

Numerical study of a hydrocyclone performance for oil-sand separation

Torres Nelson, Fuentes Manuel, Asuaje Miguel, PhD.

Universidad Metropolitana de Caracas, Venezuela, t.nelson@correo.unimet.edu.ve

Universidad Metropolitana de Caracas, Caracas Venezuela, manuel.fuentes@correo.unimet.edu.ve

Universidad Metropolitana de Caracas, Caracas Venezuela, masuaje@unimet.edu.ve

Abstract— *The oil industry faces significant challenges in ensuring efficient oil–sand separation, a critical process to preserve crude quality, reduce operating costs, and comply with environmental regulations. Under increasing global crude demand and intensified scrutiny on sustainability, optimizing separation operations has become a strategic priority. Improved separation efficiency reduces waste, enhances resource recovery, and supports the Sustainable Development Goals, particularly SDG 9 (Industry, Innovation and Infrastructure) and SDG 12 (Responsible Consumption and Production). This study assesses the performance of a hydrocyclone for oil–sand separation through computational fluid dynamics (CFD) simulations in ANSYS Fluent®. The Rietema correlation is incorporated as the basis for the geometrical analysis of the hydrocyclone, focusing on key parameters that govern separation performance, including the viscosity and density of the bitumen–sand mixture and the sand particle size distribution. These factors alter the internal hydrodynamics of the device (flow patterns, pressure field, and particle behavior), directly impacting separation efficiency. The main objective was to model the internal flow structure to maximize oil recovery while minimizing residual sand at the outlet. The numerical results indicate that implementing the Rietema correlation contributes to improved separation efficiency, increasing oil recovery, reducing sand carryover, and enhancing the operational reliability of the process.*

Keywords— *Hydrocyclone, oil–sand separation, CFD, separation efficiency, SDG.*

NOMENCLATURE

ΔP	Total pressure loss necessary to operate the cyclone (Pa)
D	Upper cyclone diameter (cm)
D_a	Diameter of underflow (cm)
D_i	Diameter of inlet (cm)
D_o	Diameter of overflow (cm)
L	Hydrocyclone height (cm)
H	Upper cylindrical section of hydrocyclone (cm)
L_o	Vortex Finder Height (cm)
$\Delta \rho$	Difference in density between solid and liquid (kg/m ³)
η	Crude viscosity (Kg/m-s)
ρ	Liquid density (kg/m ³)
d_{50}	Diameter of particles which are separated for 50 per cent (μm)

Estudio numérico del rendimiento de un hidrociclón para la separación de arena de petróleo

Torres Nelson, Fuentes Manuel, Asuaje Miguel, PhD.

Universidad Metropolitana de Caracas, Venezuela, t.nelson@correo.unimet.edu.ve

Universidad Metropolitana de Caracas, Caracas Venezuela, manuel.fuentes@correo.unimet.edu.ve

Universidad Metropolitana de Caracas, Caracas Venezuela, masuaje@unimet.edu.ve

Resumen— La industria petrolera enfrenta desafíos para asegurar una separación eficiente de petróleo y arena, esencial para mantener la calidad del crudo, reducir costos operativos y cumplir normativas ambientales. En un contexto de mayor demanda energética y creciente presión por la sostenibilidad, optimizar los procesos de separación es una prioridad. Una separación eficiente minimiza desperdicios, mejora la recuperación de recursos y se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente el ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructuras) y el ODS 12 (Producción y Consumo Responsables). Este estudio evalúa el desempeño de un hidrociclón para separación petróleo-arena mediante simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) en ANSYS Fluent®. Se incorpora la correlación de Rietema como base para el análisis geométrico del hidrociclón, enfocándose en parámetros determinantes del desempeño, incluyendo la viscosidad y densidad de la mezcla bituminosa y la distribución de tamaño de las partículas de arena. Estos factores modifican la hidrodinámica interna del equipo (patrones de flujo, campo de presión y comportamiento de partículas), afectando directamente la eficiencia de separación. El objetivo fue modelar el flujo interno para maximizar la recuperación de petróleo y minimizar la arena residual en la salida. Los resultados numéricos indican que la implementación de la correlación de Rietema contribuye a mejorar la eficiencia de separación, aumentando la recuperación de petróleo, reduciendo la retención de arena y fortaleciendo la confiabilidad operativa del proceso.

Palabras clave— Hidrociclón, separación petróleo-arena, CFD, SGD, eficiencia de separación.

NOMENCLATURA

ΔP	Pérdida total de presión necesaria para operar el ciclón (Pa)
D	Diámetro superior del ciclón (cm)
D_a	Diámetro del overflow (cm)
D_i	Diámetro de la entrada (cm)
D_o	Diámetro del underflow (cm)
L	Altura del hidrociclón (cm)
H	Altura de la sección cilíndrica del hidrociclón (cm)
L_o	Altura del vortex finder VF (cm)
$\Delta \rho$	Diferencia de densidad entre sólido y líquido (kg/m^3)
η	Viscosidad del crudo (Kg/m-s)
ρ	Densidad del crudo (kg/m^3)
d_{50}	Diámetro de las partículas que están separadas para un 50 por ciento (μm)

I. INTRODUCCIÓN

Un hidrociclón es un dispositivo diseñado para separar partículas de diferentes tamaños y densidades utilizando la fuerza centrífuga. Los hidrociclones tienen una geometría cilíndrico-cónica, con tres puertos, como se muestra en la figura 1. A lo largo de su eje, hay dos salidas: una en la parte superior, conocida como "overflow", y otra en la parte inferior, conocida como "underflow", mientras que una entrada perpendicular se encuentra en la parte superior del dispositivo. [1]

Su funcionamiento se basa en la inyección tangencial de un fluido en el interior de un cilindro cónico, creando un flujo circular dentro del hidrociclón, que a su vez produce un efecto vórtice [2]. Las partículas más pesadas experimentan una mayor fuerza centrífuga, son empujadas hacia la pared, pierden energía cinética debido a la fricción, lo que hace que se ralenticen y bajen, expulsándose por la salida inferior. Las partículas más ligeras, que experimentan menos fuerza centrífuga, permanecen más cerca del eje central del hidrociclón, formando un vórtice interno, donde las partículas tienden a acumularse y, por efecto del vórtice, son transportadas a la salida superior. Dai et al. confirmaron experimentalmente este comportamiento en un flujo bifásico líquido-sólido dentro de un hidrociclón [3].

El estudio de los hidrociclones desempeña un papel fundamental en industrias como el petróleo y gas, la minería y el tratamiento de aguas residuales, donde es esencial una separación eficiente de sólidos, petróleo y agua. [4] [5].

La eficiencia de separación de las partículas dependerá directamente del diseño del hidrociclón, incluyendo factores como el ángulo del cono, el diámetro de la entrada y salida, la velocidad del flujo de entrada, el tamaño de las partículas, la concentración de alimentación y las propiedades del fluido. Estos parámetros deben ajustarse cuidadosamente para maximizar la eficiencia en la separación de partículas. Los primeros trabajos se centraron en modelos empíricos para predecir el tamaño del corte (d_{50}), y la caída de presión (ΔP), formando la base para el diseño de hidrociclones. Entre estos, los modelos de Plitt y Lynch proporcionaron información crítica sobre la correlación entre variables operativas y eficiencia de separación [3] [4].

