



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

SIMULACIÓN FLUIDODINÁMICA TRANSIENTE DE PROTOTIPOS DE CELDAS DE
FLOTACIÓN CÓNICAS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

SEBASTIÁN IGNACIO FUENTES ESPINOZA

PROFESOR GUÍA:
ALVARO VALENCIA MUSALEM

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
GONZALO MONTES ATENAS
WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ

SANTIAGO DE CHILE
2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO
POR: SEBASTIÁN IGNACIO FUENTES ESPINOZA
FECHA: ENERO 2019
PROF. GUÍA: ALVARO VALENCIA MUSALEM

SIMULACIÓN FLUIDODINÁMICA TRANSIENTE DE PROTOTIPOS DE CELDAS DE FLOTACIÓN CÓNICAS

En la minería nacional existe una creciente demanda por el uso de agua para procesos, debido, entre otros factores, a una futura predominancia de plantas de concentración de cobre, que tienen un uso intensivo del recurso hídrico. El equipo responsable del mayor consumo de agua en las plantas de concentración es la celda de flotación, en la cual bajo principios físicos y químicos, se logra separar la ganga del mineral de interés, en este caso cobre.

Bajo este escenario, en el departamento de Ingeniería Civil de Minas de la Universidad de Chile se está desarrollando un prototipo de celda de flotación, que es diferente a las celdas tradicionales tanto geométrica como operativamente, con el fin de llegar a un diseño que sea capaz de trabajar con pulpas más espesas y así poder disminuir el consumo de agua en el proceso.

Dicho lo anterior, el tema de memoria tiene por **objetivo general** estudiar y caracterizar el comportamiento fluidodinámico transiente de nuevos prototipos de celdas de flotación cónicas utilizando una metodología CFD. Por otro lado, los **objetivos específicos** son:

- Estudiar el comportamiento de las celdas de flotación frente a distintas concentraciones de sólidos en la pulpa.
- Estudiar el comportamiento de las celdas de flotación frente a distintos caudales de inyección de aire.
- Caracterizar el comportamiento de las celdas de flotación estudiadas.
- Definir las directrices de diseño que debe tener una celda de flotación cónica.

La metodología de trabajo contempla una revisión bibliográfica, seguida de simulaciones CFD a 2 geometrías de celdas de flotación cónicas inspiradas en una celda experimental, para así identificar problemas de diseño y elaborar una nueva geometría que logre definir las directrices de diseño que hay que seguir para construir celdas de flotación cónicas más eficientes, todo respaldado por simulaciones de condiciones de operación representativas.

Los resultados arrojan que las geometrías cónicas existentes, desarrolladas por el departamento de Ingeniería Civil de Minas, tienen un desempeño hidráulico deficiente en cuanto a la separación de fases, debido a el gran diámetro de la celda que causa campos de velocidades tangenciales bajos, lo cuales no propician la separación hidráulica.

Se concluye que las geometrías experimentales actuales no cumplen con los requisitos de operación mínimos y deben hacerse cambios significativos en el diseño, disminuyendo la relación largo/diámetro de la celda y modificando la disposición de sus entradas y salidas.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes básicos	1
1.2. Motivación	2
1.3. Objetivos	2
1.3.1. Objetivo general	2
1.3.2. Objetivos específicos	2
1.4. Alcances	2
2. Antecedentes Bibliográficos	5
2.1. Consumo de agua en la minería	5
2.2. Proceso de flotación	6
2.3. Caracterización de la pulpa	7
2.3.1. Concentración en sólidos	7
2.3.2. Densidad	8
2.3.3. Viscosidad	8
2.4. Prototipos de celdas de flotación	9
2.4.1. Datos experimentales	10
2.5. Parámetros de simulación	11
2.5.1. Tipo de fluido	11
2.5.1.1. Fluidos newtonianos	11
2.5.1.2. Fluidos no-newtonianos	12
2.5.2. Modelos multifásicos	12
2.5.3. Eulerian Model	13
2.5.4. Mixture Model	13
2.5.5. Volume of Fluid (VOF) Model	14
2.5.6. Modelo de turbulencia $k - \varepsilon$ realizable	15
2.5.7. Time Step	15
2.5.7.1. Fixed Time Step	15
2.5.7.2. Variable Time Stepping	15
3. Metodología	17
3.1. Metodología general de trabajo	17
3.1.1. Etapa I	17
3.1.2. Etapa II	18
3.1.3. Etapa III	19
3.1.4. Etapa IV:	20

3.2.	Propiedades reológicas	21
3.3.	Condiciones de operación	23
3.3.1.	Condiciones de operación bases	23
3.3.2.	Condiciones de operación de los casos de interés	24
3.4.	Geometrías de trabajo (CE y CEM)	24
3.5.	Modelos multifásicos	26
3.6.	Mallado	26
3.7.	Evaluación de resultados	27
3.7.1.	Sentido Se	27
3.7.2.	Mantención Ma	27
3.7.3.	Velocidad Ve	28
3.7.4.	Frenado Fr	28
3.8.	Setup Fluent	28
4.	Resultados	35
4.1.	Simulación de las condiciones de operación bases	35
4.1.1.	Análisis de sensibilidad	35
4.1.2.	Resultados simulaciones	35
4.1.3.	Análisis parcial de resultados	40
4.2.	Simulación de los casos de interés	41
4.2.1.	Selección de la malla	41
4.2.2.	Resultados simulaciones	42
4.2.3.	Análisis parcial de resultados	53
4.3.	Simulación de los casos de interés en la Propuesta de Diseño	53
4.3.1.	Directrices del nuevo diseño	53
4.3.2.	Geometría PD	54
4.3.3.	Análisis de sensibilidad	55
4.3.4.	Resultados simulaciones	57
4.4.	Indicadores de desempeño	65
5.	Análisis de resultados	69
6.	Conclusiones	73
7.	Recomendaciones	75
	Bibliografía	77

Índice de Tablas

2.1. Resultados experimentales sobre la celda de flotación cónica experimental . .	11
3.1. Densidades de las fases de la pulpa sin mezclarlas.	22
3.2. Concentraciones y densidades de las fases que componen la pulpa.	22
3.3. Fracciones volumétricas de la fase sulfuro que deben ser inyectados para obtener una ley del 1,7% Cu.	22
3.4. Viscosidades dinámicas y esfuerzos de fluencia de la pulpa para las concentraciones de estudio.	23
3.5. Condiciones de operación bases.	23
3.6. Dimensiones del diseño CAD de la Celda Experimental (CE).	25
4.1. Características malla de la geometría CE para la simulación de los casos bases.	36
4.2. Parámetros de calidad del mallado de la geometría CE para la simulación de los casos bases.	36
4.3. Flujos máxicos en las simulaciones de la geometría CE con las condiciones de operación bases.	39
4.4. Condiciones de operación casos de interés.	41
4.5. Características malla de la geometría CE para la simulación de los casos de interés.	41
4.6. Parámetros de calidad del mallado de la geometría CE para la simulación de los casos de interés.	41
4.7. Fracciones volumétricas de aire en las salidas tangencial y axial de la geometría CE sometida a las condiciones de operación de interés.	44
4.8. Fracciones volumétricas de aire en las salidas tangencial y axial de la geometría CEM sometida a las condiciones de operación de interés.	44
4.9. Flujos máxicos en las simulaciones de la geometría CE con las condiciones de operación de los casos de interés, utilizando la concentración en sólidos del 50%.	44
4.10. Flujos máxicos en las simulaciones de la geometría CEM con las condiciones de operación de los casos de interés, utilizando la concentración en sólidos del 50%.	45
4.11. Dimensiones del diseño CAD de la Propuesta de Diseño (PD).	54
4.12. Características malla de la geometría PD para la simulación de los casos de interés.	56
4.13. Parámetros de calidad del mallado de la geometría PD para la simulación de los casos de interés.	56

4.14. Fracciones volumétricas de aire en las salidas tangencial y axial de la geometría PD sometida a las condiciones de operación de interés.	58
4.15. Flujos máxicos en las simulaciones de la geometría PD con las condiciones de operación de los casos de interés, utilizando la concentración en sólidos del 50%.	59
4.16. Indicadores de desempeño hidráulico de las geometrías CE, CEM y PD bajo las condiciones de operación de interés.	65

Índice de Ilustraciones

2.1. Consumo total de agua, continental y de mar, por sector productivo en minería durante la producción del año 2016 [2].	6
2.2. Principio de flotación en una celda de flotación mecánica [5].	6
2.3. Prototipo original de celda de flotación cilíndrica, la cuál ya se encuentra simulada en trabajo de memoria de título anterior [11].	9
2.4. Diagramas de celdas de flotación cónicas que están siendo actualmente estudiadas por el Departamento de Ingeniería Civil de Minas de la Universidad de Chile.	10
3.1. Diagrama de flujo de la Etapa I.	18
3.2. Diagrama de flujo de la Etapa II.	19
3.3. Diagrama de flujo de la Etapa III.	20
3.4. Diagrama de flujo de la Etapa IV.	21
3.5. Celda Experimental (CE) en posesión del Departamento de Ingeniería de Minas.	24
3.6. Diseño CAD de la Celda Experimental (CE).	25
3.7. Diseño CAD de la Celda Experimental Mejorada (CEM).	26
3.8. Setup general de las simulaciones.	29
3.9. Configuración de los modelos multifásicos utilizados.	29
3.10. Modelo de turbulencia.	30
3.11. Propiedades de la fase sulfuros de cobre con un 50% de concentración de sólidos en peso.	30
3.12. Condiciones de borde de las entradas y salidas de las celdas de flotación.	31
3.13. Métodos de solución.	32
3.14. Parámetros del time step adaptativo.	33
4.1. Análisis de sensibilidad sobre el promedio de la velocidad tangencial para la geometría CE.	36
4.2. Análisis de sensibilidad sobre el promedio de la velocidad axial para la geometría CE.	37
4.3. Planos de estudio perpendiculares al eje de la celda de flotación, distribuidos de forma equidistantes entre la entrada tangencial y salida tangencial.	37
4.4. Resultados de las velocidades tangenciales a lo largo de la geometría CE con una pulpa con concentración de sólidos del 40%, utilizando el modelo <i>Mixture</i>	38
4.5. Resultados de las velocidades tangenciales a lo largo de la geometría CE con una pulpa con concentración de sólidos del 50%, utilizando el modelo <i>Mixture</i>	38

4.6. Resultados de las velocidades tangenciales a lo largo de la geometría CE con una pulpa con concentración de sólidos del 60 %, utilizando el modelo <i>Mixture</i> .	39
4.7. Variación en la concentración de la fase de sulfuros entre inyecciones y salidas de la CE, para los 3 casos sin inyección de aire.	40
4.8. Mallado de la geometría CE para la simulación de los casos de operación de interés.	42
4.9. Resultados de las velocidades tangenciales a lo largo de la geometría CE con una pulpa con concentración de sólidos del 50 %, utilizando el modelo <i>Euleriano</i> .	43
4.10. Resultados de las velocidades tangenciales a lo largo de la geometría CEM con una pulpa con concentración de sólidos del 50 %, utilizando el modelo <i>Euleriano</i> .	43
4.11. Velocidades tangenciales globales de las geometrías CE y CEM, obtenidas como un resultado de una integración volumétrica sobre el volumen de control.	45
4.12. Velocidades axiales globales de las geometrías CE y CEM, obtenidas como un resultado de una integración volumétrica sobre el volumen de control.	46
4.13. Plano vertical transversal a lo largo de toda la geometría CE, sobre el cual se obtienen resultados gráficos.. . . .	47
4.14. Pathlines de velocidad absoluta en $[m/s]$ de la fase sulfuros de cobre, para las simulaciones de las geometrías CE y CEM con una concentración en sólidos del 50 % en peso.	48
4.15. Fracción en volumen de la fase aire en el plano de estudio transversal a lo largo de la celda, para las geometrías CE y CEM con una concentración en sólidos del 50 % en peso.	49
4.16. Fracción en volumen de la fase sulfuros de cobre en el plano de estudio transversal a lo largo de la celda, para las geometrías CE y CEM con una concentración en sólidos del 50 % en peso.	50
4.17. Velocidad tangencial en $[m/s]$ de la fase sulfuros de cobre en el plano de estudio transversal a lo largo de la celda, para las geometrías CE y CEM con una concentración en sólidos del 50 % en peso.	51
4.18. Velocidad axial (positivo hacia la derecha) en $[m/s]$ de la fase sulfuros de cobre en el plano de estudio transversal a lo largo de la celda, para las geometrías CE y CEM con una concentración en sólidos del 50 % en peso.	52
4.19. Diseño CAD de la Propuesta de Diseño (PD).	54
4.20. Análisis de sensibilidad sobre el promedio de la velocidad tangencial para la geometría PD.	55
4.21. Análisis de sensibilidad sobre el promedio de la velocidad axial para la geometría PD.	56
4.22. Mallado de la geometría PD para la simulación de los casos de operación de interés.	57
4.23. Planos de estudio perpendiculares al eje de la celda de flotación, distribuidos de forma equidistantes entre la entrada tangencial de aire y salida tangencial.	57
4.24. Resultados de las velocidades tangenciales a lo largo de la geometría PD con una pulpa con concentración de sólidos del 50 %, utilizando el modelo <i>Mixture</i> .	58
4.25. Velocidades globales de la geometría PD, obtenidas como un resultado de una integración volumétrica sobre el volumen de control.	59
4.26. Pathlines de velocidad absoluta en $[m/s]$ de la fase sulfuros de cobre, para las simulaciones de la geometría PD con una concentración en sólidos del 50 % en peso.	60

