

# Uso de CFD para la simulación de procesos mineralúrgicos de concentración gravimétrica

## Mineralurgical gravimetric process CFD simulation

Lina María Chica Osório<sup>1</sup>, Manuel Alejandro Ospina Alarcón<sup>2</sup>, Oswaldo Bustamante Rúa<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Magíster en Ingeniería – Materiales y Procesos. Estudiante Doctorado en Ingeniería – Ciencia y Tecnología de Materiales. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. Instituto Minerales Cimex lmchica@unal.edu.co

<sup>3</sup>Ph.D. Profesor Asociado Escuela de materiales Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín.

Recibido 29/11/11, Aceptado 18/04/2012

### RESUMEN

Se presenta un estudio numérico de flujo multifase realizado en un paquete comercial de CFD (Computational Fluid Dynamics) que pretende simular el movimiento de partículas al interior de equipos de concentración gravimétrica centrífuga (hidrociclón) y en lecho (jig) cuando se opera con suspensiones minerales de diferentes densidades y tamaños de partícula. Se evalúa la trayectoria de las partículas, aspecto que condiciona el funcionamiento de ambos equipos como concentradores gravitacionales.

Los resultados son claves para la comprensión de los mecanismos que rigen la separación y la eficiencia pues permiten explicar el origen de fenómenos hidrodinámicos importantes desde la perspectiva de aplicación industrial, una vez conocida la trayectoria.

**Palabras clave:** CFD, simulación de procesos, concentración gravimétrica, hidrociclón, jig.

### ABSTRACT

This paper presents a numerical study of multiphase flow in commercial package CFD (Computational Fluid Dynamics). Article aims to simulate particles movement within centrifugal gravity concentration equipment (hydrocyclone) and fluidized bed (jig) operating with mineral suspensions of different densities and particle sizes. It evaluates particles trajectory and its effects in operation of both gravity concentrators.

Results are important to understand mechanisms governing separation efficiency and thus help to explain origin of hydrodynamic phenomena important from industrial application perspective, if trajectory is know.

**Keywords:** CFD, process simulation, gravity concentration, hydrocyclone, jig.

**Nomenclatura**

$U$	Velocidad del fluido	$m_p$	Masa de la partícula
$\bar{u}_i$	Velocidad promedio	$V_p$	Volumen de la partícula
$u_i'$	Fluctuación de la velocidad	$C_D$	Coefficiente de arrastre
$p$	Presión del fluido	$D_p$	Diámetro de la partícula
$U_c$	Velocidad del fluido	$C_{VM}$	Coefficiente de masa virtual
$U_p$	Velocidad de la partícula	$C_L$	Coefficiente de levantamiento
$S_c$	Término fuente de masa	$g$	Gravedad
$S_{cm}$	Término fuente de momentum	$t$	Tiempo
<i>Símbolos griegos</i>			
$\rho_c$	Densidad del fluido	$\mu_e$	Viscosidad turbulenta
$\rho_p$	Densidad de la partícula	$\alpha$	Fracción volumétrica
$\mu$	Viscosidad del fluido		

**1. INTRODUCCIÓN**

El procesamiento de minerales es considerado fundamental dentro de la industria minera. Clásicamente, el término procesamiento de minerales o mineralurgia se emplea para describir las operaciones de transformación involucradas en el mejoramiento y recuperación de minerales [1]. Dichas operaciones son desarrolladas de manera secuencial para obtener una materia prima útil en procesos siguientes o un producto final deseable en el mercado. Las operaciones que se agrupan bajo el nombre procesamiento de minerales pueden dividirse en cuatro grupos: conminución o reducción de tamaño, clasificación, concentración y refinación. Cada una se destaca dentro de un proceso mineralúrgico, de acuerdo a las características mineralógicas del alimento y las especificaciones del producto final.

La concentración emplea la diferencia de propiedades físicas o volumétricas de las sustancias minerales para su separación generando la segregación de dos o más especies [2]. En un equipo de concentración gravimétrica una corriente denominada alimento es dividida en dos (Figura 1): una corriente llamada concentrado, que posee un contenido elevado de la especie de interés y otra corriente denominada colas, en la cual se disminuye sustancialmente este contenido [3].

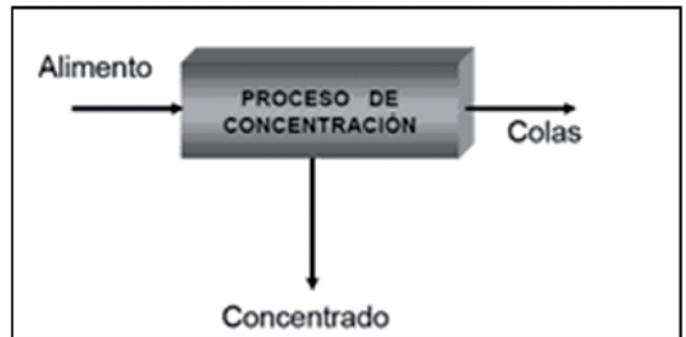
Uno de los equipos más ampliamente utilizado como concentrador gravimétrico es el jig. Este equipo utiliza corrientes verticales generadas por pulsaciones en el agua para la concentración. Un esquema general del jig se presenta en la Figura 2.

Un jig consta de un tanque abierto a la atmósfera que es llenado con agua, la cual oscila armónicamente en pulsos

de ascenso y descenso, como consecuencia de la transmisión de energía debido a movimientos de membranas o pistones. El tanque posee una criba, inclinada entre 10% y 20% y sobre esta yace un lecho poroso artificial (LPA), compuesto por partículas de densidad intermedia entre los minerales a separar. El tamaño apropiado de las partículas que ingresan a un jig debe oscilar entre 250 y 300  $\mu\text{m}$ .

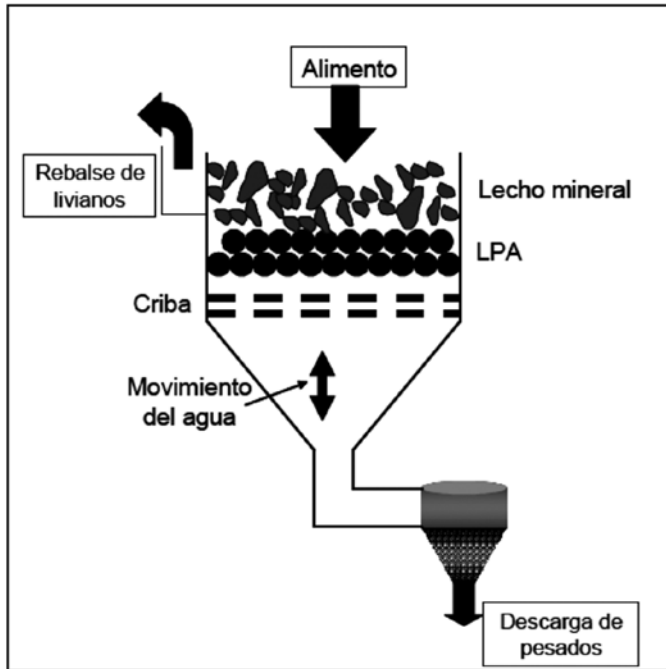
**Figura 1.** Esquema general de separación en un concentrador [3]