En la separación de agua y petróleo, el diseño y funcionamiento de los hidrociclones se enfrenta a complejidades adicionales debido a la presencia de fases emulsionadas. Los estudios de Neesse y Dueck [5] destacan la importancia de la inversión de fase (phase inversion) y la tensión interfacial para determinar el rendimiento de la separación, especialmente en sistemas con grandes cortes de agua. Además, fenómenos como los efectos de gancho y el bypass de partículas finas plantean desafíos para lograr una separación óptima [6].

Los avances en el diseño de hidrociclones han sido impulsados por estudios experimentales y computacionales. La Dinámica de Fluidos Computacional (DFC) se ha convertido en una herramienta poderosa para simular los patrones de flujo interno y la disipación de energía en hidrociclones. Utilizando modelos como el Modelo de Tensión de Reynolds (RSM) y la Simulación de Remolinos Grandes (LES), los investigadores han podido visualizar la formación de vórtices y la intensidad de la turbulencia, permitiendo optimizar parámetros de diseño, como la longitud del buscador de vórtices y el ángulo del cono [7] [8].

En el sector del petróleo y gas, la integración de hidrociclones para el tratamiento de agua producida ha recibido una atención significativa. Estudios de Shams et al. [9] y Abulnaga [10] han demostrado que modificaciones en la geometría de los hidrociclones pueden mejorar la eficiencia de separación y reducir los costes operativos. Estas incluyen la adición de múltiples entradas para reducir la turbulencia y el uso de mini-hidrociclones para la separación fina de partículas [11] [12].

A pesar de estos avances, persisten desafíos en la predicción del desempeño de hidrociclones aplicados a sistemas multifásicos de interés petrolero, especialmente cuando se consideran mezclas crudo-arena con propiedades físicas distintas a las de los sistemas agua-sólido comúnmente reportados en la literatura. La interacción entre el campo rotacional, la viscosidad del crudo, el arrastre sobre las partículas sólidas y la partición de flujo entre overflow y underflow puede modificar significativamente la eficiencia de separación y la caída de presión. Estudios recientes han demostrado que el desempeño de los hidrociclones depende de la configuración geométrica, la estabilidad del vórtice, la velocidad tangencial y la reducción del bypass de partículas hacia el overflow [13], [14]. Asimismo, investigaciones basadas en CFD-DPM han resaltado la importancia de representar adecuadamente el seguimiento de partículas sólidas, las fuerzas hidrodinámicas actuantes y la independencia de malla para obtener predicciones confiables en flujos con alta intensidad de swirl [15], [16]. Sin embargo, aún se requieren estudios numéricos que conecten las correlaciones geométricas clásicas, como la de Rietema, con el análisis hidrodinámico y de trayectoria de partículas en aplicaciones crudo-arena. Por esta razón, el presente trabajo evalúa numéricamente el desempeño de un hidrociclón diseñado con base en Rietema para la separación de arena respecto al crudo, analizando el efecto de la velocidad de

entrada sobre la caída de presión, el campo de velocidades, el campo de presión y la eficiencia de separación.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio empleó un enfoque numérico basado en las correlaciones de Rietema para investigar el rendimiento de un hidrociclón diseñado para la separación de crudo y arena. El objetivo principal es analizar la eficiencia de separación y las características de ΔP bajo condiciones operativas variables. Las simulaciones de dinámica de fluidos computacional (DFC) se realizaron utilizando ANSYS Fluent® Versión 2025 R1. La geometría se desarrolló basándose en los principios estándar de diseño de hidrociclones de Rietema, incorporando una sección de entrada, cuerpos cilíndricos y cónicos, y dos salidas (underflow y overflow), tal como se muestra en la figura 1. Se realizaron pruebas de independencia de la malla para asegurar la precisión numérica. Las condiciones de borde se establecieron según las condiciones operativas industriales, con la introducción de crudo y arena en la entrada a caudales variables. La presión en las salidas se mantuvo en condiciones atmosféricas. Los efectos de turbulencia se representaron mediante un cierre RANS adecuado para flujos fuertemente rotacionales, característicos de los hidrociclones. El transporte de la fase dispersa (arena) se incorporó mediante un enfoque lagrangiano de partículas, mientras que el crudo se consideró como fase continua. La interacción entre fases se capturó a través de las fuerzas hidrodinámicas relevantes que gobiernan el arrastre y la dispersión, determinando el destino de las partículas hacia el overflow o el underflow.

El post-procesamiento se centró en campos de velocidad, gradientes y ΔP , así como en el análisis de trayectorias de partículas para interpretar los mecanismos de separación. La eficiencia se evaluó en función de balances de flujo másico de la arena en las salidas y se estudió su variación con la velocidad de entrada, con el objetivo de analizar los criterios de operación y observar que tan eficiente es la separación crudo-arena en condiciones industriales en un hidrociclón.

El estudio se desarrolló bajo un conjunto de supuestos y limitaciones propias del modelo numérico empleado. El crudo API 30.7 se consideró como fase continua, incompresible y de comportamiento newtoniano, mientras que la arena se modeló como fase dispersa mediante un enfoque lagrangiano DPM. El análisis se limitó a partículas de arena de 50 μm , una concentración másica de 1 % y un rango de velocidades de entrada entre 2,5 y 10 m/s. Asimismo, se adoptó un acoplamiento unidireccional entre fases, por lo que el campo de velocidad y presión del crudo afecta la trayectoria de las partículas, pero la retroalimentación de las partículas sobre la fase continua no fue considerada. En consecuencia, los resultados obtenidos deben interpretarse dentro de este rango operativo y bajo las simplificaciones asociadas al modelo RANS RNG $k-\epsilon$ y al seguimiento lagrangiano de partículas.

A. Dominio de la simulación

La geometría del hidrociclón fue creada siguiendo los principios estándar de diseño propuestos por Rietema,

ampliamente reconocidos por su aplicación en la configuración geométrica de hidrociclones. Estos principios definen correlaciones que permiten determinar proporciones fundamentales, como el diámetro de la entrada (**Di**), el diámetro del underflow y overflow (**Do/Da**), la longitud total del hidrociclón (**L**) y el vortex Finder (**Lo**). Estos valores se presentan en la Figura 1.

El diseño de los hidrociclones debe garantizar una eficiencia óptima de separación, que depende de diversos factores operativos y geométricos. Un hidrociclón ideal separa el fluido en dos corrientes: el overflow, que contiene el 50% de las partículas con un tamaño mayor que el diámetro de corte (d_{50}), y el underflow, donde se concentra el material restante. Este equilibrio es esencial para lograr una separación eficiente en aplicaciones como la separación de crudo y arena.

Adicionalmente, la correlación de Rietema vincula el desempeño con la intensidad del swirl y la ΔP . Así, la fase más densa migra hacia la pared por acción centrífuga y se descarga preferentemente por el underflow, criterio que guía el análisis de ΔP , campo de velocidades y eficiencia en los casos simulados.

