la presión estática aguas arriba y aguas abajo en tuberías. Sin embargo, en el caso de los ciclones, la presencia de remolinos de gas complica este cálculo, ya que este ocasiona aumentos de la presión estática en las paredes, y se plantea la cuestión del manejo de la presión dinámica asociada al vórtice. En términos de caída de presión en el ciclón, se hace referencia a la suma de las presiones estática y dinámica (Hoffman & Stein, 2008).

La caída de presión Δp en un ciclón muestra una relación proporcional, o cercana a proporcional, al cuadrado del caudal volumétrico, siguiendo la tendencia común en equipos de procesamiento con flujo turbulento. Para expresar de manera característica la caída de presión en un ciclón específico, se informa a menudo en una forma adimensional denominado "número de Euler", como se muestra en la Ecuación 38.

$$Eu = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho v_{in}^2} \quad (38)$$

Capítulo III. Metodología.

En el presente capítulo se llevan a cabo simulaciones numéricas de los tres modelos de un separador ciclónico de partículas variando el diámetro del buscador de vórtice con cinco diferentes valores, utilizando al aire como fluido, y conocer su relación con la eficiencia de recolección y caída de presión correspondiente, empleando el software ANSYS Fluent 2019. Estas simulaciones se realizan con sus respectivas condiciones de frontera, con la finalidad de analizar, comparar y validar que los datos obtenidos sean correctos.

Elaboración de modelos CAD.

Para la elaboración de los modelos CAD, se tomarán en consideración los ciclones mencionados con anterioridad, es decir, los diseños propuestos por (Parnell & Davis, 1979), (Shepherd & Lapple, 1939) y (Stairmand, 1951), los cuales son ilustrados en las Figuras 9, 10 y 11. Los cuales son generados en el Software SpaceClaim.

Figura 9.

Modelo de ciclón 1D3D.

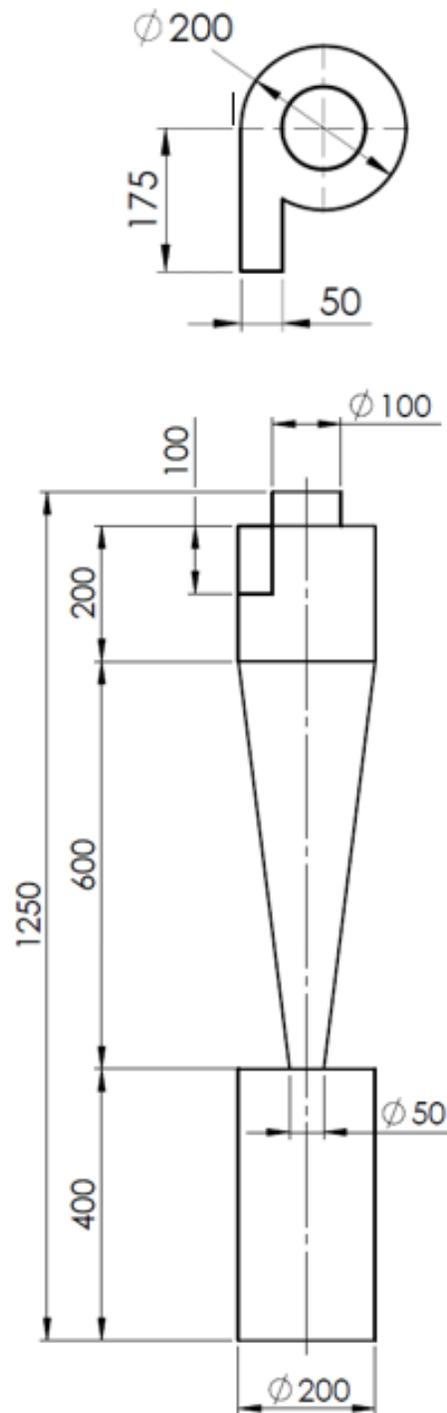


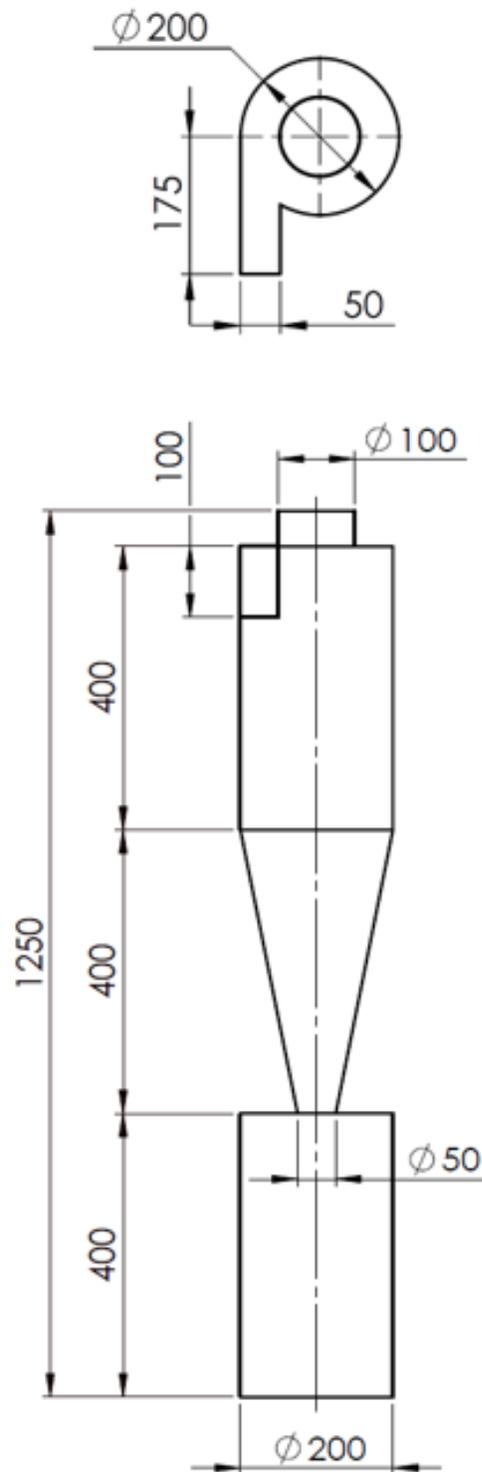
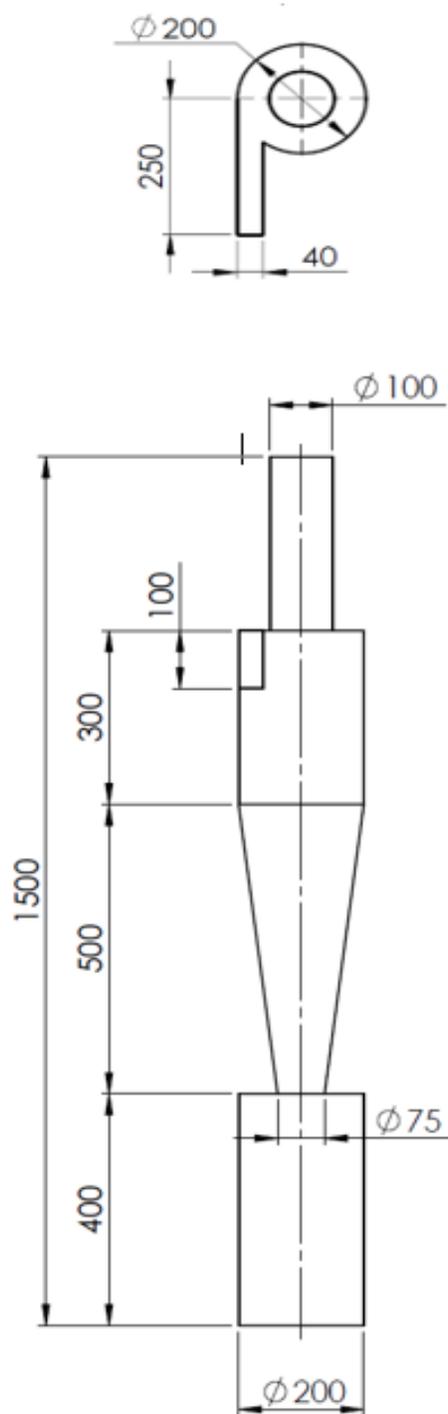
Figura 10.*Modelo de ciclón 2D2D.*

Figura 11.

Modelo de ciclón Stairmand.



Preprocesamiento.

Para realizar la simulación numérica de los separadores es necesario especificar las condiciones de frontera en las diferentes zonas, para lograr que la resolución de ecuaciones dentro del dominio computacional sea exitosa. En la Tabla 3, se indica las condiciones de contorno seleccionadas.

Tabla 3.

Condiciones de contorno.

Sección	Condiciones de contorno	
	Categoría	DPM
Entrada tangencial.	Velocidad de entrada	Escape
Salida del buscador de vórtice	Salida de presión	Escape
Colector de partículas	Pared	Atrapar
Paredes	Pared	Reflejar.

Es de suma importancia conocer que en la Tabla 3, para las condiciones de contorno Velocidad de entrada y Salida de presión, deben especificarse valores como el diámetro hidráulico, la intensidad de turbulencia y la velocidad de entrada del fluido para la primera condición, de igual manera las propiedades del fluido y de las partículas se deben especificar en la sección de materiales.

Los parámetros de turbulencia fueron aplicados uniformemente en la entrada estableciendo una intensidad de turbulencia, la cual está definida como la relación entre la media cuadrática de las fluctuaciones de velocidad y la velocidad promedio del fluido (FLUENT User's Guide, 2016), como se muestra en la Ecuación 34.

$$I = \frac{u'}{u} = 0.16(Re)^{-1/8} \quad (34)$$

donde Re es el número de Reynolds, definido en la Ecuación 35.

$$Re = \rho \frac{v_{in} D_H}{\mu} \quad (35)$$

D_H es el diámetro hidráulico definido como la relación entre el área de la sección transversal A y el perímetro mojado P_w (FLUENT User's Guide, 2016), como se muestra en la Ecuación 36.

$$D_H = \frac{4 \cdot A}{P_w} \quad (36)$$

Las paredes fueron modeladas con una condición de no deslizamiento, y la interacción de partícula – partícula y partícula – paredes fueron consideradas perfectamente elásticas.

El flujo de aire es ingresado de forma perpendicular a la superficie de entrada tangencial con una velocidad v_{in} de 10 m/s. La densidad del aire y su viscosidad fueron establecidos como 1.225 kg/m³ y 1.7894 × 10⁻⁵ Nm², respectivamente, ajustándose a las condiciones ambientales.

En la Tabla 4, se presentan los diferentes valores del diámetro del buscador de vórtice y su respectivo diámetro hidráulico e intensidad de turbulencia, de igual manera se calculan estos dos parámetros para las secciones rectangulares de la entrada tangencial de cada uno de los modelos del separador.

Tabla 4.

Diámetro hidráulico e intensidad turbulenta de las secciones circulares y rectangulares de la salida del buscador de vórtice y la entrada tangencial del separador, respectivamente.

Parámetros	Sección						
	Circular [ϕ (m)]					Rectangular (m x m)	
	0.04	0.07	0.1	0.13	0.16	0.1x0.05	0.1x0.04
DH [m]	0.04	0.07	0.1	0.13	0.16	0.06667	0.05714
IT [%]	4.46102	4.15962	3.97824	3.84989	3.75125	4.18504	4.26652

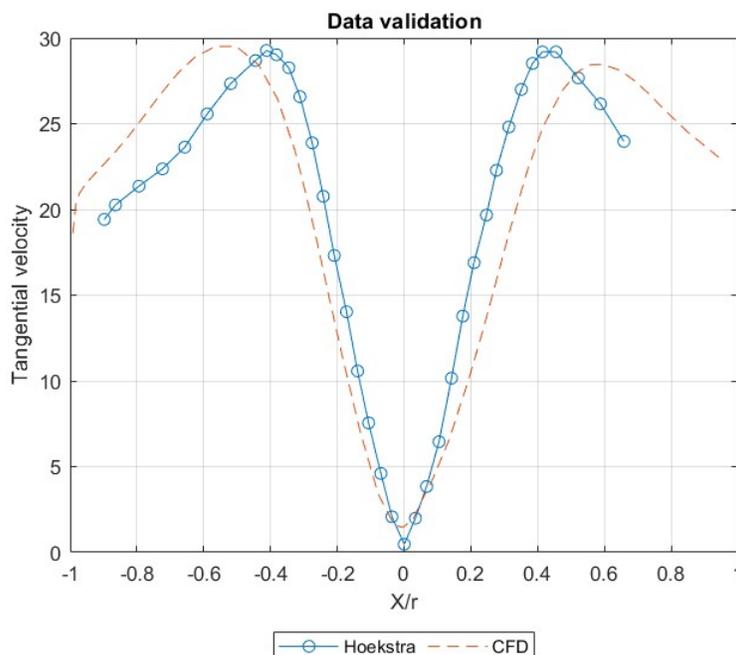
Validación de datos.

Para validar los datos de la simulación numérica, se llevó a cabo una comparación de las curvas de velocidad tangencial y axial generadas en ANSYS Fluent, y las obtenidas experimentalmente en el estudio de (Hoekstra, 2000) del modelo de Stairmand, mediante el uso de un anemómetro Doppler de láser, medidos a 0.05 m por debajo del buscador de vórtice, como se muestra en la Figura 12 y 13.

La consistencia observada entre las curvas generadas y experimentales respalda la validez y confiabilidad de la simulación numérica para modelar con precisión el comportamiento del flujo dentro de un separador ciclónico de partículas.

Figura 12.