**Figure 1.** General separation schematic in concentrator [3]



En general, partículas en intervalos de tamaño más finos que el anteriormente descrito debe procesarse empleando, por ejemplo, hidrociclones, equipo versátil que de acuerdo a condiciones de operación puede emplearse como concentrador gravimétrico, clasificador por tamaños o separador sólido líquido. En un hidrociclón se aprovecha la velocidad relativa que adquieren las partículas al moverse en un fluido cuando están sometidas a una fuerza exterior, lo que significa que se emplea la diferencia de peso y no de

**Figura 2.** Esquema básico de un jig [3]  
**Figure 2.** Schematic jig representation [3]

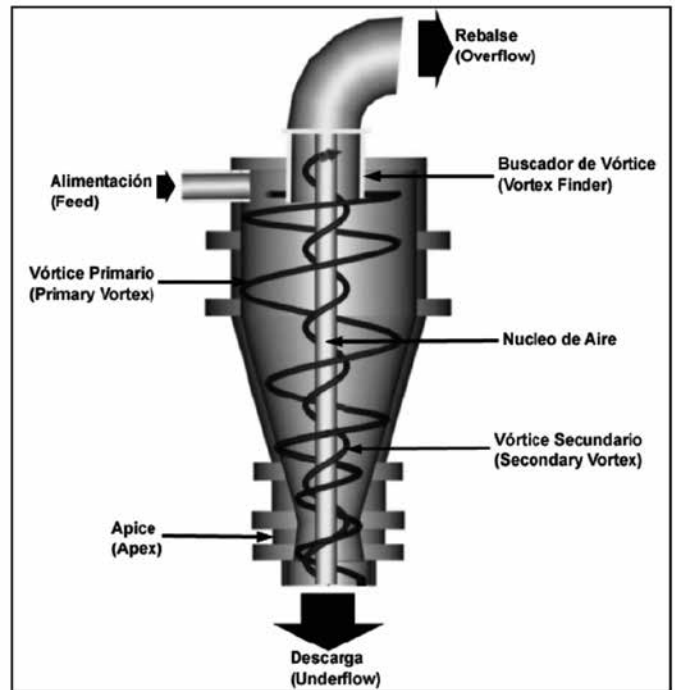


tamaño. Particularmente, este equipo es intensivamente usado en la actualidad dentro del procesamiento de minerales, debido a la sencillez de su operación, su capacidad, bajo costo de mantenimiento por la ausencia de partes móviles, y el amplio espectro de tamaños en los que puede emplearse [4].

Un hidrociclón consta de un estanque cilíndrico de fondo cónico con una alimentación tangencial en la parte superior (Figura 3). Posee dos salidas: una situada en el centro y en lo alto de la parte cilíndrica que recibe el nombre de *vortex finder* y por la cual es evacuada la corriente enriquecida en finos u *overflow*, y una en el extremo inferior del cono, que recibe el nombre de *ápex por la cual sale del equipo la corriente enriquecida en gruesos o underflow*. El proceso de separación en hidrociclones es llevado a cabo por un flujo turbulento generado por el ingreso tangencial del alimento y por un gradiente de presión a lo largo del eje del aparato consecuencia de la elevada velocidad angular [5]. A lo largo del eje central se desarrolla un núcleo de aire o *air core*.

Existe una paradoja entre la aparente sencillez del funcionamiento estos equipos y la hidrodinámica al interior de los mismos. Hasta ahora, los mecanismos que rigen el funcionamiento de estos dispositivos no se han entendido completamente. No ha sido posible comprender algunos aspectos relacionados con los campos de velocidad inte-

**Figura 3.** Esquema del funcionamiento de un hidrociclón [6]  
**Figure 3.** Schematic hydrocyclone operation [6]



rior y la trayectoria de las partículas desde la alimentación hasta las salidas.

Por ser equipos en donde el fluido se encuentra confinado, la observación y medición experimental del campo de flujo es muy limitada, y técnicas de dinámica de fluidos computacional (CFD Computacional Fluid Dynamics) adquieren relevancia en el estudio y optimización de este tipo de procesos mineralúrgicos. Sin embargo, la presencia de partículas al interior del flujo incrementa la complejidad del modelamiento y la simulación empleando CFD, sobre todo en lo relacionado con las condiciones iniciales y de frontera para la solución numérica del campo de flujo.

En este artículo, se presentan los resultados de una simulación numérica del flujo al interior de equipos de concentración gravimétrica tipo jig e hidrociclón empleando un código comercial y se emplea una aproximación Euleriana-Lagrangiana para determinar la trayectoria de las partículas.

### 1.1 Modelo computacional

*Ecuaciones que gobiernan el movimiento del fluido*

El movimiento de una fase continua es descrito en términos de las ecuaciones promedio de conservación de la masa (Eq.1) y el momentum (Eq. 2), conocidas como RANS Reynolds Average Navier Stokes [7].

$$\frac{\partial \alpha_c \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\alpha_c \rho u_i) = S_c \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\alpha_c \rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_c \rho u_i u_j) = -\alpha_c \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_c \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \alpha_c \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho u_i' u_j'}) + \alpha_c \rho_c g + S_{cm} \quad (2)$$

El término  $S_{cm}$  representa el intercambio de momentum partícula-fluido. El sistema de ecuaciones es cerrado mediante los modelos de turbulencia k-ε estándar o RNG. Es importante resaltar que el objeto de este artículo no es presentar en detalle los modelos empleados en la simulación numérica. Sin embargo, si el lector desea conocer más sobre los modelos de turbulencia empleados, se recomienda remitirse a [8] para más detalles.

