

**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE CLASIFICACIÓN DE SÓLIDOS EN UN
HIDROCICLÓN INDUSTRIAL**

JUAN ESTEBAN ARISMENDY BARRERA

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
MEDELLÍN
2013**

**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE CLASIFICACIÓN DE SÓLIDOS EN UN
HIDROCICLÓN INDUSTRIAL**

JUAN ESTEBAN ARISMENDY BARRERA

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniería Química

Director:

M.Sc. GABRIEL FELIPE AGUILERA GÁLVEZ

Co-Director:

Ph.D GERMAN CAMILO QUINTANA MARIN

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
MEDELLÍN**

2013

NOTA DE ACEPTACIÓN

_____.

_____.

_____.

_____.

_____.

Firma
Nombre
Presidente del jurado

_____.

Firma
Nombre
Presidente del jurado

_____.

Firma
Nombre
Presidente del jurado

_____.

Medellín, 18 de Mayo del 2013

DEDICATORIA

A mis padres y a mi hermana que gracias a su apoyo y confianza incondicional pude salir adelante sin importar las adversidades que tuve que enfrentar durante el transcurso de mi carrera.

AGRADECIMIENTOS

Al director de este proyecto, Gabriel Felipe Aguilera Gálvez que gracias a su dedicación, esfuerzo, y sobre todo sus enseñanzas

Al Docente German Camilo Quintana Marín Co-director de este proyecto por darle otra perspectiva y otro camino al trabajo realizado.

Al Docente Hader Humberto Álzate Gil por sus enseñanzas y consejos durante la carrera.

Al Docente Andrés Tabares por su apoyo en conocimientos de CFD

A Paula Andrea Arismendy Barrera que a pesar de los momentos difícil nunca dudo en mí y siempre me ha apoyado.

A Sumicol S.A

A Oscar Hernán Vasco Por su apoyo durante la carrera.

A Wilson Cadavid operario del Centro Industrial de la Unión por su ayuda en la realización experimental de este proyecto.

A todas aquellas personas, que me ayudaron y me apoyaron en el transcurso de mi carrera.

Y por último y más importante a mis padres por regalarme la oportunidad de estudiar y sobre todo ayudarme a crecer como persona.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	13
1. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	15
1.1 HIDROCICLONES	15
1.1.1. APLICACIONES	16
1.1.1.1 Espesado	18
1.1.1.2 Deslamado	18
1.1.1.3 Refinado.....	18
1.1.1.4 Circuitos Cerrados de Molienda	18
1.1.1.5 Clasificación Selectiva.....	19
1.1.1.6 Recuperación de Sólidos	19
1.1.1.7 Fraccionamiento.....	20
1.1.1.8 Pre-Concentración	20
1.1.1.9 Recuperación de Líquido.	20
1.1.1.10 Lavado Contracorriente	20
1.1.2. CLASIFICACIÓN	21
1.1.2.1. Hidrociclón Simple.....	21
1.1.2.2. Arreglo Multiciclón	22
1.1.3. DISEÑO.....	23
1.1.3.1. Variables Geométricas	24
1.1.3.2. Variables Operacionales	25
1.1.4. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO	27
1.1.4.1. Patrones de flujo en hidrociclones.....	28
1.1.4.2. Caída de presión.....	32
1.1.4.3. Eficiencia en un Hidrociclón	34

1.2. DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONALES.....	36
1.2.1. VENTAJAS Y LIMITACIONES DE MÉTODOS NUMÉRICOS.....	37
1.2.2. ELEMENTOS BÁSICOS DE UN MÉTODO CON SOLUCIÓN NUMÉRICA	38
1.2.3. CONDICIONES INICIALES Y CONDICIONES DE FRONTERA.....	39
1.2.4. METODOS DE DISCRETIZACIÓN.	40
1.2.4.1. Métodos de Diferencias Finitas	40
1.2.4.2. Métodos de Volúmenes Finitos	41
1.2.5. PROGRAMAS COMERCIALES PARA EL USO DE C.F.D	42
1.2.6. MODELAMIENTO MATEMÁTICO Y ECUACIONES GOBERNANTES	44
1.2.7. MODELOS DE TURBULENCIA	45
1.2.7.1. Modelo de Turbulencia κ - ε	46
1.2.7.2. Modelo de Turbulencia Reynolds Stress Model	46
1.2.8. SIMULACIÓN CON PARTÍCULAS.....	49
1.2.8.1. Modelo Lagrangiano.....	49
1.2.8.2. Modelo Euleriano	50
1.2.9. ESTUDIOS REALIZADOS PREVIAMENTE CON C.F.D EN HIDROCICLONES	50
2. OBJETIVOS.....	56
2.1. OBJETIVO GENERAL	56
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	56
3. METODOLOGÍA.....	57
3.1. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	57
3.1.1. OBTENCIÓN DE LA SUSPENSIÓN A TRABAJAR	57

3.1.2.	MEDICIÓN DE LA DENSIDAD.....	58
3.1.3.	MEDICIÓN DEL CAUDAL	58
3.1.4.	MEDICIÓN PARA LA DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTICULAS (DTP) 58	
3.2.	DESARROLLO DE LA SIMULACIÓN.....	59
3.2.1.	CONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA.....	60
3.2.2.	PROCESO DE MALLADO (MESHING).	60
3.2.3.	CONDICIONES DE FRONTERA.....	61
3.2.4.	SIMULACIÓN MEDIANTE FLUENT	61
3.2.4.1.	Simulación con Agua.....	61
3.2.4.2.	Simulación Agua –Partículas	61
3.3.	VALIDACIÓN DEL MÉTODO	62
4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	63
4.1.	ESTUDIO NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL	63
4.1.1.	ESTUDIO DE LA FASE CONTINUA	67
4.1.1.1.	Campo de Presiones.....	67
4.1.1.2.	Velocidad Tangencial.....	70
4.1.1.3.	Velocidad axial.....	72
4.1.2.	ESTUDIO FASE CONTINUA-SOLIDOS.	74
4.1.2.1.	Simulación mediante Ansys-Fluent®	77
4.1.3.	VALIDACIÓN DEL MODELO	79
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	80
	BIBLIOGRAFÍA.....	82

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Ventajas y desventajas	15
Tabla 2. Operaciones de hidrociclones	17
Tabla 3. Dimensiones de un hidrociclón.	25
Tabla 4. Concentraciones de Sólidos utilizadas.....	58
Tabla 5. Resultados Obtenidos en la experimentación.....	63
Tabla 6. Valores corregidos	64
Tabla 7. Optimización de la malla	64
Tabla 8. Diámetro del núcleo de aire	70
Tabla 9. Eficiencia del hidrociclón.....	77
Tabla 10. Reparto de líquido en el sobre flujo y bajo flujo.	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representación gráfica de un hidrociclón	17
Figura 2. Circuitos cerrados de molienda.	19
Figura 3. Arreglos multiciclón.....	23
Figura 4. Dimensiones de un hidrociclón	25
Figura 5. Funcionamiento de un hidrociclón	28
Figura 6. Distribución de la velocidad tangencial en un hidrociclón.	29
Figura 7. Distribución de la presión estática y total en un hidrociclón.....	30
Figura 8. Distribución de la velocidad axial.....	31
Figura 9. Distribución de las partículas en un hidrociclón.	32
Figura 10. Curva de eficiencia de un Hidrociclón.....	35
Figura 11. Diámetros de Corte experimentales y simulados a diferentes diámetros de boquilla a 83kPa.	52
Figura 12. Comparación de la velocidad axial de dos hidrociclones 50mm y 76 mm respectivamente.....	53
Figura 13. Contorno de presión a diferentes con diferentes alimentaciones.	55
Figura 14. Diagrama de flujo de proceso.	59
Figura 15. Geometría Del Hidrociclón.....	60
Figura 16. Optimización de la malla.....	65
Figura 17. Esquema QUICK en estado estacionario.	66
Figura 18. Esquema QUICK en estado transitorio.	67
Figura 19. Contorno de la presión total.....	68
Figura 20. Contorno de la presión estática	69
Figura 21. Perfil de presiones	70
Figura 22. Contorno de la Velocidad Tangencial.	71
Figura 23. Distribución radial de la velocidad tangencial	72
Figura 24. Contorno de la velocidad axial.....	73
Figura 25. Distribución radial de la velocidad axial	74
Figura 26. Análisis DTP laser alimentación HC 40mm	75
Figura 27. Análisis DTP laser abajo) sobre flujo y arriba) bajo flujo.....	76

Figura 28. Trayectoria de las partículas78
Figura 29. Contorno central Arriba y Contorno del equipo Abajo.....78

RESUMEN

El hidrociclón es uno de los equipos de clasificación más utilizados en la industria y en particular en el procesamiento de minerales. Posiblemente su principal característica es la de ser un equipo de separación de tamaños hidrodinámicos, lo cual le otorga una alta capacidad de producción, y diferentes niveles de eficiencia según sea su configuración geométrica, operacional y del tipo de material a clasificar. Sin embargo, y a pesar de tener múltiples aplicaciones, son pocos los estudios finalizados con éxito en cuanto a la modelación y simulación de sus principios hidrodinámicos, dado a que el comportamiento del flujo en su interior es bastante complejo. La mayoría de los modelos existentes son de carácter empírico, y usualmente no son aplicables a todos los casos de minerales.

En el presente trabajo se presenta la validación entre datos experimentales y datos simulados para un hidrociclón de 40 mm, a concentraciones bajas. La experimentación se realizó en el centro industrial de la Unión donde se calculó el caudal, la densidad y la distribución del tamaño de partículas (DTP) y la simulación utiliza el Software comercial ANSYS FLUENT®, que utiliza el método de volúmenes finitos. Para el desarrollo del modelo se utiliza el modelo de esfuerzos de Reynolds (RSM) como modelo para evaluar la turbulencia, además del modelo estocástico de Lagrange o modelo de fase discreta (DPM) como modelo para la interacción de las partículas con la fase continua, la simulación resulto ser un método eficaz para analizar la distribución de flujo, de presión y velocidades al interior de un hidrociclón. Los resultados obtenidos están muy cerca a los datos experimentales por lo que la aproximación realizada tiene alta correlación con el proceso real lo que le otorga un alto grado de validez en la práctica.

PALABRAS CLAVE: HIDROCICLÓN; DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONALES; MODELOS DE TURBULENCIA.

INTRODUCCIÓN

Los hidrociclones son una de las unidades de procesamiento más versátiles usadas en el manejo de sólidos, este equipo fue introducido a la industria por primera vez como un equipo de proceso en 1891 y la primera patente sobre su uso fue concedido en los Estados Unidos. M. G. Driessen (Murthy & Bhaskar, 2012) fue el que reportó por primera vez la aplicación de un hidrociclón para la industria minera en el año 1939, además se reportaron diversas aplicaciones en otras industrias que lo usan con frecuencia para la clasificación de sólidos como son: la química, petrolera, de pulpa y papel y de alimentos. Debido a su eficiencia para separar, la facilidad en la instalación, el hecho de no tener partes móviles, tener bajos costos de mantenimiento y ahorro en el espacio hacen de este equipo un equipo eficiente para la clasificación de sólidos (El, Bouso, & Procesos, 2001; Murthy & Bhaskar, 2012) sin embargo, en este tipo de equipos de separación se pueden optimizar parámetros de rendimiento y obtener una mayor relación costo-beneficio que mejoran condiciones de carácter operacional lo cual se puede obtener con el entendimiento de la dinámica del proceso (Bahamón García, Quintana Marin, & Alzate Gil, 2009).

Entender el funcionamiento de la dinámica del proceso se ve obstaculizado por la complejidad del flujo que hay dentro de los hidrociclones. Existen varias correlaciones empíricas basadas en parámetros geométricos y operacionales, que predicen el rendimiento, pero estas proporcionan solo información física de la hidrodinámica del flujo limitadas y en un rango determinado (Chen, Zydek, & Parma, 2000; Karimi, Akdogan, Dellimore, & Bradshaw, 2012). Para intentar llegar a la comprensión de la compleja interacción tridimensional Fluido-Sólido al interior de los hidrociclones se han utilizado métodos Instrumentales para determinar la velocidad del flujo del líquido utilizando laser doppler velocimetry (LDV), los cuales son estudios complejos, costosos y limitados a casos particulares. Por tal

motivo se ha recurrido con éxito al empleo de simulaciones basadas en dinámica de fluidos computacionales (C.F.D). La clave de la metodología de solución para los modelos de C.F.D consiste en subdividir el dominio en un gran número de volúmenes de control y convertir las ecuaciones diferenciales parciales por integración en sus equivalentes algebraicos(Bhaskar, Murthy, Raju, et al., 2007; Nowakowski, Cullivan, Williams, & Dyakowsky, 2004).

Adicionalmente, en los últimos años se ha demostrado que estas técnicas de simulación ofrecen una valiosa predicción para la mezcla Sólido-líquido en los hidrociclones ya que proporciona una solución para el campo de flujo interno dentro de este (Delgadillo & Rajamani, 2007; B. Wang & Yu, 2006; L. Wang et al., 2009). Hasta el momento la mayoría de los estudios referenciados tienen como deficiencia el efecto del núcleo de aire, que con frecuencia no es tomado en cuenta, por lo que se limita la aplicación de C.F.D como modelo de aplicación real en la industria(Olson & Van Ommen, 2004).

En este trabajo se estudia con C.F.D la hidrodinámica de un hidrociclón de 40 mm trabajando en la clasificación de caolín, y se compara con resultados experimentales. La aplicación de C.F.D se llevó a cabo con el Software Ansys Fluent 12.1 ®, que resuelve ecuaciones diferenciales parciales.

1. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

1.1 HIDROCICLONES

Un hidrociclón es el equipo de colección de un material en suspensión que se emplea con mayor frecuencia debido a su bajo costo de operación, su construcción simple, tener condiciones de trabajar a concentraciones de sólidos altas además de ser bastante eficientes en el momento de realizar la separación, En la Tabla 1 se presentan algunas ventajas y desventajas de los hidrociclones.

Tabla 1. Ventajas y desventajas

Ventajas	Desventajas
Bajos costos de capital	No se pueden materiales pegajosos aglomerantes.
Ausencia de partes móviles , por lo tanto, Pocos requerimientos de mantenimiento y costos de operación bajos	Las unidades de alta eficiencia pueden tener altas caídas de presión.
Caída de Presión baja	Dependiendo del material del hidrociclón no maneja partículas abrasivas a altas velocidades de operación.
Requerimiento de espacio pequeño	

Fuente: (López Becerra & Trujillo Vera, 2004)

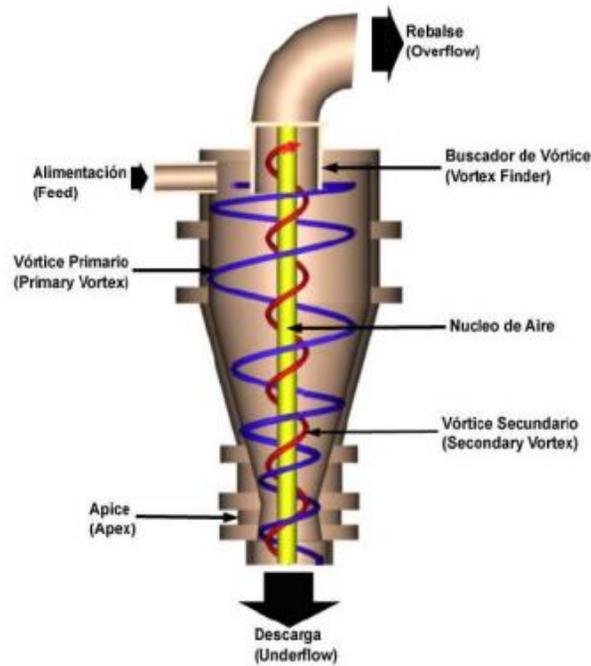
Este tipo de equipos se conoce como de flujo reverso, y consiste de un cuerpo cilíndrico, una alimentación tangencial (normalmente con una geometría rectangular) a través de la cual se alimenta una suspensión que ingresa al equipo y en medio de la parte cilíndrica se encuentra un tubo ubicado de manera axial (Conocido como Vortex Finder) la cual es la salida de los sólidos finos, una base cónica y un deposito en la parte inferior en la parte inferior de la base es donde se almacenan los sólidos gruesos (Bahamón García et al., 2009), cuando la

suspensión entra al hidrociclón de forma tangencial bajo una presión media- alta se traduce en una rotación fuerte debido a la diferencia de densidades entre las fases, la mayoría de las descargas pesadas son descargadas en el bajo flujo y la fase liviana en el sobre flujo. Este tipo de fenómenos ocurren debido a 3 fuerzas sobre las partículas las cuales son la centrífuga, la gravitacional y la de arrastre, cuando la fuerza de arrastre predomina sobre las partículas estas se descargan en el bajo flujo y caen sobre las paredes del cuerpo del hidrociclón, cuando la fuerza centrífuga predomina estas se descargan en el sobre flujo por medio del núcleo de aire que hay axialmente entre las dos salidas y la fuerza gravitacional es despreciable (Zhang, You, & Niu, 2011) , en la Figura 1 se muestra un hidrociclón y su funcionamiento.

1.1.1. APLICACIONES

Los hidrociclones se han desempeñado en muchas industrias como son la minería, carbón, alimentos, pulpa y papel además de ser utilizado posterior a otros procesos como son trituración la molienda y calcinación (Andersson, 2010). Por ejemplo en la industria minera ocurren ciertos tipos de operaciones que pueden realizar los hidrociclones, esto ocurre dependiendo de las variables de operación, tipo de suspensión, concentración de sólidos y tamaño del hidrociclón, estos fenómenos se muestran en la Tabla 2.

Figura 1. Representación gráfica de un hidrociclón



Fuente: (Chica Osorio & Bustamante Rua, 2009)

Tabla 2. Operaciones de hidrociclones

Aplicaciones
Espesado, clarificación
Deslamado (clarificación parcial)
Desarenado, refinado, eliminación del sobre tamaño
Circuitos cerrados de molienda
Clasificación selectiva (separación)
Recuperación de sólidos (rechazo)
Fraccionamiento, clasificación
Pre-concentración (separación)
Recuperación de líquidos (clarificación)
Lavado en contra corriente

Fuente: (Trawinski & Aragon Bouso, 2013)

1.1.1.1 Espesado

Esta denominación se refiere a la eliminación de la mayor cantidad de agua para producir un escurrido de los sólidos. El verdadero espesado apunta a la recuperación de todos los sólidos.