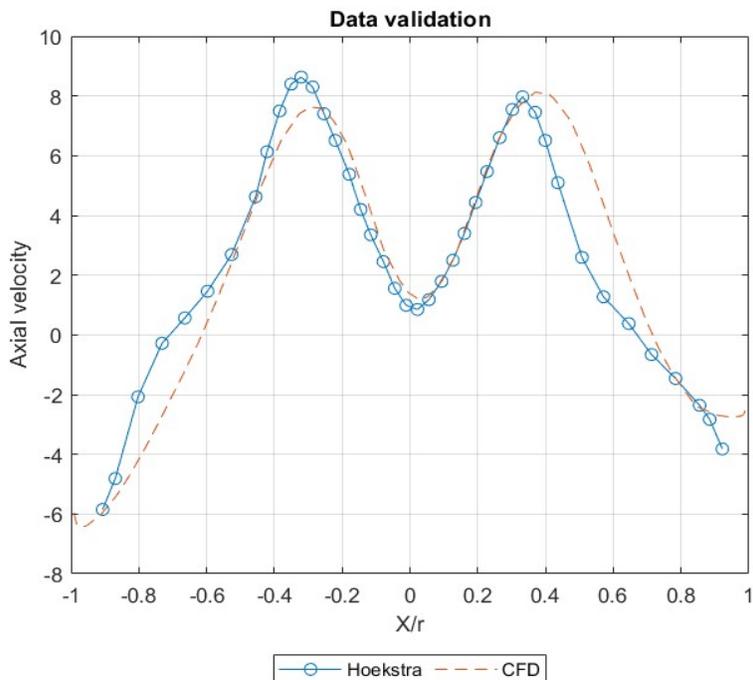
Comparación entre las curvas de velocidades tangenciales.



Nota: Esta figura representa las curvas de velocidad tangencial obtenidas en el estudio de (Hoekstra, 2000) (o -) y de la simulación numérica CFD (- -).

Figura 13.

Comparación entre curvas de velocidades axiales.



Nota: Esta figura representa las curvas de velocidad axial obtenidas en el estudio de (Hoekstra, 2000) (o -) y de la simulación numérica CFD (- -).

Se generaron varias mallas poliédricas con el software Watertight Geometry Workflow versión 2021 para la descripción del flujo en los separadores ciclónicos. El ciclón está dividido en cuatro partes: la entrada de sección tangencial, el buscador de vórtice, la sección cilíndrica del ciclón y la sección cónica que corresponden a las paredes y finalmente, el colector de partículas. Además, se realizó un refinamiento en las paredes del ciclón, donde es muy importante predecir adecuadamente las condiciones del flujo.

Para determinar la calidad del mallado, los parámetros de relación de aspecto, la oblicuidad, y la ortogonalidad son evaluados en la Tabla 5, considerando tres tipos de mallado,

un grueso, medio y fino, de 2E5 celdas, 4E5 celdas y 6E5 celdas, respectivamente. Por otro lado, en la Figuras 14, 15 y 16 se muestran las curvas de velocidad tangencial medidos a 0.05 m por debajo del buscador de vórtice, con sus respectivos mallados para representar la convergencia de malla de cada modelo de separador.

Tabla 5.

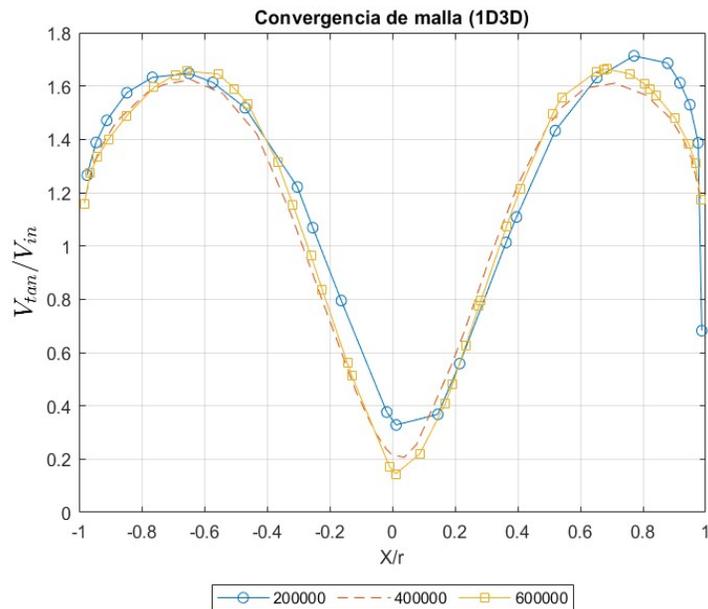
Evaluación de criterios de mallado de los tres modelos de ciclones.

Mallado	Criterio	Diseños		
		1D3D	2D2D	Stairmand
Grueso	RA	9.08	10.19	10.25
	Or	0.20	0.23	0.20
	Ob	0.035	0.035	0.035
Medio	RA	10.17	10.38	10.99
	Or	0.26	0.21	0.14
	Ob	0.034	0.035	0.031
Fino	RA	11.76	10.36	10.25
	Or	0.21	0.21	0.23
	Ob	0.033	0.031	0.032

Nota. En la Tabla se presenta el valor máximo de relación de aspecto (RA), el valor mínimo de ortogonalidad (Or) y el valor promedio de oblicuidad (Ob) de cada mallado (grueso, medio y fino) de los tres diseños de ciclones.

Figura 14.

Convergencia de malla del ciclón 1D3D con sus mallados de 2E5, 4E5 y 6E5 celdas.

**Figura 15.**

Convergencia de malla del ciclón 2D2D con sus mallados de 2E5, 4E5 y 6E5 celdas.

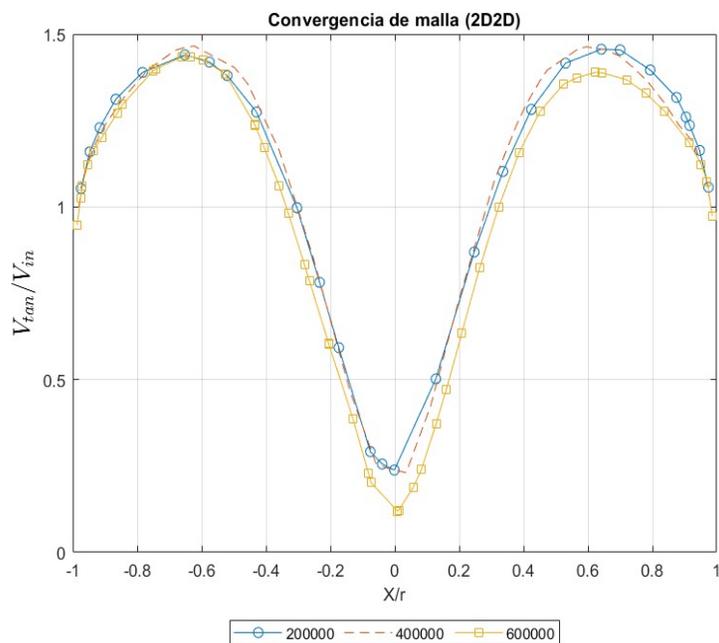
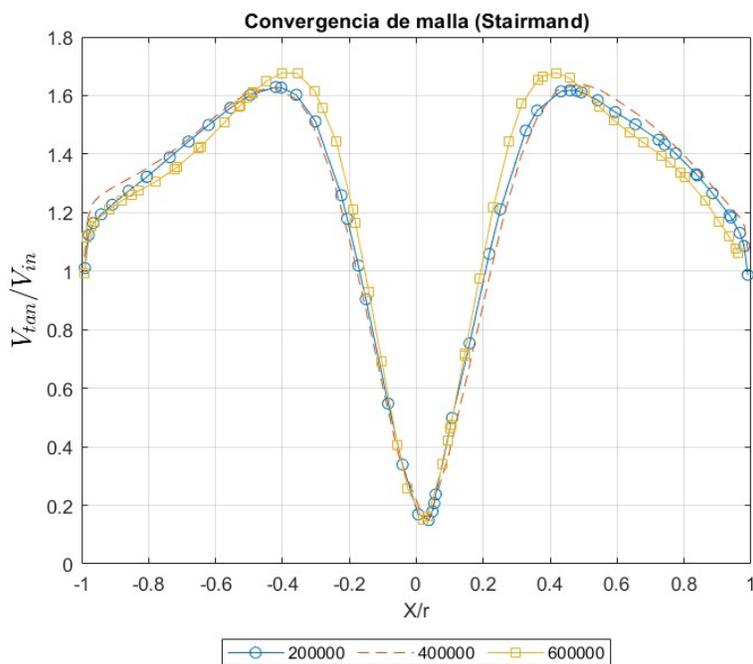


Figura 16.

Convergencia de malla del ciclón Stairmand con sus mallados de 2E5, 4E5 y 6E5 celdas.



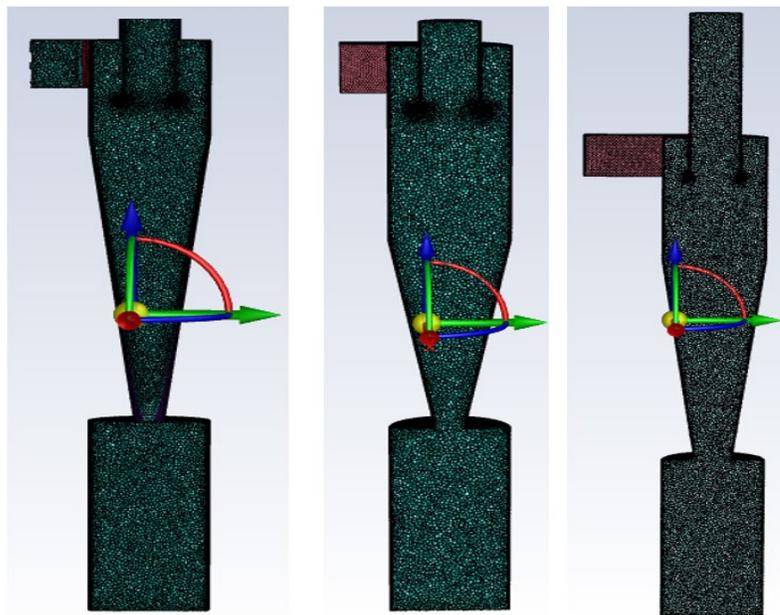
Se puede observar que los tres modelos de ciclones presentan curvas de velocidades muy similares, sin embargo, con 2E5 celdas las curvas no presentan un ajuste adecuado en el centro del ciclón en comparación a las curvas de 4E5 y 6E5 celdas.

Por la similitud en el comportamiento de las curvas de velocidad con 4E5 y 6E5 celdas, se decidió realizar la simulación numérica con el valor mínimo de celdas entre estas dos para ahorrar el gasto computacional.

En la Figura 17 se representa los tres modelos de separadores con aproximadamente 4E5 celdas.

Figura 17.

Mallado de los tres modelos de separadores con 4E5 celdas poliédricas.



Para analizar la eficiencia de recolección de cada modelo, se insertaron 4080 partículas en la entra tangencial del ciclón 1D3D y 2D2D, mientras que en el modelo Stairmand, 3370 partículas. La distribución del tamaño de partículas (Rosin & Rammler, 1933) fue aplicado. La Tabla 6 muestra las propiedades de las partículas que fueron inyectadas.

Tabla 6.

Propiedades de las partículas.

Propiedades	Valor
Densidad [kg/m ³]	2700
Diámetro mín. [m]	1e-6
Diámetro máx. [m]	5e-6
Propagación	3.5
Número de diámetros	10

Nota. La tabla presenta las propiedades de las partículas y los datos necesarios para configurar la entrada de partículas mediante el método Rosin – Rammler.

Capítulo IV: Análisis de resultados.

Postprocesamiento.

Para el postprocesamiento se utilizó el software ANSYS Fluent 2019, en donde se analizó los perfiles de velocidad tangencial y axial, y la variación del número de Euler y su eficiencia con respecto a los diferentes diámetros del buscador de vórtice, correspondiente a cada modelo. El análisis del flujo dentro del separador fue desarrollado alcanzando los 3 [s]. Por otro lado, la recolección de datos de flujos máxicos y fracciones superficiales en la entrada y salida del separador se realizó cada 0.0002 [s], con la finalidad de demostrar la conservación de masa y conocer la variación de presión estática. Los datos recolectados y las gráficas generadas fueron desarrolladas en el software MATLAB R2023b.

Resultados obtenidos.

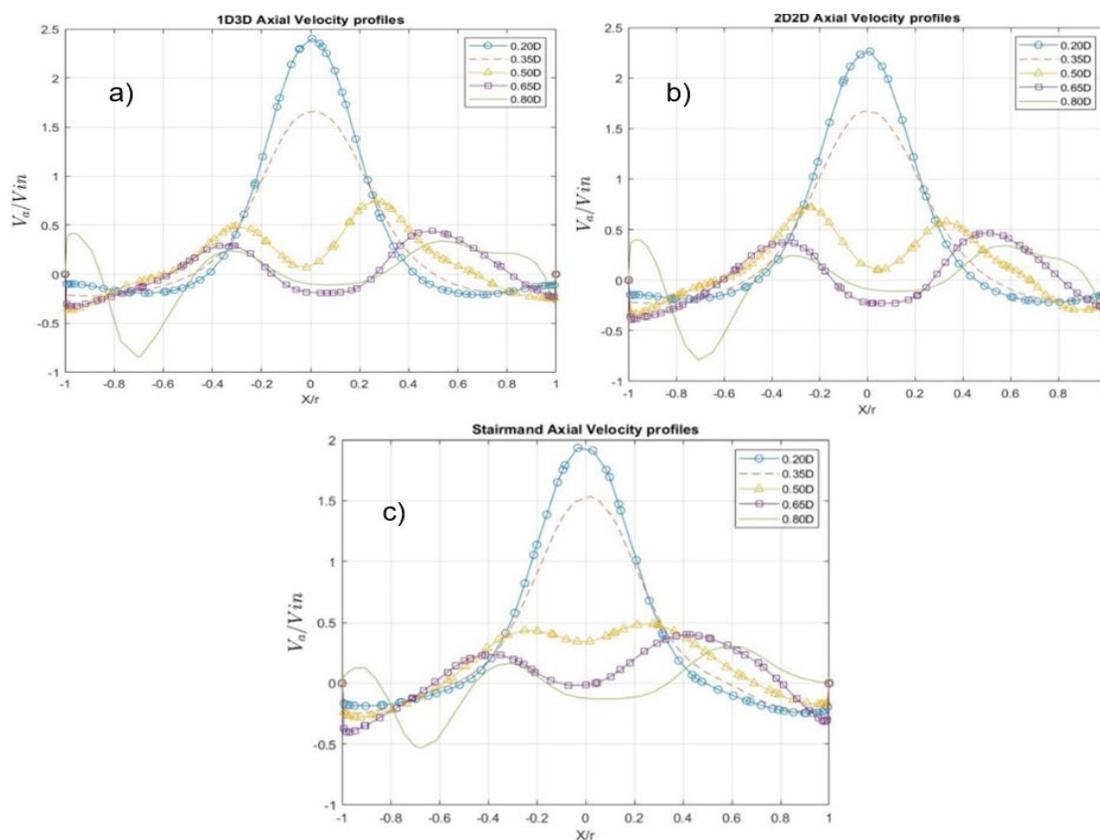
Para evaluar los separadores, se desarrollaron las simulaciones con un mallado de los tres modelos de separadores con los cinco diámetros de buscador de vórtice, utilizando $4E5$ celdas aproximadamente, basado en la independencia de malla y en la validación de datos expuestos en el Capítulo III. El tiempo de cómputo total de las simulaciones fue de 4 días, obteniendo unos residuales entre $1e-6$ hasta $1e-3$, y el número de Courant analizado en las simulaciones transitorias fluctuó entre valores de 0.8 a 0.95 durante los 3 segundos de simulación.