*Ecuaciones que gobiernan el movimiento de las partículas*

En una aproximación Lagrangiana, la trayectoria de las partículas es simulada resolviendo la ecuación de movimiento para cada fase dispersa. Asumiendo partículas esféricas rígidas, el balance de fuerzas sobre una partícula está expresado por la Eq. (3) [8]:

$$m_p \frac{dU_p}{dt} = F_p + F_D + F_{VM} + F_L + F_H + F_G \quad (3)$$

Donde

$$F_p = V_p \nabla p : \text{Fuerza debida al gradiente de presión del fluido} \quad (4)$$

$$F_D = -\frac{\pi}{8} C_D \rho_c D_p^2 |U_p - U_c| (U_p - U_c) : \text{Fuerza de arrastre} \quad (5)$$

$$F_{VM} = -\left(\frac{Dl}{Dt} + I \cdot \nabla U_c\right) \text{ con } I = C_{VM} \rho_c V_p (U_p - U_c) : \quad (6)$$

Fuerza efecto de masa virtual

$$F_L = -C_L \rho_c V_p (U_p - U_c) \times (\nabla \times U_c) : \text{Fuerza de empuje} \quad (7)$$

$$F_G = \rho g : \text{Fuerza debida a la gravedad} \quad (8)$$

$$F_H : \text{Fuerza de Basset} \quad (9)$$

Una vez el campo de fuerzas es calculado la trayectoria puede estimarse a partir de la Eq.

$$\frac{dx_i}{dt} = U_{pi} \quad (10)$$

**Modelación en CFD**

*Descripción del sistema y mallado del volumen de control*

Las dimensiones empleadas para la simulación numérica listan en las Tabla 1 y 2 referidas a las Figuras 4 y 5, respectivamente. El mallado del volumen se realizó empleando el paquete comercial GAMBIT 2.4.6. El dominio computacional fue dividido en volúmenes hexagonales. Se realizaron dos mallas para analizar la independencia de la solución. Debido a la complejidad hidrodinámica del sistema, otros modelos en CFD han reportado el uso de máximo 500000 celdas para esta clase de dispositivos [9, 10, 11]. Una vista del esquema de mallado se muestra en

las Figuras 6 y 7. La calidad del mallado se considera aceptable si el Equiangular Skew es menor o igual a 0.5. Este criterio fue reportado por [12] para mallas en 3D. Como se discutirá más adelante, los resultados mostrados hacen referencia a la malla más fina que garantiza mayor convergencia y menor difusividad numérica.

**Tabla 1.** Dimensiones del hidrociclón  
**Table 1.** Hydrocyclone dimensions

Parámetro	Símbolo	Dimensión (mm)
Diámetro hidrociclón	Dc	155
Diámetro inlet	Di	60
Diámetro overflow	Do	50
Diámetro underflow	Du	35
Longitud vortex finder	Lv	350
Longitud sección cilíndrica	Lc	450
Longitud sección cónica	Lp	500

**Tabla 2.** Dimensiones del Jig  
**Table 2.** Jig dimensions

Parámetro	Símbolo	Dimensión (mm)
Diámetro cilindro exterior	D <sub>e</sub>	700
Diámetro cilindro interior	D <sub>i</sub>	500
Diámetro cono exterior	D <sub>1</sub>	400
Diámetro cono interior	D <sub>c</sub>	200
Diámetro caja concentrado	D <sub>c</sub>	200
Diámetro alimentación	D <sub>a</sub>	50
Diámetro caja de distribución	D <sub>f</sub>	200
Diámetro descarga colas	D <sub>o1</sub>	50
Diámetro descarga concentrado	D <sub>o2</sub>	50
Diámetro entrada agua de Hutch	D <sub>h</sub>	50
Altura cilindro exterior	H <sub>e</sub>	300
Altura cilindro interior	H <sub>1</sub>	300
Altura cono interior	L <sub>e</sub>	300
Altura cono exterior	L <sub>i</sub>	300

Figura 4. Geometría hidrociclón convencional  
Figure 4. Conventional hydrocyclone geometry

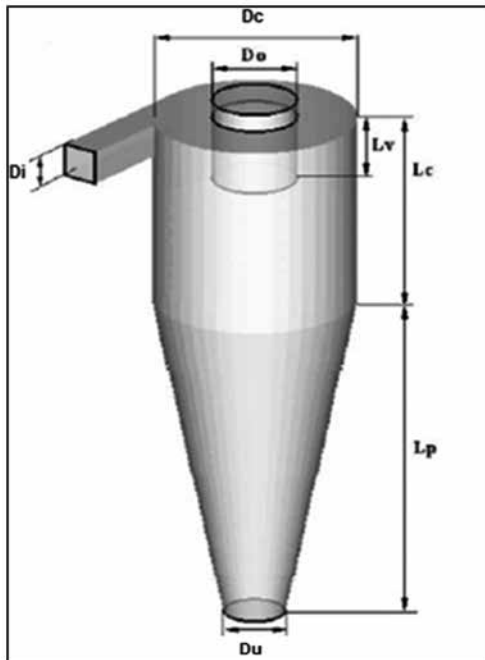


Figura 6. Mallado del dominio computacional del hidrociclón  
Figure 6. Computational grid of hydrocyclone