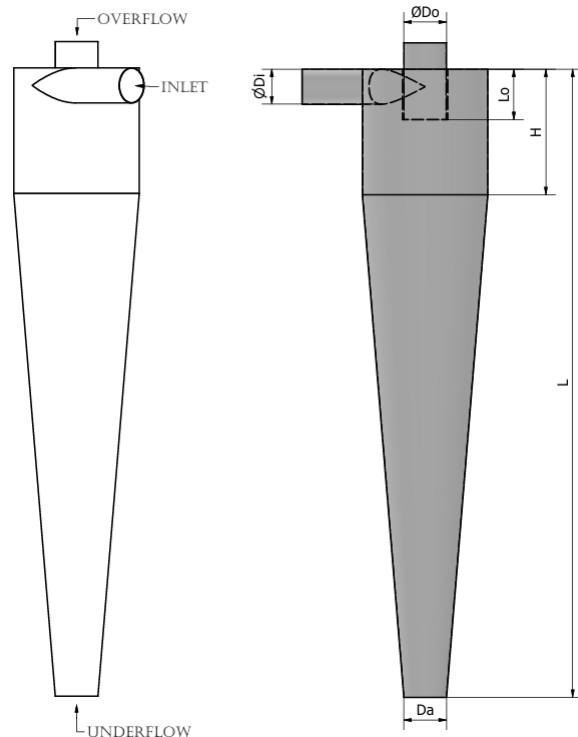


Fig 1. Geometría del Hidrociclón

Las correlaciones de Rietema proporcionan una base sólida para ajustar estos factores en el diseño del hidrociclón, asegurando un equilibrio entre la eficiencia de separación y la estabilidad operativa. Los factores de diseño están presentados en la Tabla I, se implementaron en este estudio para modelar la geometría base y analizar los resultados obtenidos mediante simulación DFC.

Tabla I
Correlaciones de diseño de Rietema para hidrociclones

Medidas	Di/D	Do/D	L/D	Lo/D
Rietema	0.28	0.34	5.00	0.4

Para construir la geometría y realizar la simulación, se asumió una ΔP de 60 kPa a lo largo del hidrociclón, considerando las condiciones típicas de funcionamiento en aplicaciones industriales. Esta es un parámetro crítico que afecta directamente al rendimiento del equipo, ya que influye en la generación del campo de velocidades dentro del hidrociclón, así como en la formación del vórtice necesario para una separación de fases eficiente [17]. La selección de esta ΔP se basó en referencias de estudios previos y escenarios operativos industriales, donde valores similares han demostrado ser efectivos para separar partículas sólidas del fluido continuo.

Aplicando los factores de diseño de Rietema, según la Tabla I, derivamos las siguientes dimensiones mostrados en la Tabla II.

Tabla II
Dimensiones calculadas del hidrociclón

Medidas	Valor	Unidad
$Do = Da$	21.16	cm
$D = H$	62.23	cm
Di	17.42	cm
Lo	24.89	cm
L	311.13	cm

Para asegurar un flujo completamente desarrollado en el sistema, se añadieron secciones rectas de tuberías en la entrada y salidas del hidrociclón.

B. Métodos Numéricos

1) *Modelo multifásico*: en este trabajo es necesario representar explícitamente la dinámica sólido-líquido en el campo rotacional del hidrociclón. Para esto, el crudo se modeló como una fase continua monofásica, incompresible y de comportamiento newtoniano, resuelta en un marco Euleriano, mientras que la fase sólida (arena) se representó mediante el Discrete Phase Model (DPM) en un enfoque Lagrangiano. La segunda "fase" no se resolvió como un continuo adicional, sino como un conjunto de partículas rastreadas individualmente [18].

2) *Modelo de turbulencia*: el modelo de turbulencia es crítico debido al flujo intensamente turbulento y rotacional. La turbulencia del flujo continuo se modeló mediante un enfoque RANS usando el modelo RNG $k-\epsilon$. Este modelo conserva la estructura de dos ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta k y su tasa de disipación ϵ , pero incorpora refinamientos derivados de la teoría de Renormalization

Group (RNG). En particular, el RNG $k-\epsilon$ incluye (i) un término adicional en la ecuación de ϵ que mejora la respuesta ante altas tasas de deformación y curvatura de líneas de corriente, y (ii) una modificación por swirl/rotación que ajusta la viscosidad turbulenta para capturar con mayor fidelidad los efectos de flujo fuertemente rotacional. Esta opción es especialmente relevante en hidrociclones, donde el campo de velocidades está dominado por swirl intenso y gradientes de cizalla pronunciados, por lo que el RNG $k-\epsilon$ con corrección de swirl suele ofrecer mayor robustez y precisión que el $k-\epsilon$ estándar. [19][20]

3) *Modelo de fase discreta (DPM)*: es esencial cuantificar la separación sólido-líquido, por esto en este trabajo, las partículas sólidas de arena se modelaron mediante DPM. Se trabajó con una concentración másica de arena de 1%, y se adoptó un esquema de acoplamiento unidireccional (one-way coupling): el campo de velocidad y presión del crudo afecta el movimiento de las partículas, mientras que la retroalimentación de las partículas sobre el campo del continuo (momento y turbulencia) se desprecia. Esta aproximación es representativa del régimen diluido, reduce el costo computacional y mejora la estabilidad numérica sin afectar el objetivo del estudio, que es cuantificar el transporte y la separación de partículas en el hidrociclón. [21]

4) *Métodos para la solución*: el acoplamiento presión-velocidad se resolvió mediante el algoritmo SIMPLE. Para el cálculo de los flujos en las caras de control se utilizó la corrección Rhie-Chow basada en momento, la cual reduce el desacoplamiento presión-velocidad en mallas localizadas y mejora la estabilidad numérica del campo de presión. [22] En cuanto a la discretización espacial, los gradientes se evaluaron con el esquema mínimos cuadrados basado en celdas (Least Squares Cell Based). La ecuación de presión se discretizó con un esquema de segundo orden, mientras que la ecuación de cantidad de movimiento y las ecuaciones de turbulencia para la energía cinética turbulenta k y la tasa de disipación ϵ se discretizaron mediante el esquema upwind de segundo orden. Esta combinación de esquemas de segundo orden se adoptó para disminuir la difusión numérica y capturar con mayor fidelidad los gradientes intensos asociados al flujo altamente rotacional en el interior del hidrociclón. [23]

C. Discretización del dominio (mallado)

Para el dominio se crearon 5 mallados no estructurados mencionados en la Tabla III con la misma estructura que se muestra en la figura 2.

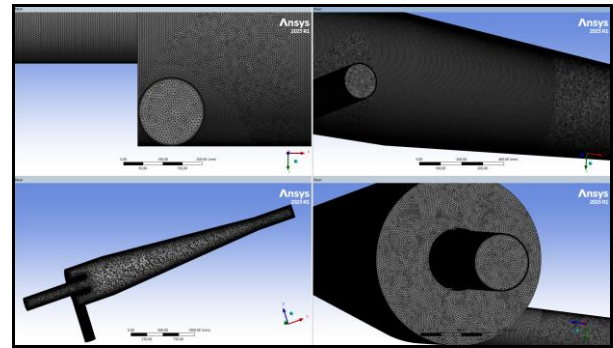


Fig 2. Mallado del hidrociclón

El dominio de simulación se integró con elementos más finos cerca de regiones críticas, como la entrada, paredes y salidas. Adicionalmente, se controlaron métricas de calidad como la calidad ortogonal o asimetría para asegurar estabilidad numérica.