4.27. Fracción en volumen de la fase aire en el plano de estudio transversal a lo largo de la celda, para las simulaciones de la geometría PD con una concentración en sólidos del 50 % en peso.	61
4.28. Fracción en volumen de la fase sulfuros de cobre en el plano de estudio transversal a lo largo de la celda, para las simulaciones de la geometría PD con una concentración en sólidos del 50 % en peso.	62
4.29. Velocidad tangencial en $[m/s]$ de la fase sulfuros de cobre en el plano de estudio transversal a lo largo de la celda, para las simulaciones de la geometría PD con una concentración en sólidos del 50 % en peso.	63
4.30. Velocidad axial (negativo hacia la derecha) en $[m/s]$ de la fase sulfuros de cobre en el plano de estudio transversal a lo largo de la celda, para las simulaciones de la geometría PD con una concentración en sólidos del 50 % en peso.	64
4.31. Indicador de desempeño hidráulico Se para la geometrías CE, CEM y PD bajo las condiciones de operación de interés.	66
4.32. Indicador de desempeño hidráulico Ma para la geometrías CE, CEM y PD bajo las condiciones de operación de interés.	66
4.33. Indicador de desempeño hidráulico Ve para la geometrías CE, CEM y PD bajo las condiciones de operación de interés.	67
4.34. Indicador de desempeño hidráulico Fr para la geometrías CE, CEM y PD bajo las condiciones de operación de interés.	67
4.35. Indicador de Desempeño Hidráulico Global DHG para la geometrías CE, CEM y PD bajo las condiciones de operación de interés.	68

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes básicos

Dentro de la industria minera el recurso hídrico, es de vital importancia para llevar a cabo sus procesos. Si bien existen nuevos proyectos mineros que apuntan a incrementar el consumo de agua de mar y disminuir el consumo de agua de origen continental, de todas formas dentro de la industria existe una proyección de aumento sostenido en el uso del recurso para los próximos 10 años en Chile.

El crecimiento sostenido se explica porque cerca del 90% del uso de aguas recae en la minería del cobre, mineral que proviene de yacimientos que se están envejeciendo, lo cual implica que los óxidos de cobre que se encuentran más en la superficie escasean y es necesario extraer cada vez más sulfuros de cobre, en el primer caso generalmente se utiliza el proceso de lixiviación, mientras que en el segundo caso procesos de concentración, que son mucho más intensivos en el uso de agua.

Para los procesos de concentración se utilizan típicamente las celdas de flotación, de las cuales se obtienen concentrados a partir de la pulpa de minerales mezclados con reactivos y aditivos, que al entrar en contacto con burbujas de aire al interior de las celdas permiten filtrar el mineral de interés. Las celdas de flotación convencionales consisten en estanques con pulpa en su interior y una inyección constante de aire desde la parte inferior de la celda. Se busca que la mezcla este bajo constante agitación para que se formen burbujas de aire de forma homogénea en toda la celda, a dichas burbujas se adhieren los concentrados sólidos que se desean extraer, dado que estos están a su vez impregnados de agentes hidrófobos. Finalmente, por diferencia de densidad, las burbujas suben hasta la parte superior de la celda, donde rebalsan y son extraídas con el concentrado.

1.2. Motivación

El uso y gestión del agua es un tema de contingencia nacional, más aún en aquellas zonas que en los últimos años se han visto afectadas por prolongadas sequías, perjudicando de forma transversal a todos los sectores de la economía y la sociedad. Por lo mismo, considerando que gran parte de la industria minera se encuentra en el Norte del país, zona en la cual escasea el recurso hídrico, es de interés buscar innovaciones a los procesos productivos en el sector, que apunten a optimizar el uso del agua y reducir los impactos medioambientales.

A partir de lo anterior, el profesor Gonzalo Montes del departamento de Ingeniería Civil de Minas de la Facultad, junto a su equipo de trabajo se encuentra desarrollando un prototipo de celda de flotación, la cual destaca por tener una geometría y forma de operación completamente distinta a las celdas tradicionales que se usan hoy en día en la minería. El tema de memoria presentado busca caracterizar el comportamiento de dicho prototipo de celda de flotación, para distintas condiciones de operación y configuraciones geométricas, todo a través del método CFD.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Estudiar y caracterizar el comportamiento fluidodinámico transiente de nuevos prototipos de celdas de flotación cónicas utilizando una metodología CFD.

1.3.2. Objetivos específicos

- Estudiar el comportamiento de las celdas de flotación frente a distintas concentraciones de sólidos en la pulpa.
- Estudiar el comportamiento de las celdas de flotación frente a distintos caudales de inyección de aire.
- Caracterizar el comportamiento de las celdas de flotación estudiadas.
- Definir las directrices de diseño que debe tener una celda de flotación cónica.

1.4. Alcances

- Se caracteriza el comportamiento de hasta 3 geometrías de celdas flotación solo por CFD.
- No se contemplan trabajos de validación experimental, salvo la utilización de datos experimentales conocidos para tener puntos de referencia.
- El diseño de las celdas y su geometría particular se considera como dato.

- No se considera en las simulaciones el efecto del campo electromagnético.
- No se considera en las simulaciones el fenómeno químico involucrado en el proceso de flotación.

Capítulo 2

Antecedentes Bibliográficos

2.1. Consumo de agua en la minería

En el año 2015 a nivel país el uso consuntivo¹ del agua por el sector minero representaba solo el 3% de los derechos de agua, sin embargo, en la zona Norte la demanda de agua por la minería representaba el 14.5% de todos los sectores económicos, llegando incluso al 50% en la región de Antofagasta [1]. Considerando lo anterior sumado a las sequías que se han experimentado en los últimos años en la zona Norte del país, cobra real importancia optimizar el uso del agua en el sector minero, ya sea a través de innovaciones a los procesos utilizados o mejoras en la gestión de uso del recurso.

Por otro lado, como se puede apreciar en la Figura (2.1), más del 90% del uso del agua en la minería se lo lleva la minería del cobre [2], de la cual los procesos que más consumen agua son los vinculados a la hidrometalurgia y concentración, siendo el segundo 5 veces más intensivo en el uso de agua que el primero durante el año 2016 [3].

Debido al envejecimiento de los yacimientos, en el futuro será cada vez menor la extracción de los óxidos de cobre que se procesan por lixiviación², aumentando la extracción de los sulfuros de cobre que se encuentran a mayor profundidad. Dichos sulfuros, deben pasar por procesos de concentración, generalmente mediante la técnica de flotación. Las proyecciones en el uso del agua para la minería del cobre apuntan que el consumo agua en procesos de concentración aumentará un 74,7% del 2016 al 2028, mientras que en el mismo período, la lixiviación disminuirá su consumo un 51,7% [3].

¹Derecho de aprovechamiento consuntivo es aquel que faculta a su titular para consumir totalmente las aguas en cualquier actividad.

²Proceso de la hidrometalurgia que permite obtener el cobre de minerales oxidados aplicando una disolución de ácido sulfúrico y agua. Típicamente la extracción del mineral en cuestión es más superficial.

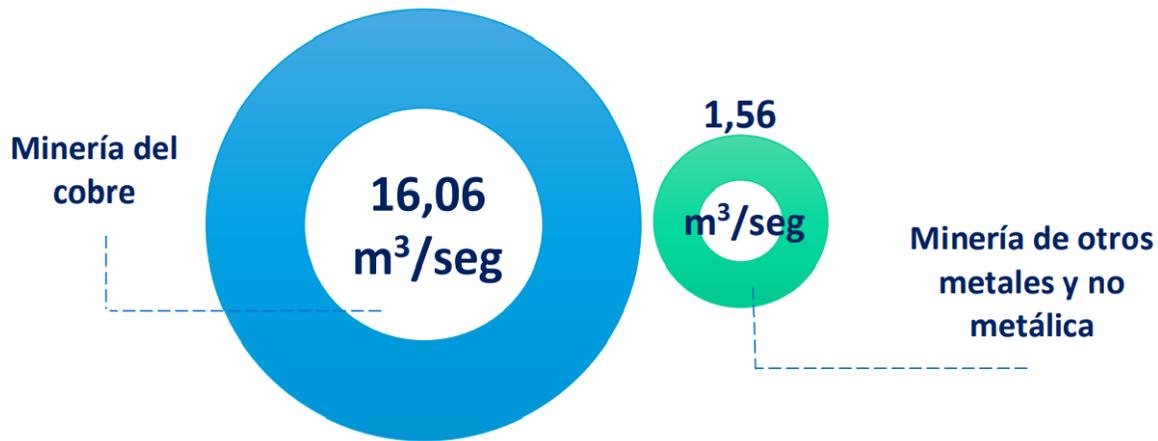


Figura 2.1: Consumo total de agua, continental y de mar, por sector productivo en minería durante la producción del año 2016 [2].

2.2. Proceso de flotación

En la industria minera la flotación es un proceso que se utiliza para obtener minerales por medio de la separación o concentración, aprovechando las propiedades superficiales tanto naturales como inducidas sobre los minerales en cuestión. El proceso consiste en generar un sistema trifásico sólido-líquido-gas en el cual gobiernan de forma conjunta fenómenos químicos y físicos. Las superficies de los minerales pueden ser hidrofílicas o hidrofóbicas, lo que permite unir el segundo tipo de superficie con burbujas de aire que flotan, formando un agregado partícula-burbuja que se extrae de forma posterior con la espuma, obteniéndose así el concentrado del mineral de interés en la zona superior de la celda [4].

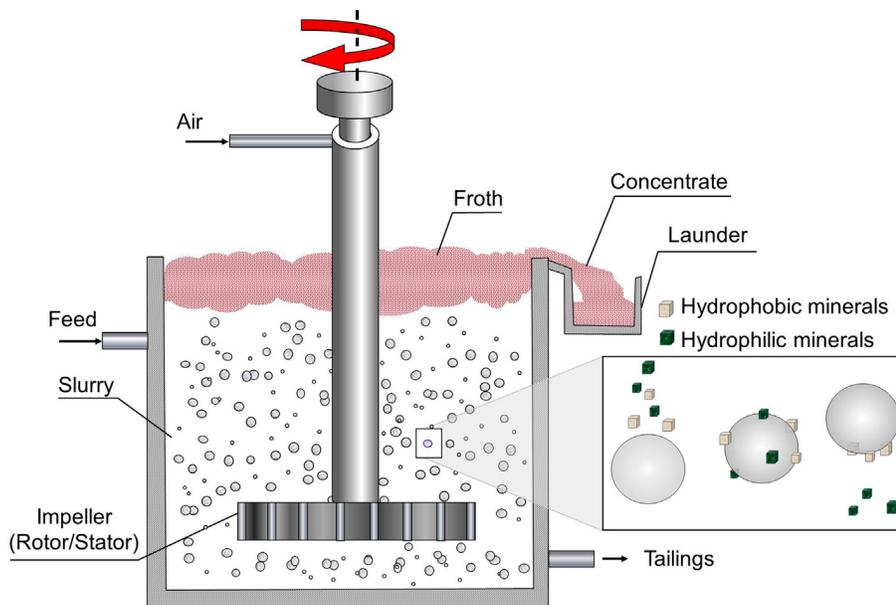


Figura 2.2: Principio de flotación en una celda de flotación mecánica [5].

Para el proceso se utiliza un equipo denominado celda de flotación, como la que se muestra

en la Figura (2.2), en la cual se inyecta de forma continua la pulpa (mezcla de las fases líquida y sólida, en específico agua y minerales respectivamente) y aire (fase gaseosa). Por medio de un agitador u otro dispositivo se busca generar la suficiente turbulencia para promover las colisiones de las burbujas de aire con los minerales hidrofóbicos, formando así un agregado burbuja-mineral que es recuperado de forma posterior en forma de espuma, mientras que la ganga se queda en la pulpa, pasando a ser parte del relave que es extraído típicamente por la parte inferior de la celda. Para facilitar la flotación, a la pulpa se le adiciona, previo al proceso, reactivos colectores para generar el efecto hidrofóbico, reactivos depresantes para generar el efecto hidrofílico, reactivos espumantes para permitir la formación y estabilidad de la espuma y otros modificadores para mejorar el proceso. Cabe notar que para que la flotación sea posible, las partículas de la fase sólida de la pulpa deben ser lo suficientemente finas para que la fuerza de adhesión entre estas y la burbujas sea superior al peso de la partícula sólida, además de que la densidad del agregado burbuja-mineral sea menor que la de la pulpa [5].

2.3. Caracterización de la pulpa

La caracterización del fluido a modelar se hace a través de la caracterización de la pulpa, para lo cual se define su concentración en sólidos, densidad y viscosidad [6].

2.3.1. Concentración en sólidos

Esta se puede expresar en base a la concentración de los sólidos en volumen o en peso, de acuerdo a las ecuaciones (2.1) y(2.2) respectivamente.

$$C_v = \frac{C_w \rho_m}{\rho_s} = \frac{100 \cdot C_w / \rho_s}{C_w / \rho_s + (100 - C_w) / \rho_L} \quad (2.1)$$

$$C_w = \frac{C_v \rho_s}{\rho_m} = \frac{C_v \rho_s}{C_v \rho_s + (100 - C_v)} \quad (2.2)$$

En las ecuaciones anteriores se tiene que:

- C_v : Concentración en sólidos en la pulpa por volumen [%].
- C_w : Concentración en sólidos en la pulpa por peso [%].
- ρ_m : Densidad de la mezcla sólido-líquido o pulpa [kg/m^3].
- ρ_L : Densidad de la fase líquida [kg/m^3].
- ρ_s : Densidad de la fase sólida [kg/m^3].