En las Figura 18 y 19 se muestran los perfiles de velocidad axial y tangencial, respectivamente, de los ciclones 1D3D (a), 2D2D (b) y Stairmand (c), estos perfiles son extraídos a 1.05 m del eje axial, medidos desde la base del ciclón, es decir, se encuentran 0.05 m por debajo del buscador de vórtice.

La Figura 18 muestra una similitud de los perfiles de velocidad axial de los ciclones 1D3D (a), 2D2D (b) y Stairmand (c), donde los diámetros del buscador de vórtice de 0.04 m y 0.07 m presentan una velocidad máxima muy superior a los demás perfiles, y estas dos curvas tienen menores puntos de inflexión, demostrando que la probabilidad de reinserción de partículas utilizando estos diámetros es mínima. Los perfiles de velocidad con diámetros de 0.1 m y 0.13 m del buscador de vórtice tienen un comportamiento que se adecua de mejor manera a las paredes del ciclón, sin embargo, la probabilidad de reinserción de partículas es mayor. Finalmente, la curva de color verde corresponde al ciclón con el buscador de vórtice de mayor diámetro, donde los perfiles de velocidad son asimétricos y el flujo tiene una distribución dispersa.

Figura 18.

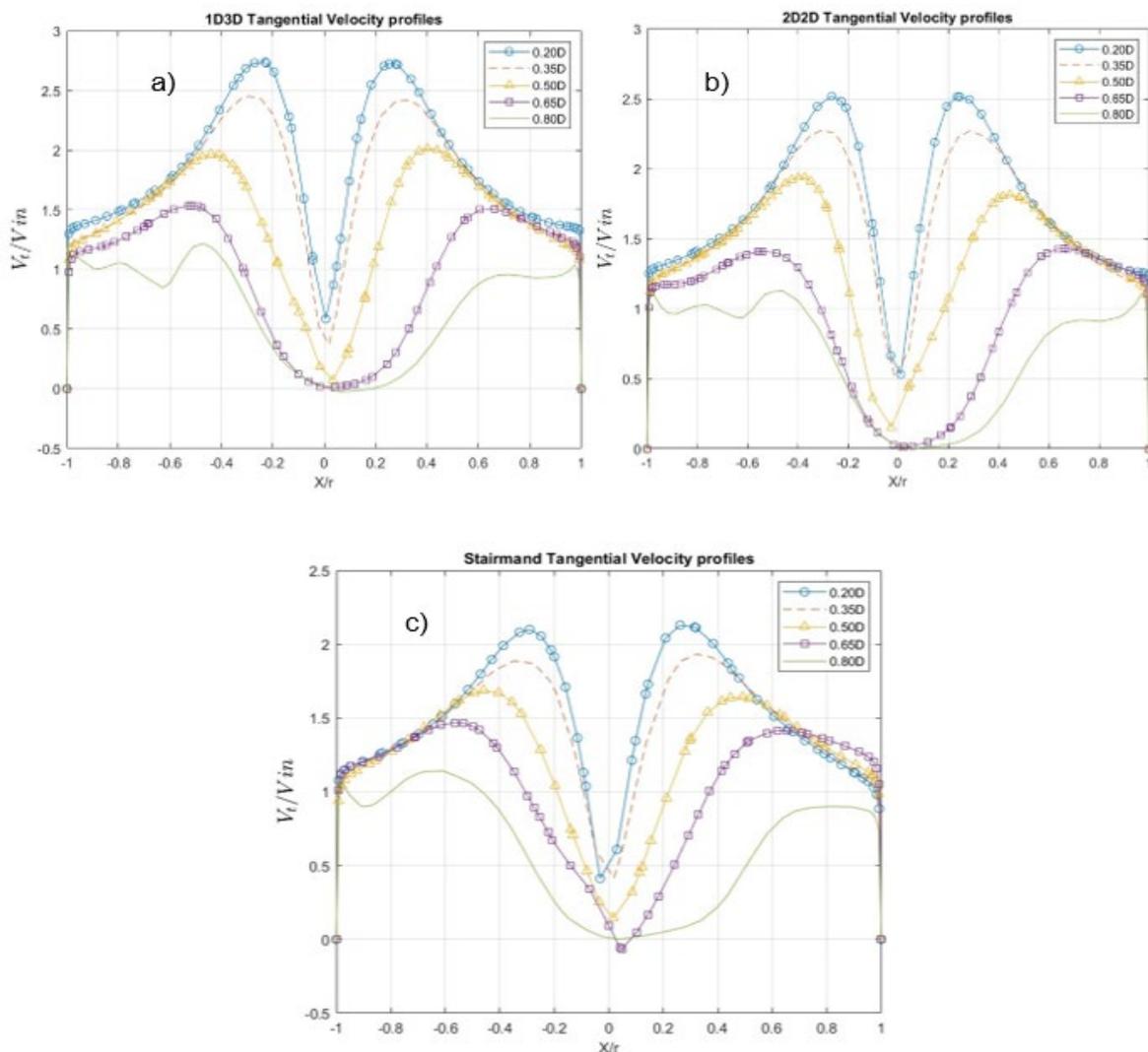
Perfiles de velocidad axial en el ciclón 1D3D, 2D2D y Stairmand con diferentes diámetros del buscador de vórtice.



La Figura 19 muestran la similitud existente entre los perfiles de velocidad tangencial de los ciclones 1D3D (a), 2D2D (b) y Stairmand (c), respectivamente, donde se puede apreciar que los valores máximos de estas velocidades corresponden a un menor diámetro de buscador de vórtice. En estos perfiles se pueden apreciar que las velocidades en las paredes del ciclón toman valores de cero, debido a que en las paredes existe la condición de no deslizamiento.

Figura 19.

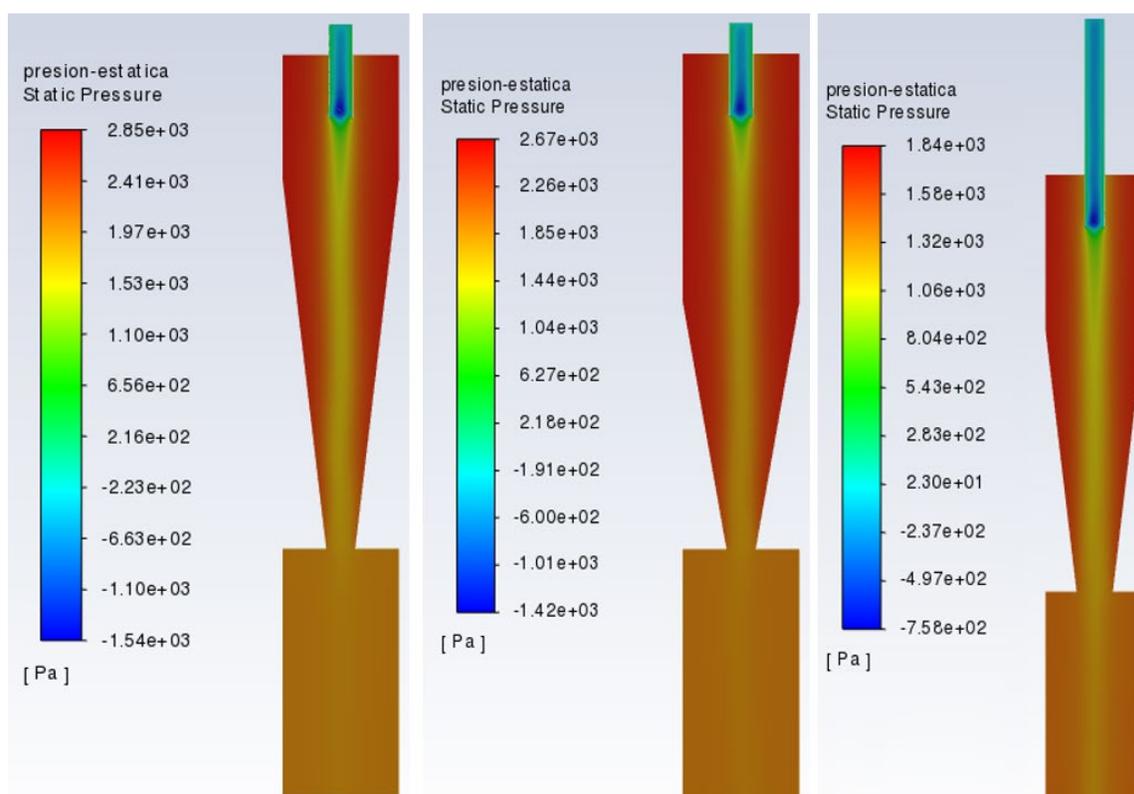
Perfiles de velocidad axial en el ciclón 1D3D, 2D2D y Stairmand con diferentes diámetros del buscador de vórtice.



En las Figura 20, 21, 22, 23 y 24 se presentan los contornos de presión estática de los tres modelos de ciclones: 1D3D, 2D2D y Stairmand, de izquierda a derecha respectivamente. En las cuales se presentan los diferentes valores del diámetro del buscador de vórtice, el cual influye directamente en los rangos de presión estática que registran los ciclones, pudiendo notar que existe una relación inversamente proporcional entre estos dos parámetros.

Figura 20.

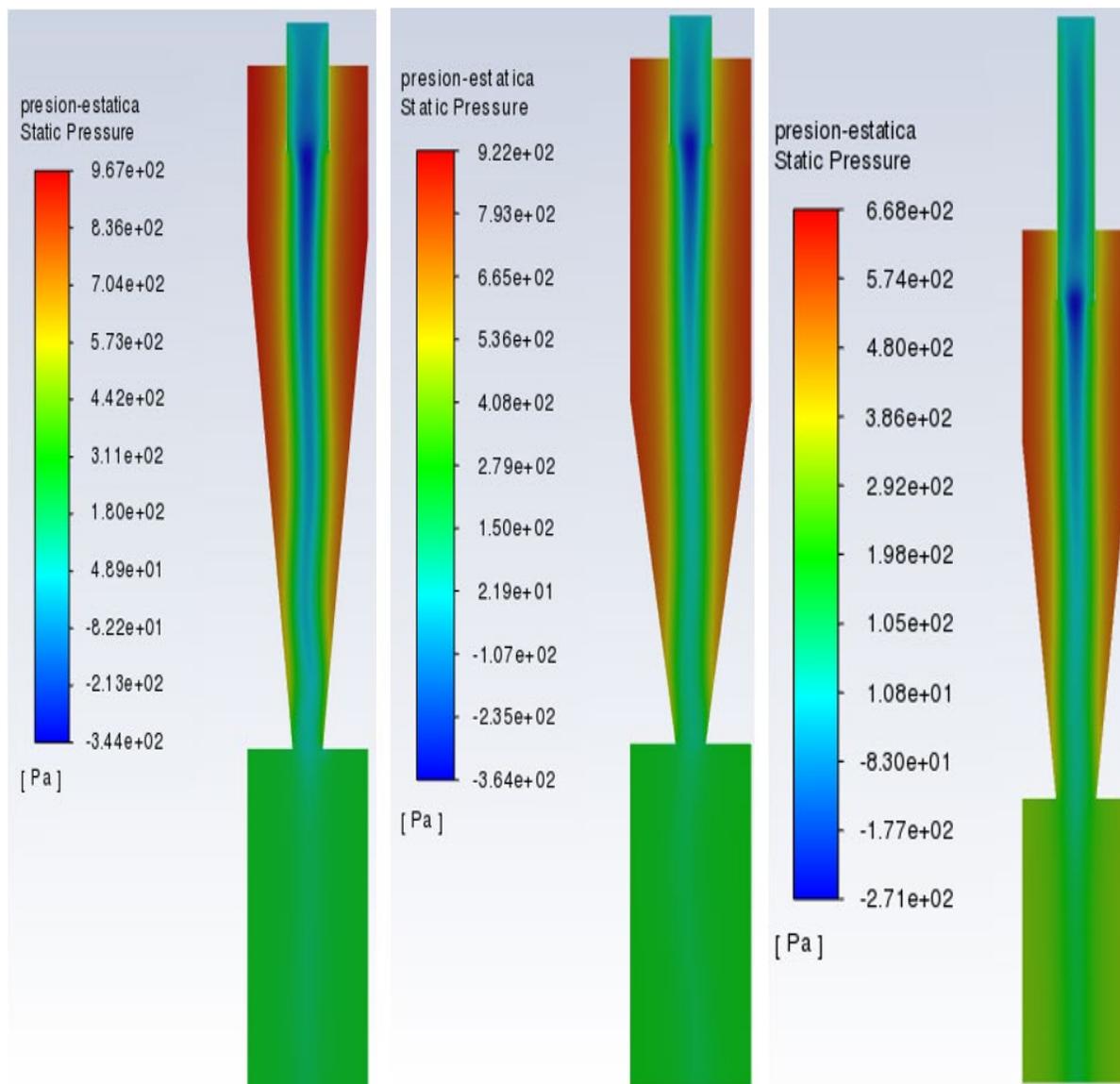
Contornos de presión estática de los tres modelos de ciclones con diámetro de buscador de vórtice de 0.04 m.