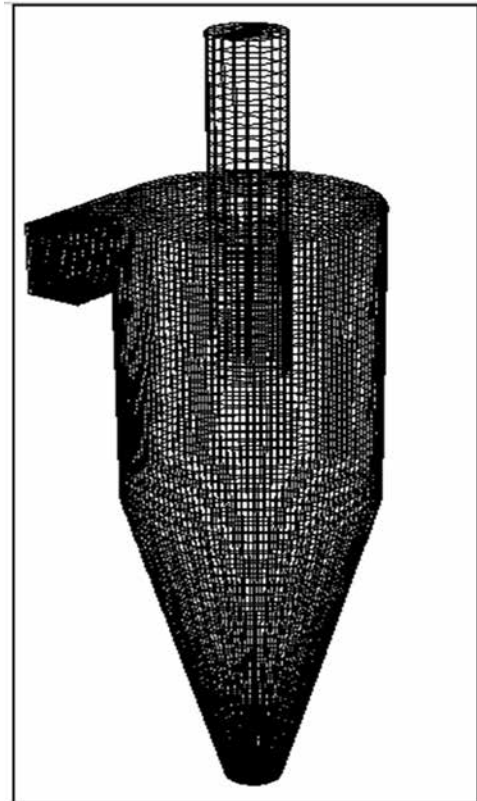


Figura 5. Geometría del jig  
Figure 5. Jig geometry

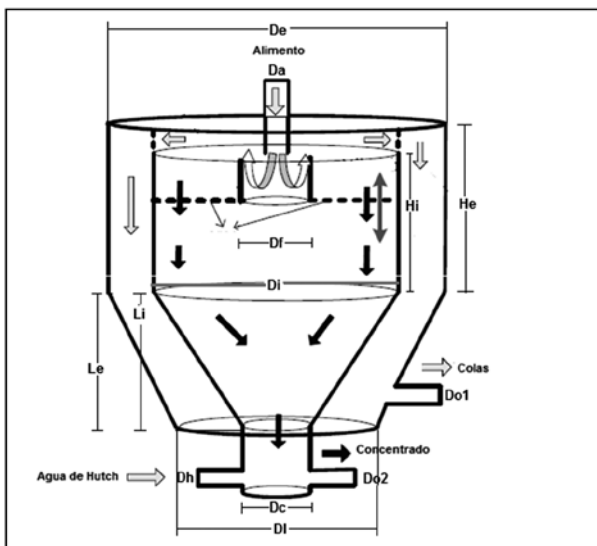
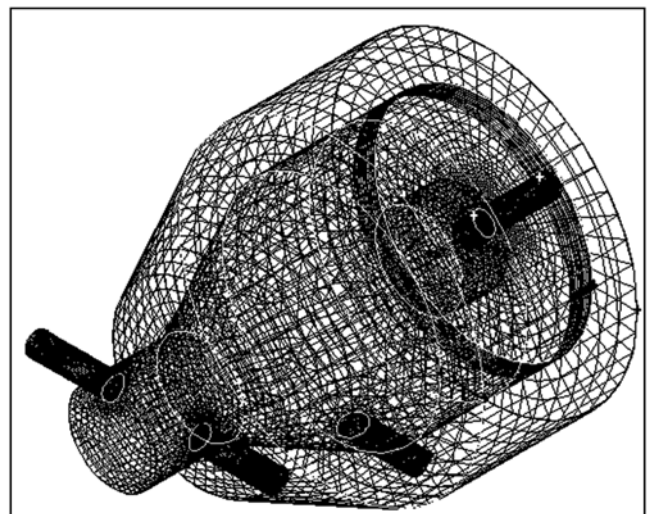


Figura 7. Mallado del dominio computacional del jig  
Figure 7. Computational grid of jig



Condiciones de frontera y definición del solver

Las condiciones de frontera asignadas son mostradas en las Tablas 3 y 4.

**Tabla 3.** Condiciones de frontera para el hidrociclón  
**Table 3.** Boundary condition for hydrocyclone

Zona	Tipo de condición	Condición	Valor
Inlet	Velocity inlet	Constante	100 m/s
Overflow	Pressure outlet	Abierto a la atmósfera	0 Pa
Underflow	Pressure outlet	Abierto a la atmósfera	0 Pa
Vortex finder	Wall	No deslizante	-
Interior	Fluid	Agua	$\rho = 998.2$ Kg/m <sup>3</sup> $\mu = 0.001003$ Kg/ms

**Tabla 4.** Condiciones de frontera para el jig  
**Table 4.** Boundary condition for jig

Zona	Tipo de condición	Condición	Valor
Entrada 1-Entrada de Alimento	Velocity inlet	Constante	10 (m/s)
Entrada 2-Agua de Hucth	Velocity inlet	Constante	4 (m/s)
Salida 1-Corriente de colas	Pressure outlet	Abierto a la atmosfera	101325 (Pas)
Salida 2-Corriente de concentrado	Pressure outlet	Abierto a la atmosfera	101325 (Pas)
Pared – Pared interna	Wall	No deslizante	0
Default_interior	Fluid	Agua	-
Criba	Porous jump	Espesor de poro	(cm)

La simulación numérica fue realizada en FLUENT 6.2 el cual emplea el método de volúmenes finitos para resolver las ecuaciones de transporte. Se empleó el modelo de turbulencia: k-ε estándar asumiendo un proceso isotérmico. Para la modelación del flujo, se consideró la solución de las ecuaciones de conservación de la masa y el momento empleando un método segregado capaz de resolver las ecuaciones de manera secuencial para cada iteración.

El esquema de discretización elegido fue *upwind* de segundo grado para reducir la difusión numérica. Se empleó el algoritmo SIMPLE para acoplar la presión y la velocidad. La convergencia fue evaluada siguiendo los residuales de cada variable y se consideró que la solución converge cuan-

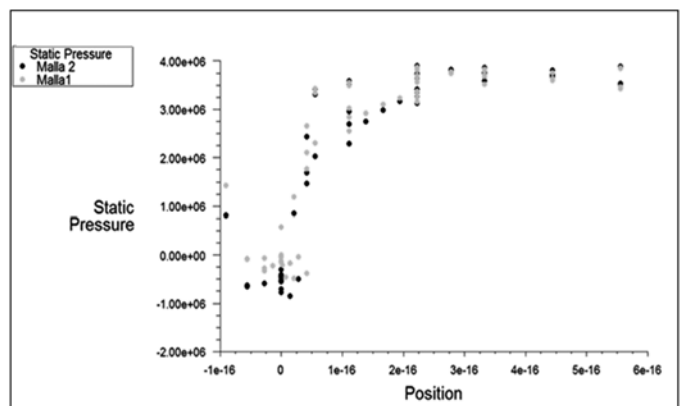
do los residuales de la masa caen en cinco órdenes de magnitud, y las demás variables tres. Dentro de las condiciones de operación se estableció un proceso bajo los efectos de la gravedad y se realizaron simulaciones de flujo para el estado estacionario y transiente. Una vez analizado el flujo interior, fueron adicionadas partículas a cada equipo para evaluar la trayectoria. A la corriente de entrada al hidrociclón fueron agregadas partículas de óxido de calcio de densidad 3320 Kg/m<sup>3</sup> y al jig partículas de oro cuya densidad es 19.320 Kg/m<sup>3</sup>. El tamaño de partícula de las inyecciones se ajusta a una distribución Rosin Ramler. Para la inyección de partículas, el *spread parameter* fue fijado en 0.8 y la velocidad de ingreso en 0m/s para asegurarse que las partículas sean arrastradas por el flujo de agua en la entrada. Se asumen partículas esféricas que no interactúan entre sí.

**2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

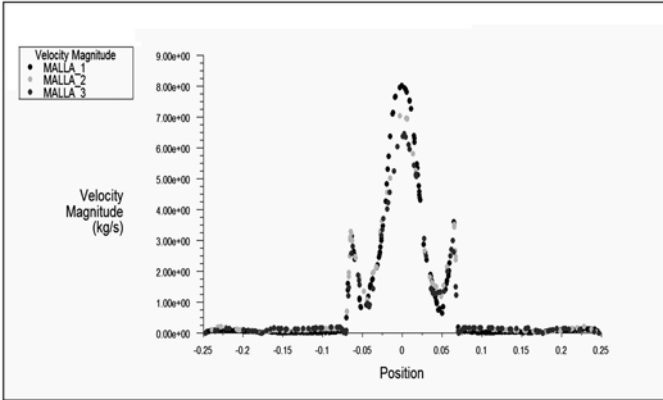
*Independencia de malla*

Se realizaron las simulaciones en el estado estacionario para el campo de flujo empleando dos mallas para el hidrociclón y tres para el jig. La Figura 8 muestra los resultados de presión estática obtenidos para la línea correspondiente el eje axial del hidrociclón para ambas corridas. Puede observarse que los valores hallados siguen la misma tendencia. Aunque existe una diferencia entre los resultados obtenidos, este no es considerable y por ello puede decirse que la solución es independiente del tamaño de la malla. De acuerdo a estos resultados se elige la malla 1, que es la más refinada, para el análisis del campo de flujo al interior del hidrociclón y para la evaluación de la trayectoria de las partículas. En el caso del jig la solución también es independiente de la malla utilizada. Esto se puede comprobar en las Figura 9 donde se muestran los perfiles de velocidad para una línea que pasa horizontalmente por el distribuidor de flujo en el jig. Se elige la malla 3 pues implica un menor costo computacional.