2.3.2. Densidad

Acorde a la Ecuación (2.3), la densidad de la pulpa ρ_m depende de la densidad del fluido o fase líquida, de la densidad de las partículas sólidas y de la concentración en peso de la fase sólida.

$$\rho_m = \frac{100}{C_w/\rho_s + (100 - C_w)/\rho_L} \quad (2.3)$$

2.3.3. Viscosidad

Para obtener la viscosidad de la pulpa se utilizan distintos modelos dependiendo de la concentración en sólidos, dado que si esta es baja el comportamiento se asemeja al de un fluido Newtoniano, mientras que para altas concentraciones el comportamiento es el de un fluido no Newtoniano. Para bajas concentraciones y un comportamiento Newtoniano, Thomas (1965) propuso la Ecuación (2.4) que relaciona la viscosidad dinámica de la pulpa μ_m y la viscosidad dinámica de la fase líquida μ_L , ambas en $[Pa \cdot s]$ [6].

$$\frac{\mu_m}{\mu_L} = 1 + 2,5 \cdot C_v + 10,05 \cdot C_v^2 + 0,00273 \cdot e^{16,16 \cdot C_v} \quad (2.4)$$

Para el mismo caso anterior, experiencias realizadas en relaves chilenos indican que la ecuación de Wellman (Ecuación (2.5)) entrega mejores resultados [7].

$$\frac{\mu_m}{\mu_L} = \frac{e^{-10,4 \cdot C_v}}{(1 - C_v/0,62)^8} \quad (2.5)$$

Para concentraciones elevadas de sólidos en la pulpa se puede utilizar la ecuación de Krieger (Ecuación (2.6)) [8, 9].

$$\frac{\mu_m}{\mu_L} = \left(1 - \frac{C_v}{C_c}\right)^{-[\eta]C_c} \quad (2.6)$$

En la ecuación anterior se define la viscosidad intrínseca como $[\eta] = \lim_{C_v \rightarrow 0} \left(\frac{\mu_m/\mu_L - 1}{C_v}\right)$ y la máxima fracción de empaquetamiento C_c , ambos parámetros que deben ser ajustados caso a caso.

De forma particular para la Ecuación (2.6), cuando $[\eta]C_c = 2$, se tiene la Ecuación (2.7) de Maron-Pierce, utilizada para concentraciones intermedias [8].

$$\frac{\mu_m}{\mu_L} = \left(1 - \frac{C_v}{C_c}\right)^{-2} \quad (2.7)$$

De forma adicional, se tienen las siguientes definiciones respecto a la ley de cobre;

- **Ley de alimentación:** Fracción másica de cobre contenido en la pulpa de alimentación que está haciendo ingreso a la celda de flotación.
- **Ley de la cola:** Fracción másica de cobre contenido en la pulpa que está siendo eyectado de la celda por la salida de las colas, tomando un valor menor a la ley del concentrado.
- **Ley del concentrado:** Fracción másica de cobre contenida en la pulpa que está siendo eyectada de la celda por la salida del concentrado de cobre, tomando un valor mayor a la ley de las colas.

2.4. Prototipos de celdas de flotación

Los prototipos de celdas de flotación fueron diseñados por el profesor Gonzalo Montes junto a su equipo de trabajo en el Departamento de Ingeniería Civil de Minas de la Universidad de Chile. Los diseños se diferencian tanto de forma geométrica como operativa respecto a las celdas de flotación tradicionales, con el fin de poder procesar pulpas con mayores concentraciones de sólidos, reduciendo así el consumo de agua en el proceso.

Uno de los diseños originales se muestra en la Figura (2.3), en el cual la pulpa y el aire se inyectan desde la derecha y la recuperación ocurre en el extremo izquierdo. Sobre esta celda actúa un campo electromagnético en la dirección del flujo axial de pulpa, el cuál ayuda a la recuperación del agregado burbuja-partícula de mineral, mientras que la geometría en sí genera un efecto hidrociclón que promueve la separación de las partículas de minerales según su tamaño y densidad [10].

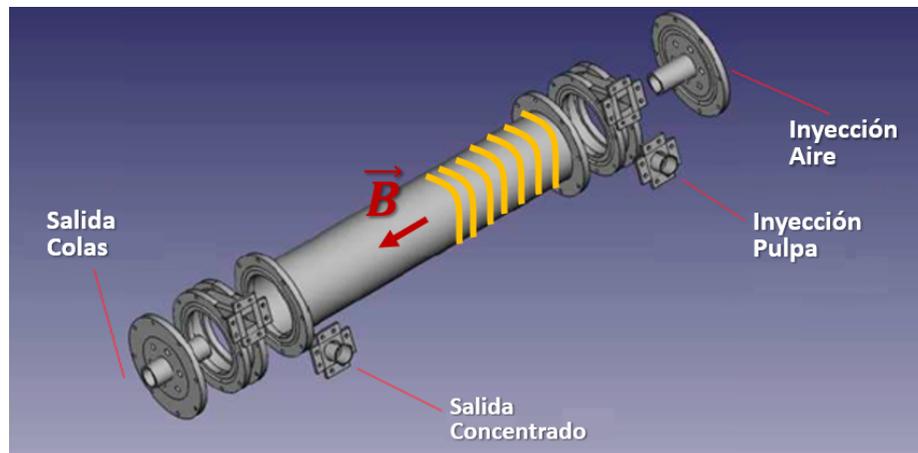
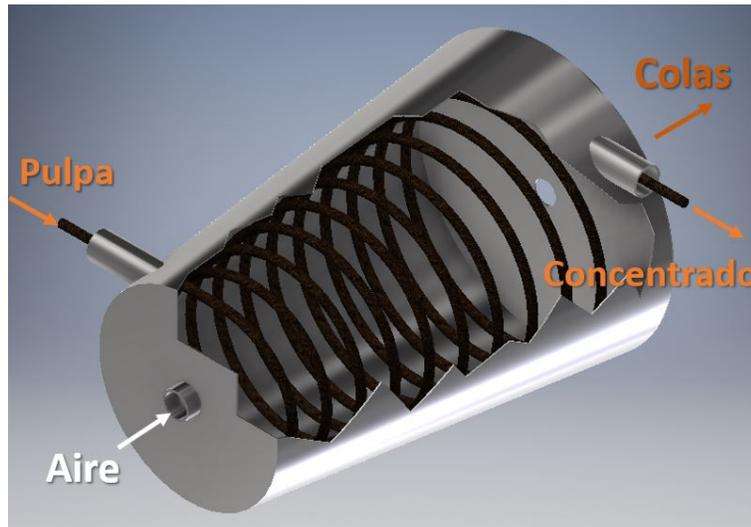


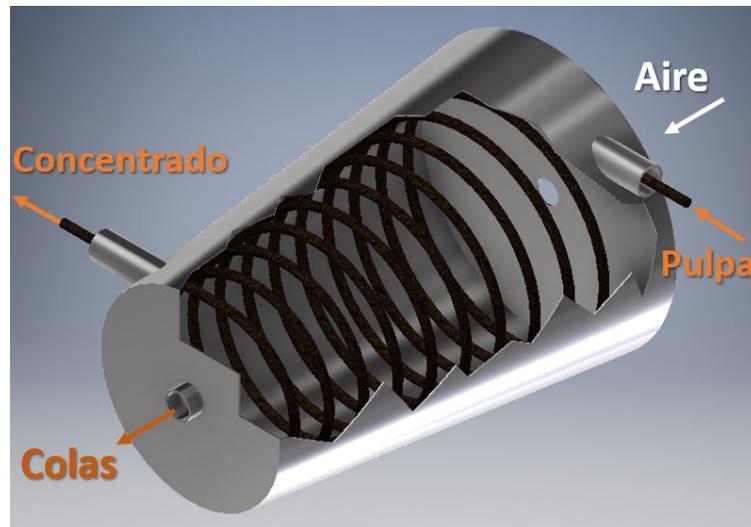
Figura 2.3: Prototipo original de celda de flotación cilíndrica, la cuál ya se encuentra simulada en trabajo de memoria de título anterior [11].

En esta memoria se pretende simular nuevos tipos de prototipos, manteniendo el principio de funcionamiento general, pero cambiando la geometría cilíndrica de la Figura (2.3) por geometrías cónicas como las de las figuras (2.4a) y (2.4b). Estas nuevas celdas bases tienen

una diámetro mayor $2D$ y un diámetro menor D , manteniendo el largo de la celda original (en torno a 50 cm).



(a) Diagrama de celda de flotación cónica con flujo de pulpa desde D hacia $2D$.



(b) Diagrama de celda de flotación cónica con flujo de pulpa desde $2D$ hacia D .

Figura 2.4: Diagramas de celdas de flotación cónicas que están siendo actualmente estudiadas por el Departamento de Ingeniería Civil de Minas de la Universidad de Chile.

2.4.1. Datos experimentales

Sobre la celda de flotación cónica existen datos experimentales (Tabla (2.1)), de los cuales se pueden elaborar un supuesto fundamental para las simulaciones; bajo las condiciones fluidodinámicas de los casos en que no existe inyección de aire, existe la validación experimental de que existe concentración de cobre por efecto de la separación por hidrociclón.

Tabla 2.1: Resultados experimentales sobre la celda de flotación cónica experimental

Disposición celda	Caudal de aire [L/min]	Caudal de pulpa [L/min]	Campo EM [G]	Ley Alimentación [%]	Ley Cola [%]	Ley Concentrado [%]
Cono d a 2d	0	60	0	1,692	1,69	3,004
Cono d a 2d	150	60	0	1,764	1,71	6,016
Cono 2d a d	0	60	0	1,676	1,65	2,522
Cono 2d a d	150	60	0	1,696	1,66	3,004

2.5. Parámetros de simulación

En esta sección se presentan las descripciones de los distintos parámetros que hay que determinar para llevar a cabo las simulaciones CFD.

2.5.1. Tipo de fluido

Para la simular el comportamiento fluidodinámico de las celdas de flotación, la mezcla trifásica se asimilará a 2 fluidos interactuando entre sí. En primer lugar se tiene la fase gaseosa de aire, la cual puede ser modelada como fluido newtoniano y en segundo lugar la fase sólida-líquida que se puede modelar como fluido Newtoniano para bajas concentraciones ($C_w < 25\%$) y para concentraciones mayores como un fluido no-newtoniano. Para la memoria es de interés el fluido no-newtoniano en conjunto con la viscosidad de la ecuación de Krieger, dado que se busca trabajar con pulpas tal que $C_w > 50\%$.

2.5.1.1. Fluidos newtonianos

En un fluido newtoniano el esfuerzo cortante es proporcional a la razón de deformación o gradiente de velocidad, siendo la viscosidad la constante de proporcionalidad. Para el caso de flujo tangencial unidimensional, lo anterior se traduce en la Ecuación (2.8) [12].

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (2.8)$$

En la Ecuación (2.8) se tiene que:

- τ : Esfuerzo cortante [N/m^2].
- μ : Viscosidad dinámica [$Pa \cdot s$].
- $\frac{du}{dy}$: Gradiente de velocidad [s^{-1}].

2.5.1.2. Fluidos no-newtonianos

Cuando en los fluidos los esfuerzos de corte no se relacionan linealmente con la razón de deformación estos se denominan fluidos no-newtonianos. En el caso de las pulpas de la minería los más mas comunes de encontrar [7] son el modelo plástico de Bingham, el fluido seudoplástico (o de adelgazamiento por corte) y el fluido seudoplástico con esfuerzo de fluencia:

- **Fluido plástico de Bingham**

Existen fluidos que pueden resistir un esfuerzo cortante finito antes de comenzar a deformarse, mostrando en esta etapa el comportamiento de un sólido, sin embargo, al sobrepasar este esfuerzo denominado esfuerzo de fluencia τ_0 , el fluido comienza a fluir de forma que el esfuerzo cortante es proporcional a la razón de deformación. El fluido plástico de Bingham se describe por la Ecuación (2.9) [12].

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{du}{dy} \quad \text{si } |\tau| > \tau_0 \quad (2.9)$$

- **Fluido seudoplástico**

En un seudoplástico la viscosidad va disminuyendo a medida que el esfuerzo de corte sobre el mismo va aumentando. En este caso el esfuerzo de corte está dado por la Ecuación (2.10), también se define una viscosidad aparente según la Ecuación (2.11) [13].

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (2.10)$$

$$\mu_{ap} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = K\dot{\gamma}^{n-1} \quad (2.11)$$

En las ecuaciones anteriores se tiene que:

- K : Constante de consistencia del fluido [$Pa \cdot s^n$].
- $\dot{\gamma}$: Gradiente de velocidad perpendicular al plano de corte [s^{-1}].
- n : Power-law index, que toma un valor menor a 1, si $n > 1$ el fluido pasa a ser dilatante.

- **Fluido seudoplástico con esfuerzo de fluencia**

Este tipo de fluido tiene el mismo comportamiento que el del seudoplástico, con la salvedad de que se necesita sobrepasar un esfuerzo de fluencia para comenzar la deformación, al igual que en el caso del fluido de Bingham, por lo que en este caso $\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n$ [13].