Nota: En esta figura se puede observar que la presión estática máxima medida en los tres modelos de ciclones la experimenta el modelo 1D3D, seguido por el 2D2D y finalmente el de Stairmand. Los valores negativos de presión estática únicamente se centran en el buscador de vórtice.

Figura 21.

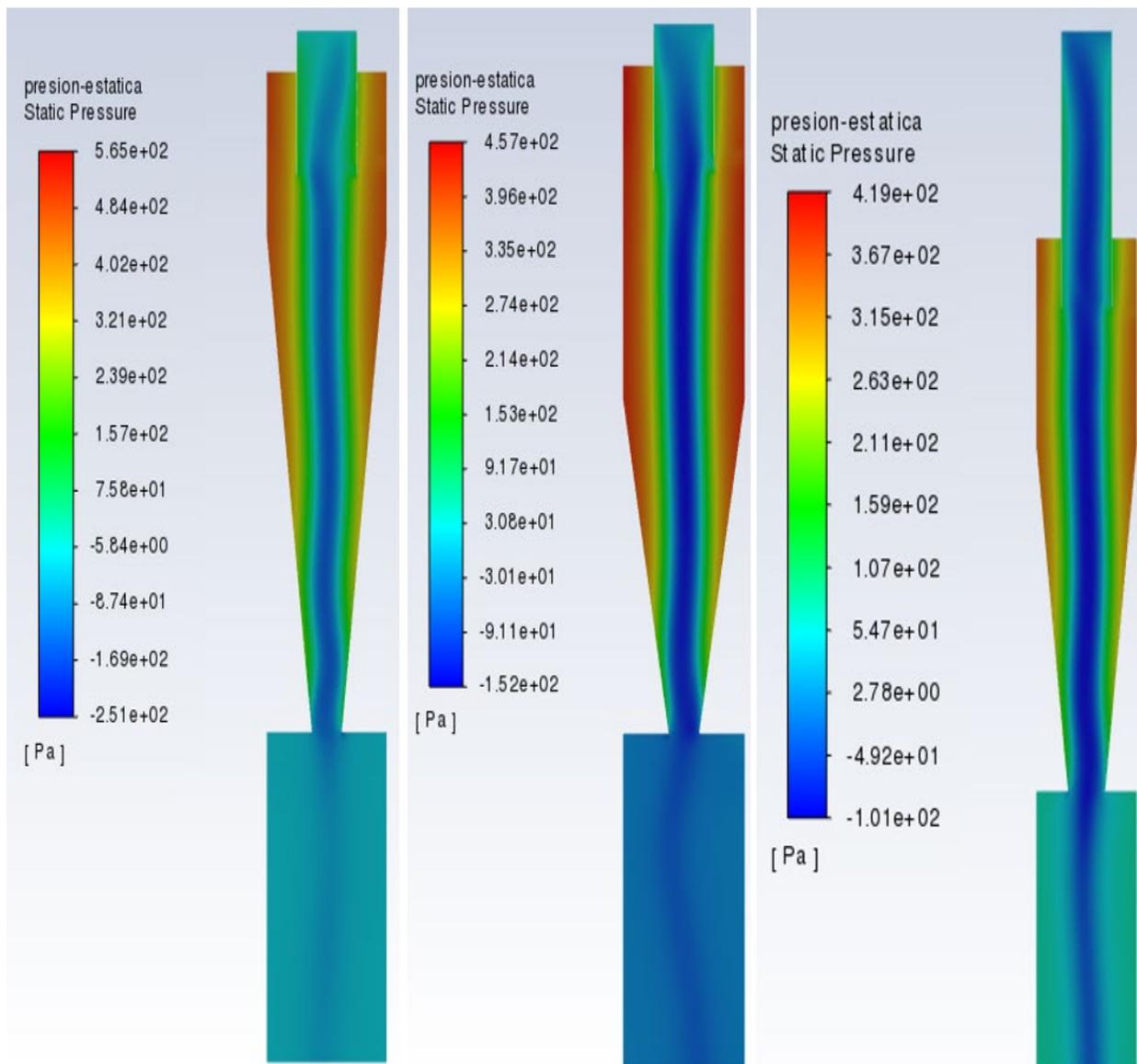
Contornos de presión estática de los tres modelos de ciclones con diámetro de buscador de vórtice de 0.07 m.



Nota: En esta figura se puede apreciar que los valores más altos de presión estática son registrados en las paredes del ciclón y los valores más bajos están ubicados dentro del buscador de vórtice y debajo de este.

Figura 22.

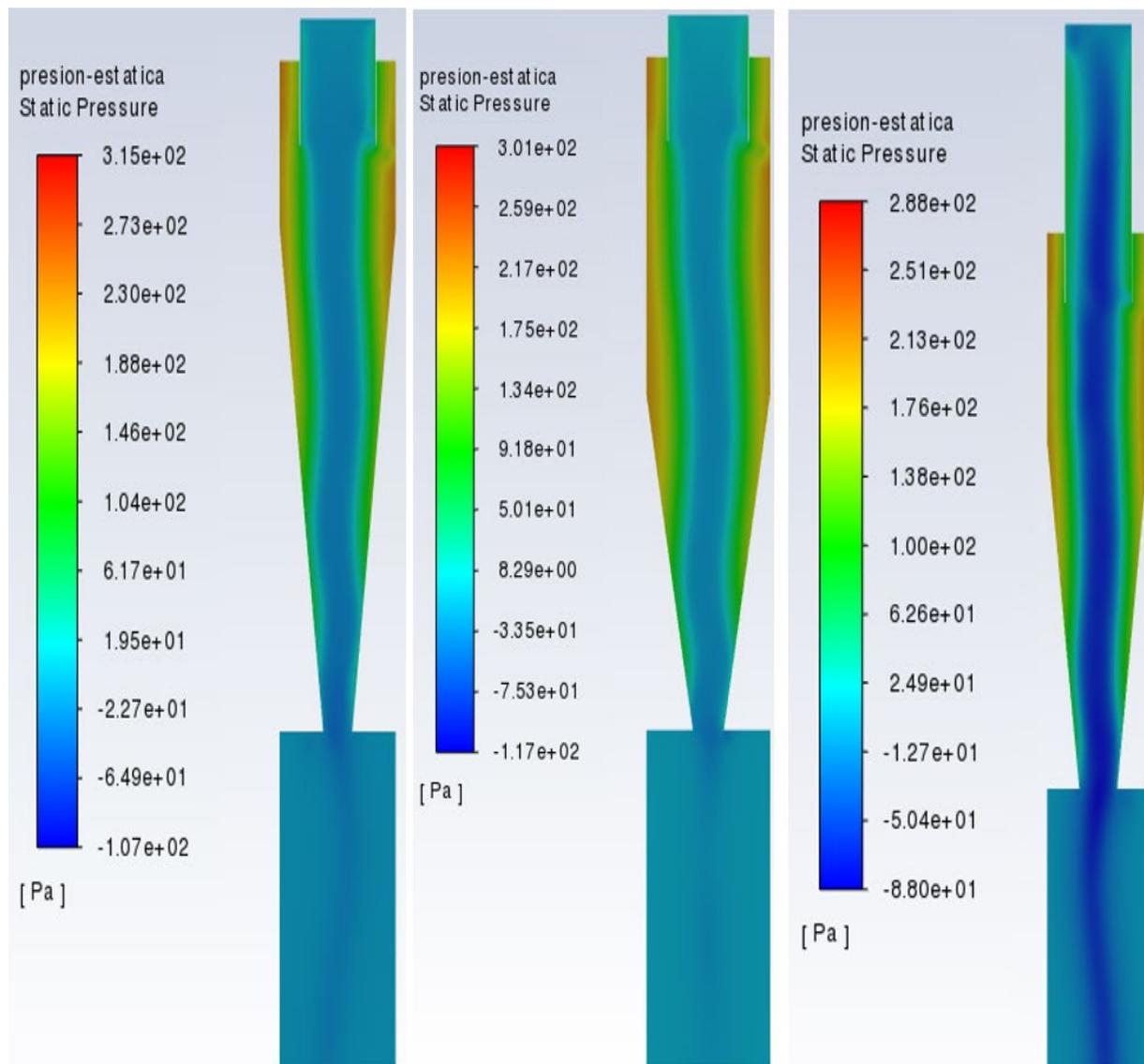
Contornos de presión estática de los tres modelos de ciclones con diámetro de buscador de vórtice de 0.1 m.



Nota: En esta figura se puede notar que los valores negativos, representados con tonalidades azules, son más notorios y percibidos en todo lo largo del ciclón, desde el buscador de vórtice hasta el colector de partículas.

Figura 23.

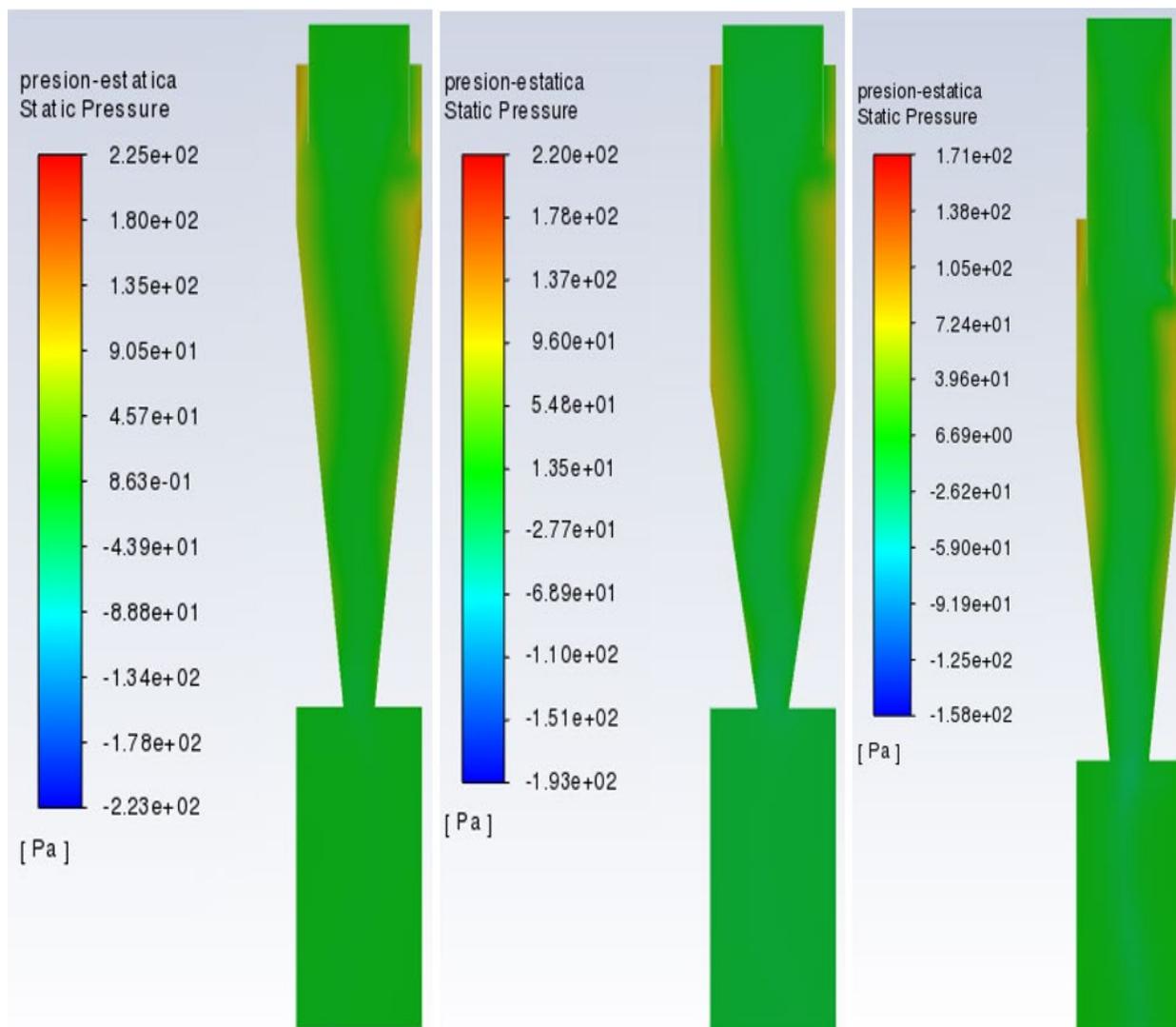
Contornos de presión estática de los tres modelos de ciclones con diámetro de buscador de vórtice de 0.13 m.



Nota: En esta figura se aprecia que los valores de presión estática que experimenta el ciclón en sus paredes cada vez son más bajos y la región que registra valores bajos es más amplia.

Figura 24.

Contornos de presión estática de los tres modelos de ciclón con diámetro de buscador de vórtice de 0.16 m.