Las Figuras 3, 4 y 5 presentan el estudio de independencia de malla a partir de tres métricas globales del flujo. En conjunto, se observa que al incrementar el número de elementos la solución converge. De forma consistente, la ΔP en ambas salidas tiende a un valor prácticamente constante en la malla muy fina, por tanto, la malla seleccionada puede considerarse suficientemente refinada para el resto de las simulaciones.

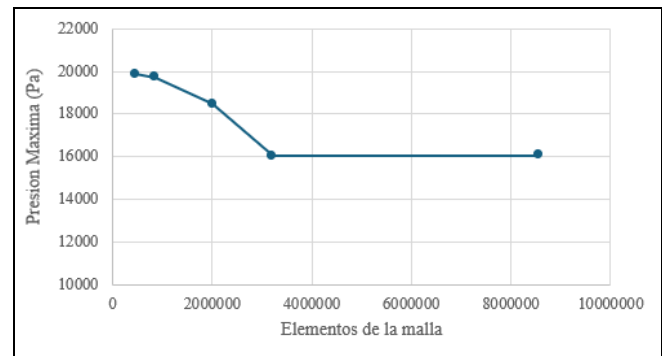


Fig 3. Presión máxima vs elementos de malla

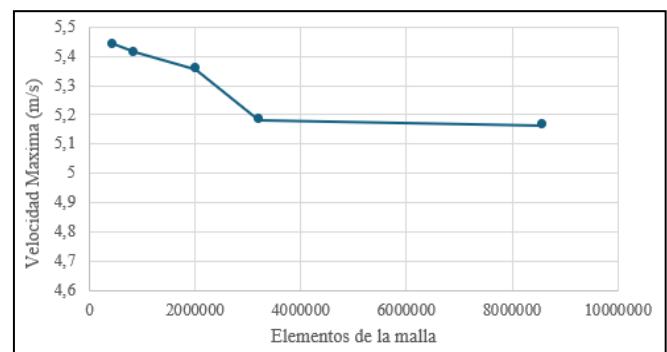


Fig 4. Velocidad máxima vs elementos de malla

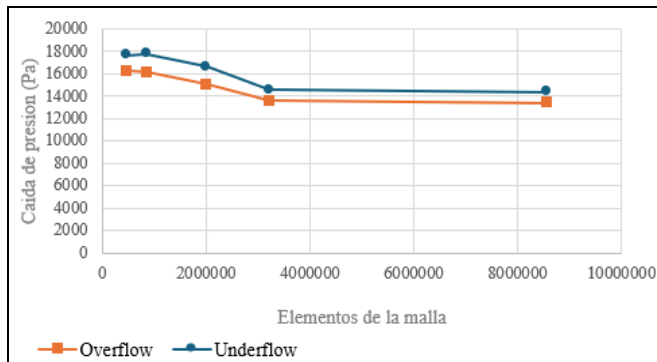


Fig 5. ΔP vs elementos de malla

Además, la figura 6 complementa la validación de malla mostrando una mejor capacidad para capturar los gradientes cercanos a pared conforme se refina la discretización. Sin embargo, exige más costo computacional como se muestra en la figura 7.

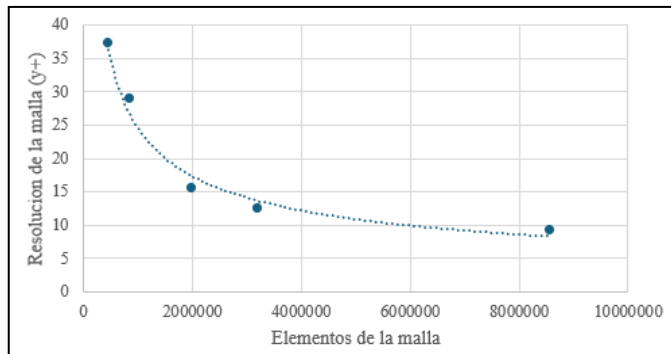


Fig 6. Y+ vs elementos de la malla

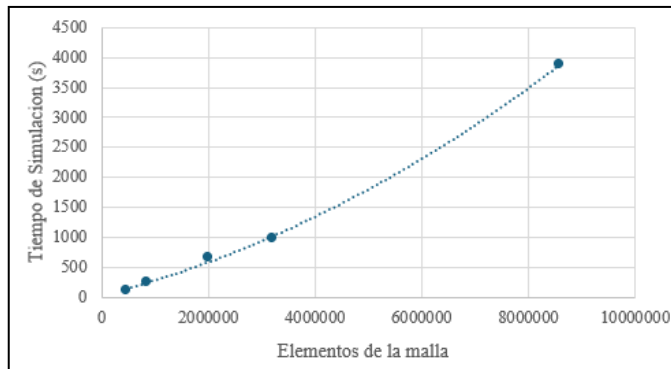


Fig 7. Tiempo de simulación vs elementos de la malla

Tabla III
Número de elementos del mallado

Malla	Nodos	Elementos
Muy Gruesa	161967	461333
Gruesa	290831	853191
Media	664105	2010594

Fina	1044498	3209329
Muy Fina	2728738	8578761

En consecuencia, se seleccionó la malla muy fina para el resto de las simulaciones, ya que garantiza la mayor confiabilidad numérica con un error estimado de 0,29%, manteniendo consistencia en los indicadores de convergencia y calidad de capa límite.

D. Materiales y Fluidos

Para la simulación, se utilizó crudo con una gravedad API de 30,7 como fase continua. El crudo fue considerado como un fluido incompresible y de comportamiento newtoniano, con propiedades físicas constantes durante la simulación. Las principales propiedades físicas del petróleo crudo, incluyendo su densidad y viscosidad, se resumen en la Tabla IV. Estos parámetros desempeñan un papel crucial en la determinación de la dinámica de fluidos y la eficiencia de separación dentro del hidrociclón. Además, se utilizaron partículas de arena de 50 μm , correspondientes al tamaño de partícula considerado en el diseño del hidrociclón, con una densidad de 1990 kg/m^3 para representar la fase dispersa. Estas partículas fueron seleccionadas para simular contaminantes sólidos comúnmente encontrados en procesos de separación. Las propiedades de la arena se detallan en la Tabla V. La combinación de estas propiedades del material permitió una representación realista de un sistema multifásico, proporcionando información sobre el rendimiento del hidrociclón en condiciones operativas similares a las aplicaciones industriales.

Tabla IV
Propiedades del crudo

Densidad	871,68 kg/m^3
Viscosidad	0,01125 kg/m-s
API	30.7

Tabla V
Propiedades de la arena

Densidad	1990 kg/m^3
Diámetro	50 μm

E. Parámetros de la simulación y condiciones de borde

En los casos de estudio se aplicó un barrido de velocidad de entrada para el flujo continuo con inyección de partículas de arena. La Tabla VI menciona las condiciones para la simulación. Las salidas (overflow y underflow) se definieron como pressure outlet a presión atmosférica, implementada en Fluent como presión estática manométrica. Esto se menciona en la tabla VII.