1.1.1.2 Deslamado

En esta operación el objetivo es eliminar las partículas finas en el flujo superior. Esto es a menudo necesario para mejorar el producto para procesos posteriores, tales como flotación, separación magnética o filtración. En algunas plantas químicas los hidrociclones se usan frecuentemente para eliminar el agua después de un proceso de cristalización; los cristales finos son evacuados en el flujo superior siendo reciclados en el cristalizador donde actúan como núcleos para la formación de un nuevo cristal.

1.1.1.3 Refinado

En el refinado, el flujo superior es el producto final y pequeñas cantidades de partículas superiores al tamaño deseado son evacuadas con el flujo inferior.

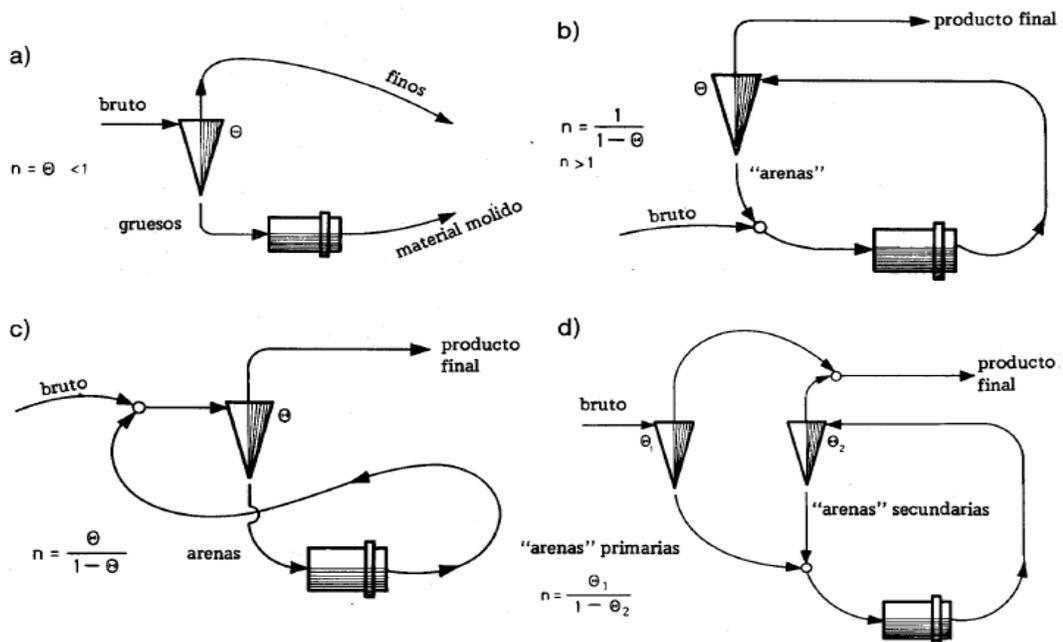
1.1.1.4 Circuitos Cerrados de Molienda

Los hidrociclones de deslamado y refinado se usan a menudo juntos con procesos de molienda, en la Figura 2 se muestra varios ejemplos de cómo es el acople de los hidrociclones con circuitos cerrados de molienda.

1.1.1.5 Clasificación Selectiva

Esto ocurre cuando en la suspensión es heterogénea y hay más de un producto principal, se utiliza mucho en la separación de caolín de la materia prima. Cuando el producto principal es el caolín este es refinado en el flujo superior y el subproducto es el cuarzo grueso que sale por el flujo inferior.

Figura 2. Circuitos cerrados de molienda.



Fuente: (Trawinski & Aragon Bouso, 2013)

1.1.1.6 Recuperación de Sólidos

Después de que un producto sale de otros procesos como son: tornillos lavadores de arena, escurridores, cribas y escurridoras centrifugas, llevan consigo partículas finas que deben ser recuperados, acá el hidrociclón se convierte en una aplicación atractiva para este proceso.

1.1.1.7 Fraccionamiento

Otra aplicación es la clasificación en dos fracciones para un tratamiento posterior a diferentes procesos, un ejemplo típico es el fraccionado de un concentrado de hierro para alimentación sinter (gruesos) y pellet (finos).

1.1.1.8 Pre-Concentración

Si hay grandes diferencias en el peso específico de componentes minerales la alimentación puede ser enriquecido en hidrociclones, este es un proceso de concentración por gravedad o concentración centrífuga y depende de la geometría del hidrociclón donde el más utilizado es uno de fondo plano.

1.1.1.9 Recuperación de Líquido.

Si las aguas de procesos o soluciones madres deben reciclarse, con hidrociclones puede obtenerse a menudo con una clarificación satisfactoria, por ejemplo en las plantas de lavado de carbón este es uno de los problemas más importantes, especialmente cuando los esperadores existentes están sobrecargados, en este caso los hidrociclones se instalan en paralelo para mantener el nivel de turbiedad del agua.

1.1.1.10 Lavado Contracorriente

La eliminación de ácidos adherentes, lejías o partículas finas de un producto en partículas, es realizada por diluciones o espesados periódicos en múltiples hidrociclones (Trawinski & Aragon Bouso, 2013).

1.1.2. CLASIFICACIÓN

En forma general, los hidrociclones se clasifican en: hidrociclón simple y multiciclón. Los simples poseen una sola unidad, son de gran diámetro y para aumentar su eficiencia de colección o su capacidad, se realizan arreglos en serie, paralelo, o se instala un recirculación; por el contrario, los multiciclones son la unión en paralelo de varias unidades de menor diámetro en una cámara rectangular, logrando así mayores eficiencias (López Becerra & Trujillo Vera, 2004).

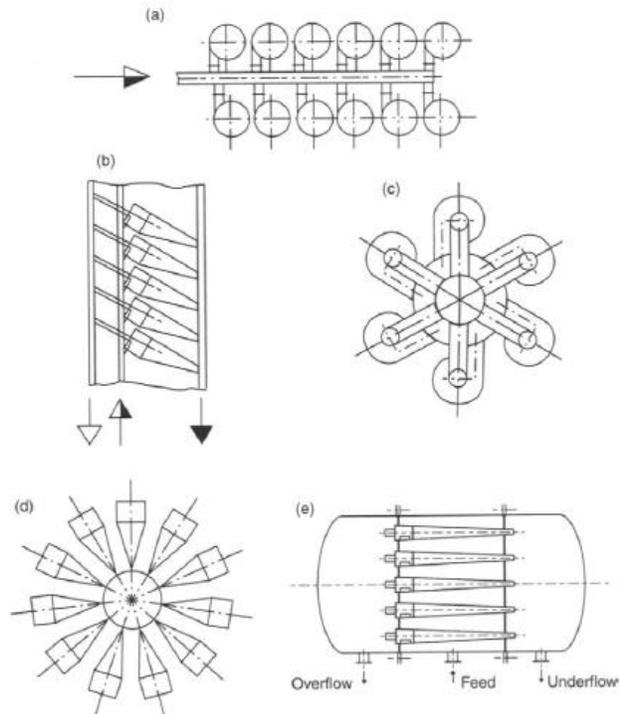
1.1.2.1. Hidrociclón Simple

Normalmente se utilizan este tipo de hidrociclones para realizar diámetros de corte entre 150 μm , los más utilizados son los de fondo plano, los cuales El lecho “fluido” creado en la zona inferior de los ciclones de cono ancho, no es un lecho estacionario, sino que está dotado de un movimiento de convención alrededor del núcleo central, lo cual favorece la reclasificación de partículas, ligeras o de pequeño tamaño mal clasificadas, que en su movimiento constante son en algún momento arrastradas por el torbellino interior o principal, siendo finalmente evacuadas por el rebose superior. Este principio no puede ser aprovechado en un ciclón cónico, porque un aumento de la altura del lecho provocaría rápidamente la obstrucción de la boquilla de descarga, debido a la fricción de las partículas con la pared cónica (efecto silo), pero si puede ser desarrollado alejando la pared del orificio de descarga, para lo cual se elimina la zona cónica prolongando al mismo tiempo la zona cilíndrica y “cerrando” el ciclón con un fondo horizontal o casi, con un ángulo comprendido entre 160° - 180° . El lecho fluido creado en el fono del ciclón actúa como un “colchón”, amortiguando las variaciones en la alimentación, tanto en caudal como en concentración de sólidos(Bouso, 1999).

1.1.2.2. Arreglo Multiciclón

Para hidrociclones con menor diámetro dan para la misma caída de presión una mayor eficiencia. En procesos de clarificación o clasificación a bajos tamaños de corte son requeridos, bancos de hidrociclones con diámetro pequeño son usados en paralelo para tratar caudales elevados esto se puede hacer ya sea por una tubería colectora que conecta varios hidrociclones individuales en paralelo, o cuando un gran número de pequeñas unidades se va utilizar, encerrándolos en una caja única con cámaras de descarga comunes, tales unidades puede ser unidas entre ellas en paralelo para producir columnas capaces de tratar flujos muy altos. Los arreglos disponibles pueden ser divididos en cuatro tipos básicos como se muestran en la Figura 3, con pequeñas variaciones dentro de cada tipo, los primeros dos tipos a) y b), son arreglos lineales mientras que los otros dos, c) y d), son circulares, estos arreglos prestan una mejor distribución uniforme de la alimentación debido a que cada unidad es idéntica de la tubería y se alimenta en una cabecera central, c) es el arreglo más común que se presentan en la industria aquí los hidrociclones están en forma vertical o ligeramente inclinados, para hidrociclones con tecnología muy elevada y para tratar cierto tipo de materiales y requieren una inercia en su material, es común ver hidrociclones hechos altos grados de acero inoxidable montados en tubos como se muestra en el numeral e) de la Figura 3 (Svarovsky, 1992).

Figura 3. Arreglos multiciclón



Fuente: (Svarovsky, 1992)

1.1.3. DISEÑO

De un hidrociclón cabe destacar que la entrada de alimentación es tangencial a la parte cilíndrica, la geometría de la sección de entrada puede variar, siendo por lo general circular, ovalada o rectangular obteniéndose distintos perfiles de velocidad de fluido de cada geometría, otra característica importante de diseño tiene que ver con el recubrimiento interno que poseen tanto el cilindro de alimentación como las secciones cónicas posteriores, el cual consiste con una capa de goma u otros revestimientos sintéticos (poliuretano), esto debido a la naturaleza abrasiva de los fluidos que se procesan.

1.1.3.1. Variables Geométricas

Con respecto a las dimensiones en el diseño y construcción de estos dispositivos, es necesario destacar que estas son de origen empírico, extendiendo diferencias en las dimensiones si se considera el hidrociclón como un dispositivo de clasificación o uno con el propósito de disminuir la cantidad de agua en una mezcla. Las relaciones entre estas dimensiones están mostradas en la Figura 4, y las dimensiones se muestran en la Tabla 3. (Yan & Gupta, 2006).

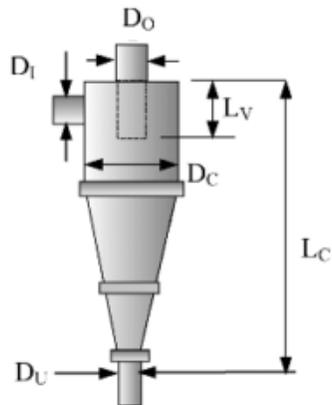
DIÁMETRO DEL HIDROCICLÓN: Es la variable geométrica más importante, pues gobierna el tamaño de la descarga, debido a las fuerzas centrifugas generadas al interior del hidrociclón.

DIÁMETRO Y FORMA DE ENTRADA: Determina la velocidad de entrada, la cual gobierna las características de la velocidad tangencial en función de radio. La geometría de la alimentación, también es importante. En la mayoría de las aplicaciones de hidrociclón convencionales la entrada es tangencial lo que ayuda a “extender” el flujo, pero también son comunes las entradas envolventes que minimizan la turbulencia y reducen el desgaste.

DIÁMETRO Y LONGITUD DEL VORTEX FINDER: Para un hidrociclón de diámetro fijo, el diámetro del vortex finder afecta el d_{50} de manera proporcional a DO , el “Vortex finder” debe extenderse por debajo de la entrada de la alimentación evitando enviar los directamente al rebase.

LONGITUD DE LA SECCIÓN CILÍNDRICA Y ÁNGULO DE CONO: Ambas afectan el tiempo de residencia de las partículas en el hidrociclón. Un incremento en la longitud de la sección cilíndrica, permite una clasificación más fina. Para un diámetro de hidrociclón fijo, una disminución en el ángulo de cono incrementa el tiempo de residencia, disminuyendo el d_{50} y la claridad de la separación disminuye. (Chica Osorio & Bustamante Rúa, 2009)

Figura 4. Dimensiones de un hidrociclón



Fuente: (Yan & Gupta, 2006)

Tabla 3. Dimensiones de un hidrociclón.

Dimensión un Hidrociclón clasificador	
Diámetro de entrada	$D_1 = D_c / 7$
Diámetro del Vortex Finder (35-40% de D_c)	$D_0 = D_c / 5$
Diámetro del Bajo Flujo	$D_c / 15$
Longitud del Vortex Finder	$L_v = 0.4 D_c$
Longitud del Hidrociclón	$3 D_c$
Angulo de cono	12° para $D_c < 250$ mm, 20° para $D_c > 250$ mm

Fuente: (Yan & Gupta, 2006)

1.1.3.2. Variables Operacionales

PRESIÓN DE ENTRADA: Un incremento en la velocidad de la entrada aumenta el efecto de la fuerza centrífuga. Partículas más finas son conducidas a la descarga y el d_{50} disminuido, pero el cambio debe ser grande para ser significativo, adicionalmente, un incremento en el caudal Q de entrada incrementa la presión a la entrada, debido a que $Q \propto (\Delta P)^{0.5}$. Incrementa en la presión de entrada donde

se produce un incremento en la fracción de finos recuperados en la descarga (Chica Osorio & Bustamante Rúa, 2009).

DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA DE ALIMENTACIÓN DTP: Una alimentación gruesa con contenido de material fino puede incrementar el tamaño de separación d_{50} . La recuperación de agua en la descarga también está influenciada por la DTP de los sólidos alimentados. La forma de las partículas en la alimentación también es un factor importante en la separación, debido a su influencia tanto en el empaquetamiento de los sólidos en la suspensión, como en la dirección de las partículas. En el caso de minerales laminares, por ejemplo, estos tienden a aparecer en el rebalse aunque sean relativamente gruesos. La concentración de sólidos y la distribución de tamaños en el alimento, son los parámetros que más afectan el movimiento de las partículas al interior del hidrociclón y por lo tanto tiene un efecto mayor sobre la eficiencia de la clasificación.

FRACCIÓN VOLUMÉTRICA DE SÓLIDOS Y VISCOSIDAD DE LA SUSPENSIÓN: Un cambio en el porcentaje de sólidos alimentados, genera un cambio en la viscosidad de la suspensión, lo cual afecta el tamaño de corte, la claridad de la separación, el tipo de descarga y la capacidad del equipo, de otro lado, el movimiento tangencial produce fuerzas intensas de cizalladura dentro del hidrociclón. En el caso de suspensiones pseudoplásticas, la viscosidad efectiva dentro del hidrociclón depende de la tasa de del esfuerzo cortante como función de entrada si esta se incrementa, la viscosidad decrece sustancialmente. A altas presiones de operación genera un mayor esfuerzo de cizalladura dentro del hidrociclón pues se incrementa la velocidad tangencial y por lo tanto la tasa de cizalladura, se aumenta y considerado las características de la pulpa se puede favorecer la clasificación, aunque aparece alta turbulencia y el “efecto pared”, que desfavorecen el proceso de clasificación y separación del hidrociclón, adicionalmente, la recuperación de agua se incrementa cuando se incrementa la

viscosidad de la alimentación ya sea debido a cambios de concentración (Chica Osorio & Bustamante Rúa, 2009).

1.1.4. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

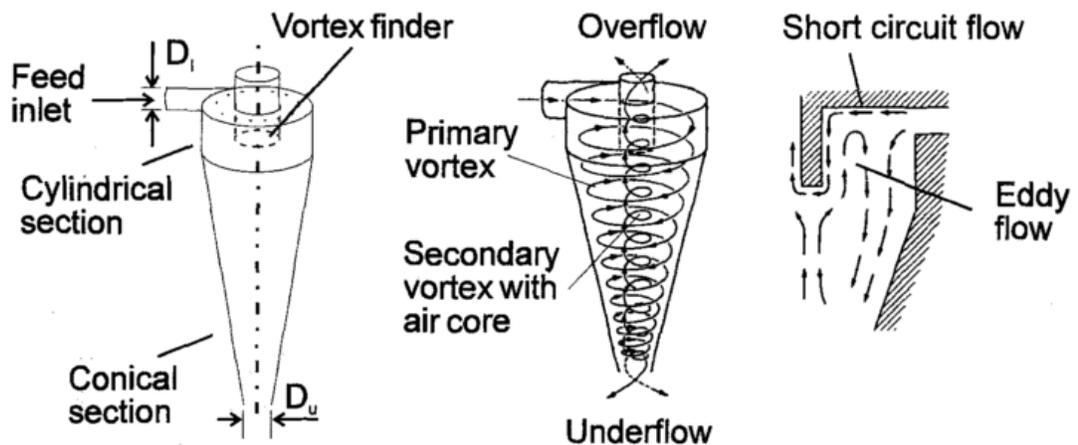
El fenómeno de la sedimentación de partículas se da en la naturaleza en cualquier lago o estanque donde se alimenta agua turbia o material en suspensión, las partículas se posan en el fondo (bajo flujo), formando un sedimento que posee un grado de concentración alta respecto a la de la alimentación, mientras que el agua sobrenadante es clarificada y eliminada como flujo superior (sobre flujo), los mismos fenómenos ocurren en una suspensión en rotación, donde las fuerzas centrífugas son mucho mayores produciendo efectos de separación por el aumento del grado de sedimentación (Trawinski & Aragon Bouso, 2013).

Por ejemplo un hidrociclón opera debido a una alimentación tangencial ocasionada por una bomba centrífuga aquí se reemplaza la fuerza gravitacional por una fuerza centrífuga en el interior del equipo, la sección transversal de la tubería de entrada es generalmente circular, ovalada o rectangular; cada uno de los cuales proporcionan un perfil de velocidad diferente dentro de la cámara de alimentación y el cono del ciclón (Nowakowski & Doby, 2008; Yan & Gupta, 2006).