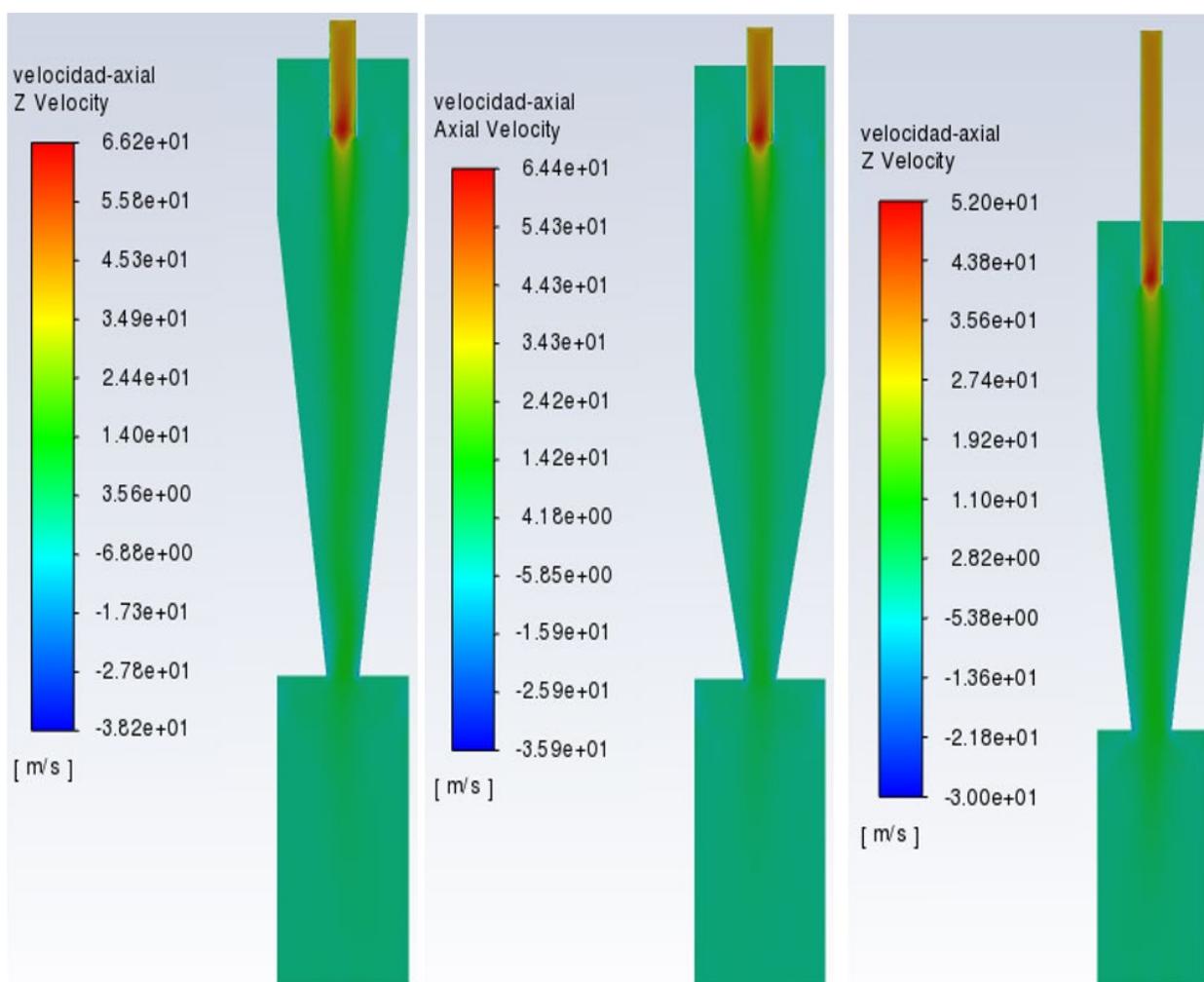


Nota: Esta gráfica muestra que los valores de presión estática cuando cuentan con un diámetro del buscador de vórtice cercano al diámetro del ciclón, registran valores muy similares de este parámetro en todo el ciclón.

En las Figura 25, 26, 27, 28 y 29 se presentan los contornos de velocidad axial de los tres modelos de ciclones: 1D3D, 2D2D y Stairmand, de izquierda a derecha respectivamente, y cada figura con su respectivo diámetro del buscador de vórtice.

Figura 25.

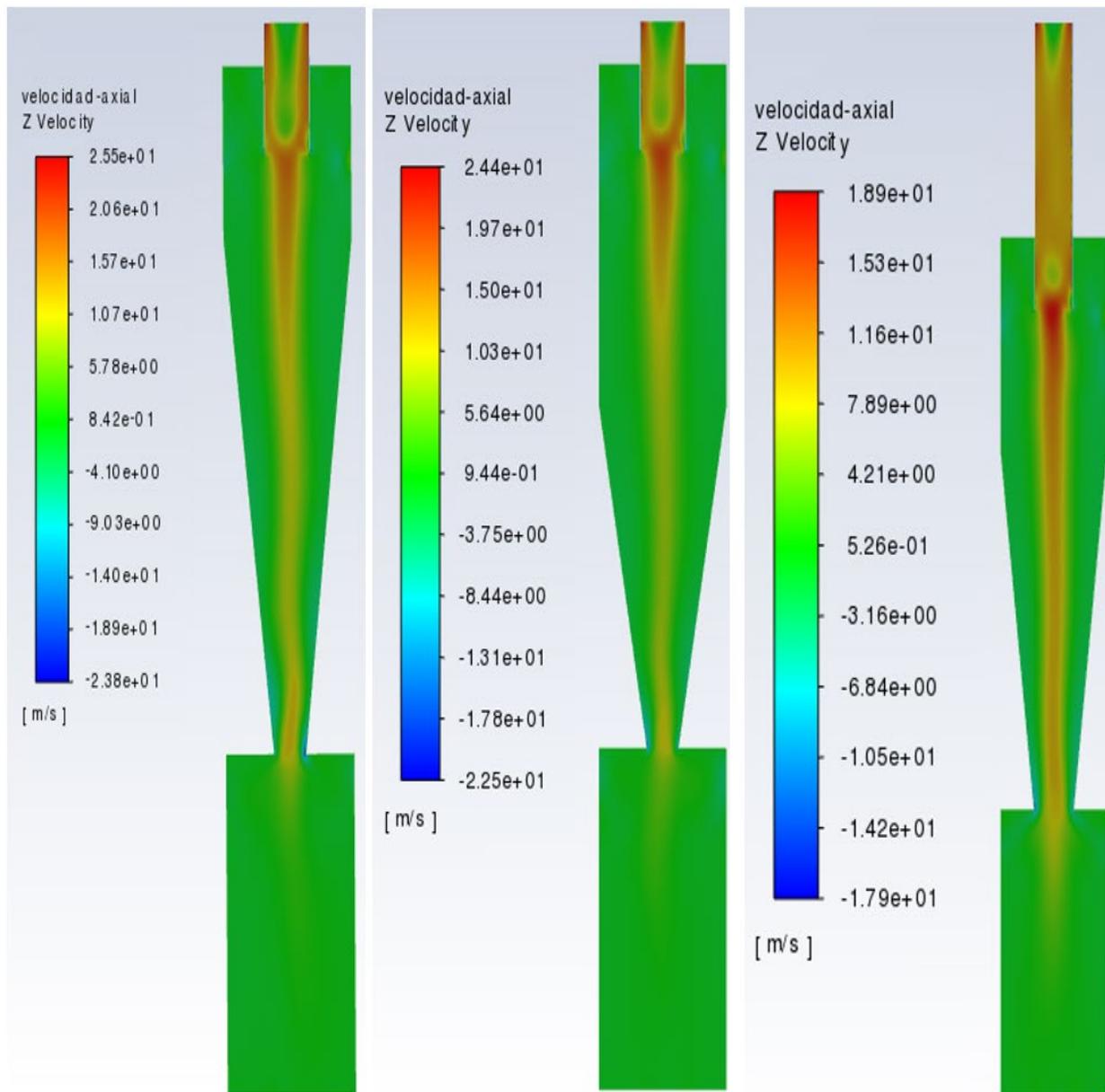
Contornos de velocidad axial de los tres modelos de ciclón con diámetro de buscador de vórtice de 0.04 m.



Nota: En esta figura se puede apreciar que los valores más altos de velocidad axial se encuentran dentro del buscador de vórtice, y es desarrollada en todo su diámetro.

Figura 26.

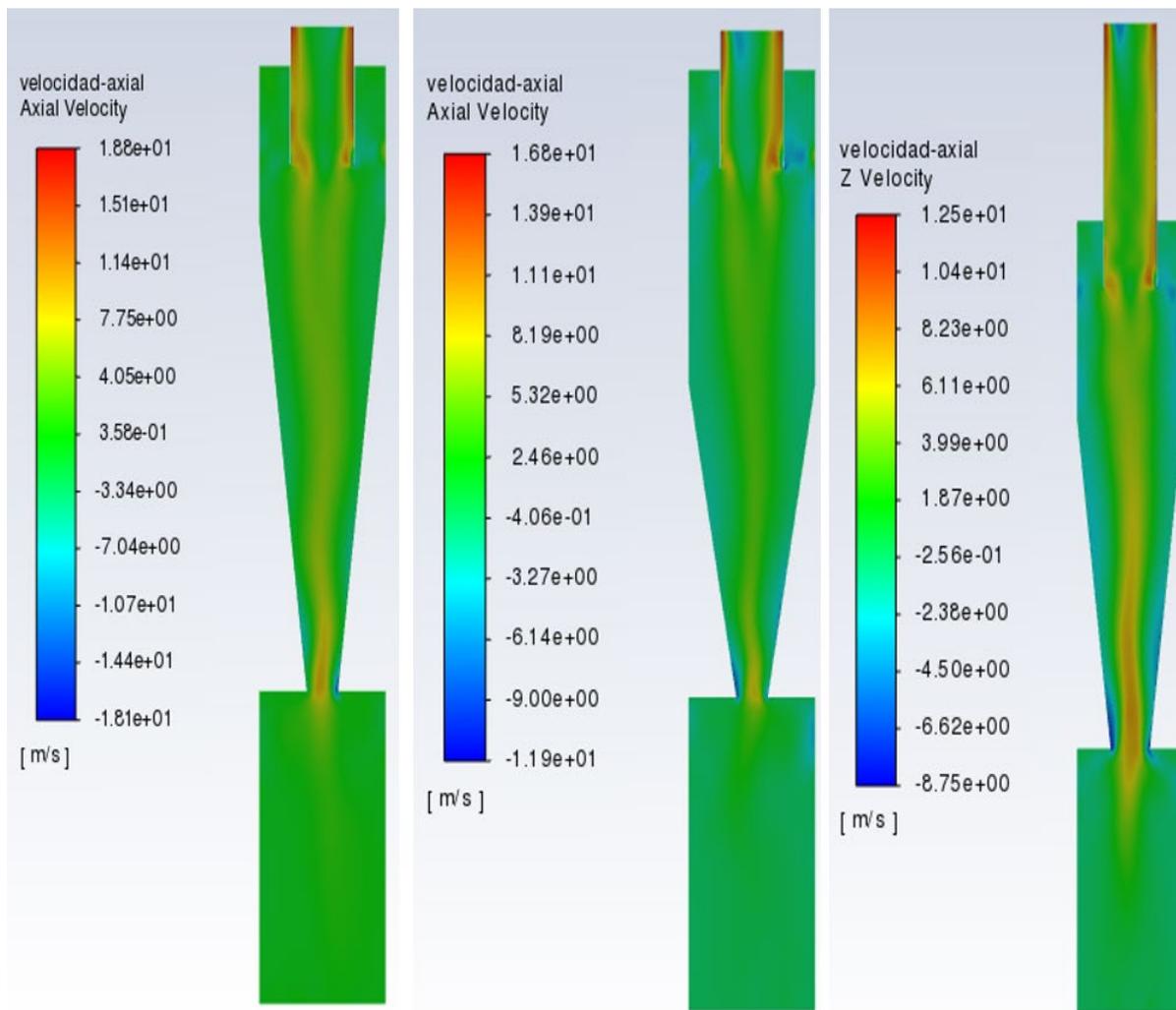
Contornos de velocidad axial de los tres modelos de ciclón con diámetro de buscador de vórtice de 0.07 m.



Nota: En esta figura se muestra cómo los valores altos de velocidad axial pueden influir en el ingreso de partículas en la parte inferior del cono.

Figura 27.