Tabla VI
Resumen de las condiciones de simulación

Parámetro		Detalle
Fluido		Crudo API 30.7/Arena (Partículas)
Régimen		Estacionario
Condiciones para partículas de arena	Diámetro	50 μm
	Concentración	1 %
	Flujo masico	0.88 kg/s
Interacción partícula-fluido		One-way
Condiciones de pared (BC type)	Entrada	reflect
	Overflow	escape
	Underflow	trap
Criterio de Convergencia		Residuales RMS $<1 \times 10^{-4}$

El procedimiento del cálculo de la eficiencia del dispositivo se conoce como la relación de la cantidad de arena que escapa por la salida del overflow sobre la inyectada en la entrada del hidrociclón.

Tabla VII
Condiciones de borde de los casos de estudio

Frontera	Tipo	Especificación
Entrada	Velocidad	V variable (2,5 – 10 m/s)
Overflow	Presión estática	P = 0 (atm)
Underflow	Presión estática	P = 0 (atm)

III. RESULTADO Y DISCUSIÓN

Los resultados se presentan siguiendo una lógica causa-efecto, partiendo de la respuesta hidráulica del hidrociclón y avanzando hacia el desempeño de separación. Para fortalecer la interpretación de las tendencias, se incorporan observaciones cuantitativas entre los casos extremos del barrido de caudal, con el fin de evaluar el efecto del incremento de flujo sobre la presión máxima, la caída de presión, la velocidad máxima y la eficiencia de separación.

A. Respuesta hidráulica del hidrociclón

En la Figura 8 se observa un incremento no lineal de la presión máxima con el caudal, consistente con el aumento de pérdidas por efectos inerciales y la intensificación del campo rotacional a mayores velocidades de entrada. Entre el menor y el mayor caudal evaluado, la presión máxima aumentó de 5,51 kPa a 103,54 kPa, equivalente a un incremento de aproximadamente 18,8 veces. Este comportamiento evidencia la alta sensibilidad de la respuesta hidráulica del hidrociclón frente al incremento del caudal. En hidrociclones, la respuesta hidráulica suele escalar con términos del tipo $\Delta P \propto \rho V^2$, por lo que un aumento del caudal puede reflejarse en incrementos significativos de presión y pérdidas hidráulicas. [24].

Mientras que la figura 9, la ΔP aumenta con el caudal y muestra diferencias entre las salidas. Entre los casos extremos del barrido, la ΔP asociada al overflow aumentó de 4,80 kPa a 94,70 kPa, equivalente a un incremento aproximado de 19,7

veces, mientras que la ΔP del underflow aumentó de 4,46 kPa a 85,88 kPa, equivalente a 19,3 veces. La rama asociada al overflow tiende a reportar valores ligeramente mayores que el underflow, lo cual es coherente con la distribución de presiones vinculada al núcleo de vórtice y a las pérdidas locales asociadas al vortex finder o descarga superior. Este comportamiento confirma que el aumento del caudal intensifica la demanda hidráulica del hidrociclón, aunque mantiene una diferencia consistente entre ambas salidas.

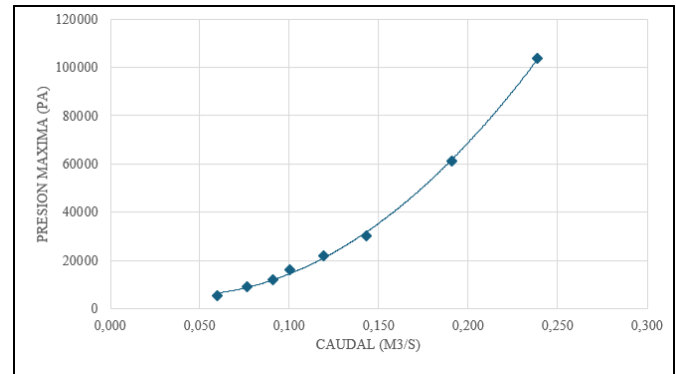


Fig 8. Presión máxima vs caudal

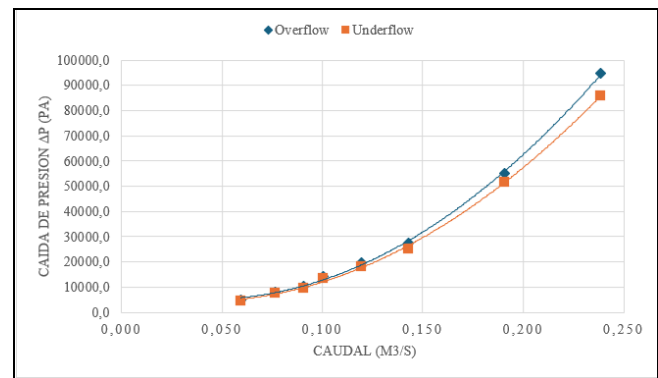


Fig 9. Caída de presión vs caudal (overflow/underflow)

B. Intensificación del campo de velocidades.

La Figura 10 muestra que la velocidad máxima aumenta con el caudal, reflejando un fortalecimiento del swirl y del gradiente radial de presión. Entre el menor y el mayor caudal evaluado, la velocidad máxima dentro del hidrociclón aumentó de 3,10 m/s a 12,82 m/s, equivalente a un incremento aproximado de 4,13 veces. Esta intensificación es relevante porque el campo de velocidades, tanto tangencial como axial, gobierna el equilibrio entre el arrastre del fluido y la migración radial de partículas, condicionando directamente el proceso de separación. Adicionalmente, la relación muestra una tendencia casi lineal en el intervalo analizado, indicando que el incremento del caudal se traduce en un aumento proporcional de la velocidad máxima y, por ende, del nivel de swirl dentro del equipo.

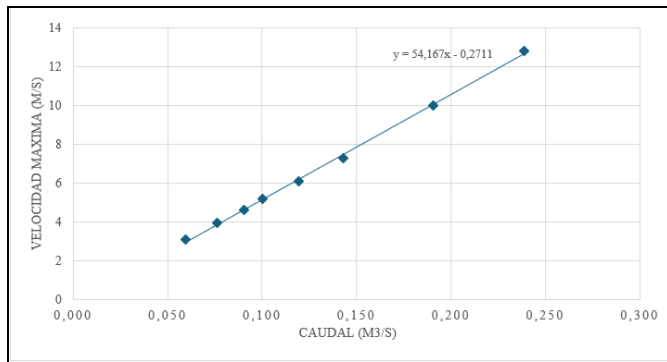


Fig 10. Velocidad Maxima vs Caudal

C. Desempeño de separación.

La figura 11 muestra que la eficiencia se mantiene alta ($\approx 97\text{--}99\%$) a lo largo del barrido, con variaciones moderadas. Esto sugiere un régimen operativo robusto para el tamaño de partícula y carga considerados; cambios pequeños pueden atribuirse a ajustes del patrón interno de flujo y a la sensibilidad de la partición overflow/underflow ante el incremento de caudal. En sistemas de desarenado, el incremento de caudal suele mejorar la fuerza centrífuga efectiva, aunque el costo hidráulico aumenta por la mayor ΔP . En este caso la velocidad máxima evaluada fue de 10 m/s.