El tipo de fluido que utiliza es una suspensión Líquido – Sólido o una mezcla de líquidos, la suspensión de alimentación genera un torbellino a lo largo de la superficie cilíndrica y cónica, dirigiéndose al exterior a través del vértice cónico. Al ser este estrecho, solamente una parte de las corrientes es evacuada como flujo interior (bajo flujo), transportando las partículas gruesas, la mayoría del líquido que han sido limpiados por la sedimentación de los sólidos en el torbellino primario contienen partículas finas sobre él y es forzado a abandonar el ciclón a través del flujo superior (sobre flujo) formando un torbellino secundario ascendente alrededor al rededor del núcleo de la carcasa. En el interior del núcleo se crea una depresión, que recoge todo el aire disuelto que ha sido transportado como

burbujas o disuelto en el agua de alimentación, debido al incremento de la velocidad tangencial en el torbellino secundario, las altas fuerzas centrífugas generadas traen consigo una eficiente separación. Las partículas finas separadas sedimentan radialmente y se unen al torbellino primario; la mayoría de estas partículas son evacuadas finalmente a través de la boquilla formada por el vértice del cono (Trawinski & Aragon Bouso, 2013), en la Figura 5 se muestra el funcionamiento de un hidrociclón.

Figura 5. Funcionamiento de un hidrociclón



Fuente: (Rushton, Ward, & Holdich, 1996)

1.1.4.1. Patrones de flujo en hidrociclones.

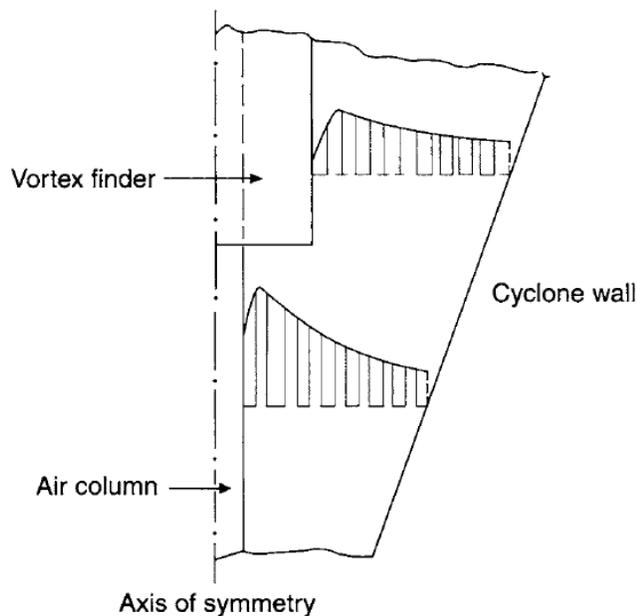
Los patrones de flujo en un hidrociclón tienen una simetría circular con la excepción de la región en la que se alimenta tangencialmente la suspensión. La velocidad del flujo en cualquier punto dentro del hidrociclón este puede estar dentro de tres componentes: la velocidad tangencial v_t , la velocidad radial v_r y la velocidad axial v_a , y esos componentes pueden ser estudiados por separado (Svarovsky, 1992)

VELOCIDAD TANGENCIAL: En niveles al borde del vortex finder, la velocidad tangencial v_t incrementa considerablemente mientras va decreciendo el radio hasta un radio dado que es más pequeño que la salida del radio del vortex finder esto puede ser descrito con la siguiente relación:

$$v_t r^n = cte \quad \text{Donde} \quad n \quad 0.6 \leq n \leq 0.9 \quad (1)$$

Como el radio se incrementa aún más, la velocidad tangencial decrece y es proporcional a r , esta relación se mantiene hasta el núcleo de aire (que normalmente se forma en la descarga debido a la presión atmosférica) en niveles encima del borde del vortex finder, la pausa en el ascenso de la velocidad tangencial ocurre en el radio más grande y puede ser visto en la Figura 6. Aparte este fenómeno y los efectos de la pared la velocidad es independiente de la posición vertical (Svarovsky, 1992).

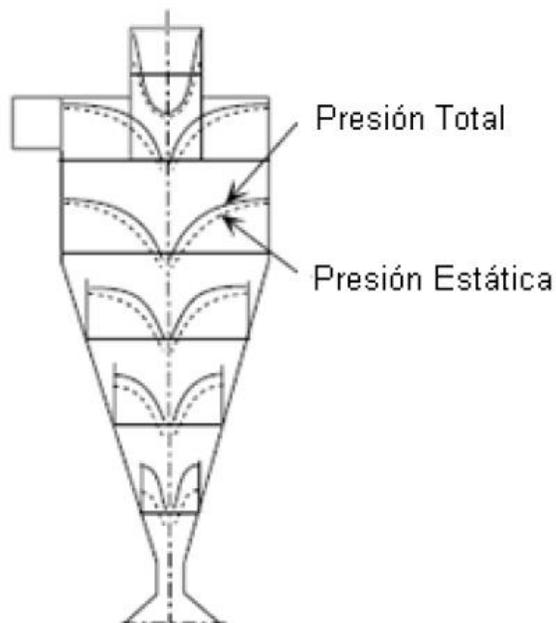
Figura 6. Distribución de la velocidad tangencial en un hidrociclón.



Fuente: (Svarovsky, 1992)

DISTRIBUCIÓN DE LA PRESIÓN: Para que un elemento de fluido en rotación mantenga su equilibrio (posición estática en la dirección r), la presión a mayor r debe exceder aquella a menor r . Por lo tanto, la presión estática debe aumentar monótonicamente con el aumento del radio. En la Figura 6, las curvas de la parte estática, p , con la posición radial; y la parte superior de las curvas, representa la presión total, $p + (1/2)\rho v^2$ (estática y dinámica). Se observa que la presión estática depende en gran medida de la posición radial y, tiene su valor máximo en la pared del cuerpo principal del ciclón. La consecuencia es clara: debido a la fuerza centrífuga, un remolino disminuye la presión hacia el eje de rotación. Esta presión es prácticamente constante en la región externa, casi sin pérdidas por el vórtice, mientras que decrece significativamente en el centro, en la Figura 7 se muestra la distribución de presión estática y total y de cómo se genera el vórtice debido al núcleo de aire en el centro del hidrociclón (Bahamón García et al., 2009).

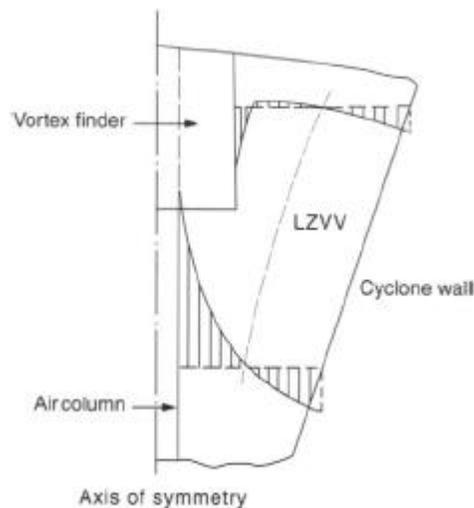
Figura 7. Distribución de la presión estática y total en un hidrociclón.



Fuente: (Bahamón García et al., 2009)

VELOCIDAD AXIAL: La velocidad axial es la componente paralela al eje del equipo y depende únicamente del radio, en radios entre la pared del ciclón y el núcleo de aire, la velocidad axial se vuelve hacia arriba, debido al flujo de la pared que se extiende hacia el interior y en las cercanías de la pared del ciclón esta velocidad tiene una dirección hacia el vortex finder en la Figura 8. Se muestra como hay un fuerte flujo hacia las abajo a lo largo de las paredes exteriores de las partes cilíndricas y cónicas(Svarovsky, 1992).

Figura 8. Distribución de la velocidad axial.

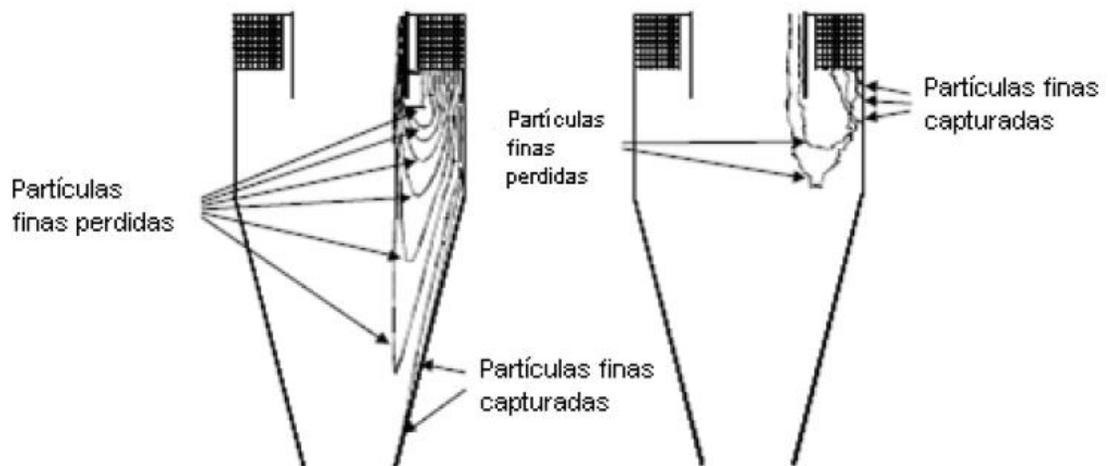


Fuente: (Svarovsky, 1992)

MOVIMIENTO DE PARTICULAS EN SUSPENSIÓN: Las partículas que entran en el espacio de separación del ciclón están sujetas a una fuerza de arrastre dirigida hacia el centro y a una fuerza centrífuga dirigida hacia afuera. El "espacio de separación" se inicia en el punto donde el gas de entrada experimenta flujo rotacional por primera vez y las partículas transportadas a lo largo de este flujo de gas experimentan por primera vez una fuerza centrífuga que actúa hacia el exterior. Este punto de entrada varía con el diseño del ciclón. Independientemente, la fuerza centrífuga es proporcional a la masa de partículas y, por tanto, al diámetro de las partículas al cubo: d_p . La fuerza de arrastre, que se debe a la

corriente del líquido desde el exterior a la parte interior del vórtice, es proporcional a d_p , al menos cuando se aplica la ley de Stokes (lo cual ocurre a menudo en la práctica). Las partículas más grandes, por lo tanto, son las más fáciles de separar. No es fácil estudiar experimentalmente el patrón del flujo de partículas. A fin de dar una impresión del flujo de una partícula a través de un ciclón, aunque el objetivo es centrifugar las partículas a la pared y capturarlas, es interesante examinar las partículas más finas, pues algunas de ellas no se colectan. En la Figura 9 se muestran tamaños de partícula extremadamente finos ($1 \mu m$). Algunas de estas partículas salen por el localizador del vórtice, mientras que aquellas inyectadas cerca de la pared, son capturadas y removidas (Bahamón García et al., 2009; Svarovsky, 1992).

Figura 9. Distribución de las partículas en un hidrociclón.



Fuente: (Bahamón García et al., 2009).

1.1.4.2. Caída de presión.

La caída de presión, se refiere a las sumas de las presiones estáticas y dinámicas que por el movimiento en torbellino y su gradiente de presión, la caída de presión en hidrociclones puede ser debido a:

1. Pérdidas a la entrada.
2. Pérdidas por fricción en el vórtice doble , en el espacio de separación
3. Pérdidas en el localizador del vórtice y en las salidas del hidrociclón.

Las pérdidas de presión en el localizador del vórtice son mayores que las pérdidas a la entrada o en el espacio de separación. Estas pérdidas están dominadas por la disipación viscosa, que es aproximadamente proporcional a la magnitud absoluta de la velocidad tangencial al cuadrado, de modo que cualquier influencia que tiene la tendencia a aumentar la fuerza del vórtice, aumenta las pérdidas y viceversa. Por lo general, tienen un orden de magnitud mayor que las otras dos contribuciones; la única excepción notable son los ciclones altamente cargados de sólidos, donde las pérdidas de pared asociadas a la fuerza de arrastre por fricción pueden tener una contribución significativa en la caída de presión. Las pérdidas en la entrada a menudo son insignificantes en comparación con las demás contribuciones, por lo menos en los ciclones de entrada tangencial. Sin embargo, el mecanismo subyacente no es habitual y la caída de presión disminuye con el coeficiente de fricción en las paredes, concentración de sólidos o volumen del equipo en general.

La explicación de estos efectos desconcertantes es común y reside en el hecho de que no es simplemente la presión normal o “estática”, la que se está perdiendo, disminuyendo o disipando; es la presión “total”, constituida por la presión estática más la energía cinética del vórtice (Cortes & Gil, 2007).

Para la obtención de la caída de presión existen modelos experimentales y empíricos donde algunos modelos empíricos asumen la caída de presión como si fuera la caída presión estática como una función de la dimensión del hidrociclón y generalmente esta es proporcional a la velocidad (Gimbun, Chuah, Fakhru’l-Razi, & Choong, 2005).

1.1.4.3. Eficiencia en un Hidrociclón

El método más común para representar la eficiencia en un hidrociclón es por la una curva de partición, que se refiere a la fracción peso o porcentaje de cada tamaño de partícula en la alimentación que reporta en el sobre flujo o bajo flujo, el punto de corte o tamaño de separación, de los ciclones es definido como el tamaño para que el 50% de las partículas en la alimentación se reportan en el bajo flujo. Este punto de la curva puede ser expresado tomando los puntos en que el 75% y el 25% de las partículas alimentadas se reportan en el bajo flujo. Estos son los tamaños d_{75} y d_{25} respectivamente. La eficiencia de separación, o así llamado imperfección “I” está dado por:

$$I = \frac{d_{75} - d_{25}}{d_{50}} \quad (2)$$

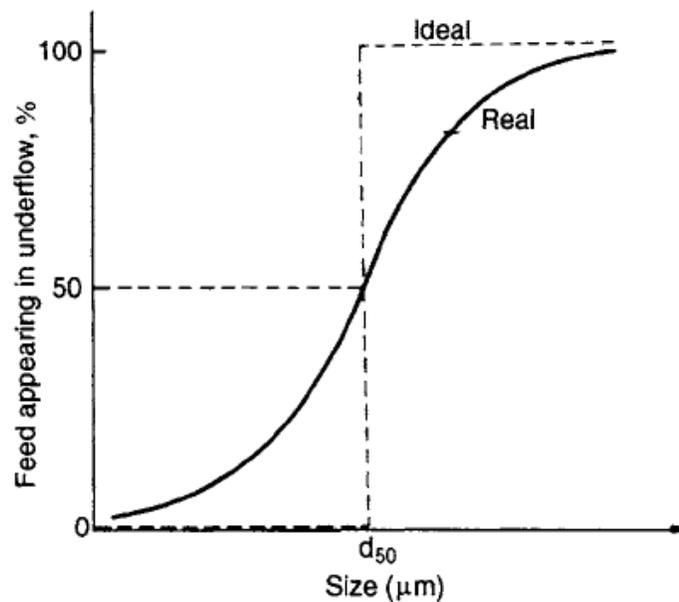
Muchos modelos matemáticas de hidrociclones incluyen el termino d_{50} corregido tomado desde la curva de clasificación (Napier-Mun & Wills, 1993).

Puesto que un hidrociclón por lo general recoge diferentes tamaños de partículas que poseen una amplia gama de tamaños, es común trabajar con diferentes eficiencias, cada una definida por un estrecho intervalo de tamaños de partículas, imaginando intervalos indefinidamente pequeños, se obtiene una función $\eta(dp)$ que puede ser expresado como una función o un grado de eficiencia del hidrociclón para los tamaños de partículas (Hoffman et al) dan una relación matemática:

$$\eta(dp) = \int_0^{\infty} f(dp)\eta(dp)d(dp) \quad (3)$$

Donde $f(dp)$ es la distribución del tamaño de partículas (D.T.P) en la alimentación. La curva de eficiencia se representa en la Figura 10 y puede ser concebida también como la medida real de los efectos del hidrociclón, desde su propia definición, esto depende únicamente de las características del hidrociclón y no de la D.T.P, por el contrario se puede ver en la ecuación 3. Que la eficiencia total depende de la D.T.P y de las características.

Figura 10. Curva de eficiencia de un Hidrociclón.



Fuente: (Napier-Mun & Wills, 1993)

Es también bastante obvio que las partículas gruesas serán separadas mientras que el material muy fino siempre se escapará con el líquido. Si el flujo de fluido y partículas fuera siempre laminar y ordenado, habría un corte abrupto en algún d_p intermedio en que las partículas dejarían de ser separadas y escaparían, o viceversa. Como consecuencia de que un tamaño fijo de partícula se separa con una probabilidad entre cero y uno, $\eta(dp)$ tiene la forma genérica de una función sigmoidea entre los límites $\eta(0) = 0$ y $\eta(\infty) \rightarrow 1$. Por lo tanto, una simple

caracterización se compone del llamado tamaño de corte, d_{p50} , el tamaño para el cual se logra separar la mitad, $\eta(d_{p50})=0.5$. (Cortes & Gil, 2007).

1.2. DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONALES

La Dinámica de Fluidos Computacionales, cuyo acrónimo en inglés es C.F.D., es el análisis de sistemas que involucran mecánica de fluidos, transferencia de calor y los asociados con algunos fenómenos tales como reacciones químicas utilizando simulación por computadora (Versteeg & Malalasekera, 1995); una rama de la mecánica de fluidos que se basa en algoritmos y la teoría de fluidos. A partir de modelos físicos, obtiene modelos numéricos mediante la discretización de las variables, con el objetivo de simular fuerzas incidentes sobre una aeronave, turbulencias, inestabilidad Aero acústica, entre muchos otros problemas físicos, mediante el uso de programas de computador especializados para la solución, ampliando de manera notable el espectro de aplicación de la mecánica de fluidos.

El desarrollo de C.F.D. se fundamenta hacia el año 1910, cuando Richardson presentó ante la Real Sociedad de Londres su trabajo de análisis de esfuerzos en sólidos utilizando el Método de Diferencias Finitas (M.D.F.) desarrollado inicialmente por Euler. A partir de este trabajo y a lo largo del siglo XX, se han realizado diversos aportes al cálculo numérico en general, que facilitaron la creación de los métodos de solución agrupados en: método de diferencias finitas, método de elementos finitos, método de volúmenes finitos, método de elementos de frontera y métodos sin malla. Estos aportes permitieron el progreso de los métodos mencionados al punto de convertirlos en herramientas sumamente viables para tratar problemas en disciplinas como dinámica de fluidos, análisis estructural y transferencia de calor.

La solución analítica del conjunto de ecuaciones diferenciales parciales no lineales que gobiernan el movimiento de un fluido (ecuación de continuidad y ecuaciones de Navier-Stokes) está restringida por los límites matemáticos que a su vez

imponen restricciones para alcanzar la generalización de los métodos, y así lograr el análisis de flujos en geometrías complejas y regímenes altamente no lineales (Bahamón García et al., 2009).