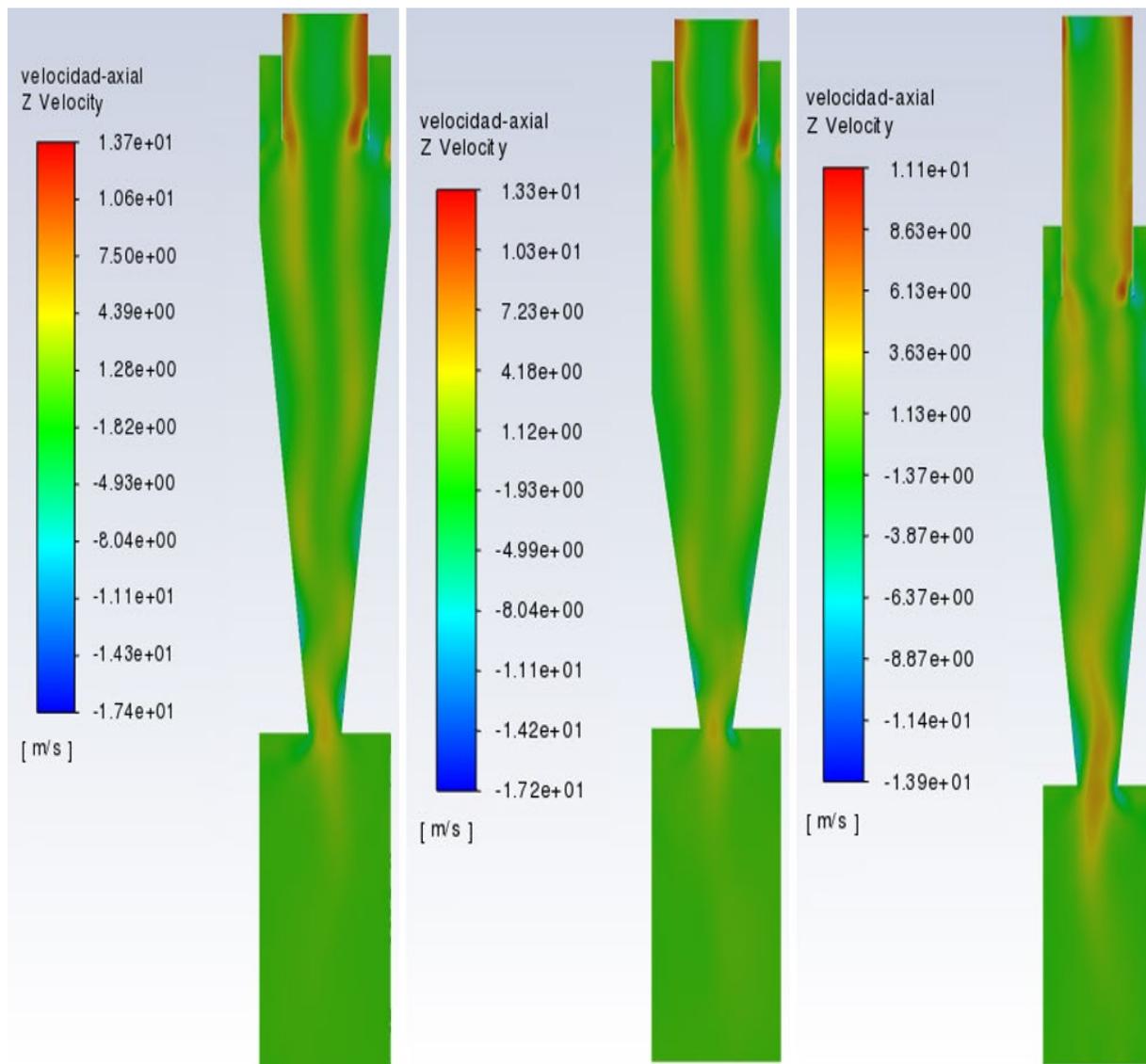
Contornos de velocidad axial de los tres modelos de ciclón con diámetro de buscador de vórtice de 0.1 m.



Nota: Esta figura presenta al flujo de aire dividiéndose en dos corrientes por debajo del buscador de vórtice. Estas corrientes se dirigen a sus paredes, donde experimentan los valores más altos de velocidad axial.

Figura 28.

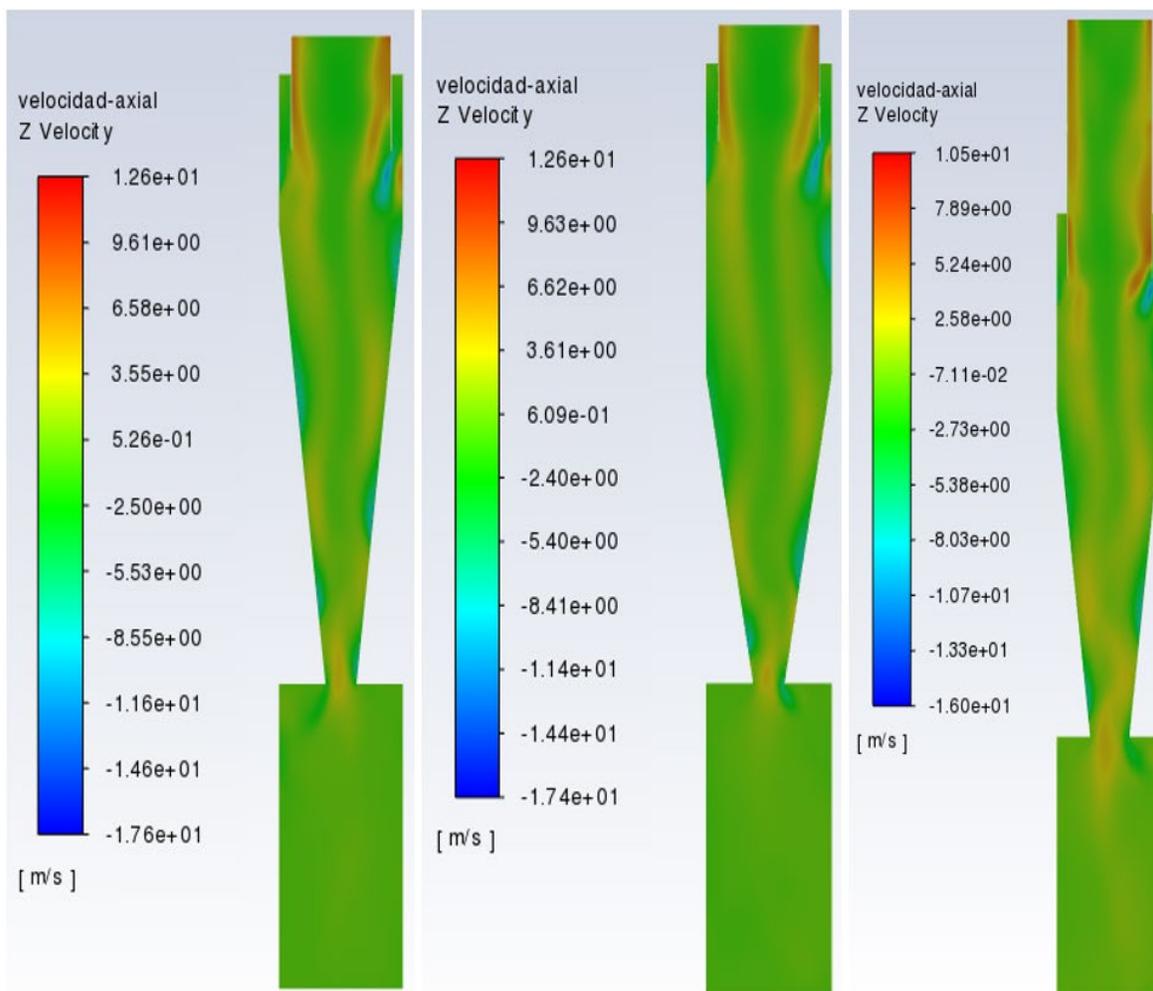
Contornos de velocidad axial de los tres modelos de ciclón con diámetro de buscador de vórtice de 0.13 m.



Nota: En esta figura se muestra que los valores de velocidad axial disminuyen a medida que el diámetro del buscador de vórtice aumenta. El flujo de aire se divide en la zona inferior del cono, donde se puede apreciar una distribución más dispersa a medida que se aleja del buscador de vórtice.

Figura 29.

Contornos de velocidad axial de los tres modelos de ciclón con diámetro de buscador de vórtice de 0.16 m.

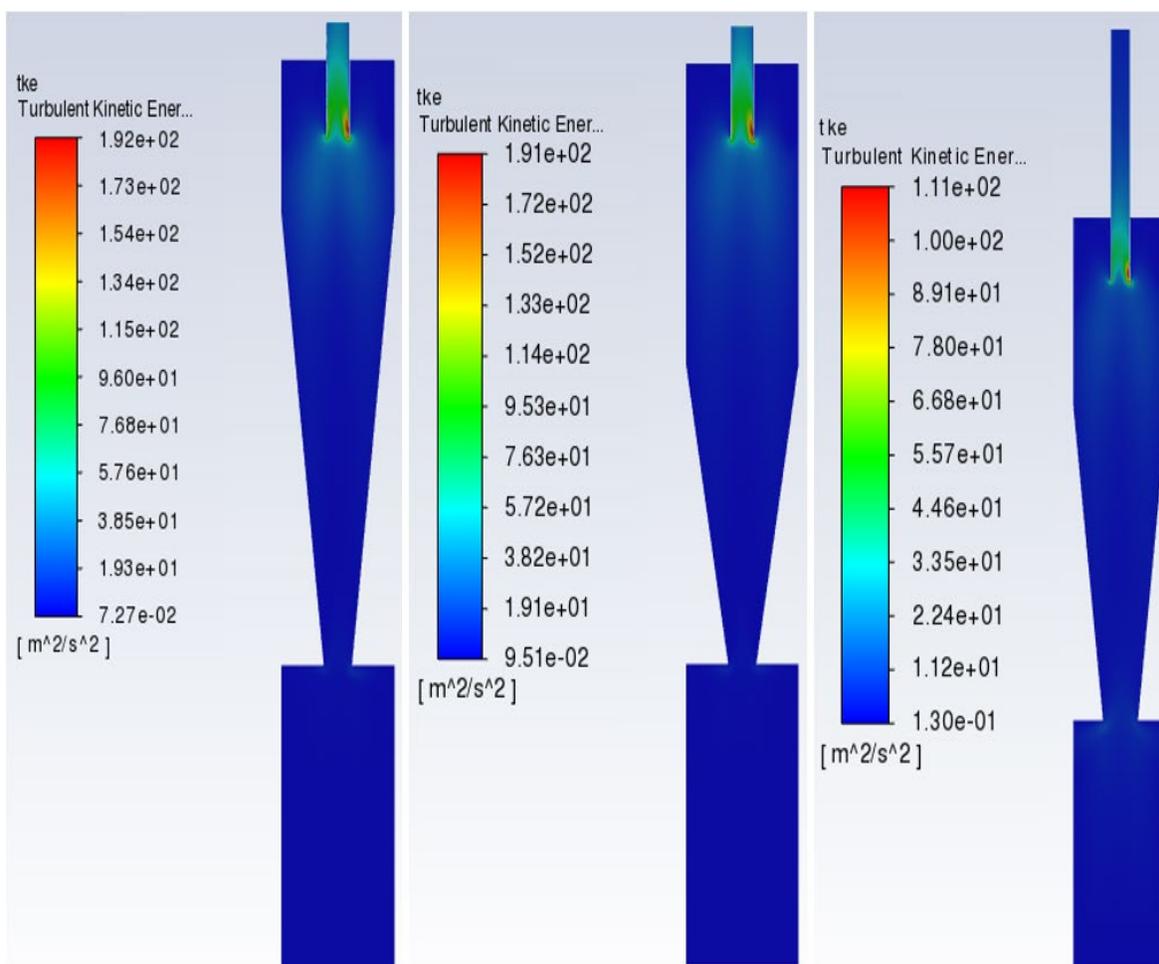


Nota: La figura muestra que los valores altos de velocidad axial no solo se encuentran en la parte central axial del ciclón, sino también en sus paredes. Esto contribuye a una circulación no deseada, forzando a las partículas a ingresar al área central y posteriormente expulsadas por el buscador de vórtice.

En las Figura 30, 31, 32, 33 y 34 se presentan los contornos de energía cinética turbulenta de los tres modelos de ciclones: 1D3D, 2D2D y Stairmand, de izquierda a derecha respectivamente, y cada figura con su respectivo diámetro del buscador de vórtice.

Figura 30.

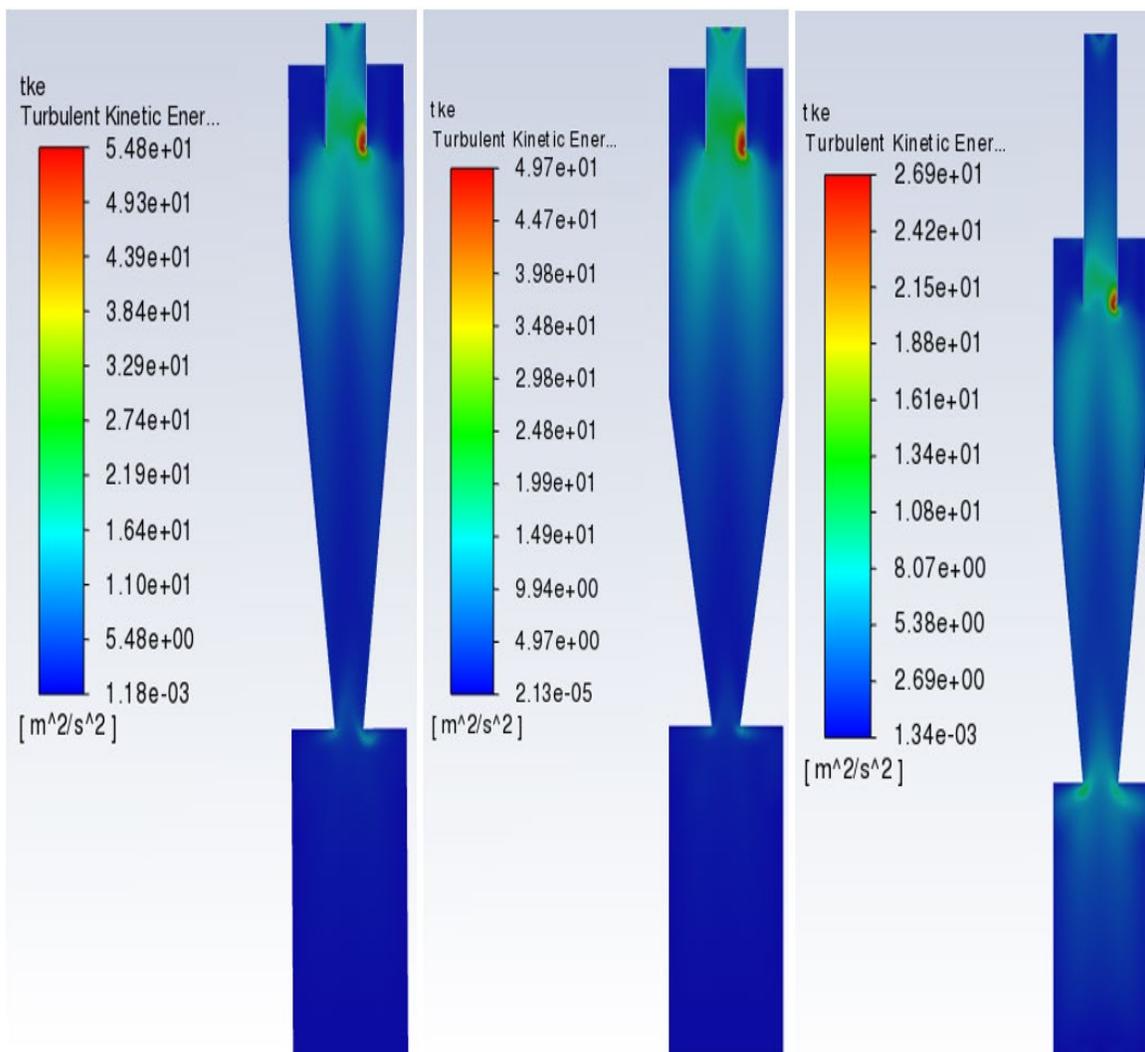
Contornos de energética cinética de turbulencia de los tres modelos de ciclón con diámetro de buscador de vórtice de 0.04 m.