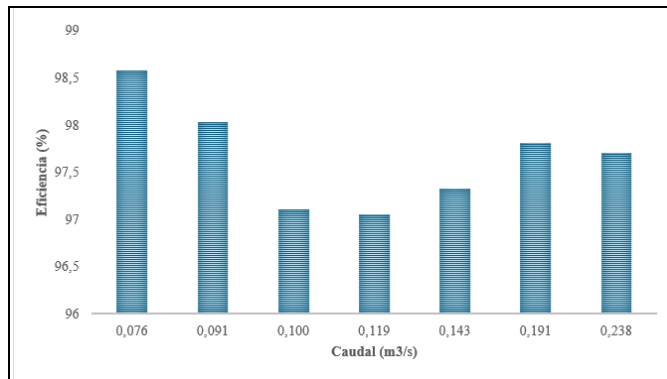


Fig 11. Eficiencia vs Caudal

D. Balance de partículas.

La Tabla VIII evidencia que la mayor fracción de arena se reporta en el underflow, mientras que el overflow permanece significativamente menor, en concordancia con la eficiencia global observada. Para los casos con balance másico disponible, la fracción de arena recuperada por el underflow se mantiene aproximadamente entre 97,0 % y 98,4 %, mientras que la fracción descargada por el overflow permanece por debajo de 3,0 % en la mayoría de los casos. Esto confirma que el hidrociclón presenta una recuperación preferencial de sólidos por la descarga inferior bajo las condiciones evaluadas.

Tabla VIII
Flujo masico de arena por salida

Velocidad (m/s)	DPM masa escapda	
	Overflow (kg/s)	Underflow (kg/s)
2,5	x	x
3,2	0,02545852	0,86751092
3,8	0,01681223	0,86270742
4,21	0,02545852	0,85454148
5	0,02593887	0,85406114
6	0,02353712	0,85646288
8	0,01393013	0,8606987
10	0,02017467	0,85982533

Adicionalmente, la Tabla IX confirma esta tendencia desde el punto de vista del conteo de partículas. En todos los casos, más del 97 % de las partículas inyectadas fueron recuperadas por el underflow, mientras que el porcentaje de partículas que alcanzó el overflow se mantuvo aproximadamente entre 1,1 % y 2,9 %. Esta consistencia entre flujo másico y conteo de partículas fortalece la validez de la métrica de eficiencia empleada y permite interpretar el underflow como la corriente dominante de recuperación de arena.

Tabla IX
Conteo de partículas inyectadas vs recuperadas

Caudal (m3/s)	Numero de partículas de arena		
	Inyectadas	Overflow	Underflow
0,060	1832	20	1812
0,076	1832	26	1806
0,091	1832	35	1796
0,100	1832	52	1780
0,119	1832	54	1778
0,143	1832	49	1783
0,191	1832	29	1803
0,238	1832	42	1790

En conjunto, las Tablas VIII y IX muestran consistencia entre el balance másico y el conteo de partículas. La concordancia entre el flujo másico escapado y el conteo de partículas valida la métrica de eficiencia y evidencia un underflow dominante en recuperación de arena. Las diferencias con el caudal responden a variaciones del swirl y del tiempo de residencia, sin alterar la tendencia global de separación.

E. Campos CFD: mapas de presión y velocidad.

Las figuras 12 y 13 muestran que a medida que se aumenta la velocidad de entrada, se observa el aumento de salidas de partículas de arena por el overflow, esto tiene concordancia gracias a como la velocidad implica en la fuerza

centrífuga. Por otro lado, se observa que la mayor presión se concentra en la sección cilíndrica y cónica del ciclón, y que a bajas presiones las partículas se encuentran saliendo casi flotando.

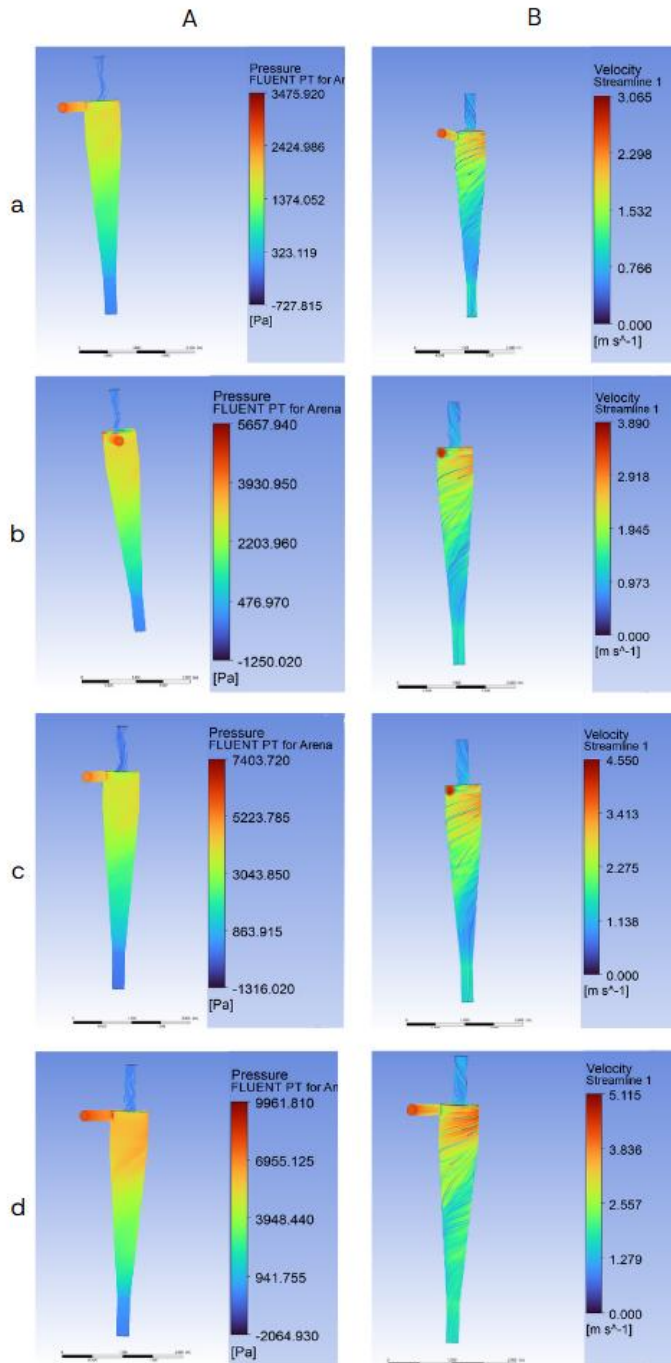


Fig 12. Líneas de corriente a diferentes velocidades de entrada.

a) $V=2,5$ b) $V=3,2$ c) $V=3,8$ d) $V=4,21$ (m/s)

Donde A representa campos de presión (arena) y B representa campos de velocidad (crudo).