Tal adversidad llevo al desarrollo de métodos numéricos como alternativa de solución, y específicamente, al método de volúmenes finitos como herramienta principal de la dinámica de fluidos computacional.

1.2.1. VENTAJAS Y LIMITACIONES DE MÉTODOS NUMÉRICOS

Hay muchas razones para observar diferencias entre los resultados computados y datos experimentales. Los errores a partir del modelo, la discretización del modelo y las simulaciones para producir soluciones numéricas, traen algunas desventajas como son:

- Las soluciones son hechas a partir de ecuaciones diferenciales.
- Las aproximaciones son hechas en la discretización del modelo.
- La discretización de ecuaciones no lineales son resueltas mediante métodos iterativos.
- La precisión de la máquina es limitada y la aproximación del criterio de convergencia empleado para detener el proceso iterativo también introduce errores en la solución.

Por estas razones las soluciones obtenidas mediante métodos numéricos no va ser siempre exacta, por lo tanto para validar los modelos se debe confiar en los datos experimentales. Los datos experimentales usados para la validación del modelo está representando la realidad, pero las medidas también contienen errores o incertidumbres. Hay errores que tiene que ser tomados in consideración comparándolos con los datos experimentales y las predicciones de los modelos.

Algunas de las ventajas, para utilizar soluciones numéricas consisten en que las soluciones analíticas utilizando un nivel matemático básico, se realizan empleando estrategias que buscan reducir el sistema de ecuaciones no lineal a un grupo de ecuaciones ordinarias, que en algunos casos de geometrías o flujos complejos, no poseen solución. Es por esto que el análisis en dinámica de fluidos mediante desarrollos analíticos está limitado por los métodos matemáticos disponibles para la solución de ecuaciones diferenciales. La experimentación, por otro lado, reporta grandes costos de operación, proporcionales a la precisión y exactitud que se requiera en los resultados y más si se tratan grandes cantidad de flujo o energía. Además del costo que acarrea el equipo experimental y los costos operacionales, se debe garantizar la similitud del modelo con el prototipo, lo cual conlleva a problemas en el momento de realizar el ejercicio experimental. Los modelos de la dinámica de fluidos computacional proveen un medio económico para comprender las complejidades de los flujos y como estos son afectados por cambios en el diseño original o en las condiciones de operación. Además, los métodos numéricos constituyen la alternativa más viable, pero se debe tener mucho cuidado ya que un usuario inexperto de códigos de C.F.D debe tener mucho cuidado ya que hermosos o colores de imágenes o videos causan una gran impresión pero no siempre son los valores reales, por lo tanto los resultados numéricos se deben analizar de manera crítica antes de realizar algún análisis y sacar conclusiones (Jakobsen, 2008).

1.2.2. ELEMENTOS BÁSICOS DE UN MÉTODO CON SOLUCIÓN NUMÉRICA

La base para una solución numérica, es a partir de un modelo matemático, que consiste en un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias, ecuaciones ordinarias parciales o ecuaciones diferencias en su versión integral además de tener unas condiciones de frontera. Las ecuaciones de transporte pueden ser escritas de diferentes formas, dependiendo del sistema coordenado usado, para la

generación de una malla numérica se definen las localizaciones discretas en que las variables son localizadas, la malla numérica normalmente es una representación discreta de dominios geométricos en que el problema es resuelto, la solución se divide en un dominio de números finitos de subdominios llamados elementos o volúmenes. Este tipo de mallas pueden ser estructuradas (para geometrías simples) o mallas no estructuradas (para geometrías complejas).

La selección de un modelo matemático es representada por un método de discretización para aproximar las ecuaciones diferenciales por un sistema de ecuaciones algebraicas para las variables en algún conjunto de localizaciones discretas en espacio y tiempo; y las importantes de ellas son:

- Método de las diferencias finitas (MDF).
- Método de los volúmenes finitos (MVF).

La selección del método de discretización debe estar relacionado en la simplicidad, en la fácil implementación, en la precisión y la eficiencia computacional (tiempo de solución). Un adecuado criterio de convergencia es importante para tener una solución numérica, tanto desde la precisión como la eficiencia, porque esto decide cuando parar un proceso iterativo, códigos C.F.D, un criterio de convergencia es definido por la reducción de los valores normalizados residuales, que parten de valores iniciales hasta un final que normalmente es 10^{-3} (Jakobsen, 2008).

1.2.3. CONDICIONES INICIALES Y CONDICIONES DE FRONTERA

La formulación de condiciones iniciales y de frontera para un problema matemático es, por supuesto básicamente una cuestión de modelamiento, pero los modelos que no son resueltos, con unas condiciones iniciales o de frontera adecuadas,

dará como resultado un sistema no físico o causa una divergencia en el método numérico, por ende la formulación de unas apropiadas condiciones iniciales y de frontera para una ecuación dada y la elección apropiada del método numérico para la solución de ecuaciones diferenciales parciales (Jakobsen, 2008).

1.2.4. METODOS DE DISCRETIZACIÓN.

La selección de los métodos de discretización frecuentemente usados para obtener soluciones en dinámica de fluidos computacionales son el método de diferencias finitas y el método de volúmenes finitos.

1.2.4.1. Métodos de Diferencias Finitas

El método de diferencias finitas es el método más antiguo para la solución de ecuaciones diferenciales parciales presumiblemente introducido por Euler en el siglo 18, este es un método conveniente para el uso de geometrías simples.

El punto de partida para la discretización del método de diferencias finitas es la ecuación de transporte en su forma diferencial, el primer paso para obtener una solución numérica es discretizar el dominio geométrico por una malla numérica. El dominio de interés es remplazado por un conjunto de puntos discretos. En el método de diferencias finitas el mallado normalmente es estructurado, donde cada punto del mallado, la ecuación diferencial es aproximada y reemplazada por derivadas parciales por aproximaciones en valores nodales de las funciones, en mallas escalonadas, las interpolaciones son usadas para obtener valores variables que son requeridos en las localizaciones de otros nodos, el resultado será una ecuación algebraica por cada nodo, en la cual el valor variable en ese y algunos nodos vecinos aparecer como incógnitas.

Las expansiones de las series de Taylor pueden ser usadas para obtener aproximaciones para la primera y segunda derivada de las variables necesarias, esos métodos son usados para obtener valores variables en otros nodos, la expansión de la serie de Taylor poder ser definida por:

$$\psi(z \pm \Delta z) \approx \psi(z) \pm \Delta z \left. \frac{\partial \psi}{\partial z} \right|_z + \frac{(\Delta z)^2}{2!} \left. \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right|_z \pm \dots + \frac{(\Delta z)^k}{k!} \left. \frac{\partial^k \psi}{\partial z^k} \right|_z \quad (4)$$

Mediante las combinaciones lineales de los valores de la función en varios puntos de la malla $z, (z \pm \Delta z), (z \pm 2\Delta z)$ y así sucesivamente podemos obtener valores para las derivadas. Los errores por truncación normalmente son debidos al espaciamiento entre las mallas (Δx) y/o el paso de tiempo (time step) (Δt) .

La principal desventaja del método de volúmenes finitos son la baja precisión, la baja velocidad de convergencia y que la restricción para el uso de geometrías simples (Jakobsen, 2008).

1.2.4.2. Métodos de Volúmenes Finitos

Entre los métodos de volúmenes finitos se agrupan aquellos procedimientos de discretización que solucionan las ecuaciones de conservación desde su formulación integral, aplicándola a volúmenes de control que conforman el dominio. La solución se logra al dividir el dominio en volúmenes relativamente pequeños, sobre los cuales se definen y aplican las integrales, y se aproximan según los valores de las variables dependientes en las fronteras de cada una de las divisiones, que a su vez dependen de los valores de las variables que rigen en el centro de los volúmenes y que serán las incógnitas a encontrar. Así se genera un sistema de ecuaciones lineales con un número de incógnitas igual al número de volúmenes. Se debe aplicar el teorema de la divergencia en las integrales de

volumen, para poder expresar el sistema en términos de flujos constantes que atraviesan las superficies que delimitan cada uno de los volúmenes.

En C.F.D., estas ecuaciones discreteadas se resuelven en una "red de computo". La red de computo consiste en "puntos nodales" en los que se quiere calcular la variable dependiente, que puede ser la temperatura, la concentración de algunos componentes químicos o, como en la ecuaciones de Navier-Stokes, la cantidad de movimiento (Bahamón García et al., 2009).

1.2.5. PROGRAMAS COMERCIALES PARA EL USO DE C.F.D

En el mercado de las herramientas computacionales aplicadas a disciplinas tales como dinámica de fluidos, transferencia de calor y de masa, sobresalen aquellos programas que garantizan la generalidad en su aplicación y precisión en los resultados. Los métodos numéricos avanzados han sido el medio por el cual se ha dado el desarrollo de programas de simulación constituyen hoy en día la base mundial del diseño en industrias relacionadas con aeronáutica, automotores, turbo maquinaria o instrumentos deportivos; y optimización en procesos energéticos tales como refrigeración, generación, sistemas de potencia y transporte de materia. Con tal potencial de aplicabilidad, los productores de programas de simulación, han tenido un apoyo comercial que les ha permitido constituir un mercado de gran movimiento en los países desarrollados. En el área de la dinámica de fluidos y a nivel local, hay varios software sofisticados en la solución de este tipo de problemas por ejemplo:

- ANSYS FLUENT®.
- PHOENICS ®
- STAR-CD ®.

Estos últimos utilizan el método de volúmenes finitos para la discretización de sus ecuaciones y son los que dominan actualmente el mercado, solo un poco de software C.F.D códigos son basados con el método de elementos finitos estos son:

- FIDAP®.
- COMSOL®.
- FEMLAB®.

ANSYS FLUENT® es común en la actividad académica, sin embargo a escala industrial es difícil ver su uso por las causas antes mencionadas. El funcionamiento general de este tipo de programas no varía mucho de uno a otro (Bahamón García et al., 2009; Jakobsen, 2008).

ANSYS FLUENT: Este es un programa con una interfaz amigable al usuario, capaz de resolver una gran variedad de problemas de dinámica de fluidos, transferencia de calor y masa, como flujo incompresible y compresible, laminar y turbulento, fluido newtoniano y no newtoniano, convección natural, radiación, combustión, flujo multifásico, cavitación, evaporación, condensación, entre otros, con aplicaciones en medios porosos, turbo maquinaria, motores de combustión y, en general, interacción entre sólidos y fluidos. Además de esto cuenta con diversos métodos de solución, como el método conservativo de elementos finitos basado en volúmenes de control y el método de volúmenes finitos en esquemas implícitos, con diferentes esquemas de derivación para aproximar el flujo conectivo; y la posibilidad de elegir entre un primer o segundo orden para la discretización en el tiempo. Para desarrollar la solución de los métodos numéricos, se debe construir la geometría media design modeller, para una posterior construcción del mallado, en esta misma interfaz se analizan las condiciones de frontera para solucionarlas mediante Fluent.

Fluent proporciona capacidades de modelado para una amplia gama de problemas de flujos compresibles e incompresibles, laminares y turbulentos. Se pueden realizar análisis en estado estacionario o transitorio. Fluent proporciona modelos Euclidianos de mezcla (V.O.F.), así como Modelos de Fase Discreta (D.P.M.). El D.P.M. realiza cálculos de trayectoria Lagrangiano para fases dispersas (partículas, gotas o burbujas), incluyendo el acoplamiento con la fase continua. Ejemplos de flujos multifásicos incluyen los flujos de canales, aerosoles, sedimentación, separación, y cavitación (Bahamón García et al., 2009).

1.2.6. MODELAMIENTO MATEMÁTICO Y ECUACIONES GOBERNANTES

En C.F.D., estas ecuaciones discretizadas se resuelven en una "red de computo". La red de computo consiste en "puntos nodales" en los que se quiere calcular la variable dependiente, que puede ser la temperatura, la concentración de algunos componentes químicos o, como en la ecuaciones de Navier-Stokes, la cantidad de movimiento. Las ecuaciones que gobiernan el rendimiento de la velocidad en fluidos incompresibles están usualmente descritas por ecuaciones diferenciales parciales: de continuidad y de Navier Stokes, que son el resultado de la cantidad de movimiento y pueden ser escritas con las ecuaciones (5) y (6)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial (\rho \langle u_i \rangle)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \langle u_i \rangle \langle u_j \rangle)}{\partial x_j} = - \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (- \rho \langle u_i' u_j' \rangle) + \rho g_i \quad (6)$$

Los subíndices $i, j=1,2,3$ representan los componentes del sistema coordenado, ρ indica la densidad del fluido, u_i denota la velocidad, p la presión y μ la viscosidad.

Además el término $-\rho\langle u_i' u_j' \rangle$ define el tensor de Reynolds y representa las fluctuaciones turbulentas en el flujo, por lo que existen varios modelos para representar este término (Delgadillo & Rajamani, 2005).

1.2.7. MODELOS DE TURBULENCIA

La turbulencia consiste de fluctuaciones en el campo de flujo, en el tiempo y en el espacio. Es un proceso complejo, principalmente porque ocurre en tres dimensiones, es inestable y se compone de muchas escalas, por tal motivo, puede tener un efecto significativo sobre las características de la corriente. La turbulencia se produce cuando las fuerzas inerciales en el fluido se vuelven significativas en comparación con las fuerzas viscosas, y se caracteriza por números de Reynolds altos. Su modelado se puede lograr mediante varias alternativas(ANSYS, 2009a):

- Simulación Numérica Directa (S.N.D.)
- Simulación de la inestabilidad mediante las ecuaciones de Navier Stokes de Reynolds-promedio (R.A.N.S.)
- Large Eddy Simulation (L.E.S.).

Debido a que las fluctuaciones pueden ser de pequeña escala y de alta frecuencia, estas son demasiado dispendiosas computacionalmente para simularse directamente en cálculos ingenieriles prácticos. Por otro lado, las ecuaciones instantáneas (exactas) gobernantes se pueden manipular de tal manera que tengan un tiempo-promedio, un conjunto-promedio, u otro tipo de manipulación, y así eliminar las pequeñas escalas, lo que resulta en una modificación del conjunto de ecuaciones que las hace computacionalmente menos dispendiosas de resolver -conocidas como R.A.N.S.-. Sin embargo, la modificación de las ecuaciones genera más variables adicionales desconocidas y se hacen

necesarios modelos de turbulencia para determinar estas variables en términos de las cantidades conocidas (ANSYS, 2009a).

1.2.7.1. Modelo de Turbulencia κ - ε

Los más simples de los “modelos completos” de turbulencia son los modelos de dos ecuaciones, en los cuales la solución de dos ecuaciones de transporte separadas permiten determinar independientemente la velocidad turbulenta y las escalas de longitud. En el “modelo de turbulencia κ - ε ”, se resuelven ecuaciones de equilibrio para la energía cinética turbulenta por unidad de masa, κ , y la tasa de disipación de la turbulencia por unidad de masa, ε , y una viscosidad turbulenta se calcula a partir de estos dos parámetros. Se emplea estrictamente para números de Reynolds altos y la viscosidad turbulenta debe ser necesariamente isotrópica (ANSYS, 2009b).

1.2.7.2. Modelo de Turbulencia Reynolds Stress Model

El modelo de esfuerzos de Reynolds (R.S.M.) es el modelo más elaborado de turbulencia. Al abandonar la hipótesis de viscosidad turbulenta isotrópica, el R.S.M. cierra (“cierre” implica que hay un número suficiente de ecuaciones para todas las incógnitas) las ecuaciones de Navier-Stokes de Reynolds-promedio mediante la solución de las ecuaciones de transporte para los esfuerzos de Reynolds, junto con una ecuación para la tasa de disipación. Esto significa que para flujo en 2-D son necesarias cuatro ecuaciones de transporte adicionales y en flujos 3-D deben resolverse siete ecuaciones adicionales de transporte. Como el R.S.M. cuantifica los efectos de la curvatura de las líneas de flujo, la turbulencia, la rotación, y los repentinos cambios en la tasa de una manera más rigurosa que los modelos de una y dos ecuaciones, este tiene mayor potencial para dar predicciones exactas de flujos complejos. Sin embargo, la fidelidad de las predicciones R.S.M. es aun limitada por las suposiciones empleadas para modelar

diversos términos en las ecuaciones exactas de transporte para los esfuerzos de Reynolds. Además, el modelado de los términos de presión y la tasa de disipación es especialmente difícil, y a menudo comprometen la exactitud de las predicciones del R.S.M. En comparación con el modelo $\kappa-\varepsilon$, el R.S.M. requiere más memoria y tiempo computacional debido al incremento del número de ecuaciones de transporte para los esfuerzos de Reynolds. Asimismo, el R.S.M. puede tomar más iteraciones para converger que el $\kappa-\varepsilon$, debido al fuerte acoplamiento entre los esfuerzos de Reynolds y la media de flujo. Sin embargo, es un deber usar el R.S.M. cuando las características de interés en el flujo son el resultado de la anisotropía (ANSYS, 2009c).