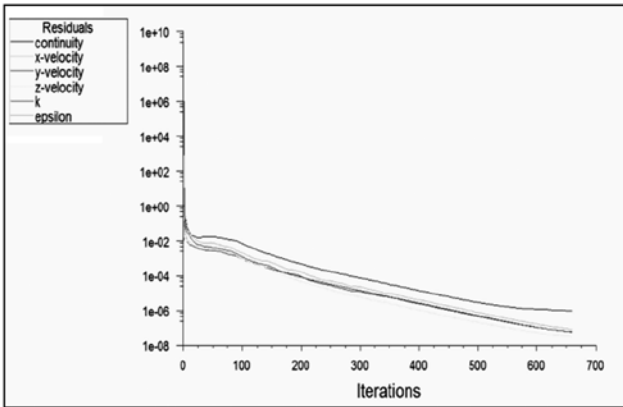
**Figura 8.** Influencia del tamaño malla en predicción de presión estática estado estacionario. Hidrociclón  
**Figure 8.** Mesh size influencing in static pressure prediction at stationary state. Hydrocyclone



**Figura 9.** Influencia del tamaño de malla en la predicción de velocidad en estado estacionario. Jig  
**Figure 9.** Mesh size influencing in static pressure prediction at stationary state. Jig



**Figura 10.** Residuales k-ε estándar. Hidrociclón  
**Figure 10.** k-ε standar residual plot. Hydrocyclone



Estado estacionario  
 Stationary state

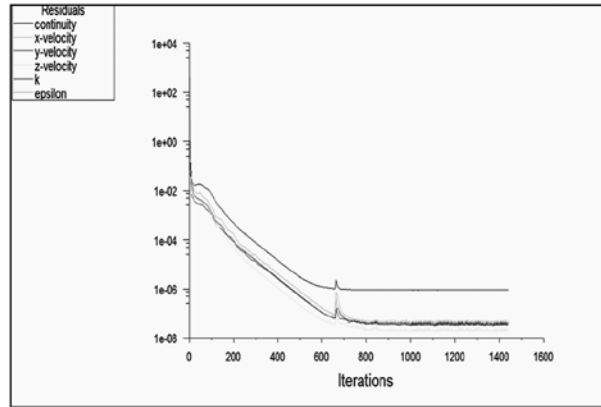
**Convergencia de la solución**

Los resultados de los residuales de las simulaciones para el estado estacionario y no estacionario empleando el modelo k-ε estándar se muestran en las Figuras 10 y 11 para el hidrociclón y el jig, respectivamente.

El reporte de flujos máxicos de la Tabla 5 indica que la diferencia entre los flujos de entrada y salida es menor al 0.2% del flujo neto, lo que garantiza la precisión de la simulación del campo de flujo.

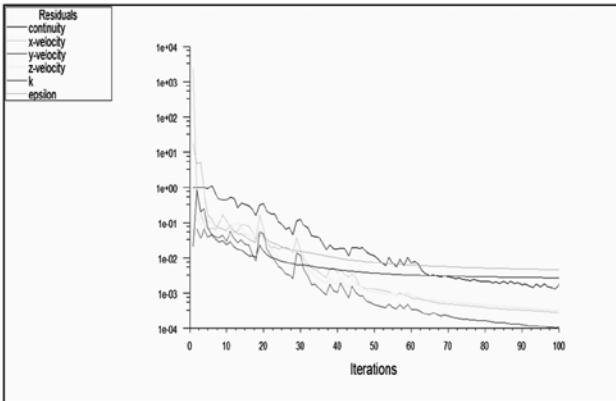
**Tabla 5.** Reporte de flujos máxicos  
**Table 5.** Mass flow report

Equipo	% Diferencia Mass Flow Rate	
	Estacionario	No estacionario
Hidrociclón	0.10	0.05
Jig	0.04	0.04

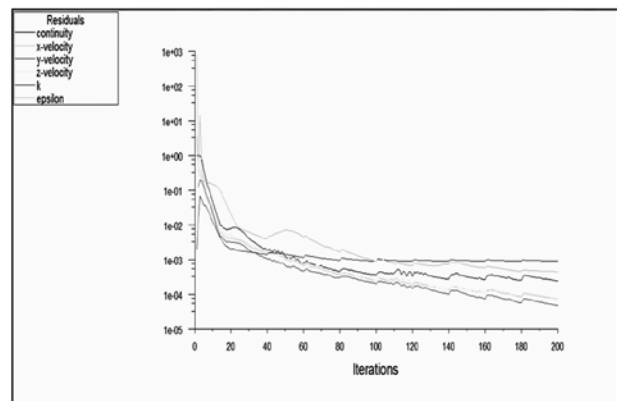


Estado no estacionario  
 Non stationary state

**Figura 11.** Residuales k-ε estándar. Jig  
**Figure 11.** k-ε standar residual plot. Jig



Estado estacionario  
 Stationary state



Estado no estacionario  
 Non stationary state



### Flujo al interior del Hidrociclón

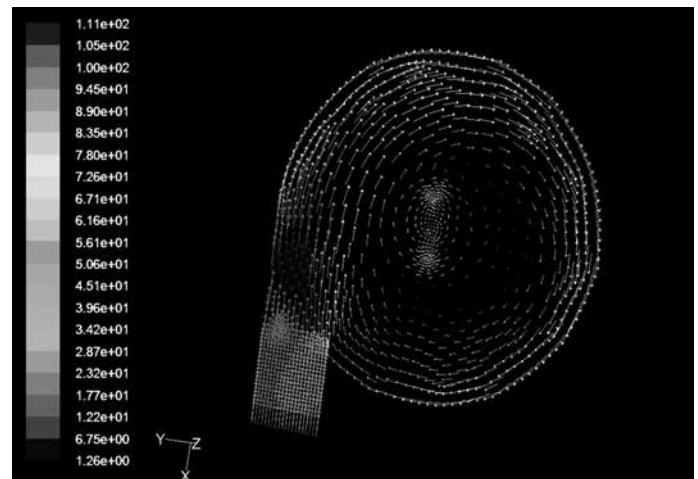
Los resultados obtenidos para los vectores de velocidad en un corte transversal a la altura de la entrada son mostrados en la Figura 12. Es posible determinar que la velocidad de la entrada del fluido al hidrociclón motivan la existencia de un campo de flujo centrífugo que se divide en dos corrientes: el rebalse y la descarga. Es claro que el fluido una vez ingresa al hidrociclón describe una combinación de flujos helicoidales: uno descendente y uno ascendente. Estos flujos generan un desplazamiento radial del fluido ocasionando un cambio en la dirección de flujo. Esto puede observarse en las *path lines*, líneas que, además que confirman la complejidad hidrodinámica del equipo, aún en el estado estacionario.