Nota: En la figura se puede apreciar que los valores más altos de la energía cinética turbulenta se establecen en la pared del buscador de vórtice y en el resto del ciclón sus valores son casi constantes.

Figura 31.

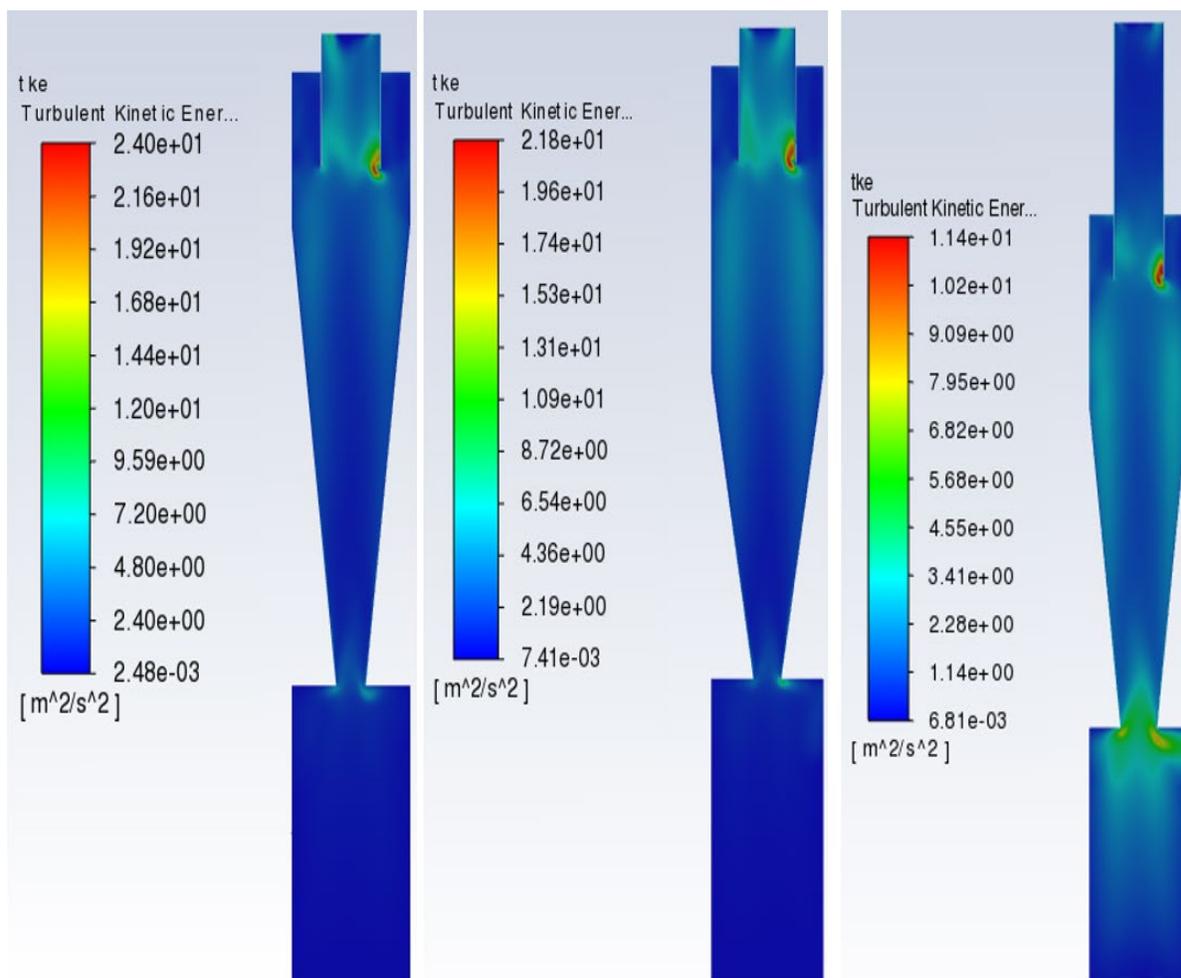
Contornos de energética cinética de turbulencia de los tres modelos de ciclón con diámetro de buscador de vórtice de 0.07 m.



Nota: Esta figura evidencia que los niveles más elevados de energía cinética turbulenta se localizan en la región inferior del buscador de vórtice, no obstante, el valor más alto se registra en las paredes del buscador de vórtice.

Figura 32.

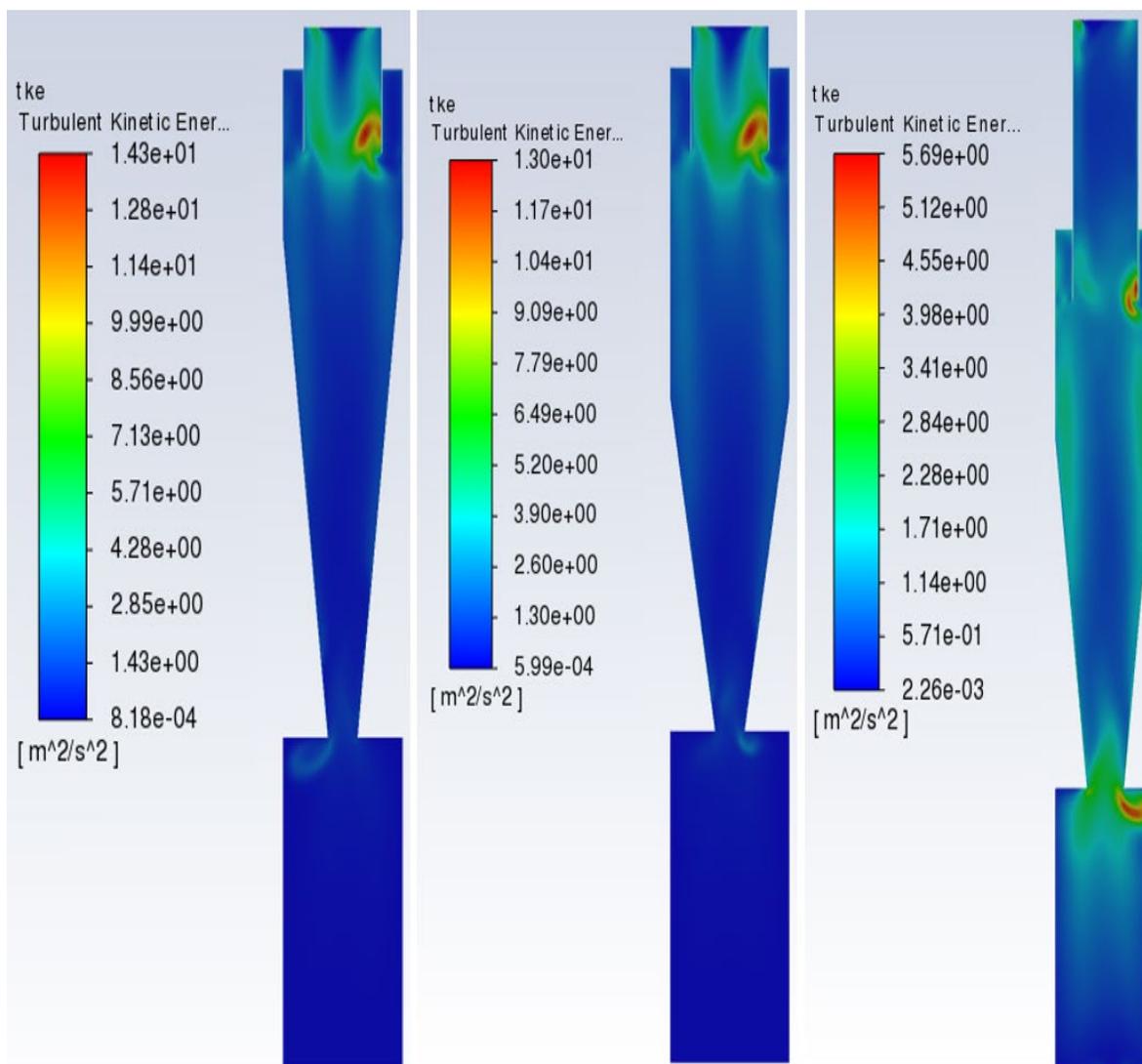
Contornos de energética cinética de turbulencia de los tres modelos de ciclón con diámetro de buscador de vórtice de 0.1 m.



Nota: Esta imagen muestra que el modelo de Stairmand empieza a presentar valores elevados de energía cinética turbulenta en la zona inferior del cono, a diferencia de los modelos 1D3D y 2D2D que presentan valores menores en esa región.

Figura 33.

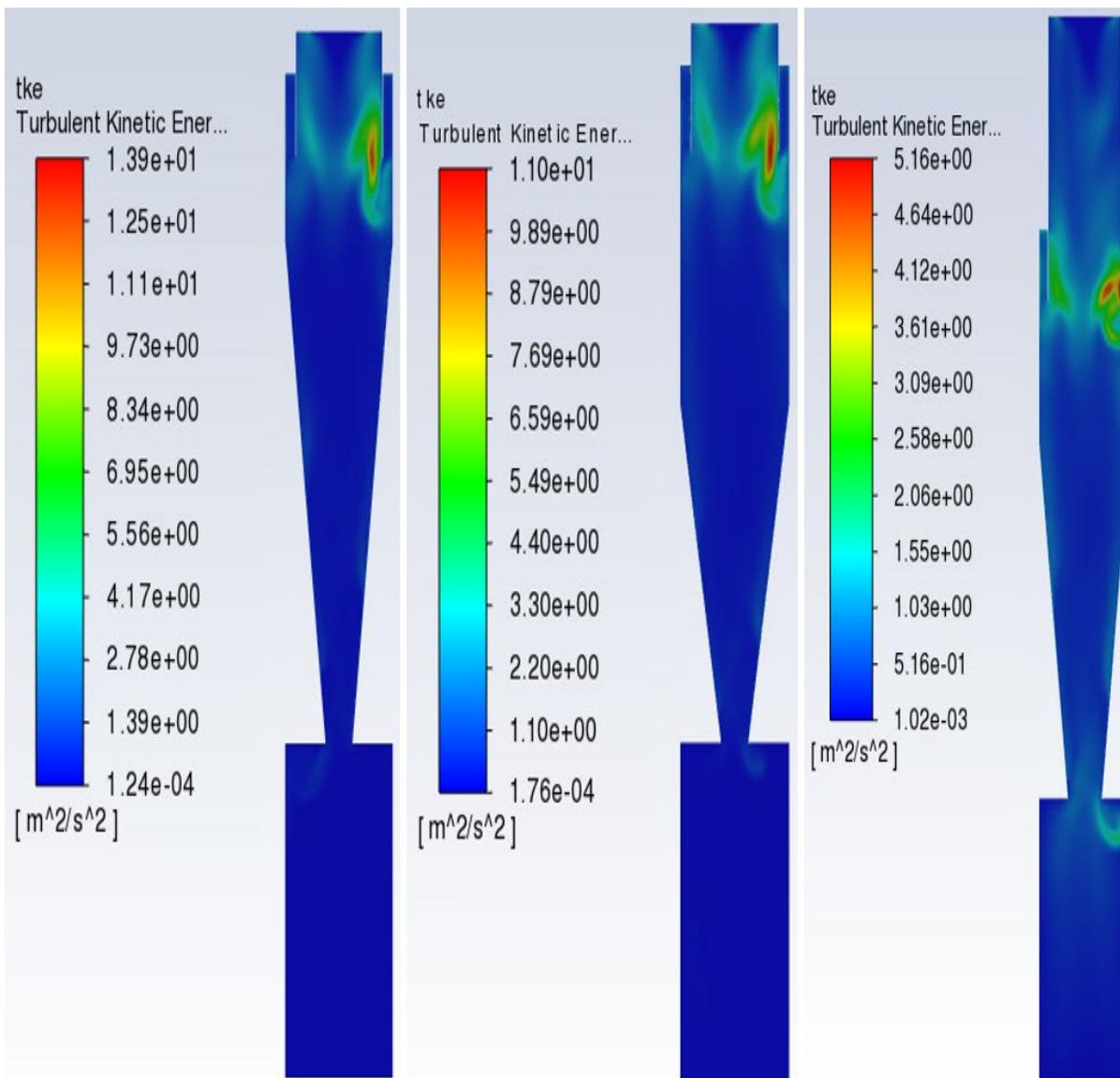
Contornos de energética cinética de turbulencia de los tres modelos de ciclón con diámetro de buscador de vórtice de 0.13 m.



Nota: Esta figura representa que el modelo de Stairmand a pesar de tener valores menores de energía cinética turbulenta que los modelos 1D3D y 2D2D, estos se encuentran distribuidos uniformemente a lo largo del ciclón, mientras que, en los otros dos modelos, los valores más altos de este parámetro se encuentran concentrados únicamente en el buscador de vórtice.

Figura 34.