La ecuación exacta del término de tensor de esfuerzos de Reynolds $-\rho\langle u_i' u_j' \rangle$ puede escribirse como indica la ecuación (7).

$$\frac{\partial(\rho\langle u_i' u_j' \rangle)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\mu_k \langle u_i \rangle \langle u_j \rangle)}{\partial x_k} = D_{ij} + P_{ij} + G_{ij} + \Phi_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (7)$$

Donde los términos de la izquierda representan el tiempo local derivativo y el término de convección en la derecha estará representado de la siguiente manera:

Donde D_{ij} Difusión Turbulenta.

$$-\frac{\partial}{\partial x_k} (\rho\mu_k \langle u_i \rangle \langle u_j \rangle \langle u_k \rangle) + p(\delta_{kj} \langle u_i \rangle + \delta_{ik} \langle u_j \rangle) \quad (8)$$

P_{ij} Terminio de producción de esfuerzo

$$-\rho \left(\langle u_i \rangle \langle u_k \rangle \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_k} + \langle u_j \rangle \langle u_k \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_k} \right) \quad (9)$$

G_{ij} Terminio de producción de empuje

$$- \rho \beta (g_i \langle u_j \rangle' \theta + g_j \langle u_i \rangle' \theta) \quad (10)$$

Φ_{ij} Termino de presión

$$+ p \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle'}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle'}{\partial x_i} \right) \quad (11)$$

ε_{ij} Termino de disipación

$$- 2\mu \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle'}{\partial x_k} \frac{\partial \langle u_j \rangle'}{\partial x_k} \right) \quad (12)$$

Y la energía cinética turbulenta, κ (13) y la tasa de disipación turbulenta ε (14), se resuelven mediante la siguiente ecuación

$$\frac{\partial(\rho \cdot k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot k \cdot \langle u_i \rangle')}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{1}{2} (P_{ij} + G_{ij}) - \rho \cdot \varepsilon (1 + 2M_t^2) \quad (13)$$

$$\frac{\partial(\rho \cdot \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot \varepsilon \cdot \langle u_i \rangle')}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \cdot C_{\varepsilon 1} + \frac{1}{2} (P_{ij} + C_{\varepsilon 3} \cdot G_{ij}) \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2} \cdot \rho \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (14)$$

M representa el número de Mach, la viscosidad turbulenta μ_t en las ecuaciones (8) y (9) se determina mediante la fórmula.

$$\mu_t = \rho \cdot C_\mu \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (15)$$

Los valores de las constantes que aparecen en el modelo están usualmente asignadas así $\sigma_k=0.82$, $C_\mu=0.09$, $\sigma_k=0.82$, $C_{\varepsilon 1}=1.44$, $C_{\varepsilon 2}=1.92$. $C_{\varepsilon 3}$ se evalúa como una función del flujo en dirección al vector gravitacional (ANSYS, 2009c; Delgadillo & Rajamani, 2005).

1.2.8. SIMULACIÓN CON PARTÍCULAS.

Hay dos formas de simular el flujo de partículas. En una de ellas, el flujo de partículas se considera como una segunda fase inter-penetrante e interactuante con la fase continua. Este es el enfoque Euleriano, en el que el modelado se realiza con relación a un marco de referencia estacionario, lo que hace la simulación de la influencia de las partículas en el flujo de gas relativamente fácil; por otro lado, se da menos información sobre el flujo de una partícula. El otro enfoque consiste en el seguimiento de una partícula única a través del campo de flujo del líquido. Este es el enfoque de Lagrange y utiliza un marco de referencia que sigue a la partícula de estudio.

1.2.8.1. Modelo Lagrangiano

En este enfoque, se hace un seguimiento del movimiento de una partícula a lo largo de la fase continua. Generalmente la ecuación del movimiento de las partículas se resuelve en un campo de flujo de líquido previamente calculado. La posición y velocidad de las partículas se calcula a partir de cortos intervalos de tiempo sucesivos, y de esta manera se les hace un seguimiento.

El movimiento de una partícula se describe por el modelo estocástico de Lagrange flujo multifase. Su trayectoria se obtiene integrando el balance de fuerzas sobre las partículas. Hay muchas fuerzas que actúan sobre una partícula en ciclón como la fuerza centrífuga, fuerza de arrastre y la fuerza gravitacional. Por lo tanto, la ecuación de movimiento de las partículas puede ser descrita en la siguiente forma:

$$\frac{\partial u_p}{\partial t} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (16)$$

F_x es un término fuente que expresa la presencia de aceleración adicional (fuerza / unidad de masa de partículas). U es la velocidad de fluido, u_p es la velocidad de la partícula, ρ es la densidad del fluido y ρ_p es de densidad de la partícula. $F_D(u - u_p)$ Es la fuerza de arrastre por unidad de masa de las partículas y F_D está dado por.

$$F_D = \frac{18 \cdot \mu \cdot C_D \cdot R_e}{\rho_p \cdot d_p^2 \cdot 24} \quad (17)$$

Donde

$$R_e = \frac{\rho_f (u_f - u_p) d_p}{\mu_f} \quad (18)$$

1.2.8.2. Modelo Euleriano

En el modelado Euleriano de partículas, estas se consideran como un fluido continuo, al igual que el gas. Este "fluido" inter-penetra con el gas e interactúa con él, de acuerdo a las leyes conocidas de interacción, como por ejemplo, la ley de Stokes. Las ecuaciones de transporte, que se acoplan a través de los términos de interacción, se resuelven para ambas fases de partículas y fluido. La ventaja de este método es que, no solo es relativamente fácil incorporar el efecto del líquido en el flujo de las partículas, sino que también fácil incorporar el efecto de las partículas en la fase continua (el "acoplamiento" entre las dos fases), además que se utiliza para para sistemas concentrados.

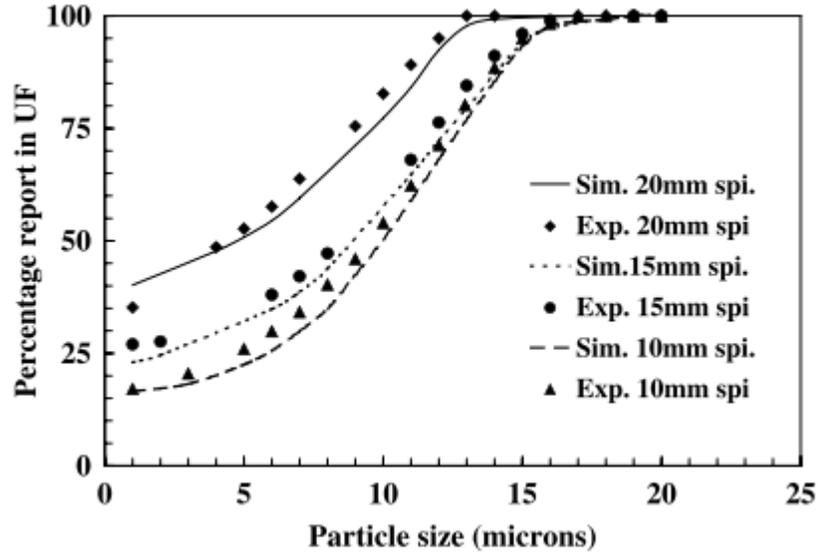
1.2.9. ESTUDIOS REALIZADOS PREVIAMENTE CON C.F.D EN HIDROCICLONES

En los últimos 20 Años se han dejado atrás los estudios empíricos para estudiar el comportamiento dinámico de los hidrociclones y se empezó a utilizar la mecánica

de fluidos computacionales, por ejemplo Krebs Engineers utilizó C.F.D como herramienta para eliminar la necesidad de fabricación y posterior evaluación de un hidrociclón, ellos hacen una variabilidad en las geometrías para obtener un mejor desempeño en cada una de ellas, una de sus variables más importantes era la velocidad tangencial de alimentación para un hidrociclón de 250 mm, además de estudiar las variables geométricas también estudiaron la abrasión y el tiempo de vida de un hidrociclón. (Olson & Van Ommen, 2004).

Bhaskar en 2007 realizó varios estudios con hidrociclones utilizando C.F.D con un hidrociclón de 76 mm donde la simulación la llevo a cabo con 3 modelos de turbulencia como son $k-\varepsilon$, $k-\varepsilon$ RNG y el Reynolds Stress Model (RSM) a 2 presiones diferentes (55 y 83 kPa) y con 4 diámetros de boquilla (10, 15, 20, 25) mm y el modelo estocástico de Lagrange (DPM) como modelo para la inyección de partículas inertes de 2650 kg/m^3 , esta simulación la comparó con datos experimentales en este estudio se comprobó que el modelo de RSM arrojó un porcentaje de error del 4% además de arrojar diámetros de corte similares a los experimentales como se muestra en la Figura 11 (Bhaskar, Murthy, Raju, et al., 2007).

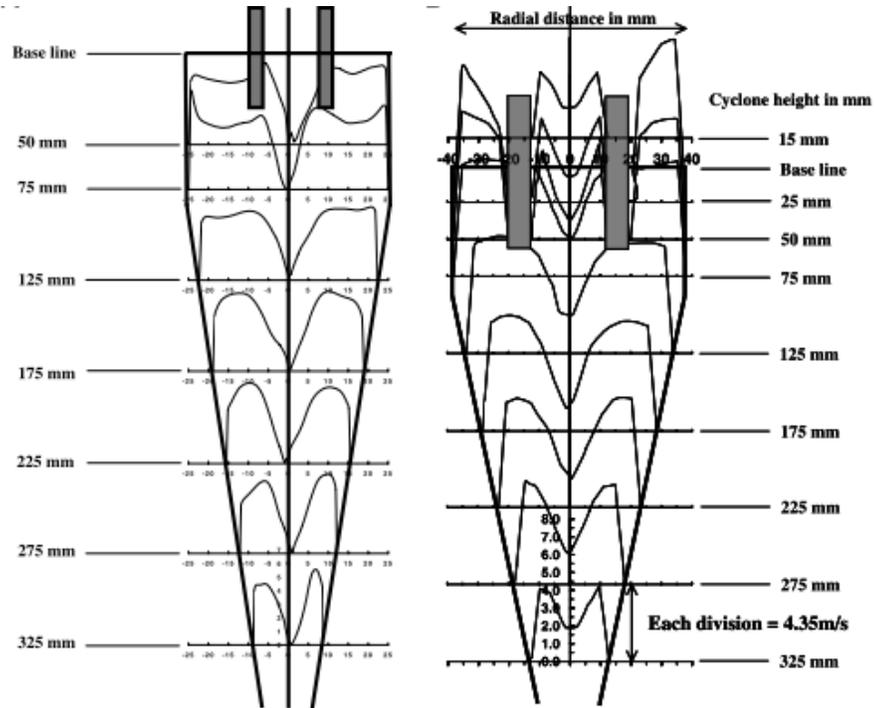
Figura 11. Diámetros de Corte experimentales y simulados a diferentes diámetros de boquilla a 83kPa.



Fuente:(Bhaskar, Murthy, Raju, et al., 2007)

Bhaskar en 2007 realizó un diseño de experimentos a dos hidrociclones de 76mm y 30mm donde la variable principal fue el diámetro de la boquilla del hidrociclón para el de 76mm fueron de (10, 15, 20, 25) mm y para el de 50mm de (3.2, 4.5, 6.4, 9.4) mm como modelo de turbulencia utilizó el RSM además de usar el modelo estocástico de Lagrange (DPM), en la Figura 12 se muestra la comparación de la velocidad axial para los dos hidrociclones, en para la inyección de partículas, el hidrociclón de 76 mm arrojó una mejor eficiencia (Bhaskar, Murthy, Ramakrishnan, et al., 2007).

Figura 12. Comparación de la velocidad axial de dos hidrociclones 50mm y 76 mm respectivamente.



Fuente:(Bhaskar, Murthy, Ramakrishnan, et al., 2007)

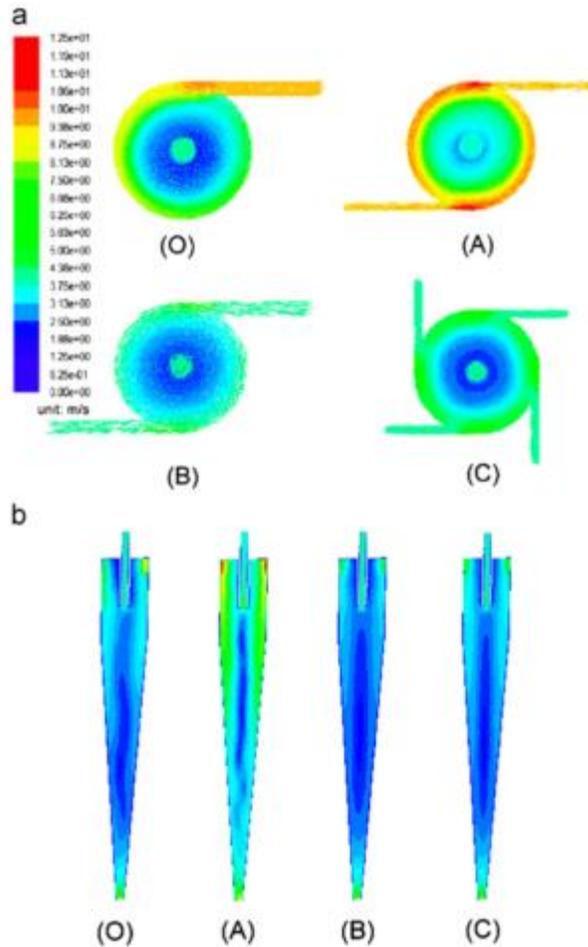
En el 2012 este mismo autor realizo un diseño de experimentos en un hidrociclón de 76mm con la variación del Vortex finder (19, 22, 25) mm y el diámetro de la boquilla (13, 15, 17) bajo las mismas condiciones de simulación de los dos estudios anteriores y en este concluyo que ante mayor es el diámetro del Vortex finder y menor el diámetro de boquilla va ser mejor el tamaño de corte, y por ende mayor eficiencia en hidrociclón (Murthy & Bhaskar, 2012).

Para la realización de la simulación de un hidrociclón mediante C.F.D se requiere un discretización espacial adecuada, Cullivan utilizó el algoritmo SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) que sirve para el acople de la presión con la velocidad además permite resolver ecuaciones de Navier-Stokes partiendo de una presión supuesta, este utilizó PRESTO que es una interpolación esquemática de la presión la cual es útil para flujos en torbellinos. Además de

utilizar una discretización espacial de orden cuadrático (QUICK) que sirve para un mallado hexaédrico y que arroja buenas aproximaciones para flujos en torbellinos (Cullivan, Williams, & Cross, 2003; Cullivan, Williams, Dyakowsky, & Cross, 2004), además Delgadillo y Rajamani en 2005 estudió la dinámica de la simulación en un hidrociclón de 75mm mediante 3 modelos de turbulencia $k-\varepsilon$ RNG, Reynolds Stress Model (RSM) y Large Eddy Simulation (LES), y el autor desarrollo la simulación en estado estacionario hasta mil iteraciones en donde la ecuación de continuidad fue constante, después del estado estacionario este simuló en un tiempo real de 1 segundo con un tamaño de paso 0.0005 segundos después de la transitoriedad del modelo este alcanzó la convergencia del método(Delgadillo & Rajamani, 2005, 2007).

Para mejorar la eficiencia en hidrociclones se ha intentado modificar la geometría del hidrociclón de 20 mm que es adecuado para la separación de partículas finas, una variación interesante es poner hidrociclones con varias alimentaciones, en este estudio se trabajó con un modelo de turbulencia de RSM además de DPM para inyectar partículas de sílice a una concentración de 0.5% en peso, una velocidad de entrada de 6.96 m/s, en la Figura 13 se muestra el contorno de la distribución de presión a diferentes tipos de alimentaciones

Figura 13. Contorno de presión a diferentes con diferentes alimentaciones.



Fuente: (Hwang, Hwang, & Yoshida, 2013)

Otro de los muchos estudios que se han hecho son los que modelan medios densos en hidrociclones, donde Chu y Wang realizó la simulación con agua y la interacción del núcleo de aire, posteriormente inyectó sólidos concentrados con la regla de mezcla Euleriana-Lagrangiana. Este trabajo arroja porcentajes de error del 4% (Chu, Wang, Yu, & Vince, 2012).

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto de la concentración de sólidos sobre las condiciones de operación de clasificación en un hidrociclón industrial mediante simulación con dinámica de fluidos computacional y mediciones experimentales.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Simular el proceso de clasificación en un hidrociclón industrial mediante mecánica de fluidos computacional variando la concentración de sólidos en la alimentación.

Determinar experimentalmente el efecto de la concentración de sólidos en la alimentación sobre la concentración de sólidos y el reparto del líquido en las salidas del hidrociclón.

Contrastar los resultados obtenidos en la simulación frente a los resultados obtenidos en la experimentación.

3. METODOLOGÍA

3.1. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para el desarrollo experimental se realizó con una corriente que sale de la clasificación de caolín, la cual transporta material grueso y se envía a un dispersor para mezclar la suspensión. Esta será la alimentación a un hidrociclón de 100 mm donde el sobre flujo de este último es la corriente principal que alimenta el hidrociclón de 40 mm la cual llega a una densidad de 1100 g/L aproximadamente, tal como se muestra en la Figura 14. Aquí se realizó un diseño de experimentos 3x1 donde se van a variar 3 diluciones de las concentraciones de sólidos, además de trabajar a presión constante (35psig) y la geometría del hidrociclón constante. En dicho experimento se midieron las densidades (en el bajo flujo, sobre flujo y alimentación), caudal (en el sobre flujo y bajo flujo); posteriormente se realizó una toma de muestras a cada una de las concentraciones para llevarlas al laboratorio y analizar distribución de tamaño de partículas (DTP).

3.1.1. OBTENCIÓN DE LA SUSPENSIÓN A TRABAJAR

Se trabajó con una corriente de rechazo que sale de la torre de beneficio de caolín, esta corriente se alimenta a la planta piloto donde el diagrama de flujo de proceso se muestra en la Figura 14. Se parte de una densidad fija y se le realiza una dilución hasta llegar a las concentraciones de sólidos diluidas que se muestran en la Tabla 4. El desarrollo para obtener la suspensión se realiza en un tanque cisterna de 19 m³ de almacenamiento con agitación constante para evitar sedimentación.

3.1.2. MEDICIÓN DE LA DENSIDAD

Para la medición de la densidad se realizó en un balón volumétrico de 250 ml, donde las suspensiones se llenan hasta el aforo, luego se pesa en una balanza de alta precisión restándole el valor del peso del balón.

3.1.3. MEDICIÓN DEL CAUDAL

Para llevar a cabo la medición del caudal se empleó un recipiente volumétrico aforado a 10 L, el caudal se mide para dos corriente: el sobre flujo y el bajo flujo. Para la determinación del caudal se realizó la medición del tiempo de llenado del recipiente hasta el aforo, este procedimiento se realiza 4 veces para reducir el error estadístico por experimentación.

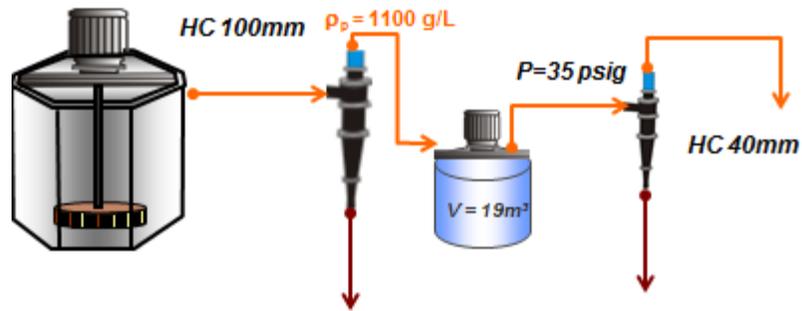
3.1.4. MEDICIÓN PARA LA DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTICULAS (DTP)

Para la medición de la distribución de tamaño partículas se utiliza el equipo de DTP laser, que se encuentra en el laboratorio de minerales industriales ubicado en el centro industrial de la Unión.