Es importante precisar que la velocidad radial, que a nivel experimental se determina por balance con las componentes axial y tangencial debido a la dificultad de su medición (es dos órdenes de magnitud menor que las otras dos) pero que a nivel de la operación del equipo es clave porque determina la trayectoria del flujo, es mostrada en la Figura 14 referida a una línea transversal a la altura media del equipo, en el caso de flujo en estado estacionario. Además de predecir en forma acertada la caída de la velocidad radial

sobre el eje axial del aparato, es claro que un modelo CFD es una herramienta útil en su determinación que garantiza un menor error en la estimación que el balance a partir de medidas experimentales.

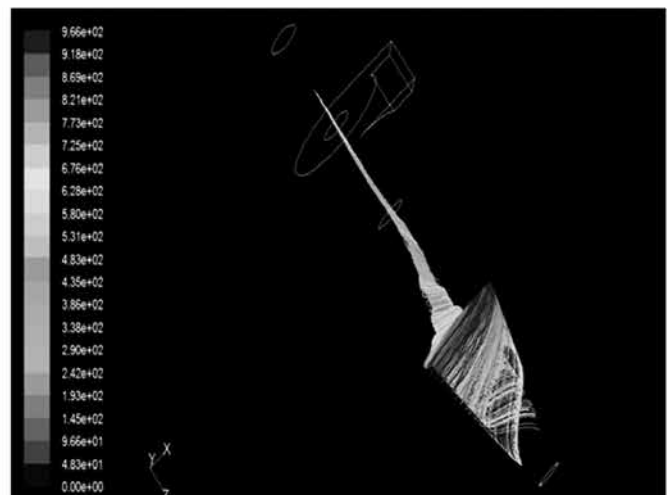
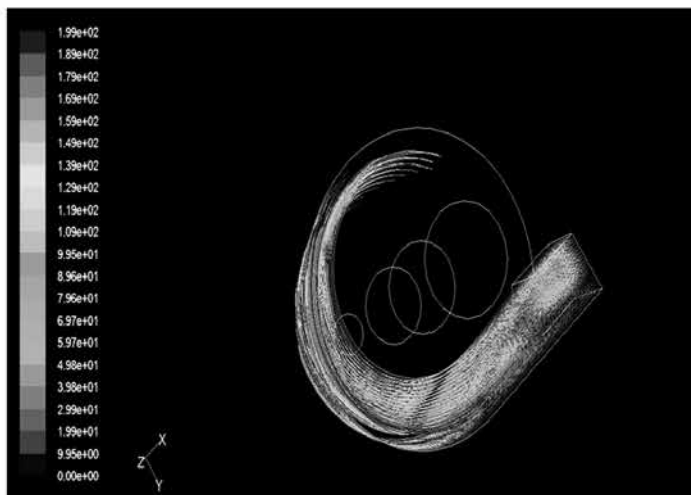
**Figura 12.** Magnitud vectores velocidad (m/s) en corte transversal. Campo de flujo centrífugo.

**Figure 12.** Velocity vectors magnitude (m/s) in transversal plane. Centrifugal flow field.



**Figura 13.** *Path lines* del flujo en la alimentación y plano transversal medio.

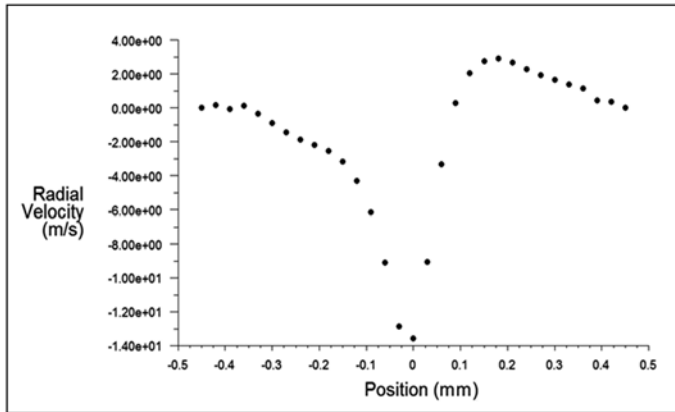
**Figure 13.** Flow *path lines* in feed and middle transversal plane.





**Figura 14.** Velocidad radial (m/s) referida a una línea transversal a la altura media del equipo.

**Figure 14.** Radial velocity (m/s) in transversal line to middle axial height

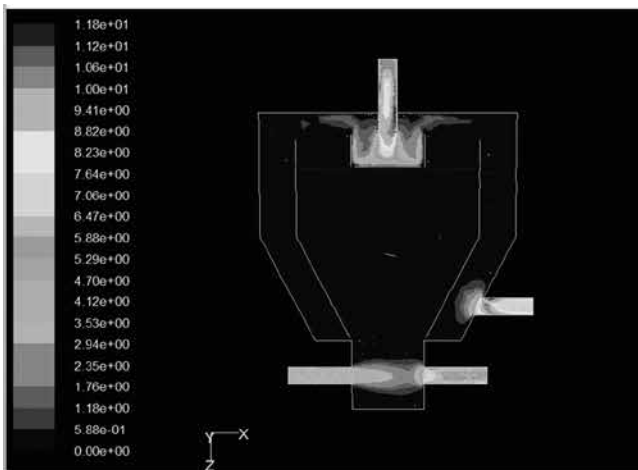


**Flujo al interior del jig**

La Figura 15 A muestra los resultados de simulación del perfil de velocidad del fluido para el jig. La velocidad disminuye continuamente desde las entradas al interior del equipo, volviéndose a incrementar en la salida. La velocidad cerca de la pared del distribuidor es alta, esto ayuda a entender el fuerte impacto del fluido sobre el fondo del distribuidor y la generación de una turbulencia que distribuye el fluido de una manera uniforme a través de toda la sección cilíndrica. Los vectores de velocidad (Figura 15 B) indican la dirección de entrada y salida del fluido. Los vectores de velocidad disminuyen continuamente desde las entradas al interior del equipo, volviéndose a incrementar en la salida. La velocidad cerca de la pared del distribuidor es alta, esto ayuda a entender el fuerte impacto del fluido sobre el fondo del distribuidor y la generación de una turbulencia que distribuye el fluido de una manera uniforme a través de toda la sección cilíndrica.