Contornos de energética cinética de turbulencia de los tres modelos de ciclón con diámetro de buscador de vórtice de 0.16 m.



Nota: La figura evidencia que los tres ciclones al tener un diámetro de buscador de vórtice de gran magnitud, la energía cinética turbulenta se centra solo en esta zona.

En la Tabla 7 se muestran las eficiencias y números de Euler de cada modelo con sus diferentes diámetros del buscador de vórtice, calculados mediante las Ecuaciones 1 y 38.

Tabla 7.

Eficiencias y número de Euler de cada ciclón con diferentes diámetros del buscador de vórtice.

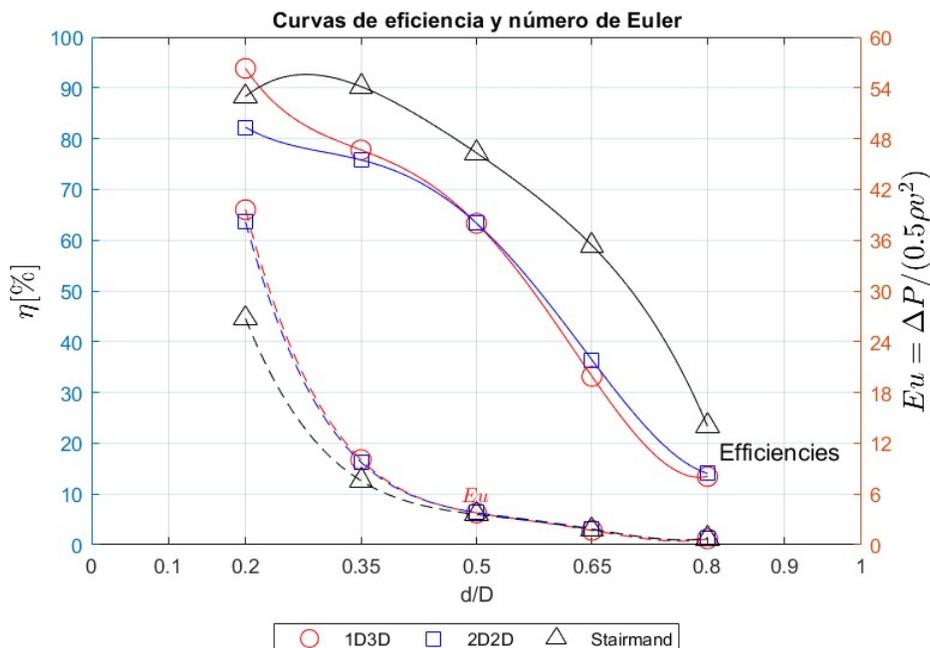
Relación de diámetros	Eficiencias (η)			Euler (Eu)		
	1D3D	2D2D	Stairmand	1D3D	2D2D	Stairmand
0.2D	93.83	82.23	88.29	39.6028	38.1787	26.7363
0.35D	77.77	75.80	90.25	10.0674	9.7689	7.5768
0.5D	63.32	63.33	77.18	3.7674	3.8167	3.5842
0.65D	33.18	36.4	58.94	1.7062	1.8591	1.8066
0.8D	13.44	14.07	23.36	0.7051	0.8057	0.7367

En la Figura 35 se presentan las curvas de eficiencia de los ciclones 1D3D, 2D2D y Stairmand, con diferentes dimensiones del diámetro del buscador de vórtice y su respectiva caída de presión, representada mediante el número de Euler. Estas gráficas fueron generadas mediante el ajuste polinomial de curvas en MATLAB R2023b.

En la Figura 35 se puede comprobar que las curvas de eficiencia y de caída de presión que experimentan los ciclones 1D3D y 2D2D, son muy similares, mientras que el ciclón de Stairmand experimenta una caída en su eficiencia cuando el diámetro del buscador de vórtice toma el valor mínimo analizado.

Figura 35.

Curvas de eficiencia y número de Euler para cada ciclón.



En la figura 36 se presentan tres curvas, donde cada una corresponde a los ciclones 1D3D, 2D2D y Stairmand, las cuales muestran la relación entre su eficiencia y número de Euler (η^2/\sqrt{Eu}), demostrando que altas eficiencias con caídas de presión elevadas no son deseadas en los ciclones de separación de partículas. En la tabla 8 son presentados los valores obtenidos de esta relación.

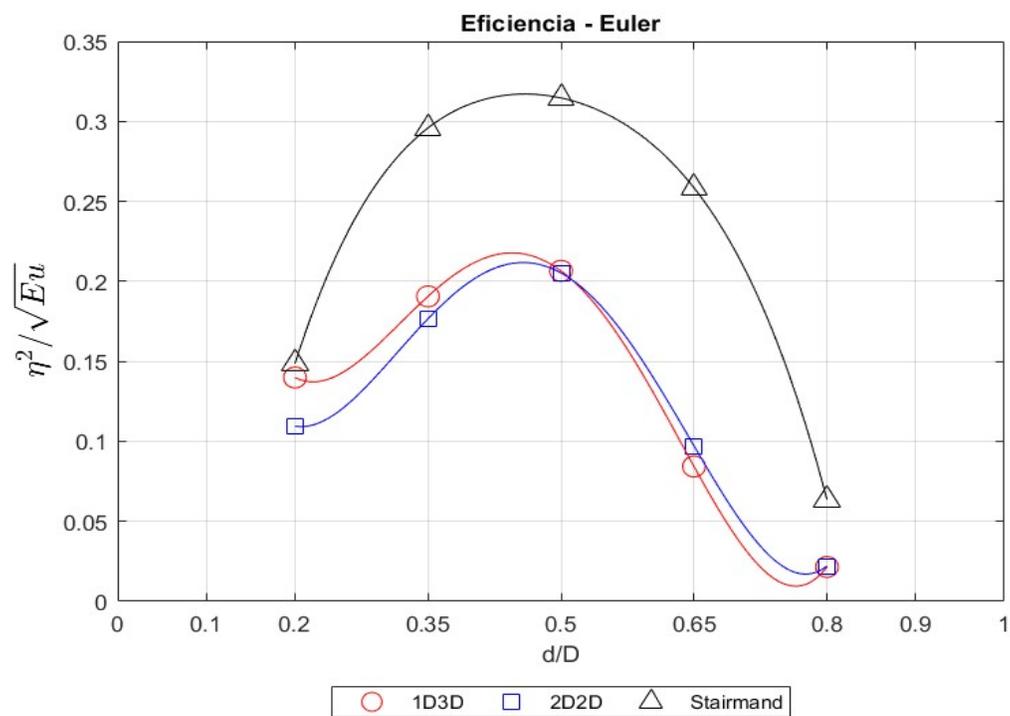
Tabla 8.

Relación entre el número de Euler y su eficiencia de cada modelo de separador.

Modelos	η^2/\sqrt{Eu}				
	0.20D	0.35D	0.50D	0.65D	0.80D
1D3D	0.13990085	0.19061912	0.20656568	0.08428328	0.02151095
2D2D	0.10943337	0.17662611	0.20529412	0.09717407	0.02205461
Stairmand	0.14864524	0.29590376	0.31464067	0.25846043	0.06357534

Figura 36.

Relación de la eficiencia y el número de Euler de cada modelo.



Capítulo V. Conclusiones y recomendaciones.

Conclusiones.

- Uno de los factores que influye en la baja eficiencia de los separadores ciclónicos es el manejo de un buscador de vórtice de gran diámetro, debido a que los valores de velocidad axial en las paredes del cono son valores considerables y ocasionan el ingreso de las partículas a la zona interna, las cuales serán expulsadas por el buscador de vórtice.
- Los ciclones 1D3D y 2D2D a pesar de tener ciertas diferencias en sus configuraciones geométricas, se puede apreciar que tienen comportamientos muy similares en los perfiles de velocidad tangencial y axial, al igual que las curvas de eficiencia y número de Euler.
- El ciclón 1D3D a pesar de presentar la eficiencia más alta, con un valor de 93.83% cuando el diámetro del buscador de vórtice es de 0.04 m, la caída de presión que experimenta es significativa, siendo un número de Euler de 39.60.
- La mejor relación entre eficiencia y número de Euler presentó el ciclón de Stairmand, cuando el buscador de vórtice tiene un diámetro de 0.07 y 0.1 m presentan eficiencias de 90.25% y 77.18%, y valores de Euler de 7.58 y 3.58, respectivamente, cuya relación η^2/\sqrt{Eu} es de 0.296 y 0.315, siendo los valores más altos registrados en el estudio.
- El ciclón de Stairmand presenta una configuración geométrica más adecuada para la recolección de partículas que los modelos 1D3D y 2D2D debido a que presenta valores más elevados de eficiencia con una proporción moderada en la caída de presión.

Recomendaciones y estudios futuros.

- Para realizar un estudio más preciso, se recomienda utilizar a futuro el modelo de turbulencia LES, ya que brinda resultados más exactos que el modelo de turbulencia de Reynolds.

- Para tener una representación física más realista, se recomienda utilizar el acoplamiento bidireccional, de tal manera que se consideraría la influencia de las partículas en el flujo del fluido, por mínima que este sea.
- Para conocer el impacto de las diferentes configuraciones geométricas en la eficiencia del separador ciclónico, se recomienda realizar variaciones dimensionales en la entrada tangencial y comparar cuál opción conlleva mejores eficiencias de recolección.
- Un punto importante en el estudio son las propiedades de las partículas, los cuales deben ser tomados de datos experimentales, de tal manera se pueden tener resultados más fiables y que se ajusten a un tipo de industria en específico.

Referencias

- Arciniégas, C. (2011). *Diagnóstico y control de material particulado: Partículas suspendidas totales y fracción respirable PM10*. Manizales: Revista Luna Azul.
- Baharuddin, A. A. (2022). Experimental Analysis of Dual Inlet Cyclone Separator. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 149-160.
- Camilo Zabala-Quintero, J. R.-P. (2021). Performance Characterization of a New Model for a Cyclone Separator of Particles Using Computational Fluid Dynamics. *Applied sciences*.
- Chuah T.G., J. G. (2006). A CFD study of the effect of cone dimensions on sampling aerocyclones and hydrodynamics. *Powder technology* 162, 126-132.
- Cokljat, D., Slack, M., Vasquez, S. A., Bakker, A., & Montante, G. (2006). Reynolds-Stress Model for Eulerian multiphase. *Progress in Computational Fluid Dynamics* 6, 168–178.
- Echeverri, C. (2006). Diseño óptimo de ciclones. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 123-139.
- 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, 6048-6058.
- Elsayed, K., & Lacor, C. (2011). The effect of cyclone inlet dimensions on the flow pattern and performance. *Applied Mathematical Modelling*, 1952-1968.
- FLUENT User's Guide*. (2016).
- Griffiths, W., & Boysan, F. (1996). Computational fluid dynamics (CFD) and empirical modelling of the performance of a number of cyclone samplers. *Journal of Aerosol Science* , 281-304.

- Guangcai Gong, Z. Y. (2011). Numerical investigation of the effect of helix angle and leaf margin on the flow pattern and the performance of the axial flow cyclone separator. *Applied Mathematical Modelling*, 3916–3930.
- Guo, M., Xue, H., Jian, P., Dangkhoh, L., Sun, X., & Yoon, J. (2023). Numerical investigation on the swirling vortical characteristics of a Stairmand cyclone separator with slotted vortex finder. *Powder Technology*.
- Hoekstra, A. J. (2000). Gas Flow Field and Collection Efficiency of Cyclone Separators. *Ph.d Thesis Delft University of Technology*.
- Hoffman, & Stein. (2008). *Gas Cyclones and Swirl Tubes*.
- Kim, J. C., & Lee, K. W. (1990). Experimental study of particle collection by small cyclones. *Aerosol Science and Technology*, 1003-1015.
- Parnell, & Davis. (1979). *Predicted effects of the use of new cyclone designs on agricultural processing particle emissions*. Hot Springs, Ark: ASAE.
- Qiang, L., Qinggong, W., Weiwei, X., & Zilin, Z. (2020). Experimental and computational analysis of a cyclone separator with a novel vortex finder. *Powder Technology*, 398-410.
- Rosin, P., & Rammler, E. (1933). The laws governing the fineness of powdered. *Journal of the Institute of Fuel*, 20-36.
- S.A.Morsi, A. A. (1972). An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems,. *Journal of Fluid Mechanics*, 193-208.
- Shepherd, & Lapple. (1939). *Flow Pattern and Pressure Drop in Cyclone*. Industrial and Engineering Chemistry .
- Stairmand, C. (1951). The design and performance of cyclone separators. *Trans. Inst. Chem. Engrs*, 29, 356-383.

- Suasnabar, D. (2000). *Dense medium cyclone performance enhancement via computational modelling of the physical processes*. Sydney .
- Sun, X. e. (2017). *Multi-objective optimization of a Stairmand cyclone separator using response surface methodology and computational fluid dynamics*. Republic of Korea: Powder Technology.
- Wang, L. (2004). *Theoretical study of cyclone design*.
- Wang, Z., Sun, G., & Jiao, Y. (2020). Experimental study of large-scale single and double inlet cyclone separators with two types of vortex finder. *Chemical Engineering and Processing*.
- Wei, Q., Sun, G., & Gao, C. (2020). Numerical analysis of axial gas flow in cyclone separators with different vortex finder diameters and inlet dimensions. *Powder Technology*, 321-333.
- Xiang, R., Park, S., & Lee, K. (2001). Effects of cone dimension on cyclone performance. *Journal of Aerosol Science.*, 549-561.
- Zabala, C., Ramirez, J., & Torres, M. (2021). Performance Characterization of a New Model for a Cyclone Separator of Particles Using Computational Fluid Dynamics. *Applied sciences*.
- Zhao, B., Su, Y., & Zhang, J. (2006). Simulation of gas flow pattern and separation efficiency incyclone with conventional single and spiral double inlet configuration. *Chemical Engineering Research and Design* 84, 1158–1165.