2.5.2. Modelos multifásicos

ANSYS Fluent cuenta con diferentes modelos para simular interacciones multifásicas y en el caso particular del fenómeno de la flotación se utiliza el enfoque Euler-Euler [14, 15, 16, 17, 18, 19] provisto por el programa, el cual contempla 3 modelos multifásicos; *Eulerian*, *Mixture & VOF*.

Todos estos modelos introducen el concepto de fracción en volumen α_q de la fase q , de modo que se cumpla la Ecuación (2.12)

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (2.12)$$

2.5.3. Eulerian Model

Este es el modelo más complejo del enfoque Euler-Euler, dado que se resuelven ecuaciones de momentum y continuidad para cada una de las fases por separado, esto para cada elemento del dominio. Lo anterior es útil cuando las fases se mueven a diferentes velocidades, dado que su interacción es simulada de mejor manera. El modelo Euleriano se caracteriza por ser el más exacto e idóneo para modelar el fenómeno de la flotación dada la complejidad de la interacción multifásica aire-pulpa, sin embargo, es altamente intensivo en el uso del recurso computacional, junto a ser más inestable en términos de convergencia [14, 15, 16, 17, 18, 19].

Las ecuaciones de momentum y continuidad del modelo son las ecuaciones (2.13) y (2.14) respectivamente [20].

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = \begin{aligned} & -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} \\ & + \sum_{p=1}^n \left(\vec{R}_{pq} + m_{pq} \vec{v}_{pq} - m_{qp} \vec{v}_{qp} \right) \\ & + \left(\vec{F}_q + \vec{F}_{lift,q} + \vec{F}_{wl,q} + \vec{F}_{vm,q} + \vec{F}_{td,q} \right) \end{aligned} \quad (2.13)$$

La 2.13 de momentum incorpora las fuerzas de cuerpo F_q , de empuje $F_{lift,q}$, *wall lubrication force* $F_{wl,q}$, *virtual mass force* $F_{vm,q}$ y *turbulent dispersion force* $F_{td,q}$ sobre la fase q . El termino \vec{R}_{pq} corresponde a una fuerza de interacción entre las fases y p es la presión compartida por todas las fases, mientras que \vec{v}_{pq} es la velocidad de la interfase que va a depender de la transferencia de masa entre estas.

$$\frac{\partial}{\partial \rho_{rq}} \left(\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (2.14)$$

En la 2.13 de continuidad ρ_{rq} es la densidad de referencia de la fase q en el dominio de la solución y \dot{m}_{pq} junto a \dot{m}_{qp} representan las transferencias de masa entre las fases.

2.5.4. Mixture Model

El modelo *Mixture* es una simplificación del modelo *Euleriano*, restando ciertos términos a las ecuaciones de momentum y continuidad, las cuales son obtenidas sumando las contribuciones de las ecuaciones correspondientes individuales de cada fase, esto para cada elemento

del dominio. Lo anterior es útil cuando las fases se mueven a diferentes velocidades, pero también el modelo puede ser usado cuando las fases se mueven a la misma velocidad formando un flujo homogéneo. Aplicaciones de este modelo incluyen la sedimentación, hidrociclones, transporte neumático y flujos burbujeantes en donde la fracción en volumen de la fase gaseosa permanece baja.

Las ecuaciones de momentum y continuidad del modelo son las ecuaciones (2.15) y (2.16) respectivamente [20], donde se destaca la omisión de ciertas interacciones respecto al modelo euleriano, junto a un tratamiento de las propiedades físicas como la suma promediada del aporte de cada fase.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = \frac{-\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T)]}{+\rho_m \vec{g} + \vec{F}} - \nabla \cdot (\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_{dr,k} \vec{v}_{dr,k}) \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0 \quad (2.16)$$

2.5.5. Volume of Fluid (VOF) Model

Modelo diseñado para dos o mas fluidos inmiscibles en los cuales la interfase entre ambos es de interés. En el modelo VOF los fluidos comparten las mismas ecuaciones de momentum y para cada elemento del dominio se genera una fracción en volumen, de modo que la suma de fracción en volumen de todas las fases involucradas sumen 1. Una limitación de que las fases compartan la ecuación de momentum, radica en que cuando la diferencia entre velocidades de ambas fases es grande, la velocidad calculada en la interfase puede verse perjudicada. Aplicaciones de este modelo incluyen el movimiento de burbujas de aire en un líquido y el rastreo estacionario o transiente de cualquier interfase líquido-gas. Este modelo es utilizado en trabajos previos de simulaciones sobre los prototipos de celdas de flotación del profesor Gonzalo Montes [11].

Las ecuaciones de momentum y continuidad del modelo son las ecuaciones (2.17) y (2.18) respectivamente [20]. En el caso de la ecuación de momentum, esta depende de las fracciones en volumen de cada fase y de sus propiedades de densidad ρ y viscosidad μ .

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = \nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2.17)$$

$$\frac{1}{\rho_q} \left(\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (2.18)$$

2.5.6. Modelo de turbulencia $k - \varepsilon$ realizable

El modelo $k - \varepsilon$ realizable se basa en la solución de las ecuaciones de transporte de la energía cinética k y su tasa de disipación ε . Se diferencia del modelo $k - \varepsilon$ standard debido a que posee una formulación alternativa de la viscosidad turbulenta y de la tasa de disipación de energía ε . Lo anterior permite modelar de mejor manera los vórtices y flujos en recirculación o rotación [20].

2.5.7. Time Step

ANSYS Fluent tiene 3 métodos para seleccionar el time step; fijo, adaptativo y variable, sin embargo el segundo no es compatible con los modelos multifásicos a estudiar [21].

2.5.7.1. Fixed Time Step

Cuando el time step está fijo, este permanece constante a lo largo de toda la simulación a menos que se cambie, en este caso se recomienda utilizar un time step que permita entre 5 y 10 iteraciones por time step antes de converger. Dada la naturaleza de los problemas tiempo dependientes, para el comienzo de la simulación hay que seleccionar un time step lo suficientemente pequeño para permitir las 5 a 10 iteraciones en la componente transiente del problema, para luego cuando se entra en la componente estacionaria cambiar el time step fijado por uno mayor. Una regla general para seleccionar el time step está dada por la condición Courant–Friedrichs–Lewy (CFL) descrita en la Ecuación (2.19), en donde u es la velocidad en la celda, Δt es el time step, Δx es el largo de la celda más pequeña de la malla, C es el número de Courant y C_{max} es 1 cuando se utiliza una solución explícita, si la solución es implícita $1 \leq C_{max} \leq 2$.

$$C = \frac{u\Delta t}{\Delta x} \leq C_{max} \quad (2.19)$$

2.5.7.2. Variable Time Stepping

Esta opción que se encuentra disponible para algunos modelos multifásicos permite modificar el time step a lo largo de la solución, definiendo un valor mínimo y máximo para este, de modo que el programa selecciona de forma automática uno en dicho intervalo. El time step se modifica cuando la interfase se está desplazando a través de celdas densas o si la velocidad de la interfase es alta, buscando siempre mantener un número de Courant global constante.

Capítulo 3

Metodología

3.1. Metodología general de trabajo

La metodología de trabajo se divide en 4 etapas principales esquematizadas en las figuras (3.1), (3.2), (3.3) y (3.4). A continuación se detallan cada una de las etapas del plan de trabajo.

3.1.1. Etapa I

1. **Revisión bibliográfica:** Recopilar los antecedentes bibliográficos necesarios para la realización de la memoria, junto a revisar el material existente en ANSYS Fluent referente a simulaciones anteriores de los prototipos de celdas flotación y trabajos similares.
2. **Preparar modelo CAD (Celda Experimental):** Recuperar las dimensiones generales de la Celda Experimental cónica (CE) que se encuentra en posesión del Departamento de Ingeniería de Minas, para traspasar la información a un modelo 3D elaborado con Autodesk Inventor.
3. **Definir condiciones de operación bases:** Determinar las condiciones bases de operación a las que se van a someter las celdas de flotación a estudiar. Las variables a estudiar son la concentración de sólidos en la pulpa y caudal de aire a inyectar.
4. **Definir parámetros de simulación:** Determinar los modelos de Fluent y sus parámetros a utilizar en las diferentes simulaciones.
5. **Simular en ANSYS Fluent casos bases:** Simular y obtener el comportamiento fluidodinámico de la CE para todas las condiciones de operación bases. Lo anterior, respaldado por el análisis de sensibilidad de malla correspondiente y bajo el modelo multifásico *Mixture*.
6. **Análisis parcial de resultados y determinar casos de interés:** A partir de las simulaciones realizadas determinar cuales de todos los casos bases, son los de mayor interés y de utilidad práctica, para una mejor extrapolación de resultados.

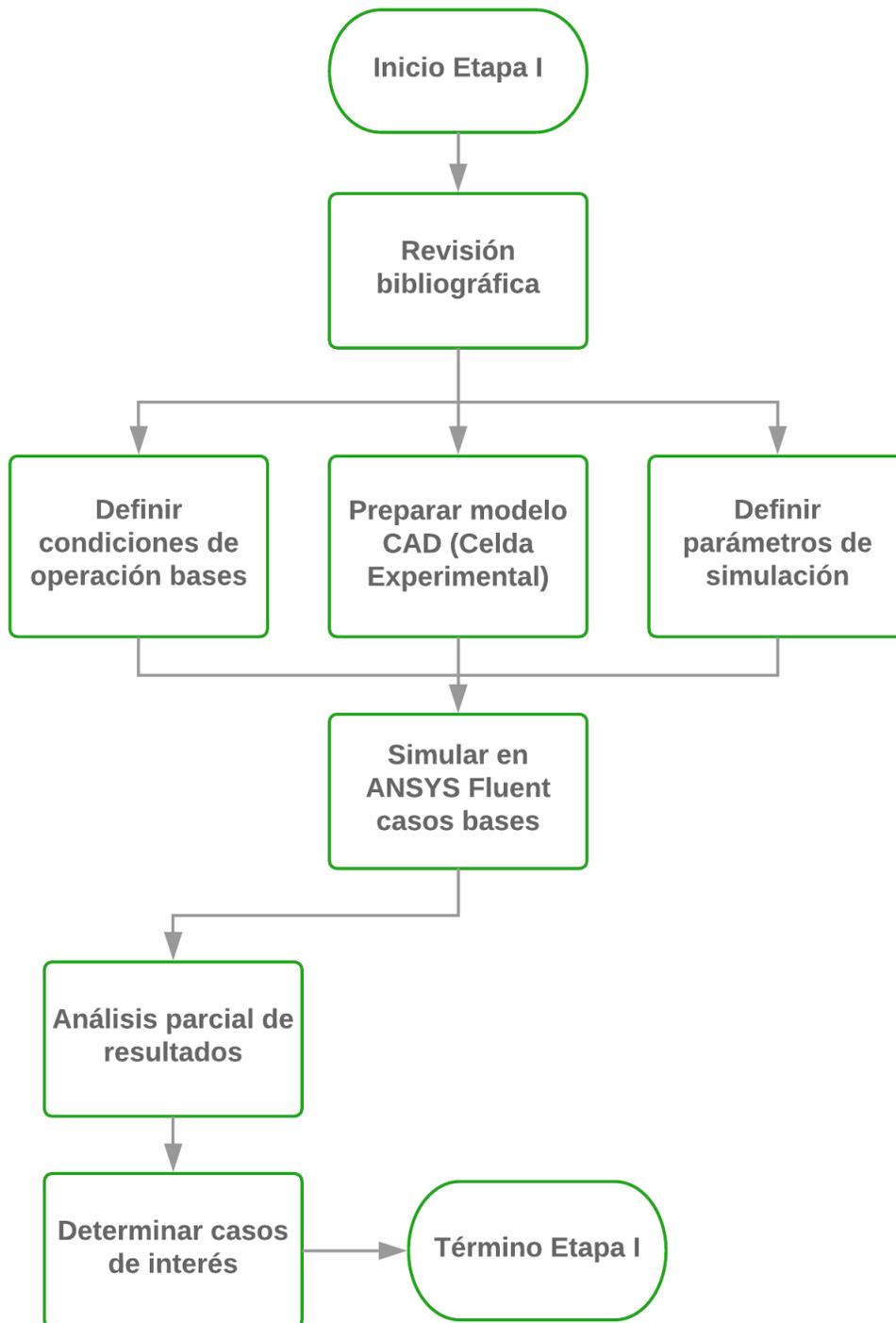


Figura 3.1: Diagrama de flujo de la Etapa I.

3.1.2. Etapa II

1. **Preparar modelo CAD (Celda Experimental Mejorada):** Modificar el modelo 3D de la CE, para incluir una mejora geométrica que apunta a aprovechar de mejor manera el efecto hidrociclón al interior de la celda. A este nuevo diseño se le denomina Celda Experimental Mejorada (CEM).
2. **Simular en ANSYS Fluent casos de interés:** Simular y obtener los comporta-

mientos fluidodinámicos de la CE y la CEM para los casos de interés, bajo el modelo multifásico *Euleriano*.