**Figura 15.** Perfiles de velocidad del fluido en estado estacionario.

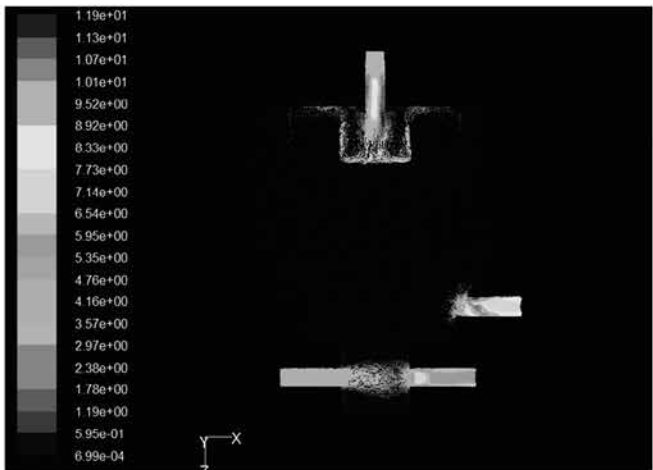
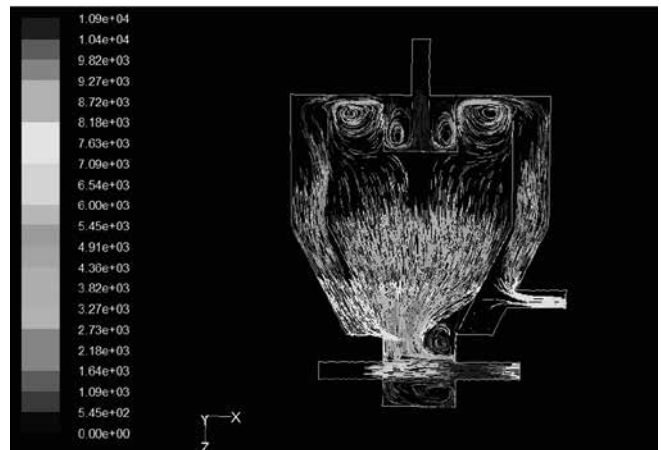
**Figure 15.** Fluid Velocity profile at stationary state



Para una mejor comprensión del flujo en el Jig, se trazo la trayectoria del agua y las partículas separadamente. En la Figura 16 se observa que el flujo de agua del alimento siempre sale por las colas y nada de esta masa de agua se encuentra a la salida de la corriente de concentrado, mientras que las líneas del agua de hutch, muestran que una porción de agua pasa por el LPA en la criba y es descargada en la corriente de colas. El agua de hutch también recircula en el Jig antes de salir por la corriente de concentrado y colas, el fuerte flujo horizontal del agua de hutch ayuda a las partículas del concentrado a salir por la respectiva corriente y la porción que fluye sobre la criba ayuda a empujar las partículas menos densas hacia la corriente de colas. Este movimiento del agua de hutch explica que un aumento del agua de hutch no necesariamente aumenta la eficiencia de la separación. Pese a que el movimiento de las partículas fue ignorado se aprecia que el flujo de agua es muy sensible a la geometría del distribuidor, el cual se utiliza para distribuir la pulpa a través de la criba. Se deben realizar simulaciones variando la altura del distribuidor y así lograr la altura que mejor evidencie la separación.

**Figura 16.** Path lines del fluido.

**Figure 16.** Fluid path lines.



**Trayectoria de las partículas**

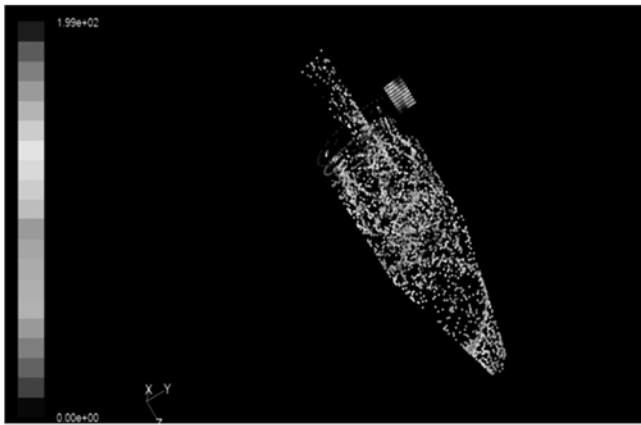
En un hidrociclón, la separación por tamaño se asocia a la trayectoria de las partículas desde la alimentación hasta las salidas. Es evidente suponer que las partículas son arrastradas por el fluido y que por ello el campo de flujo es el responsable de la clasificación. La Figura 17 muestra el seguimiento a la inyección velocidad de las partículas en 50s. Aquellas partículas ubicadas sobre la pared tienen velocidad cero (condición de pared no deslizante). Las partículas más gruesas de la distribución adquieren mayor velocidad dentro del campo de flujo del fluido y son arrastradas hacia el *underflow* (Figura 17 A).

Es de esperarse que estas partículas permanezcan menos tiempo al interior del equipo como se muestra en la Figura 17 B. Así mismo en la zona de la descarga la concentración de partículas es mayor que en otras regiones del

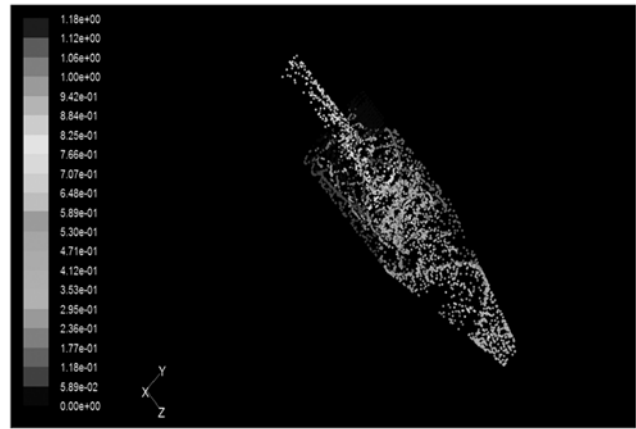
hidrociclón (Figura 17 C) y esto se ajusta a la operación real del equipo, en donde la mayor parte de las partículas y alrededor del 10% del fluido son evacuadas por la descarga (típica corriente de gruesos), mientras que el 90% del fluido y las partículas alimentadas restantes salen del equipo en el reblase. Debe destacarse que las partículas finas permanecen más tiempo al interior del campo de flujo pues son llevadas hacia el *vortex finder* por la recirculación axial del fluido.