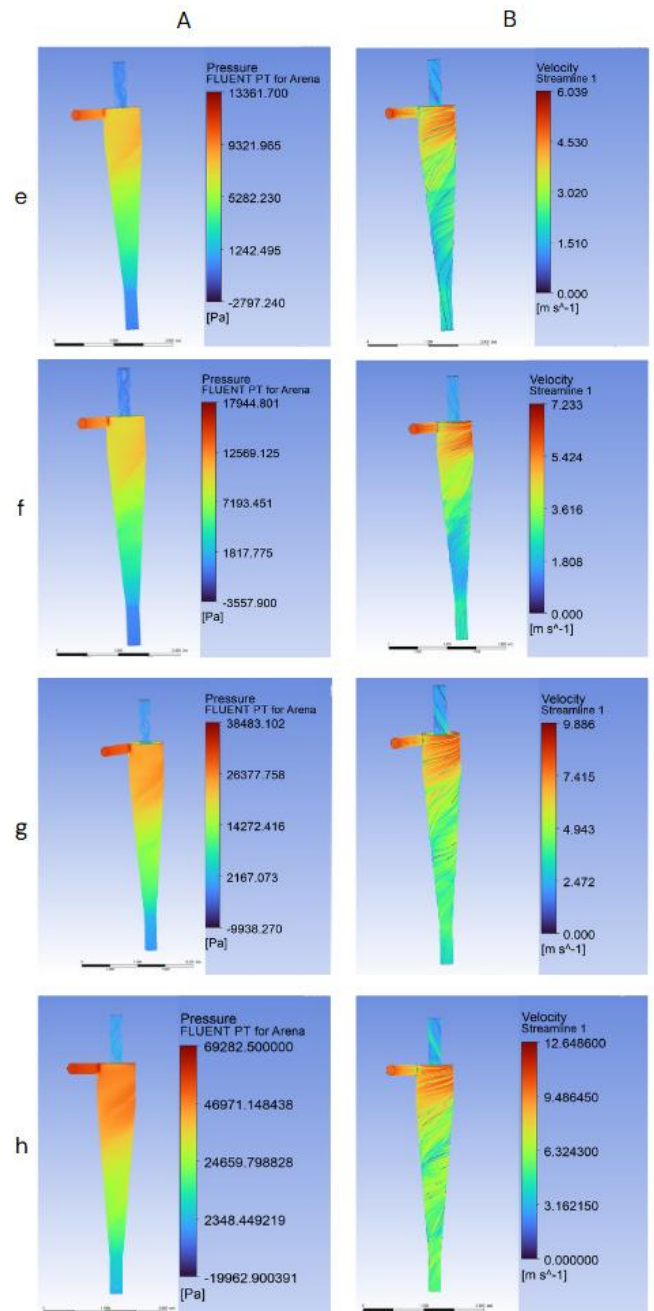


Fig 13. Líneas de corriente a diferentes velocidades de entrada.

e) $V=5$ f) $V=6$ g) $V=8$ h) $V=10$ (m/s)

Donde A representa campos de presión (arena) y B representa campos de velocidad (crudo).

Las figuras 14 y 15 muestran los contornos muestran que al aumentar la velocidad de entrada se intensifica el gradiente de presión y se refuerzan las regiones de alta velocidad asociadas al vórtice, explicando la tendencia creciente de ΔP y el desempeño de separación observado. Cuando la velocidad de entrada es igual a 10 m/s se observa un claro resalte de vacío en la salida del underflow, y a medida que se va

aumentando la velocidad de entrada, se logra apreciar un formado de vórtice más claro y organizado.

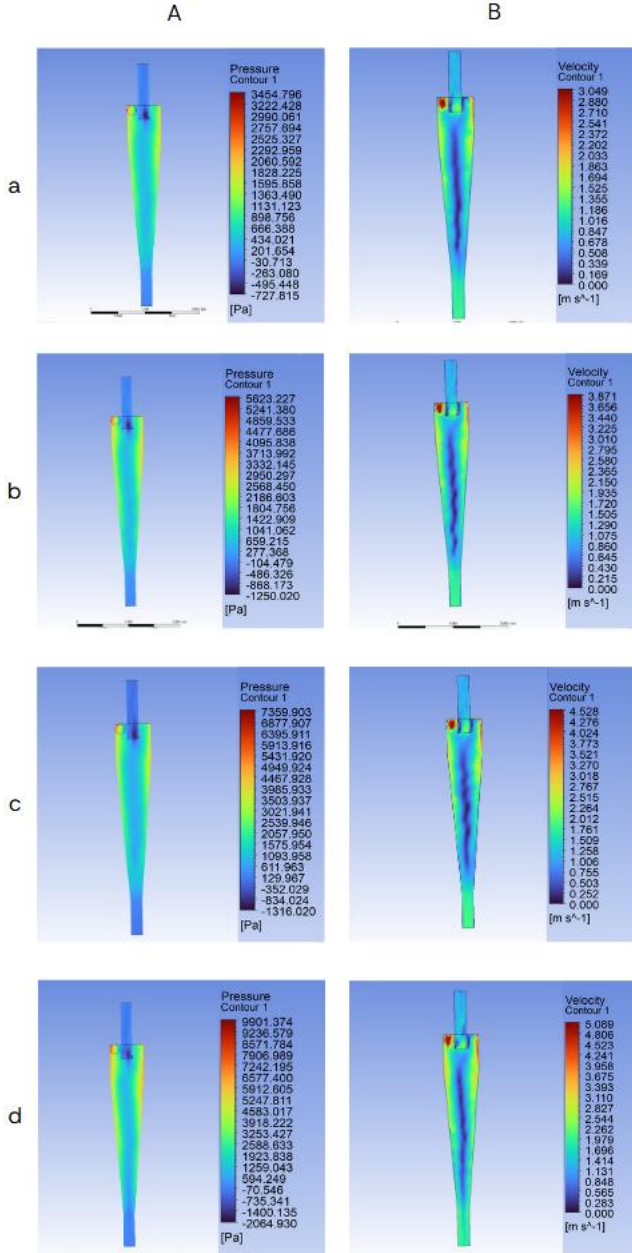


Fig 14. Contornos en plano XY a diferentes velocidades de entrada.

a) $V=2.5$ b) $V=3.2$ c) $V=3.8$ d) $V=4.21$ (m/s)

Donde A representa campos de presión y B representa campos de velocidad.

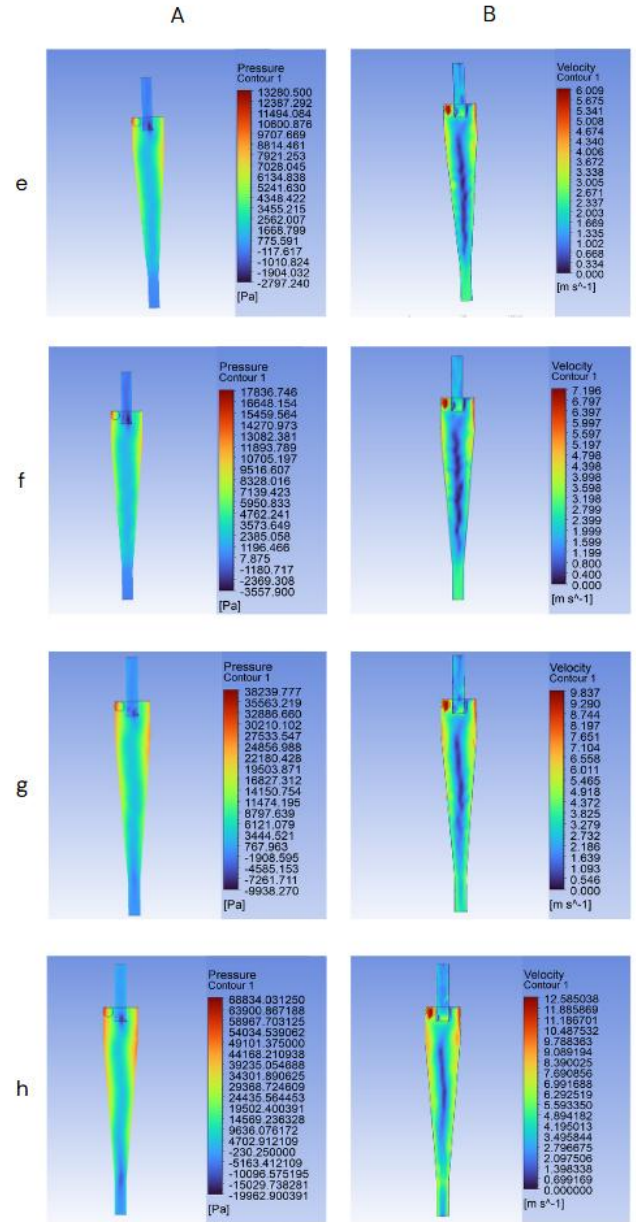


Fig 15. Contornos en plano XY a diferentes velocidades de entrada.