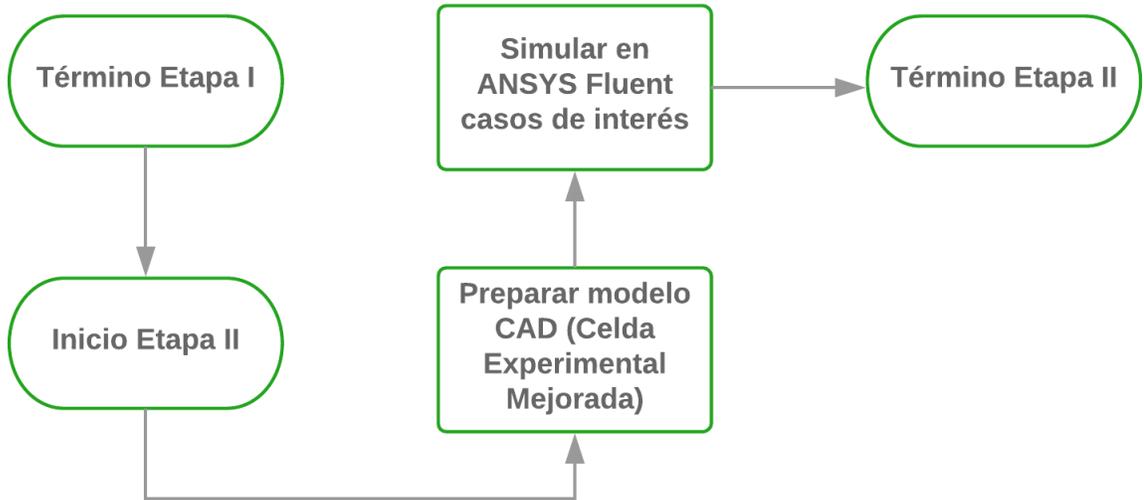


Figura 3.2: Diagrama de flujo de la Etapa II.

3.1.3. Etapa III

1. **Análisis parcial de resultados:** A partir de las simulaciones de la CE y CEM, rescatar las ventajas y desventajas de cada geometría frente a las diferentes condiciones de operación estudiadas.
2. **Preparar modelo CAD (Propuesta de Diseño):** Elaborar una nueva Propuesta de Diseño (PD), que busque corregir o potenciar aspectos positivos de las celdas de flotación cónicas simuladas.
3. **Simular en ANSYS Fluent casos de interés:** Simular y obtener el comportamiento fluidodinámico de la PD para los casos de interés, bajo el modelo multifásico *Euleriano*.

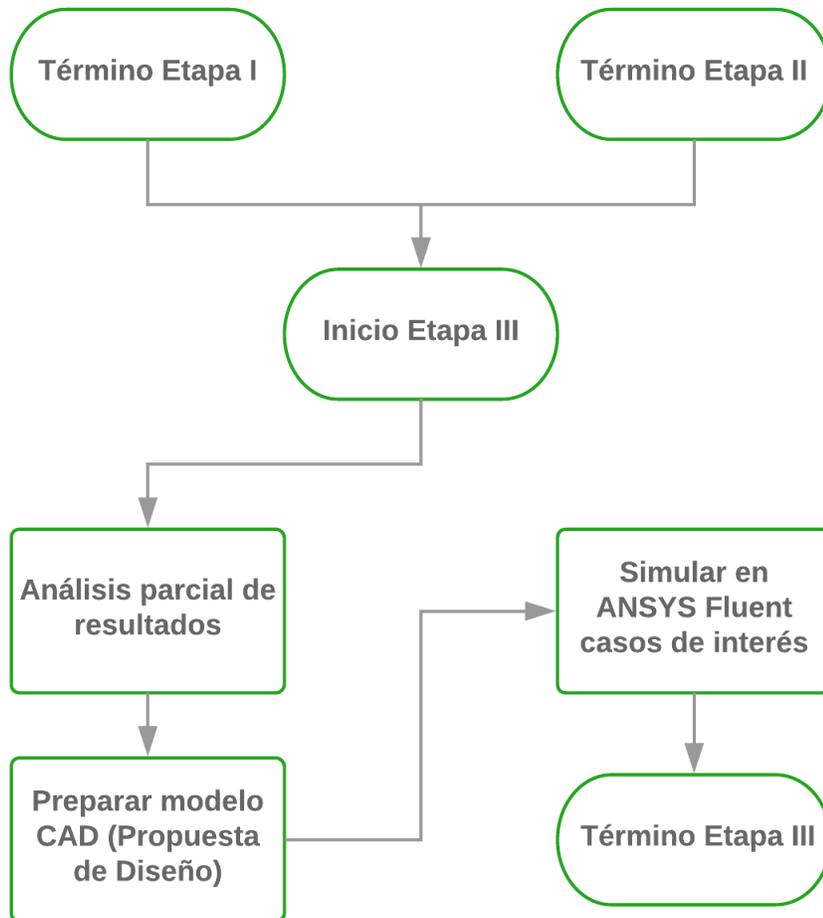


Figura 3.3: Diagrama de flujo de la Etapa III.

3.1.4. Etapa IV:

1. **Preparar resultados:** Preparar resultados gráficos para poder comparar las distintas geometrías estudiadas bajo las diferentes condiciones de operación, siendo de particular interés las *pathlines* y el campo de velocidades de la pulpa al interior de las celdas, junto a la fracción en volumen de las distintas fases involucradas.
2. **Análisis de resultados:** Estudiar y analizar tanto los resultados numéricos como gráficos generados en el trabajo previo.
3. **Concluir:** Caracterizar las celdas de flotación a partir del comportamiento de estas frente a las diferentes condiciones de operación impuestas, identificando oportunidades de mejora y directrices de diseño.

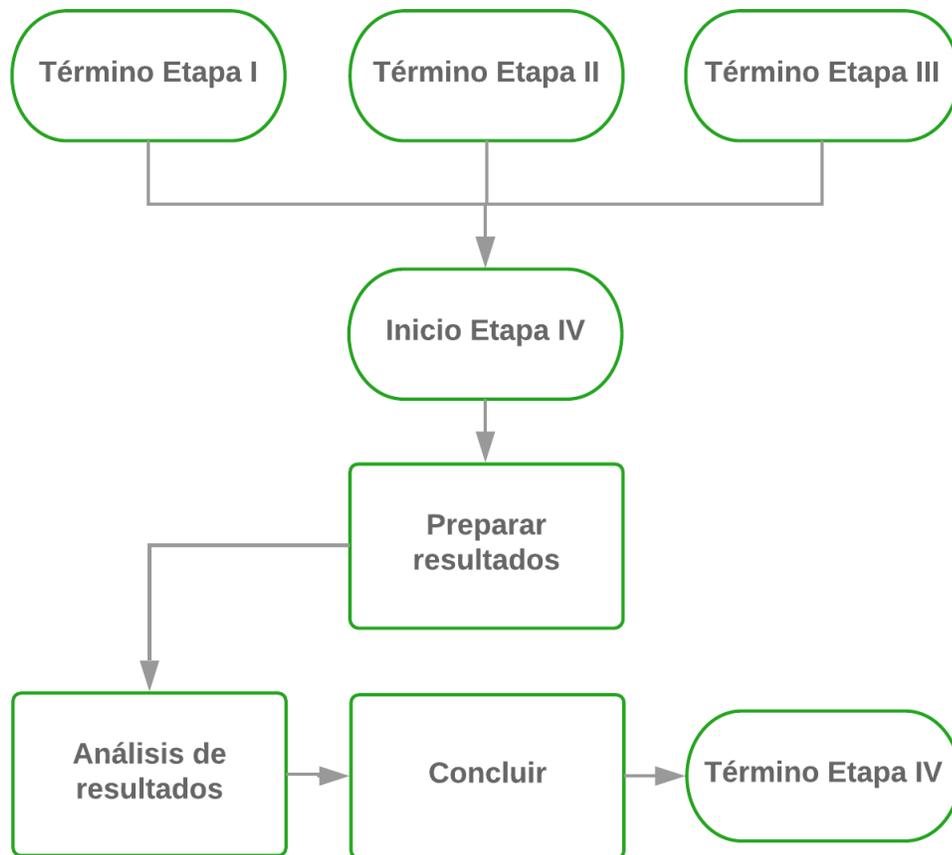


Figura 3.4: Diagrama de flujo de la Etapa IV.

3.2. Propiedades reológicas

Dentro de las simulaciones se consideran 3 fases de fluidos incomprensibles:

- **Aire**
- **Ganga en pulpa**
- **Sulfuros de cobre en pulpa:** Considerando una ley de 1,7 % Cu.

La separación de la pulpa en 2 fases diferentes tiene la finalidad de corroborar si existe un efecto de separación por hidrociclón al interior de las celdas.

Las densidades de las fases sólidas y líquida que componen la pulpa se muestran en la Tabla (3.1)¹.

Utilizando la Ecuación (2.3) y (2.1) es posible obtener la densidad y concentración en volumen de cada fase que compone la pulpa, actuando cada una de forma independiente (Tabla (3.2)).

¹Cuando se habla de la fase acompañada de la palabra “*sólido*” se refiere a la fase en estado sólido sin mezclar, mientras que cuando se habla de la fase a secas (i.e. Fase ganga o Fase sulfuro) se refiere a la fase sólida mezclada con agua.

Tabla 3.1: Densidades de las fases de la pulpa sin mezclarlas.

Fase	Densidad [kg/m^3]
Ganga (sólido)	2700
Sulfuros de cobre (sólido)	4300
Agua	998,2

Tabla 3.2: Concentraciones y densidades de las fases que componen la pulpa.

Concentración de sólidos en peso [%]	Densidades [kg/m^3]		Concentración de sólidos en volumen [%]	
	Fase ganga	Fase sulfuros	Fase Ganga	Fase sulfuros
40	1334,70	1440,70	19,77	13,40
50	1457,54	1620,27	26,99	18,84
60	1605,28	1850,97	35,67	25,83

Al multiplicar a fracción en volumen de cada fase (columnas 4 y 5 de la Tabla (3.2)) por su densidad en estado sólido (columna 2 Tabla (3.1)) se obtiene cuanto peso hay de la fase sólida en 1 metro cúbico de mezcla con agua (Tabla (3.3)). Este resultado se puede utilizar para obtener la fracción en volumen que es necesaria inyectar de la fase ganga y fase sulfuro en una entrada de la celda, para mantener constante la ley de 1,7% Cu a medida que la concentración en sólidos varía².

Tabla 3.3: Fracciones volumétricas de la fase sulfuro que deben ser inyectados para obtener una ley del 1,7% Cu.

Concentración de sólidos en peso [%]	Kg de la fase sólida en 1 m^3 de la mezcla con agua		Fracción volumétrica de la fase sulfuros en el elemento finito para obtener un ley de 1,7% Cu
	Fase ganga	Fase sulfuros	
40	533,88	576,28	0,0457
50	728,77	810,14	0,0444
60	963,17	1110,58	0,0429

Si bien las fases ganga y sulfuro poseen densidades y viscosidades diferentes, para efectos del estudio fluidodinámico se considera que la viscosidad es la misma para ambas fases, siendo estas presentadas en la Tabla (3.4). Para esto se considera el modelo de fluido plástico de Bingham, utilizando la Ecuación (2.6) para obtener la viscosidad dinámica y los valores del esfuerzo de fluencia se rescatan de la bibliografía correspondiente [11].

²Se considera que la fase sulfuros de cobre se componen de calcopirita, la cual tiene una ley de 34,6% Cu [22], por lo tanto, una ley de sulfuros de 4,91% en la pulpa equivalen a una ley de 1,7% de cobre en la pulpa.

Tabla 3.4: Viscosidades dinámicas y esfuerzos de fluencia de la pulpa para las concentraciones de estudio.

Concentración sólidos en peso [%]	40	50	60
Viscosidad dinámica μ_m [kg/ms]	0,001958	0,004229	0,009686
Esfuerzo de fluencia τ_0 [Pa]	1,5	3,15	5,05

3.3. Condiciones de operación

Todos los casos se simulan con un flujo de inyección constante de pulpa, con un caudal de 60 [L/min] correspondiente a una velocidad de inyección en la celda de 2,5 [m/s].

3.3.1. Condiciones de operación bases

Para las condiciones de trabajo de la celda se consideran 12 casos en total; 3 concentraciones en sólidos y 4 caudales de inyección de aire. Las concentraciones de sólidos en peso son del 40 %, 50 % y 60 %, debido a que la celda experimental cónica apunta a poder trabajar con pulpas de hasta el 50 % y se busca estudiar concentraciones dentro de este rango, mientras que los caudales de inyección de aire son 150, 113, 75 y 0 [L/min], dado que existen datos experimentales de la CE trabajando a una concentración en sólidos en peso del 50 % y velocidades de 150 y 0 [L/min]. Los caudales de aire señalados equivalen a las relaciones de de inyección aire/pulpa³ de 2,50, 1,88, 1.25 y 0. El detalle de los 12 casos se muestra en la Tabla (3.5), siendo siempre constante el caudal de inyección de pulpa, tomando como referencia la condición de operación experimental.

Tabla 3.5: Condiciones de operación bases.