En el jig, el desempeño de la separación de las partículas depende de su diámetro y su densidad. Las Figuras 18 muestran la distribución de las partículas de oro en el Jig. Se cree que el lecho de partículas es fundamental para la segregación de las partículas y la posterior separación [13,14]. En las figuras se observa que las partículas de diferentes tamaños tiene una distribución similar. Esto hace

**Figura 17.** Traza de Partículas en el hidrociclón.  
**Figure 17.** Particle tracking in hydrocyclone.



**A.** Magnitud velocidad (m/s).  
**A.** Velocity magnitude (m/s).

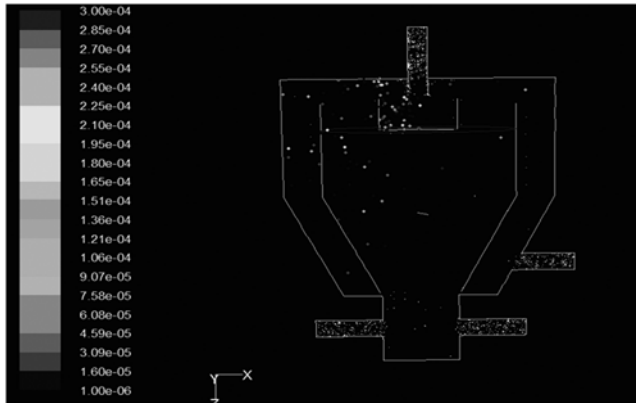


**B.** Tiempo de residencia (s).  
**B.** Residence time (s).

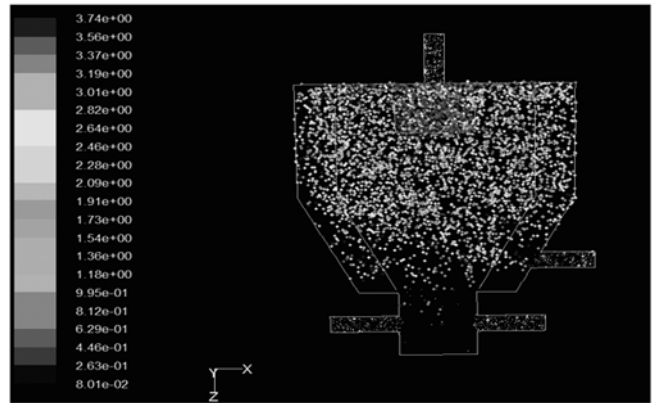


**C.** Concentración (kg/m³).  
**C.** Concentration (kg/m³).

**Figura 18.** Trayectoria de partículas en jig  
**Figure 18.** Particle tracking in jig



**A.** Diámetro de partícula (cm)  
**A.** Particle diameter (cm)



**B.** Tiempo de residencia (s).  
**B.** Residence time (s).

que en trabajos posteriores se pueda mirar el comportamiento de partículas de diferente densidad, pues se espera que estas presenten diferente distribución [11]. Se ven las diferencias generales en las trayectorias de las partículas. Cuando las partículas ingresan al distribuidor siguen trayectorias similares pero cuando las partículas rebasan la zona del distribuidor, estas tienen pocas colisiones con otras, esto significa que se notan marcadas diferencias en su trayectoria debido al movimiento del agua y la colisión partícula-partícula puede despreciarse.

Los resultados anteriores sugieren una investigación más profunda de las características de la generación del ciclo de pulsado en el Jig, pues las simulaciones previas muestran una alta dependencia del movimiento de agua en la separación debido a las fuerzas de arrastre y fuerza gravitacional y demás fuerzas debidas a la pulsación, las cuales son responsables de la eficiencia de la separación de las partículas de oro.

### 3. CONCLUSIONES

- A través de un modelo en CFD obtenido fue posible simular el campo de flujo al interior de un hidrociclón, incluyendo la velocidad radial.
- Se determinó que la trayectoria de las partículas (que define la separación por tamaños) es consecuencia del campo de flujo del fluido.
- A pesar de las limitaciones en la modelación de hidrociclones en CFD, los resultados de la simulación coinciden con los resultados experimentales clásicos. Estudios posteriores serían importantes para determinar la influencia de variables geométricas y operacionales sobre la clasificación.

- Se desarrolló un modelo CFD con acoplamiento de una vía para describir y comprender el flujo multifase en un Jig. Este modelo es una primera aproximación para el estudio del flujo y así poder predecir un buen porcentaje de concentración de oro, además, se puede predecir que el flujo es muy sensible a los parámetros de funcionamiento y a las propiedades de los materiales que se desean separar donde esto da lugar al estado no estacionario y a la turbulencia generada en el equipo.
- La trayectoria de las partículas y la predicción de la eficiencia de separación se calculan una vez los contornos de velocidad del fluido se simulan. Se debe aclarar que para propósitos tanto investigativos como industriales se deben realizar más simulaciones involucrando diferentes tipos de modelos y realizar la respectiva validación con datos experimentales, ya sea en un laboratorio, planta piloto o pruebas a escala industrial que nos permitan afirmar que los resultados de la simulación son aptos de aplicar a problemas de separación por gravedad en la industria minera nacional.

### REFERENCIAS

- [1] Fuerstenau, M.C., and Kenneth, N., Principles of Minerals Processing. SEM Editorial., New York, 2003.
- [2] Wills, B.A., Minerals Processing Technology, Butterworth-Heinemann., London, 1997.
- [3] Bustamante, M.O., Gaviria, A.C., and Restrepo, O.J., Notas de clase asignatura concentración de minerales. Editorial Universidad Nacional de Colombia., Medellín, 2007.
- [4] Bustamante M.O. (1991) Efecto de la geometría de un hidrociclón sobre las condiciones normales de operación.

- Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería. Universidad de Concepción, 1991.
- [5] Neesse, T., and Dueck, J., *Air core* formation in the hydrocyclone, *Journal of Minerals Engineering*, 20, 349–354, 2007.
- [6] Tapia Quezada, J., *Preparación Mecánica de Minerales*, Editorial Universitaria Arturo Prat., Lima, 2002.
- [7] Ranade, V., *Computational Flow Modeling for Chemical Reactor Engineering*, Academic Press., London, 2002.
- [8] FLUENT 6.2, *User's guide*. Fluent Inc., 2006.
- [9] Cullivan, J.C., Williams, R.A., Dyakowski, T., and Cross, C.R., New understanding of a hydrocyclone flow field and separation mechanism from computational fluid dynamics, *Minerals Engineering* 5 651–660, 2004.
- [10] Zhou, N., and Wei, Y., Investigation of velocity field and oil distribution in an oil–water hydrocyclone using a particle dynamics analyzer, *Chemical Engineering Journal* 157, 73–79, 2010.
- [11] Dong, K.J., Kuang, S.B., Vince, A., Hughes, T., and Yu, A.B., Numerical simulation of the in-line pressure jig unit in coal preparation. *Minerals Engineering* 23, 301-312, 2010.
- [12] Sivaguru, K., Meera, K.M., and Anantharaman, N., Hydrodynamic studies on three-phase fluidized bed using CFD analysis, *Chemical Engineering Journal* 155, 207–214, 2009.
- [13] Vince, A., Purdon P., Gibso, L., and Hughes, T., Evaluation of in-line pressure jig, ACARP Project C16042, 2007.
- [14] Nesbitt, A.B., Breytenbach, W., and Van der Plas, P.J., Characterization of the pulse wave of an inline pressure jig in a near density application. *Minerals Engineering* 18, 1–7, 2005.