Tabla 4. Concentraciones de Sólidos utilizadas.

Fracción Volumétrica	% Peso	ρ_P(g/L)
0.012	3.06%	1019.2
0.02	5.04%	1032
0.03	7.44%	1048

Figura 14. Diagrama de flujo de proceso.



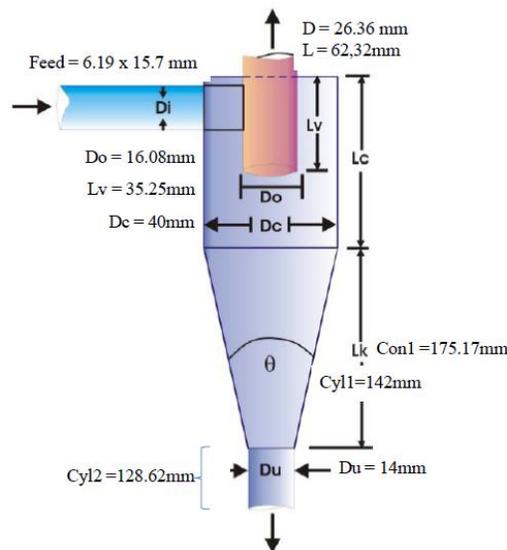
3.2. DESARROLLO DE LA SIMULACIÓN.

La simulación con C.F.D. se realizó en un computador TOSHIBA Satellite M645 con un procesador Intel Pentium Core™i5-2410M segunda generación, de 2.30 GHz, de 6 GB de memoria RAM y 500 GB de disco duro. Las ecuaciones se resolvieron numéricamente empleando el software comercial ANSYS FLUENT 12.1 ®, en el cual se usó el método de volúmenes finitos para obtener la solución. El flujo de partículas se simuló empleando el modelo de fase discreta, el cual predice las trayectorias de las partículas individuales, cada una representando una corriente continua a lo largo de la fase líquida. Se trabajó a una presión de alimentación constante de 35 psig por lo que se va utilizar el algoritmo SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) que sirve para el acople de la presión con la velocidad por lo tanto permite resolver ecuaciones de Navier-Stokes partiendo de una presión supuesta, además de utilizar PRESTO que es una interpolación esquemática de la presión la cual es útil para flujos en torbellinos. Como modelo de turbulencia se empleó el RSM que es el modelo más empleado en la literatura para la solución de hidrociclones mediante C.F.D (Bhaskar, Murthy, Raju, et al., 2007).

3.2.1. CONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA.

En la Figura 15 está representada cada una de las medidas del hidrociclón de 40 mm de la planta de caolín de Sumicol S.A, este corresponde a un hidrociclón de la compañía chilena ERAL y está hecho de poliuretano, además se construyó la geometría mediante la herramienta Design Modeller del software Ansys Fluent 12.1®.

Figura 15. Geometría Del Hidrociclón.



3.2.2. PROCESO DE MALLADO (MESHING).

El proceso de mallado es un proceso crítico de la simulación ya que en esta se representó la cantidad óptima nodos que va a contener el proceso, empleando un mallado no estructurado. Esto se realizó mediante un diseño de experimentos 3x1 donde las dos variables son la cantidad de nodos y el sobre flujo expresado en kg/s., También se fijaron las condiciones de frontera que se trabajaron para la solución del método.

3.2.3. CONDICIONES DE FRONTERA

Para este caso de estudio, se establecieron condiciones de frontera referidas a la presión de alimentación de la suspensión, a la presión ambiente a la salida y a la condición de no deslizamiento en la interface solido fluido del hidrociclón .

3.2.4. SIMULACIÓN MEDIANTE FLUENT

La simulación en Fluent se realizó, en un principio, solo con agua la cual representa la fase continua, lo anterior se llevó a cabo empleando el modelo de turbulencia RSM. Después de tener la solución con agua se desarrolló la simulación con una inyección de partículas de acuerdo a las concentraciones que se especificaron en Tabla 4.

3.2.4.1. Simulación con Agua

Mediante la herramienta Fluent se realizó la solución del problema que se planteó anteriormente en la geometría y mallado (construcción de nodos y modelo físico), esta solución se realizó mediante un modelo de turbulencia el cual será Reynolds Stress Model (RSM), al final de la simulación se predijó un valor inicial de la velocidad de alimentación que sirvió en la inyección de partículas, aquí se llevó a cabo hasta que el sistema alcance el estado estacionario y posterior evaluación de la dinámica del proceso.

3.2.4.2. Simulación Agua –Partículas

Después de realizar la simulación con agua se llevó a cabo la simulación con partículas a partir de la velocidad inicial predicha, la DTP arrojados en el laboratorio y el Modelo estocástico de Lagrange o (DPM) con Rossin-Rammler-Logaritmic para diferentes diámetros de partículas a las 3 concentraciones que se

hicieron en la parte experimental como se muestra en la Tabla 4, posterior a esta simulación se validó el modelo mediante la comparación con los datos experimentales.

3.3. VALIDACIÓN DEL MÉTODO

En esta parte se realizó la comparación de los valores experimentales con los resultados obtenidos con las simulaciones con C.F.D.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1. ESTUDIO NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL

En el presente estudio se analiza y se valida numéricamente los resultados obtenidos en la experimentación de un hidrociclón de 40 mm diseñado para la clasificación de caolín, para esto se realizó un diseño de experimentos 3X1 donde la concentración de sólidos es variable y la presión de alimentación y la geometría del hidrociclón son constantes, en la Tabla 5 se muestran los resultados obtenidos en la experimentación.

Tabla 5. Resultados Obtenidos en la experimentación

HC 40 mm								
$\phi_v=0.012$			$\phi_v=0.02$			$\phi_v=0.03$		
ρ_{AL} (g/L)	ρ_{SF} (g/L)	ρ_{BF} (g/L)	ρ_{AL} (g/L)	ρ_{SF} (g/L)	ρ_{BF} (g/L)	ρ_{AL} (g/L)	ρ_{SF} (g/L)	ρ_{BF} (g/L)
1032.32	1005.52	1082.8	1048.36	1008.4	1119.96	1055.56	1008.93	1143.44
	Q_{SF} (L/h)	Q_{BF} (L/h)		Q_{SF} (L/h)	Q_{BF} (L/h)		Q_{SF} (L/h)	Q_{BF} (L/h)
	3131.796	2306.583		3178.808	2306.583		3140.67612	2369.2004
	t₁ (s) SF	t₁ (s) BF		t₁ (s) SF	t₁ (s) BF		t₁ (s) SF	t₁ (s) BF
	11.56	15.47		10.99	15.47		11.5	15.37
	t₂ (s) SF	t₂ (s) BF		t₂ (s) SF	t₂ (s) BF		t₂ (s) SF	t₂ (s) BF
	11.39	15.92		11.28	15.92		11.56	15.55
	t₃ (s) SF	t₃ (s) BF		t₃ (s) SF	t₃ (s) BF		t₃ (s) SF	t₃ (s) BF
	11.86	15.41		11.86	15.41		11.38	14.7
	t₄ (s) SF	t₄ (s) BF		t₄ (s) SF	t₄ (s) BF		t₄ (s) SF	t₄ (s) BF
	11.17	15.63		11.17	15.63		11.41	15.16
	V (L)	V (L)		V (L)	V (L)		V (L)	V (L)
	10	10		10	10		10	10
	P (psi)	36		P (psi)	36		P (psi)	34

Con los resultados de la Tabla 5 se realiza la corrección de la fracción volumétrica y se calcula la concentración de sólidos en kg/s que es la forma como se ingresa al simulador. Además se asume la densidad del caolín igual a 2600 kg/m³ y la del agua de 1000 kg/m³, Dichas correcciones se representan en la Tabla 6:

Tabla 6. Valores corregidos

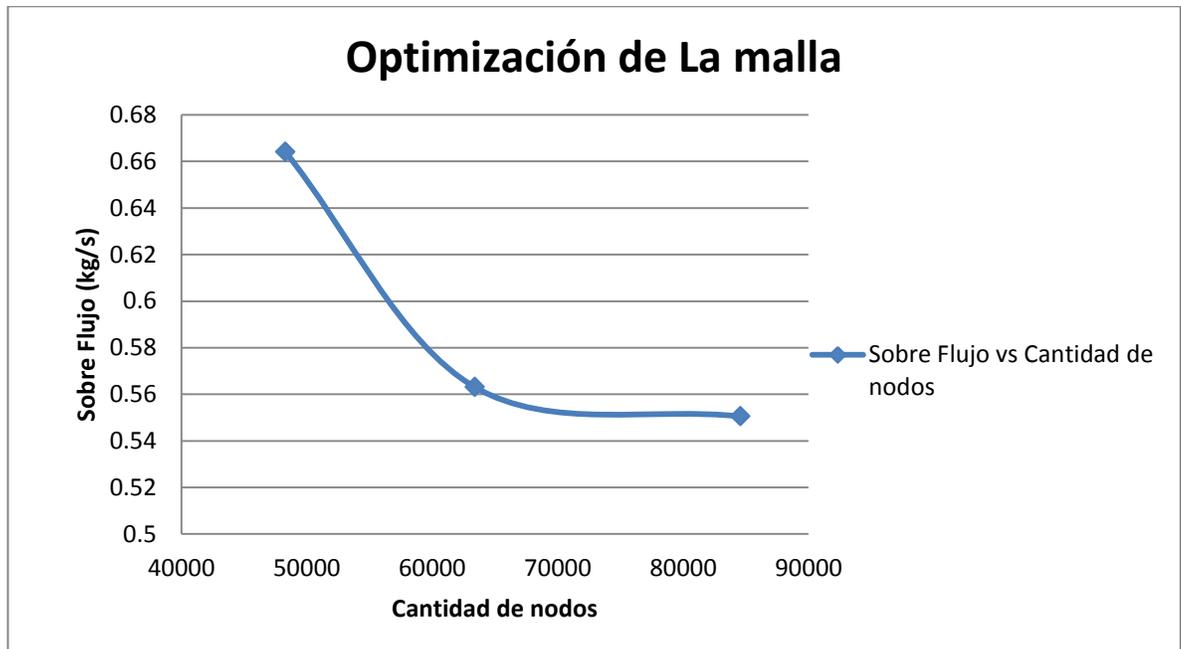
Fracción Volumétrica Ideal	Fracción Volumétrica Real	% Peso	ρ_p(g/L)	m (kg/s)
0.0120	0.0202	5.088%	1032.320	0.072
0.0200	0.0302	7.496%	1048.360	0.108
0.0300	0.0347	8.553%	1055.560	0.125

El proceso de mallado tiene un efecto muy importante en la solución de las ecuaciones gobernantes de los problemas de C.F.D, ya que estas solucionan un problema o se puede desestabilizar el sistema, para la solución de problemas con hidrociclones se trabajó con una malla no estructurada debido a la complejidad de su geometría donde la calidad y refinamiento de ella puede ocasionar divergencia o convergencia en la solución, pueden arrojar valores más confiables cuando se optimiza la calidad de la malla, se realizó un diseño de experimentos donde se variaba la cantidad de nodos de la malla que va ser la superficie de entrada y se eligió el flujo másico del sobre flujo como variable a optimizar. En la Tabla 7 y en la Figura 16 se muestran los resultados obtenidos en la simulación

Tabla 7. Optimización de la malla

Cantidad de nodos	Sobre Flujo (kg/s)
84579	0.5505
63390	0.5702
48293	0.6641

Figura 16. Optimización de la malla

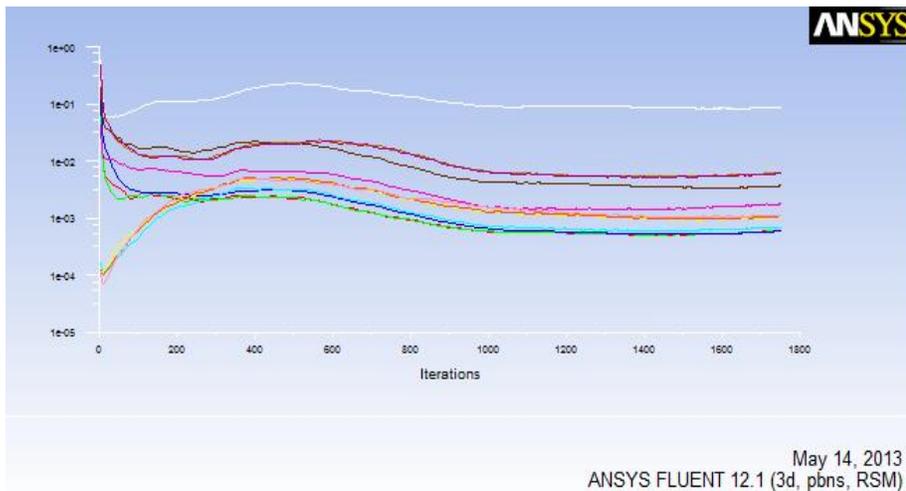


En la Figura 16 se muestra que a partir de 63390 nodos el sistema empieza a tener un comportamiento asintótico, por lo que elegir esta malla resulta adecuado ya que la cantidad de nodos es directamente proporcional a la calidad en la solución pero este hace que se disminuya la eficiencia en el tiempo de solución debido a las limitaciones del cómputo.

Para el desarrollo de la simulación Se empleó el modelo de turbulencia R.S.M. para todos los casos descritos, debido a la naturaleza anisotrópica de la turbulencia en los ciclones. Para discretizar las ecuaciones parciales del modelo, se utilizó el algoritmo SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) para el acople de presión-velocidad lo cual permite resolver las ecuaciones de Navier-Stokes partiendo de una presión fija, la cual será la presión de alimentación para obtener valores de velocidad preliminares.

Inicialmente se utilizó un esquema QUICK el cual es de orden superior para interpolar las variables en la superficie de control del volumen, sin embargo se encontró dificultad para poder obtener convergencia después de 2500 iteraciones y el sistema se estaba volviendo oscilatorio lo cual corresponde a que este tipo de esquema hay una dependencia en el tiempo y esto ocasiona estos patrones cíclicos, en la Figura 17 se muestran los valores residuales en estado estacionario simulando la fase continua (agua) y de cómo no se puede lograr la solución; en la Figura 18 se muestra el cambio de estado estacionario a transitorio donde se puede ver un cambio brusco en la convergencia en este paso se deben elegir el tiempo de paso adecuado (Delgadillo & Rajamani, 2007). Debido a esto, y teniendo en cuenta que resolver un problema en estado transitorio esta fuera del alcance del presente proyecto además de no contar con la maquina necesaria para resolver dicho tipo de problemas cuando se va inyectar los sólidos, por ende se empleó un esquema de primer orden, para el cual es suficiente resolver el modelo en estado estacionario para lograr convergencia.

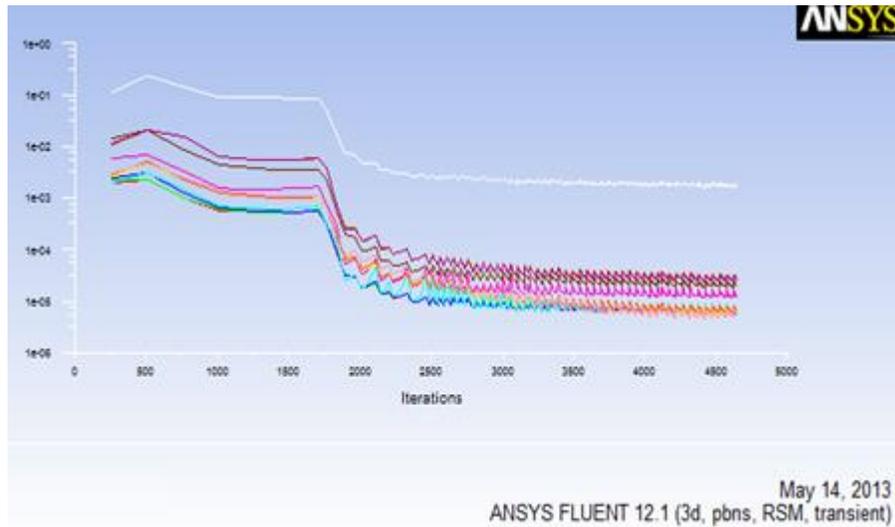
Figura 17. Esquema QUICK en estado estacionario.



Ahora se muestra el cambio cuando se pasa de un estado estacionario a un estado transitorio, donde se utilizó un tiempo de paso de 0.0025 segundos hasta

alcanzar un segundo, en este caso solo logro alcanzar 0.165 segundos después de 4500 iteraciones y 18 horas de computo.

Figura 18. Esquema QUICK en estado transitorio.



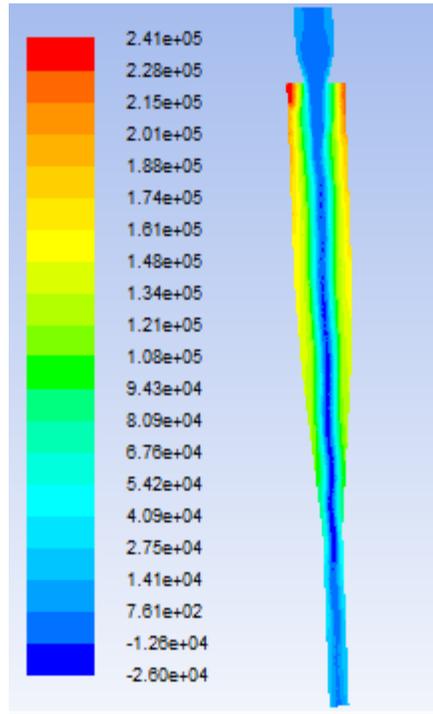
4.1.1. ESTUDIO DE LA FASE CONTINUA

Los resultados obtenidos para la simulación se muestran a continuación por medio de las Figuras 19 y 20 que contienen el campo de presión resultante, el contorno de las presiones y las líneas de corriente. La ausencia de valores experimentales a través del hidrociclón para analizar cuantitativamente la presión y los campos de velocidad resulta imposible la validación de resultados, sin embargo, se puede realizar un análisis cualitativo de esto debido al conocimiento que se tiene de la física del hidrociclón,

4.1.1.1. Campo de Presiones

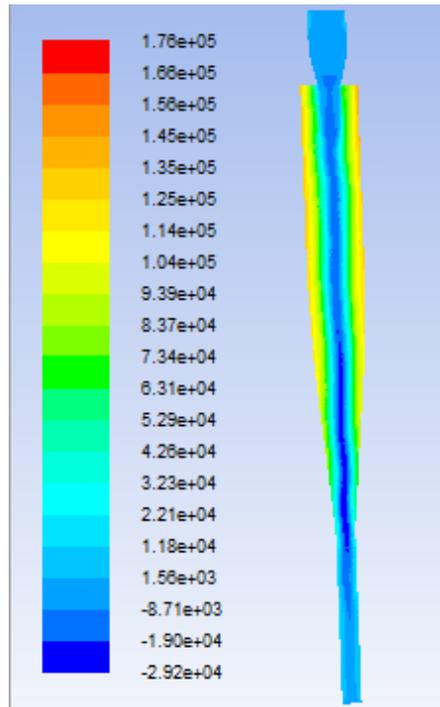
En las Figuras 19 a 20 se presentan los contornos de presión estática y presión total obtenidos para el hidrociclón de 40 mm.