e) $V=5$ f) $V=6$ g) $V=8$ h) $V=10$ (m/s)

Donde A representa campos de presión y B representa campos de velocidad.

IV. CONCLUSIONES

En particular, el hidrociclón mostró una recuperación preferencial de arena por el underflow en todo el rango de operación analizado, manteniendo una eficiencia elevada para $d = 50 \mu\text{m}$. Este desempeño se sustenta en la intensificación del campo rotacional observada en el campo de velocidades y en el incremento de la ΔP con el caudal, confirmando el compromiso típico entre eficiencia de separación y demanda hidráulica. En conjunto, los resultados numéricos validan el diseño bajo las condiciones evaluadas.

REFERENCIAS

- [1] L. G. M. Vieira, E. A. Barbosa, J. J. R. Damasceno, and M. A. S. Barrozo, "Análisis de rendimiento y diseño de hidrociclones filtrantes," [Online]. (Fuente en línea; URL no provista). Accessed: Mar. 17, 2021.
- [2] M. Izadi, A. M. Makvand, E. Assareh, and F. Parvaz, "Optimización del diseño y rendimiento de separadores sólido-líquido," *Int. J. Thermofluids*, vols. 5–6, Art. no. 100033, 2020, doi: 10.1016/j.ijft.2020.100033.
- [3] G. Q. Dai, W. M. Chen, J. M. Li, L. Y. Chu, "Estudio experimental del flujo sólido-líquido bifásico en un hidrociclón," *Eng. Chem. J.*, vol. 74, pp. 211–216, 2004.
- [4] "Estudio del cortocircuito de finos en hidrociclones operados con diferentes variables," Repositorio UNAL, 2009. [Online]. Available: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/70272/39192498.2009.pdf>. Accessed: Jan. 10, 2025.
- [5] "Hidrociclones: Cálculo de D50," Academia.edu. [Online]. Available: https://www.academia.edu/7274416/Hidrociclones_Calculo_de_D50. Accessed: Jan. 10, 2025.
- [6] L. R. Plitt, "Un modelo matemático del clasificador de hidrociclones," *CIM Bulletin*, vol. 69, no. 776, pp. 114–123, 1976.
- [7] A. J. Lynch and T. C. Rao, "La influencia de las variables de diseño y operación en el rendimiento de los hidrociclones," *Int. J. Mineral Process.*, vol. 2, no. 2, pp. 93–113, 1975.
- [8] T. Neesse and J. Dueck, "Simulación numérica de flujo multifásico en hidrociclones," *Minerals Engineering*, vol. 20, no. 4, pp. 380–386, 2007.
- [9] R. A. Arterburn, "El tamaño y la selección de hidrociclones," *The AusIMM Bulletin and Proceedings*, vol. 306, pp. 45–52, 2001.
- [10] K. U. Bhaskar, D. R. Kaushal, and S. Kumar, "Simulación CFD y estudios de validación experimental sobre hidrociclones," *Minerals Engineering*, vol. 20, no. 1, pp. 60–71, 2007.
- [11] K. Elsayed and C. Lacor, "Optimización de los parámetros de diseño de hidrociclones mediante CFD," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 34, no. 3, pp. 768–780, 2010.
- [12] M. Shams and B. Dabir, "Un estudio numérico sobre el efecto de la concentración de sólidos de alimentación en el rendimiento de los hidrociclones," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 92, no. 9, pp. 1677–1686, 2014.
- [13] B. Abulnaga, "Hidrociclones para la separación de agua y aceite," in *Industrial Mixing Handbook: Science and Practice*, pp. 1181–1204, 2002. (Editorial/ciudad no provistas).
- [14] B. Wang, A. B. Yu, and L. Lu, "Estudio CFD del campo de flujo y el rendimiento de los hidrociclones," *Minerals Engineering*, vol. 20, no. 4, pp. 348–355, 2007.
- [15] D. E. G. Xu, H. Fan, J. Cui, C. Tan, Y. Zhang, R. Zou, S. Kuang, and A. Yu, "Numerical investigation of hydrocyclone inlet configurations for improving separation performance," *Powder Technology*, vol. 439, Art. no. 119668, 2024, doi: 10.1016/j.powtec.2024.119668.
- [16] Z. Wu, G. Zheng, and S. Li, "Prediction of Erosion of a Hydrocyclone Inner Wall Based on CFD-DPM," *Fluids*, vol. 10, no. 10, Art. no. 266, 2025, doi: 10.3390/fluids10100266.
- [17] Arterburn, R. A., *The Sizing and Selection of Hydrocyclones*, Krebs Engineers, pp. 1–10.
- [18] Crowe, C. T., Schwarzkopf, J. D., Sommerfeld, M., and Tsuji, Y., 2011, *Multiphase Flows with Droplets and Particles*, 2nd ed., CRC Press, Boca Raton, FL.
- [19] L. Svarovsky, "Hidrociclones en la separación sólido-líquido," in *Solid-Liquid Separation: Industrial Filtration Principles*, pp. 229–246, 2000. (Editorial/ciudad no provistas).
- [20] Fluent Inc., 2006, *FLUENT 6.3 User's Guide*, "Modeling Turbulence: Standard, RNG, and Realizable k- ϵ Models Theory," Sec. 12.4, Fluent Inc., Lebanon, NH.
- [21] Greifzu, F., et al., 2016, "Assessment of Particle-Tracking Models for Dispersed Particle-Laden Flows Implemented in OpenFOAM and ANSYS FLUENT," *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 10(1), pp. 30–43, doi:10.1080/19942060.2015.1104266.
- [22] Patankar, S. V., and Spalding, D. B., 1972, "A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-Dimensional Parabolic Flows," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **15**(10), pp. 1787–1806.
- [23] Rhie, C. M., and Chow, W. L., 1983, "Numerical Study of the Turbulent Flow Past an Airfoil with Trailing Edge Separation," *ALAA Journal*, **21**(11), pp. 1525–1532.
- [24] Svarovsky, L., 1984, *Hydrocyclones*, Book, United Kingdom, 208 pp., U.S. Department of Energy, Office of Scientific and Technical Information (OSTI), ETDEWEB Record ID 5132483, disponible en: <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/5132483> (consultado el 29-01-2026).