#	Concentración de sólidos [%]	Caudal de inyección de aire [L/min]	Caudal de inyección de pulpa [L/min]	Relación de inyección R_{iny}
1	40	150	60	2,50
2	40	113	60	1,88
3	40	75	60	1,25
4	40	0	60	0
5	50	150	60	2,50
6	50	113	60	1,88
7	50	75	60	1,25
8	50	0	60	0
9	60	150	60	2,50
10	60	113	60	1,88
11	60	75	60	1,25
12	60	0	60	0

³Relación de inyección aire/pulpa $R_{iny} = \frac{\dot{Q}_{aire}}{\dot{Q}_{pulpa}}$

3.3.2. Condiciones de operación de los casos de interés

Luego de concluir con las simulaciones de la Etapa I, se seleccionan 4 casos de interés de los cuales se pueden extrapolar resultados que son de ayuda para definir las directrices de diseño que deben tener las celdas de flotación cónicas. Estos 4 casos particulares son la base de la ejecución las Etapas II y III.

3.4. Geometrías de trabajo (CE y CEM)

La celda experimental cónica fue construida por la empresa *Ingeniería y Construcciones Salas Hermanos Ltda.*, cuyo prototipo se puede apreciar en la Figura (3.5).



Figura 3.5: Celda Experimental (CE) en posesión del Departamento de Ingeniería de Minas.

Para el diseño CAD de la celda se extraen las dimensiones generales del prototipo de la Figura (3.5), obteniéndose como resultado el diseño de la Figura (3.6), con sus dimensiones detalladas en la Tabla (3.6).

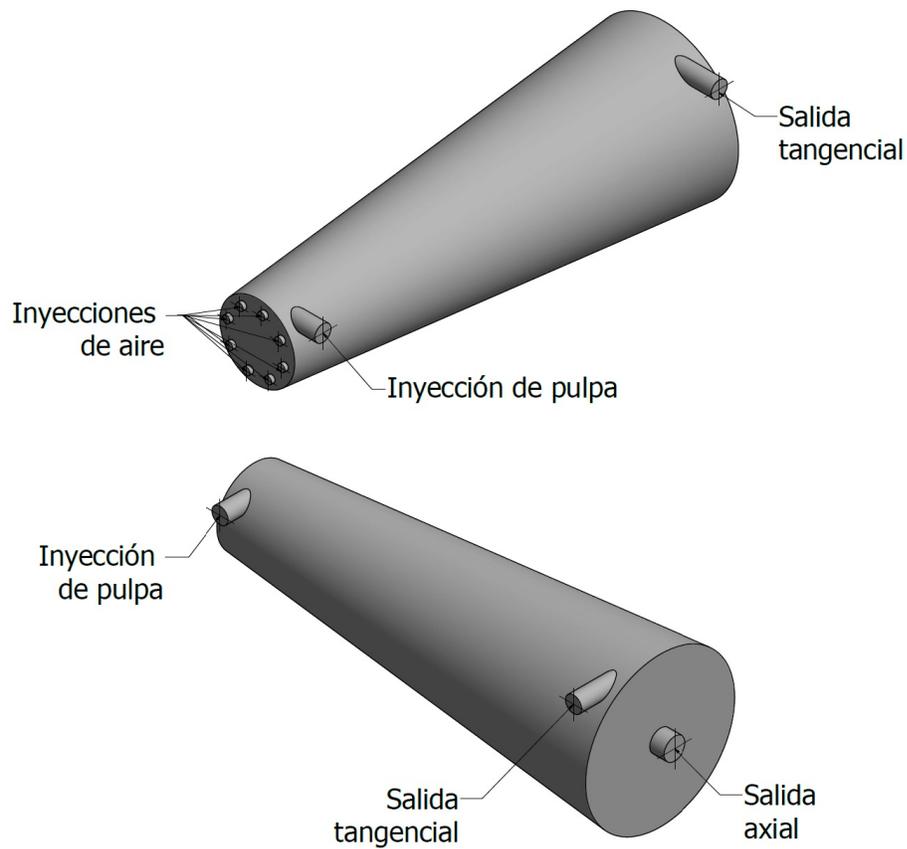


Figura 3.6: Diseño CAD de la Celda Experimental (CE).

Tabla 3.6: Dimensiones del diseño CAD de la Celda Experimental (CE).

Dimensión	Valor [mm]
Largo	570
Diámetro menor del cono	105
Diámetro mayor del cono	210
Diámetro de inyección de pulpa	22,57
Diámetro salida tangencial	22,57
Diámetro salida axial	30
Diámetro inyecciones de aire	8 x 10

El diseño que se incorpora al estudio fluidodinámico en la Etapa II es la Celda Experimental Mejorada (CEM) y como se puede apreciar en la Figura (3.7), esta mantiene las dimensiones generales de la CE, modificando solamente la disposición de la salida tangencial, esto con el fin de favorecer el efecto de separación por hidrociclón, al mantenerse teóricamente siempre el mismo sentido de giro de la pulpa al interior de la celda.

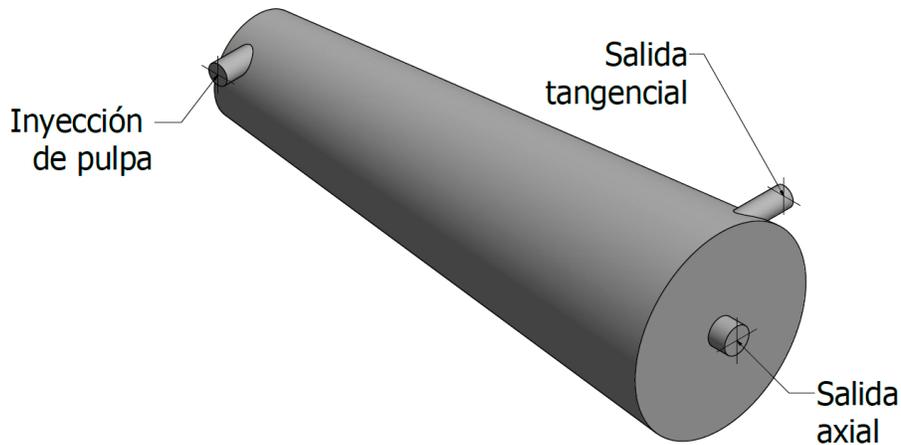


Figura 3.7: Diseño CAD de la Celda Experimental Mejorada (CEM).

3.5. Modelos multifásicos

Para el estudio de los casos bases, se utiliza el modelo multifásico *Mixture*, debido a que se busca filtrar el número de casos con simulaciones de menor calidad, pero que de todas formas evidencien resultados representativos de las condiciones de operación que se están estudiando.

Para los casos de interés que se simulan en las Etapas II y III se busca una mayor exactitud en los resultados, por lo que estos escenarios se trabajan con el modelo multifásico *Euleriano*.

3.6. Mallado

El mallado óptimo de cada celda para cada tipo de simulación, se obtiene por medio de análisis de sensibilidad sobre los promedios de velocidad tangencial y axial globales en la celda, valores que son recuperados como un reporte de integral de volumen en ANSYS Fluent. De forma complementaria, también se revisa que los parámetros de calidad del mallado, específicamente *Aspect Ratio*, *Skewness* y *Orthogonal Quality*, estén dentro del rango de valores aceptables.

Todos los análisis de sensibilidad se hacen utilizando el modelo multifásico *Mixture* para disminuir los tiempos de simulación. Dado que los casos bases solo buscan ser un filtro general, para la malla escogida se acepta una tolerancia de variación de las velocidades menor al 20 %, respecto a la malla de mejor calidad. En el caso de de las condiciones de operación de interés para las geometrías CE y CEM, el criterio de calidad es una variación menor al 10 %, mientras que para la PD, que busca definir los criterios de diseño para una nueva iteración de las celdas de flotación cónicas, se acepta una variación menor al 5 %.

3.7. Evaluación de resultados

Dado el carácter innovador de la celda de flotación cónica, no existen parámetros estandarizados para medir su desempeño, por lo que se busca crear una nueva forma de categorizar a las celdas. Dicho lo anterior, para evaluar el comportamiento fluidodinámico hidráulico de la celda, se considera que este es favorable para el proceso de concentración de cobre cuando se cumplen las siguientes condiciones:

1. **Sentido:** No existen cambios en el sentido de rotación de la pulpa.
2. **Mantención:** El flujo de pulpa es capaz de mantener el flujo helicoidal durante todo el trayecto desde la inyección hasta la salida.
3. **Velocidad:** La velocidad tangencial global de la mezcla de fases es capaz de mantener la velocidad tangencial global de la condición de operación # 8 de la Tabla (3.5) sobre la geometría CE.
4. **Frenado:** La disminución de la velocidad tangencial a lo largo de la celda debido al roce u otros factores tiene un valor bajo, manteniendo en lo posible, una velocidad tangencial constante o superior a la de la inyección.

A las 4 condiciones anteriores se les asigna un puntaje para cada celda simulada bajo las condiciones de operación de interés, de modo que se tengan indicadores de desempeño para comparar las celdas. Los puntajes de cada indicador de desempeño se presentan a continuación.

3.7.1. Sentido Se

Toma el valor 0 cuando existe un cambio de sentido de rotación de la pulpa, mientras que si este se mantiene Se vale 100.

3.7.2. Mantención Ma

Dependiendo de hasta donde alcance a llegar el flujo helicoidal (claramente definido y marcado) manteniendo el sentido de giro original de la inyección tangencial, Ma toma los valores:

- 50 si la helicoidal se mantiene hasta $1/3$ del largo de la celda.
- 75 si la helicoidal se mantiene hasta $2/3$ del largo de la celda.
- 100 si la helicoidal se mantiene durante todo el largo de la celda.

3.7.3. Velocidad Ve

Dependiendo de la velocidad tangencial global de la mezcla de las fases involucradas, Ve toma el valor X , si la velocidad tangencial global es el $X\%$ de la velocidad tangencial del caso de operación # 8 de la Tabla (3.5) sobre la geometría CE.

3.7.4. Frenado Fr

Dependiendo de las velocidades tangenciales de los planos de entrada V_{tin} ($V_{tin} > 0$) y salida V_{tout} de la celda, Fr toma el valor indicado por la Ecuación (3.1).

$$Fr(V_{tin}, V_{tout}) = \begin{cases} 100 - 100 \cdot (V_{tin} - V_{tout}), & \text{si } V_{tout} > 0 \\ 0, & \text{si } V_{tout} < 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

El Desempeño Hidráulico Global DHG de la celda, se define entonces según la Ecuación (3.2).

$$DHG = \frac{Se + Ma + Ve + Fr}{4} \quad (3.2)$$

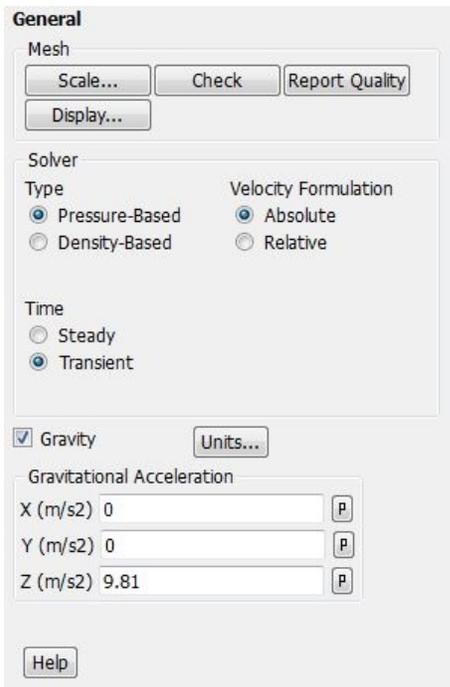
3.8. Setup Fluent

Las condiciones generales de las simulaciones contemplan el problema en su estado transiente, con *Solver* tipo *Pressure-Based*, dado que se trabajan los fluidos como incompresibles. Además se debe activar el módulo de la gravedad, de modo que la celda este dispuesta en posición horizontal, con las entradas y salidas tangenciales de forma horizontal (Figura (3.8)).

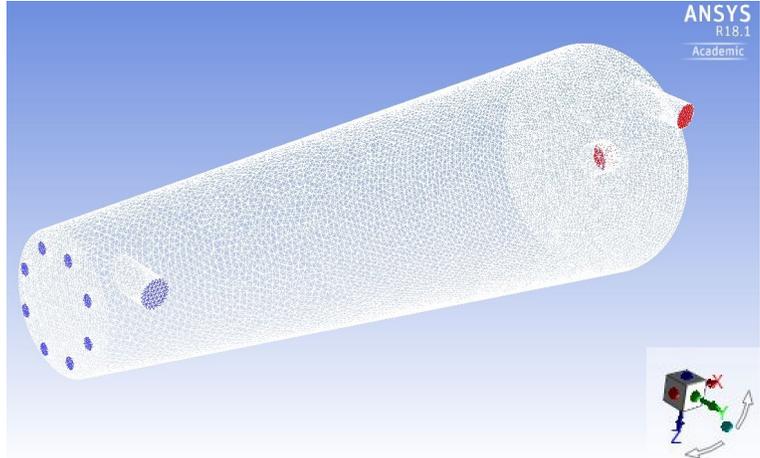
Para los modelos multifásicos, se seleccionan los tipo *Mixture* y *Euleriano* según corresponda el caso, ambos con 3 fases eulerianas. En el caso del modelo *Euleriano*, la formulación de la fracción del volumen es *Implícita*, para tener una simulación más estable, en la cual se puedan usar *time step's* más grandes. Lo anterior se muestra en las figuras (3.9).

Como se puede apreciar en la Figura (3.10), el modelo de turbulencia a elegir corresponde al $k - \varepsilon$ *Realizable* con sus demás parámetros por defecto.