Figura 19. Contorno de la presión total



No se aprecia gran diferencia en el comportamiento entre la presión estática y la presión total. Se tienen valores elevados en las paredes y va decreciendo radialmente debido a la existencia del núcleo de aire que hay en el centro, en la Figura 19 se pueden apreciar los perfiles de presión en orden axial y radial, a partir de este perfil se puede calcular el diámetro del núcleo central partiendo de la posición radial y analizando el campo donde se genera la presión de vacío. El cálculo del diámetro está representado en la Tabla 8 donde se muestra el diámetro del núcleo y el anillo donde se forma el spray; el vacío que se genera es debido a las corrientes secundarias que se crean, a partir de esta simulación se puede calcular la caída de presión del equipo que es la diferencia de la presión total entre la entrada y la salida de los dispositivos que por las condiciones de frontera es la presión atmosférica en unidades manométricas, este valor es 89.94 kPa, lo cual representa un valor para tener en cuenta a la hora de economizar gastos (Bhaskar, Murthy, Ramakrishnan, et al., 2007).

Figura 20. Contorno de la presión estática



Realizando una comparación con otros estudios se muestra que existe una zona de presión negativa que aparece en la región del vortex finder (región central) debido a la alta velocidad de remolino y el choque que existe con el flujo secundario o ascendente. El gradiente de presión es más grande a lo largo de la dirección radial, mientras que el gradiente en dirección axial es muy limitado (Murthy & Bhaskar, 2012).

Figura 21. Perfil de presiones

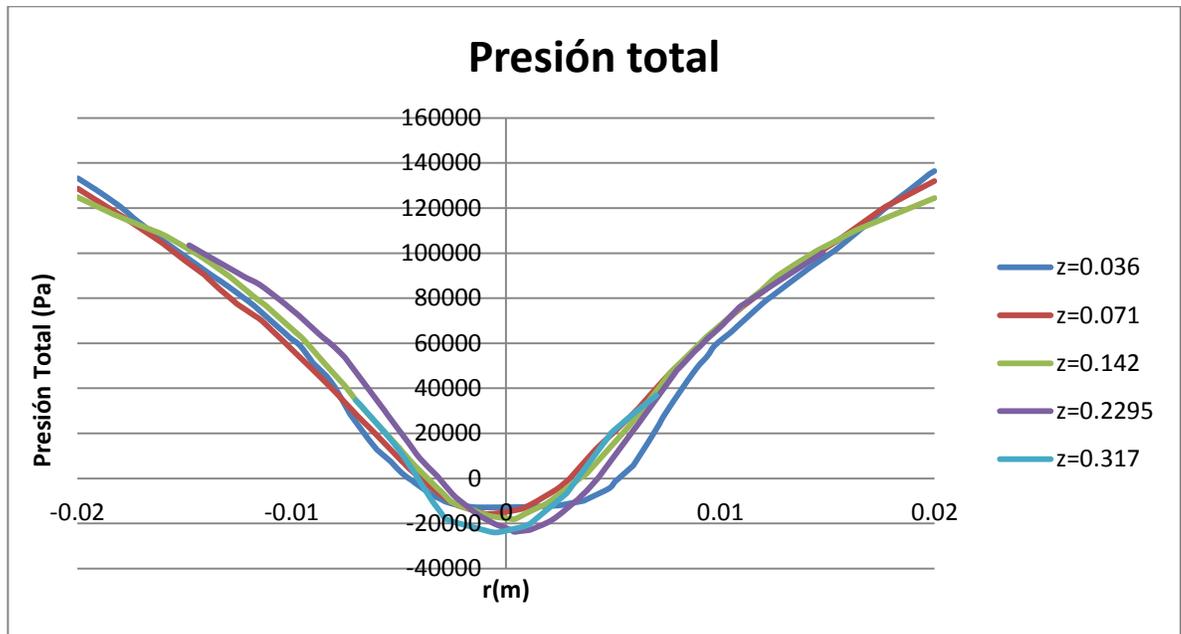


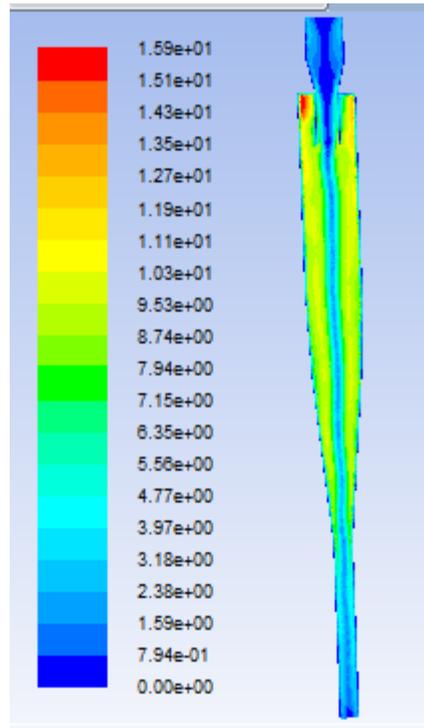
Tabla 8. Diámetro del núcleo de aire

Núcleo de aire (m)	Núcleo de aire (mm)
0.031	31.408574
8.591	Diámetro (mm)
2.704	Spray(mm)

4.1.1.2. Velocidad Tangencial

En la Figura 22 se muestra el contorno de la velocidad tangencial, de acuerdo con la disposición de colores se tiene que la región coloreada de rojo indica que es la velocidad máxima debido que es la forma como se alimenta la suspensión al hidrociclón y va disminuyendo hacia el centro debido a que el fluido va experimentando rotación.

Figura 22. Contorno de la Velocidad Tangencial.

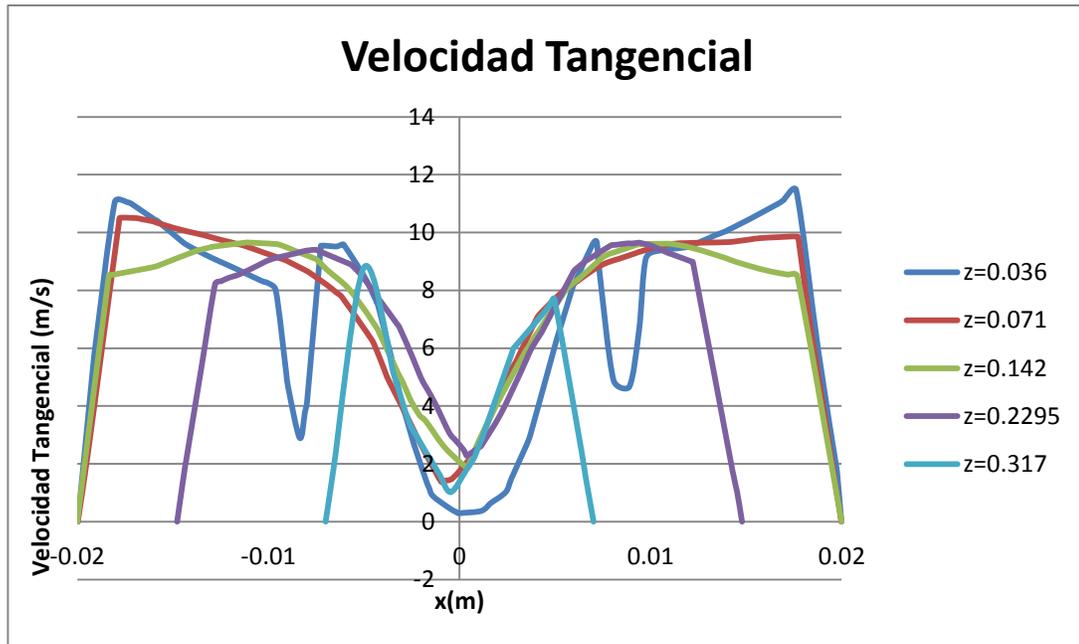


Una mejor forma de identificar este fenómeno es con la distribución de la velocidad tangencial mostrada en la Figura 22, Donde se ve que parte de una velocidad inicial 0 debido a la entrada tangencial y perpendicular a la entrada y sube hasta un máximo debido a que el fluido cambia de ángulo.

Se puede observar en la Figura 22 inicialmente al aumentar la distancia radial desde el eje existe velocidad tangencial. Los valores de esta pueden alcanzar unos valores máximos en las paredes y esta va disminuyendo de acuerdo con su posición radial. Las observaciones son similares a los informes de los trabajadores anteriores en la literatura (Bhaskar, Murthy, Raju, et al., 2007).

Otra observación importante que concuerda con otro estudio hecho por (Cullivan et al., 2004) donde se infiere que en alturas inferiores del ciclón hacia la boquilla se generan campos relativamente más bajo de la fuerza centrífuga.

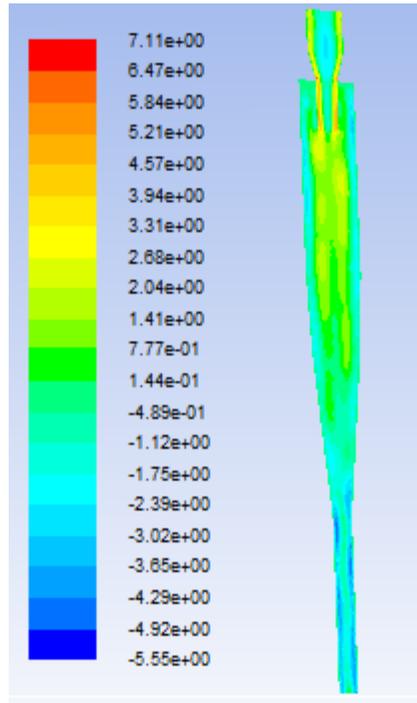
Figura 23. Distribución radial de la velocidad tangencial



4.1.1.3. Velocidad axial.

En la Figura 24 se presenta el contorno de la velocidad axial y se observa que se presentan valores mínimos en el centro donde está localizado el vortex finder debido a que no es completamente asimétrico esto debido que solo se presenta flujo secundario o ascendente del núcleo de aire, pero fuera de este centro se presentan los valores máximos ya que el flujo secundario (ascendente) y el flujo primario (Torbellino que se genera por la alimentación tangencial) colisionan y se forma un flujo caótico en las afueras del vortex finder, esto hace que se genere una caída de presión dentro del hidrociclón.

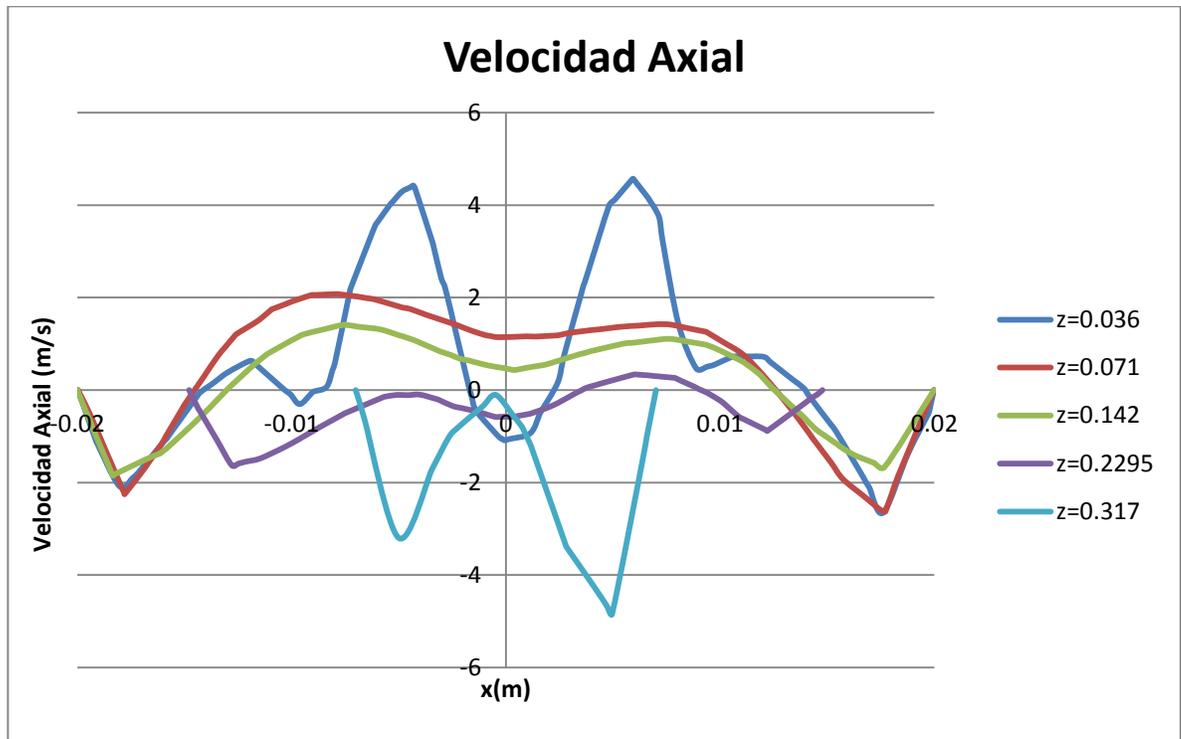
Figura 24. Contorno de la velocidad axial



En la Figura 25 se ve que para las distancias más cercanas a la salida de sólidos, no se observan perfiles en forma de W, por lo que no se presenta recirculación de las partículas ya colectadas tal que afecte el rendimiento de estos ciclones, como suele ocurrir en Equipos mal diseñados(Murthy & Bhaskar, 2012).

Otro análisis importante proviene de los perfiles de velocidad. Como se muestra en la Figura 25, la velocidad no es máxima en el centro del flujo, como se esperaba. Este máximo de la velocidad se coloca cerca de la pared cuando el flujo va en dirección de flujo inferior o está cerca del núcleo de aire cuando el flujo pasa a la dirección de desbordamiento. Esto está de acuerdo con la teoría de las fuerzas en el interior del hidrociclón y la definición del tamaño de corte. También es el comportamiento observado en el hidrociclón este comportamiento es similar con otros estudios hechos(Cullivan et al., 2003).

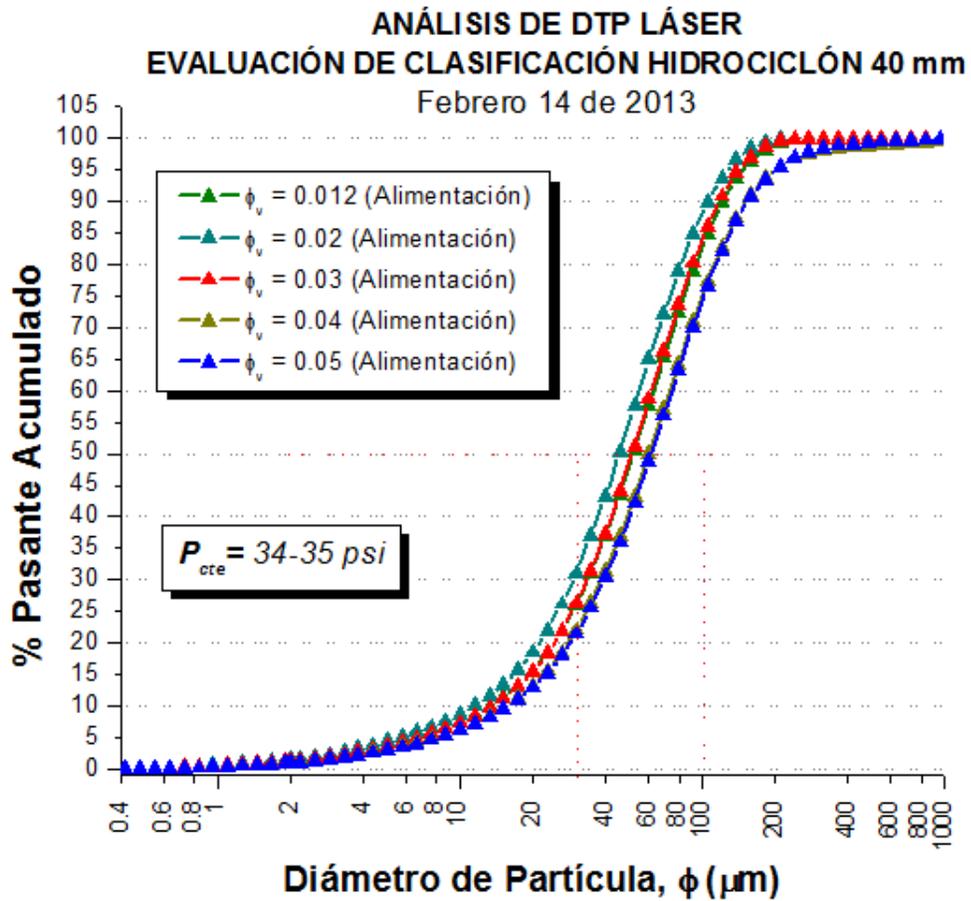
Figura 25. Distribución radial de la velocidad axial



4.1.2. ESTUDIO FASE CONTINUA-SOLIDOS.

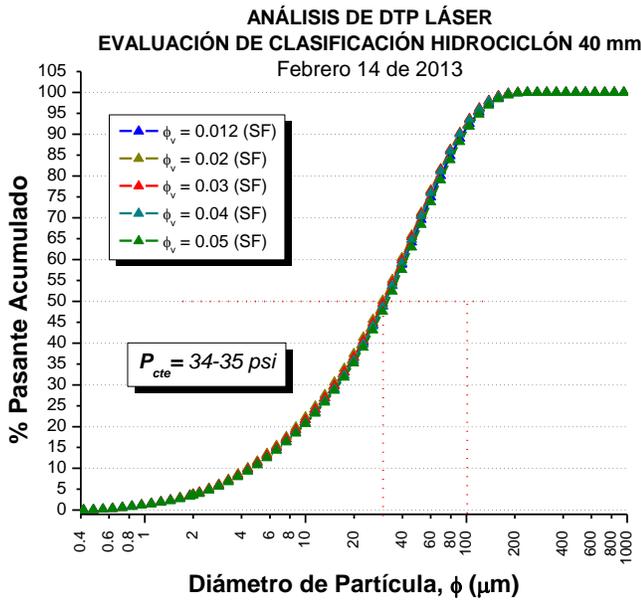
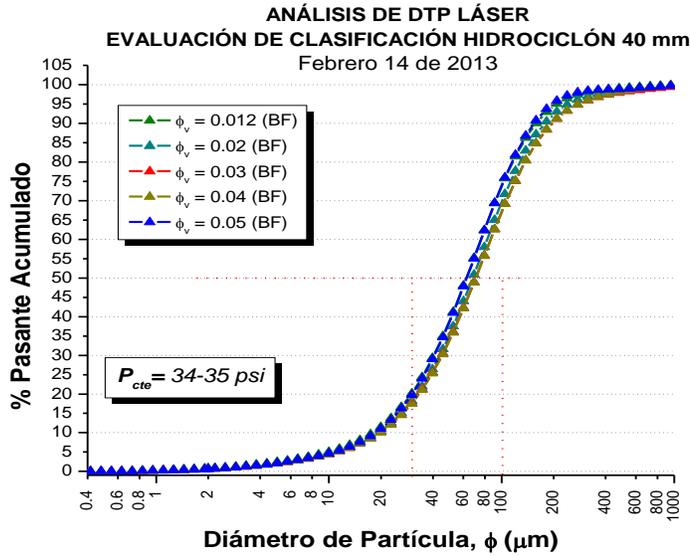
En la Figura 26 se muestra la gráfica de distribución de tamaño de partículas, en la alimentación se ve un pequeño cambio debido a los cambios de la concentración de sólidos, en este punto el diámetro de corte es de $45 \mu\text{m}$ para la suspensión más diluida y de $60 \mu\text{m}$ para la suspensión más concentrada después de este proceso se va la suspensión a través del hidrociclón para analizar la separación de esta.

Figura 26. Análisis DTP laser alimentación HC 40mm



Después del llevar a cabo la separación mediante el hidrociclón se visualiza que es un proceso ineficiente como se observa en la Figuras 27 ya que no se ve una dependencia clara de la concentración en el momento de realizar la separación; en el sobre flujo el diámetro de corte d_{50} es de $35 \mu\text{m}$ y en bajo flujo es de $60 \mu\text{m}$.

Figura 27. Análisis DTP laser abajo) sobre flujo y arriba) bajo flujo.



4.1.2.1. Simulación mediante Ansys-Fluent®

Mediante la Figura 26 se tomaron valores de diámetros de partícula para ingresar al software los cuales son; 4, 20, 40, 60, 100 y 600 μm respectivamente, y con Tabla 6 se ingresaron los valores de la concentración de sólidos en kg/s se inyectaron un total de 1840 partículas. Por medio de este método numérico se puede calcular la eficiencia del hidrociclón y se puede observar el recorrido de las partículas en diferentes tiempos.

En la Tabla 9 se observa la eficiencia del hidrociclón a diferentes concentraciones según los valores simulados

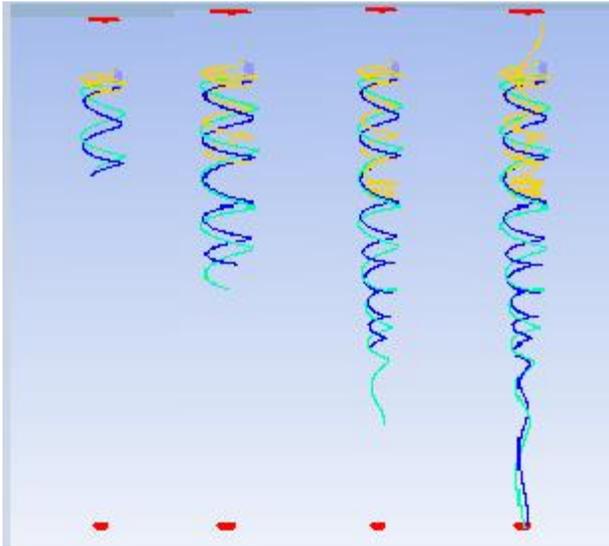
Tabla 9. Eficiencia del hidrociclón

Fracción Volumétrica	Eficiencia (%)
0.012	86.61%
0.02	87.03%
0.03	94.92%

Por medio de la simulación también se puede observar que la concentración de sólidos es una variable importante respecto a la eficiencia por lo que alimentar al hidrociclón concentraciones diluidas resulta un proceso ineficiente del proceso con hidrociclones.

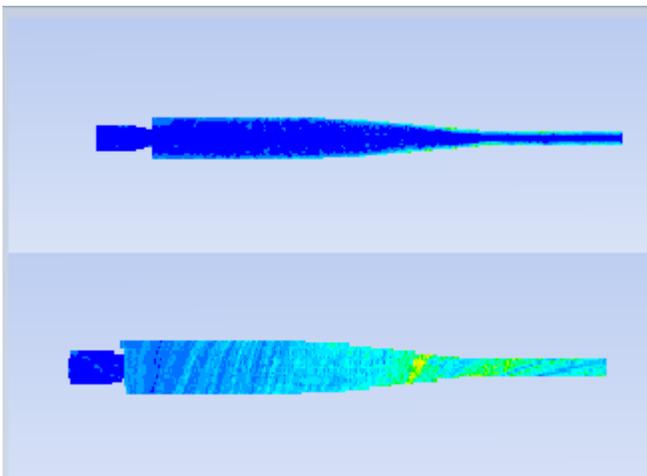
En la figura 28, se muestra mediante el hidrociclón de cómo son las trayectorias de las partículas dentro del hidrociclón desde que se alimenta hasta que termina el proceso.

Figura 28. Trayectoria de las partículas



Además se puede observar el contorno de concentraciones en el plano central y de todo el equipo, esto se representa mediante la figura 29.

Figura 29. Contorno central Arriba y Contorno del equipo Abajo.



4.1.3. VALIDACIÓN DEL MODELO

Para realizar la validación del modelo se van a comparar los resultados experimentales con los resultados obtenidos en la simulación mediante el porcentaje de divisiones o reparto del líquido en el sobre flujo y bajo flujo esta comparación se puede analizar en el Tabla 10.

Tabla 10. Reparto de líquido en el sobre flujo y bajo flujo.

$\phi_v=0.012$			$\phi_v=0.02$			$\phi_v=0.03$		
ρ_{AL} (g/L)	ρ_{SF} (g/L)	ρ_{BF} (g/L)	ρ_{AL} (g/L)	ρ_{SF} (g/L)	ρ_{BF} (g/L)	ρ_{AL} (g/L)	ρ_{SF} (g/L)	ρ_{BF} (g/L)
1032.32	1005.52	1082.8	1048.36	1008.4	1119.96	1055.56	1008.93	1143.44
Q_{AL} (L/h)	Q_{SF} (L/h)	Q_{BF} (L/h)	Q_{AL} (L/h)	Q_{SF} (L/h)	Q_{BF} (L/h)	Q_{AL} (L/h)	Q_{SF} (L/h)	Q_{BF} (L/h)
5438.38	3131.80	2306.58	5485.39	3178.81	2306.58	5509.88	3140.68	2369.20
Reparto de Líquido -Experimental								
100%	57.59%	42.41%	100%	57.95%	42.05%	100%	57.00%	43.00%
Reparto de Líquido - Simulación								
100.03%	53.00%	47.03%	99.96%	53.76%	46.20%	100.42%	55.58%	44.84%
% Error								
	8.65%	9.82%		7.79%	8.98%		2.56%	4.11%

Según la Tabla 10 se muestran el reparto del líquido en las salidas. Se puede observar que trabajar mediante C.F.D arroja porcentajes de error promedio del 7%, lo cual puede deberse a errores de tipo experimental en la toma de mediciones, así como en la parte matemática para desarrollar del método para la obtención de la convergencia en la solución. Por lo tanto puede considerarse que el error obtenido es muy bueno.

También se puede tener como referencia otros estudios donde se comparan con datos experimentales, como en el trabajo de Delgadillo y Rajamani (Delgadillo & Rajamani, 2005). Aquí, los resultados experimentales de un balance de masa de un estudio hecho en 1988 el porcentaje de error que se obtuvo con el modelo de turbulencia de RSM fue del 12.5%, lo que refuerza la buena convergencia y validez del modelo propuesto.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El modelo de C.F.D es un método eficaz para analizar la distribución de flujo, de presión y velocidades al interior de un hidrociclón. Los resultados obtenidos están muy cerca a los datos experimentales por lo que la aproximación realizada tiene alta correlación con el proceso real lo que le otorga un alto grado de validez práctica.

Teniendo en cuenta que para desarrollar las mediciones no se utilizaron equipos muy sofisticados, el grado de correlación puede ser mejorado desde la disminución del error experimental.

El modelo permite adicionalmente determinar parámetros que son muy difíciles de medir experimentalmente, o representan alto grado de error experimental. Esto le da un carácter de simulador de alta confianza. Estos parámetros son: Las dimensiones (el diámetro) del núcleo de aire, determinado a partir de la amplitud de la pared de suspensión en flujo helicoidal descendente; las características dimensionales del flujo justo antes de generar el spray a la salida del hidrociclón, y los perfiles de velocidad en el interior del equipo. Si se conocen estos parámetros, es posible optimizar los parámetros operacionales y mejorar el desempeño del equipo en cuanto a su función de clasificación como en eficiencia neta (mayor flujo másico).

La calidad de la malla en la configuración y diseño del modelo es un factor importante cuando se realizan simulaciones con C.F.D., ya que un valor óptimo de 63390 nodos se obtuvo a través del proceso de optimización. Con este mallado se obtuvieron errores del 3% en los repartos de líquidos a las salidas en un tiempo de cómputo aproximado de 3 horas.

Se plantea una hipótesis sobre el tipo de flujo al interior de los hidrociclones: es posible que dentro de ellos halla un flujo laminar después de un tiempo determinado muy corto (fracción de segundos), ya que hay evidencias de que a medida que transcurre el tiempo no existan cambios en la forma del flujo, tal y como se observa en la Figura 17, donde después de 0.165 segundos los valores residuales se vuelven constantes y es el tiempo aproximado que demora un fluido en entrar y salir con unos caudales altos. Sin embargo, para saber con exactitud esta hipótesis se debe calcular el Reynolds y verificar experimentalmente, lo cual no es un objetivo en este trabajo.

Para mejorar los resultados obtenidos con la simulación es importante realizar un diseño de experimentos donde se pueda variar la presión de alimentación y la geometría del hidrociclón. De esta manera se puede optimizar el proceso además de utilizar sistemas transitorios en la discretización numérica, además de tener la posibilidad de probar otros modelos de turbulencia que realicen la simulación de flujo en el interior, posiblemente empleando un modelo de turbulencia como el Large Eddy Simulation (L.E.S.), el cual es muy útil para detectar estructuras turbulentas microscópicas en flujos transitorios y modelos de mezcla como VOF que estudian la interacción entre el aire de la atmósfera con el fluido de la fase continua. Estas propuestas permitirían analizar el fenómeno de manera más real.

Por último, también se podría realizar simulaciones para suspensiones concentradas, de tal manera que sea posible analizar desde los efectos de la fracción volumétrica de sólidos (concentración de sólidos) el desempeño de un hidrociclón, y poder verificar parámetros operacionales que dependan de esta variable, con el fin de optimizar los gastos energéticos y minimizar la pérdida de material útil que no se separa.

BIBLIOGRAFÍA

- Andersson, R. (2010). *Evaluation of two hydrocyclone designs for pulp fractionation*. Royal Institute of technology.
- ANSYS. (2009a). Turbulencia. ANSYS, Inc. Retrieved May 13, 2013, from <https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent12/html/th/node43.htm>
- ANSYS. (2009b). Standard k-e - Model. ANSYS, Inc. Retrieved May 13, 2013, from <https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent12/html/th/node58.htm>
- ANSYS. (2009c). REYNOLDS STRESS MODEL. ANSYS, Inc. Retrieved May 13, 2013, from <https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent12/html/th/node79.htm>
- Bahamón García, D., Quintana Marin, G., & Alzate Gil, H. (2009). *Simulación en tres dimensiones de flujos gas-sólido al interior de separadores ciclónicos*.
- Bhaskar, K. U., Murthy, Y. R., Raju, M. R., Tiwari, S., Srivastava, J. K., & Ramakrishnan, N. (2007). CFD simulation and experimental validation studies on hydrocyclone. *Minerals Engineering*, 20(1), 60–71.
doi:10.1016/j.mineng.2006.04.012
- Bhaskar, K. U., Murthy, Y. R., Ramakrishnan, N., Srivastava, J. K., Sarkar, S., & Kumar, V. (2007). CFD validation for flyash particle classification in hydrocyclones. *Minerals Engineering*, 20, 290–302.
- Bouso, J. L. (1999). Hidrociclones de fondo plano.
- Chen, W., Zydek, N., & Parma, F. (2000). Evaluation of hydrocyclone models for practical applications. *Chemical Engineering Journal*, 80(1-3), 295–303.
doi:10.1016/S1383-5866(00)00105-2

- Chica Osorio, L. M., & Bustamante Rua, O. (2009). *Estudio del cortocircuito de finos en hidrociclones operados con suspensiones poliminerales en la industria cementera*. Universidad Nacional De Colombia-Sede Medellin. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/2461/1/39192498.2009.pdf>
- Chu, K. W., Wang, B., Yu, a. B., & Vince, a. (2012). Particle scale modelling of the multiphase flow in a dense medium cyclone: Effect of vortex finder outlet pressure. *Minerals Engineering*, 31, 46–58. doi:10.1016/j.mineng.2011.11.011
- Cortes, C., & Gil, a. (2007). Modeling the gas and particle flow inside cyclone separators. *Progress in Energy and Combustion Science*, 33(5), 409–452. doi:10.1016/j.pecs.2007.02.001
- Cullivan, J. C., Williams, R. A., & Cross, C. R. (2003). UNDERSTANDING THE HYDROCYCLONE SEPARATOR THROUGH COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS, 81(April), 455–466.
- Cullivan, J. C., Williams, R. A., Dyakowsky, T., & Cross, C. R. (2004). New understanding of a hydrocyclone flow field and separation mechanism from computational fluid dynamics. *Minerals Engineering*, 17, 651–660.
- Delgadillo, J. a., & Rajamani, R. K. (2005). A comparative study of three turbulence-closure models for the hydrocyclone problem. *International Journal of Mineral Processing*, 77(4), 217–230. doi:10.1016/j.minpro.2005.06.007
- Delgadillo, J. a., & Rajamani, R. K. (2007). Exploration of hydrocyclone designs using computational fluid dynamics. *International Journal of Mineral Processing*, 84(1-4), 252–261. doi:10.1016/j.minpro.2006.07.014
- El, E. N., Bouso, J. L., & Procesos, E. (2001). Hitos históricos en el desarrollo de la clasificación.

- Gimbun, J., Chuah, T. G., Fakhru'l-Razi, a., & Choong, T. S. Y. (2005). The influence of temperature and inlet velocity on cyclone pressure drop: a CFD study. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 44(1), 7–12. doi:10.1016/j.cep.2004.03.005
- Hwang, K.-J., Hwang, Y.-W., & Yoshida, H. (2013). Design of novel hydrocyclone for improving fine particle separation using. *Chemical Engineering Journal*, 85, 62–68.
- Jakobsen, H. A. (2008). *Chemical Reactor Modeling* (p. 1244). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Karimi, M., Akdogan, G., Dellimore, K. ., & Bradshaw, S. . (2012). Quantification of numerical uncertainty in computational fluid dynamics. *Computers & Chemical Engineering*, 43, 45–54.
- López Becerra, G. M., & Trujillo Vera, D. A. (2004). *Diseño y selección de separadores de tipo ciclónico*. Universidad Pontificia Bolivariana.
- Murthy, Y. R., & Bhaskar, K. U. (2012). Parametric CFD studies on hydrocyclone. *Powder Technology*, 230, 36–47. doi:10.1016/j.powtec.2012.06.048
- Napier-Mun, T., & Wills, B. (1993). *Will's Mineral Processing Technology: An introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery* (Seventh Ed., pp. 354–400).
- Nowakowski, A. F., Cullivan, J. C., Williams, R. A., & Dyakowsky, T. (2004). Application of CFD to modelling of the flow in hydrocyclones. Is this a realizable option or still a resarch challenge? *Minerals Engineering*, 17, 661–669.

- Nowakowski, A. F., & Doby, M. J. (2008). The Numerical Modelling of the Flow in Hydrocyclones, *26*(26), 66–80.
- Olson, T. J., & Van Ommen, R. (2004). Optimizing hydrocyclone design using advanced CFD model. *Minerals Engineering*, *17*(5), 713–720.
doi:10.1016/j.mineng.2003.12.008
- Rushton, a., Ward, a. S., & Holdich, R. G. (1996). *Solid-Liquid Filtration and Separation Technology* (p. 278). Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH. doi:10.1002/9783527614974
- Svarovsky, L. (1992). Hydrocyclones. In L. Svarovsky & M. T. Thew (Eds.), *Solid-Liquid Separation* (Fourth Edi., Vol. 12, pp. 193–244). Dordrecht: Springer Netherlands. doi:10.1007/978-94-015-7981-0
- Trawinski, H., & Aragon Bouso, J. L. (2013). APLICACIONES Y FUNCIONAMIENTO PRÁCTICO. Eral, Equipos y procesos, S.A.
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (1995). *An Introduction to Computational Fluis Dynamics, The volume finite method* (p. 267). Longman Group Ltd 1995.
- Wang, B., & Yu, a. B. (2006). Numerical study of particle–fluid flow in hydrocyclones with different body dimensions. *Minerals Engineering*, *19*(10), 1022–1033. doi:10.1016/j.mineng.2006.03.016
- Wang, L., Zheng, Z., Wu, Y., Guo, J., Zhang, J., & Tang, C. (2009). Numerical and experimental study on liquid-solid flow in a hydrocyclone. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, *21*(3), 408–414. doi:10.1016/S1001-6058(08)60164-X
- Yan, D., & Gupta, A. (2006). Chapter 12. Classification. *Mineral Processing Design and Operation: An Introduction* (p. 366).

Zhang, J., You, X., & Niu, Z. (2011). Numerical Simulation of Solid-liquid Flow in Hydrocyclone, 25(1), 37–41.