Para las propiedades de la fase aire se utilizan las entregadas por ANSYS Fluent por defecto, mientras que las fases de sulfuros de cobre y ganga se configuran acorde a la Figura (3.11), según las densidades de la Tabla (3.2) y la viscosidades de la Tabla (3.4). Para esto último se utiliza el modelo *Herschel - Burkley*, con un *shear rate* cercano a cero, con la finalidad de que la simulación se asemeje al modelo plástico de Bingham.

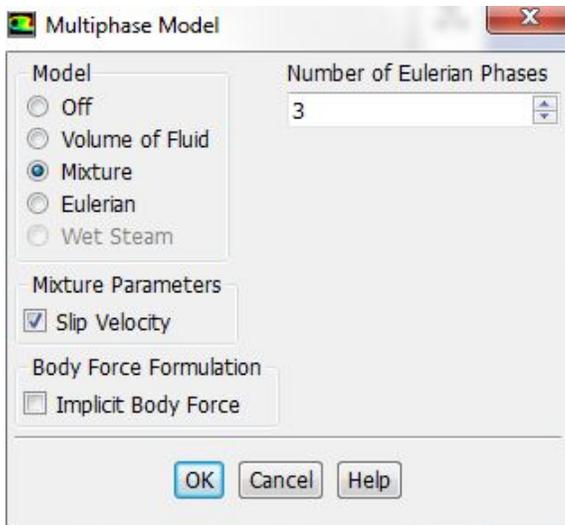


(a) Ventana de configuración general.

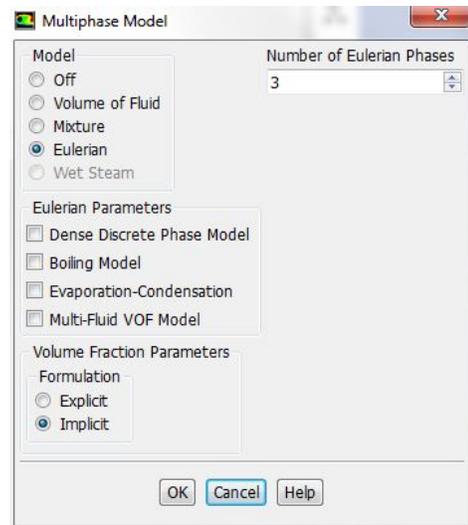


(b) Vista de la malla, en azul las superficies *inlet*, en rojo superficies *outlet*, celda en disposición horizontal con gravedad actuando en la dirección $+z$.

Figura 3.8: Setup general de las simulaciones.



(a) Configuración multifásica *Mixture*.



(b) Configuración multifásica *Euleriana*.

Figura 3.9: Configuración de los modelos multifásicos utilizados.

Las condiciones de borde de las superficies señaladas en la Figura (3.8b), se muestran en la Figura (3.12), siendo para las entradas condiciones de velocidad y para las salidas condiciones de presión. En el caso de las inyecciones, se seleccionan con la velocidad indicada previamente según el caso de estudio, con una fracción en volumen de 1 para el caso del *Inlet* de aire y para el caso del *Inlet* de pulpa se seleccionan las fracciones en volumen señaladas por la

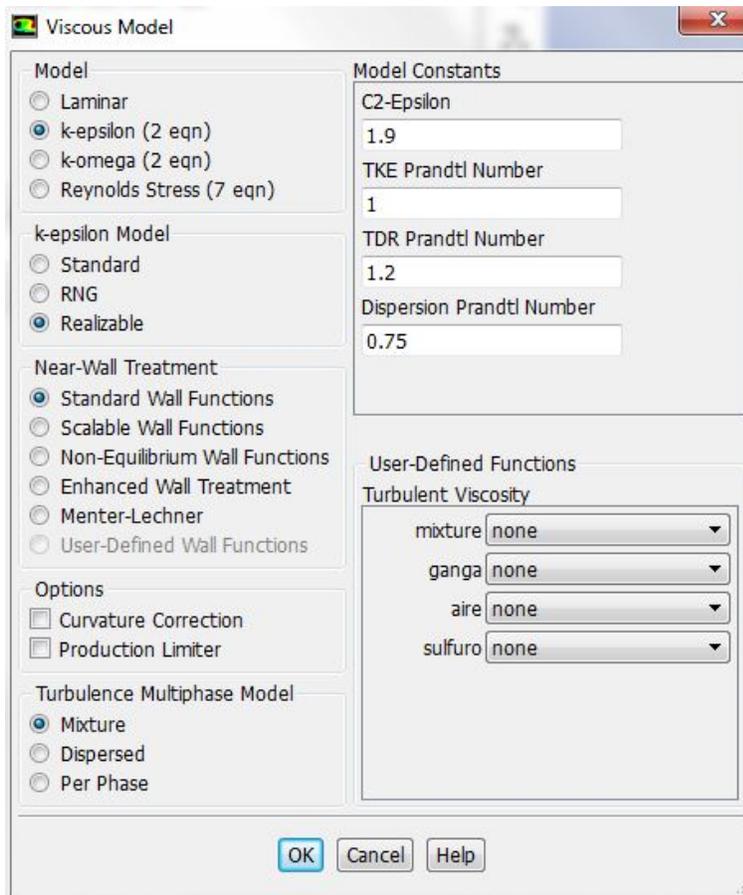


Figura 3.10: Modelo de turbulencia.

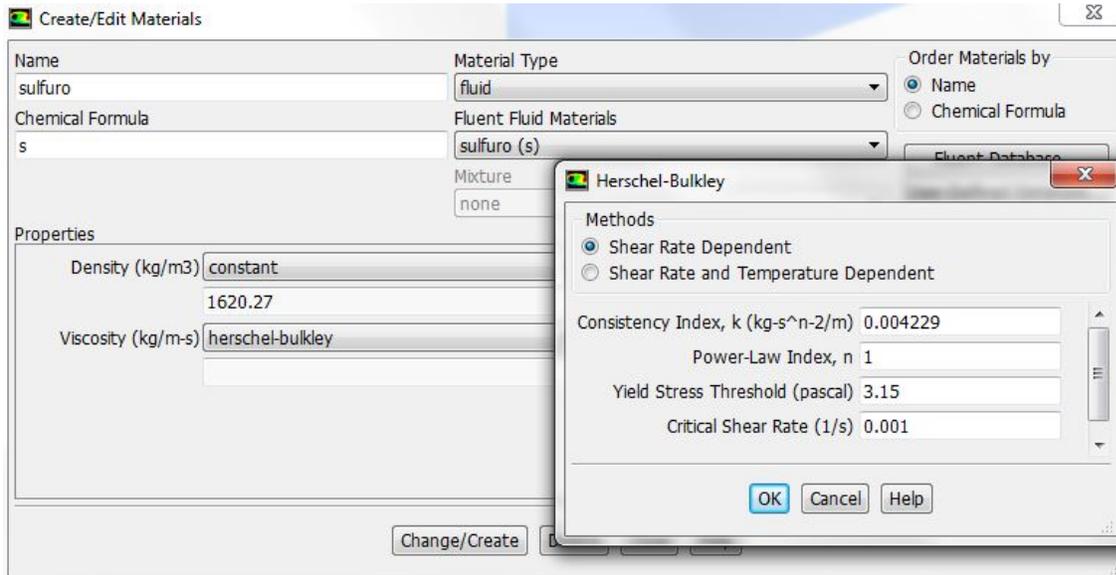
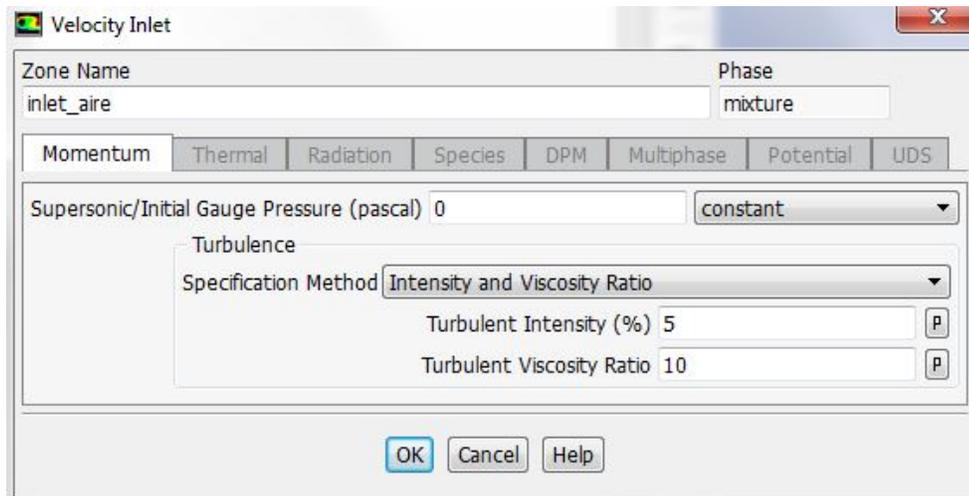
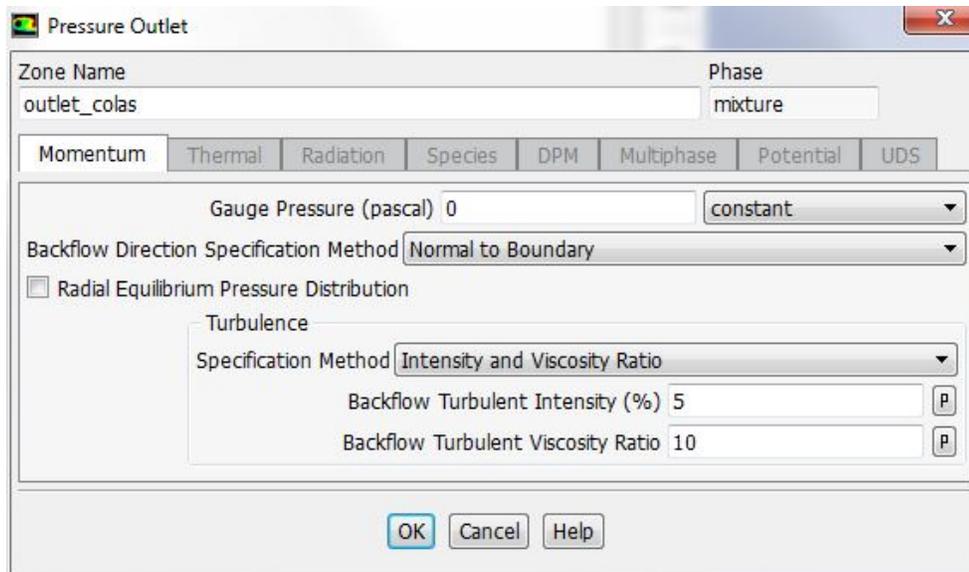


Figura 3.11: Propiedades de la fase sulfuros de cobre con un 50 % de concentración de sólidos en peso.

Tabla (3.3).



(a) Condición de borde de las superficies de entrada.



(b) Condición de borde de las superficies de salida.

Figura 3.12: Condiciones de borde de las entradas y salidas de las celdas de flotación.

El setup de los métodos de solución se muestran en la Figura (3.13), utilizando una inicialización híbrida.

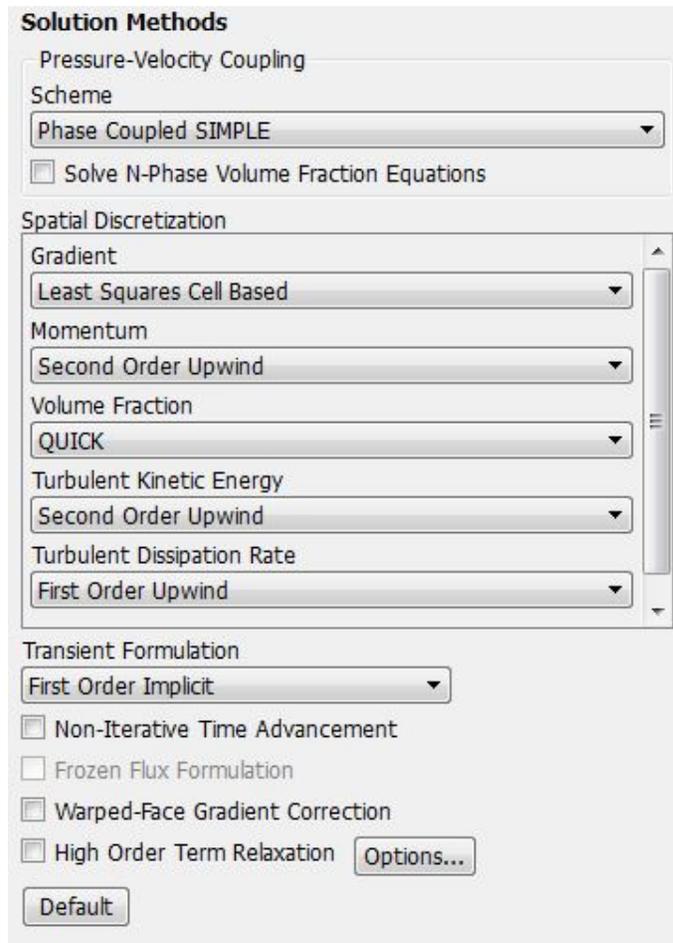


Figura 3.13: Métodos de solución.

Finalmente, las simulaciones tipo *Mixture* se corren con un time step fijo, acorde a la condición CFL para cada caso particular, mientras que las simulaciones tipo *Euleriano* trabajan con un time step adaptativo, seleccionando un tamaño de time step mínimo de un orden de magnitud por debajo al señalado por la condición CFL y un de time step máximo de un orden de magnitud por sobre la condición CFL. Esto último se puede apreciar en la Figura (3.14).

Dependiendo de cada caso particular de condiciones de operación y geometría estudiada, los resultados convergen a la solución estacionaria después de 15 a 25 segundos de simulación, lo que se traducen en tiempos de iteración que van desde las 24 horas a 144 horas según la condición de operación simulada.

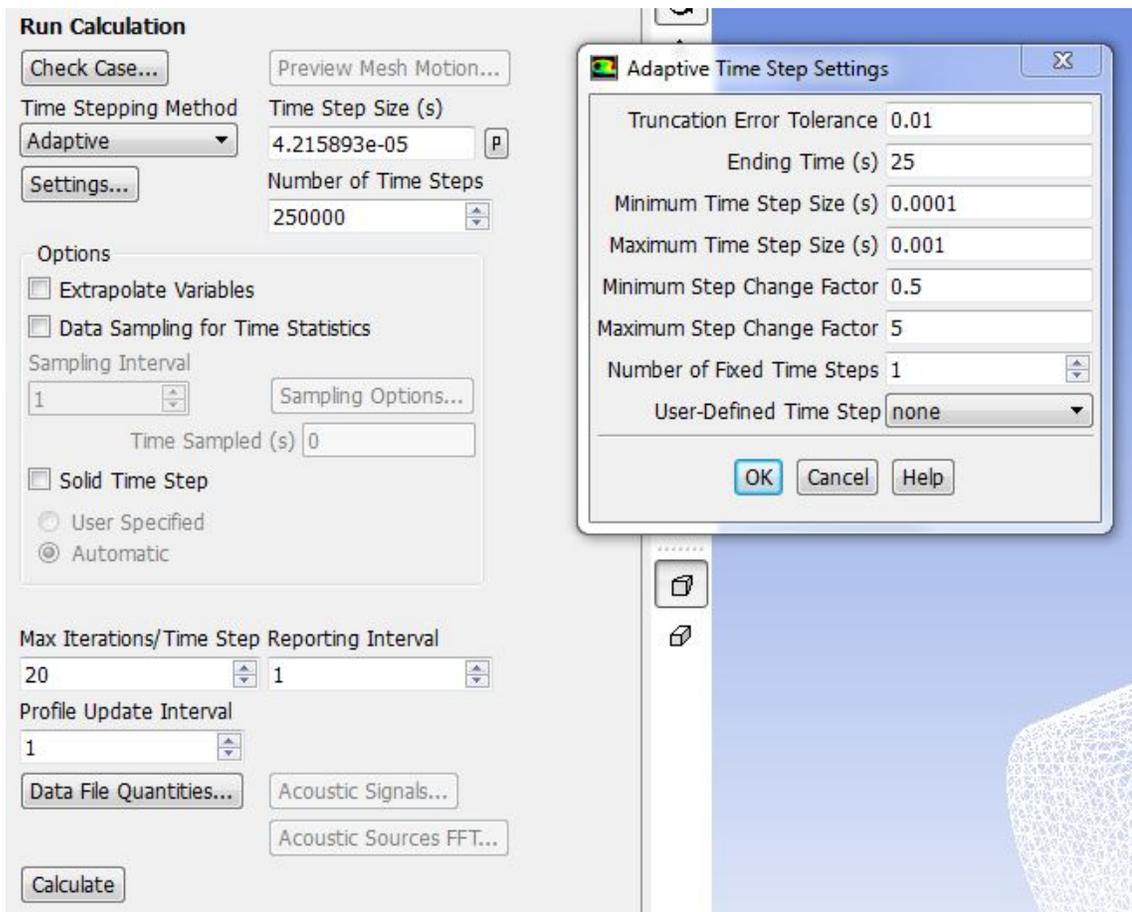


Figura 3.14: Parámetros del time step adaptativo.

Capítulo 4

Resultados

En las próximas secciones se presentan los resultados de la simulaciones, siguiendo la lógica del proceso metodológico presentado en el capítulo anterior. En primer lugar se presentan los resultados de las condiciones de operación bases, junto al análisis parcial de resultados que permite determinar los casos de interés, para continuar con la aplicación de estos a las geometrías CE y CEM utilizando el modelo *Euleriano*. Un análisis parcial de resultados permite definir la nueva geometría de la Propuesta de Diseño, la cual también se somete a las condiciones de operación de interés.

4.1. Simulación de las condiciones de operación bases

4.1.1. Análisis de sensibilidad

Los análisis de sensibilidad de la geometría CE se muestran en los gráficos de las figuras (4.1) y (4.2). En el caso de la velocidad axial, esta presenta una sensibilidad siempre menor al 10 %, mientras que para la velocidad tangencial es más sensible a las variaciones de malla.

Para las simulaciones de las condiciones de operación bases se utiliza la malla descrita según la Tabla (4.1) (cuarto mallado de las figuras (4.1) y (4.2)), con sus parámetros de calidad asociados según la Tabla (4.2). Esta selección de baja exactitud se justifica debido al gran número de simulaciones que buscan ser solo un filtro para determinar los casos de interés.

4.1.2. Resultados simulaciones

Se recuperan los valores de velocidad tangencial en 4 planos perpendiculares al eje de la celda (Figura (4.3)).

Las velocidades tangenciales en los planos descritos anteriormente se muestran en las

Tabla 4.1: Características malla de la geometría CE para la simulación de los casos bases.

Número de elementos	321.806
Número de nodos	458.185
Diferencia porcentual de la velocidad tangencial respecto a la mejor malla	18,57
Diferencia porcentual de la velocidad axial respecto a la mejor malla	0,17
Tamaño elementos gruesos [mm]	7
Tamaño elementos finos [mm]	3

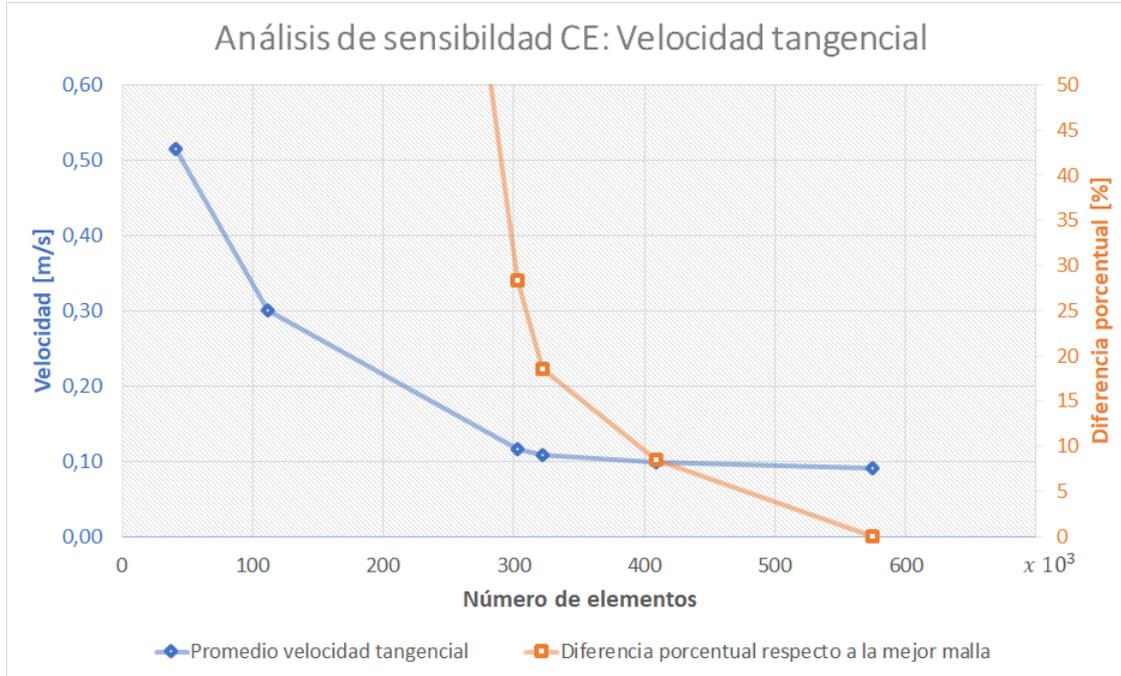


Figura 4.1: Análisis de sensibilidad sobre el promedio de la velocidad tangencial para la geometría CE.

Tabla 4.2: Parámetros de calidad del mallado de la geometría CE para la simulación de los casos bases.

Valor de estudio	Aspect Ratio	Skewness	Orthogonal Quality
Mínimo	1,158	6,73E-06	0,052
Máximo	9,739	0,947	0,994
Promedio	1,836	0,227	0,770
Desviación estándar	0,468	0,139	0,137

figuras (4.4), (4.5) y (4.6), dividiendo los resultados por las concentraciones de sólidos en peso del 40 %, 50 % y 60 % respectivamente.

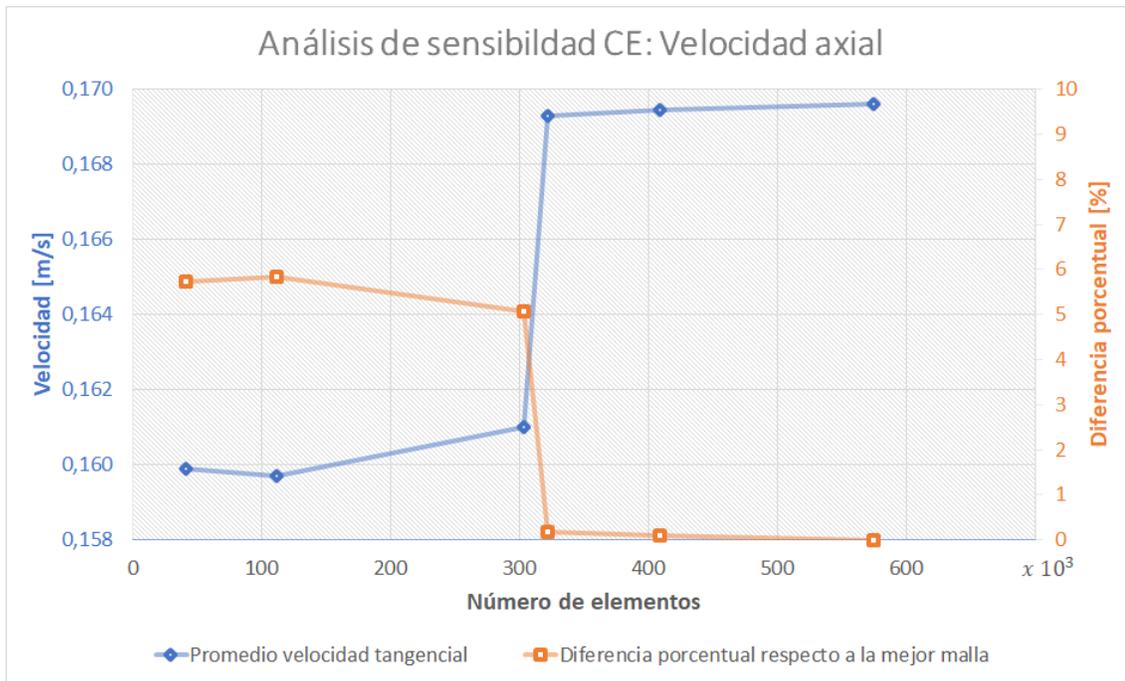


Figura 4.2: Análisis de sensibilidad sobre el promedio de la velocidad axial para la geometría CE.

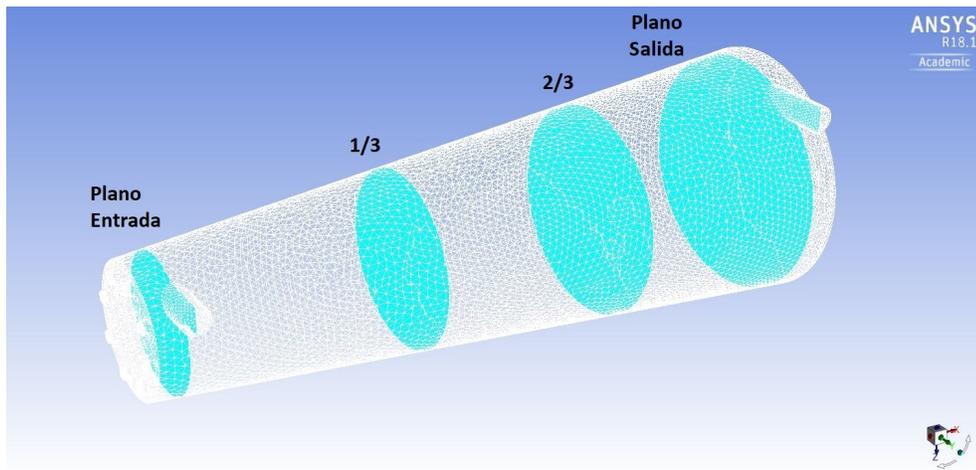


Figura 4.3: Planos de estudio perpendiculares al eje de la celda de flotación, distribuidos de forma equidistantes entre la entrada tangencial y salida tangencial.

El gráfico de barras de la Figura (4.7) muestra como varía la concentración de sulfuros entre entradas y salidas de la celda para los casos de simulación en que solo se estudia el comportamiento fluidodinámico de la pulpa.

El balance másico de las simulaciones se presenta en la Tabla (4.3).

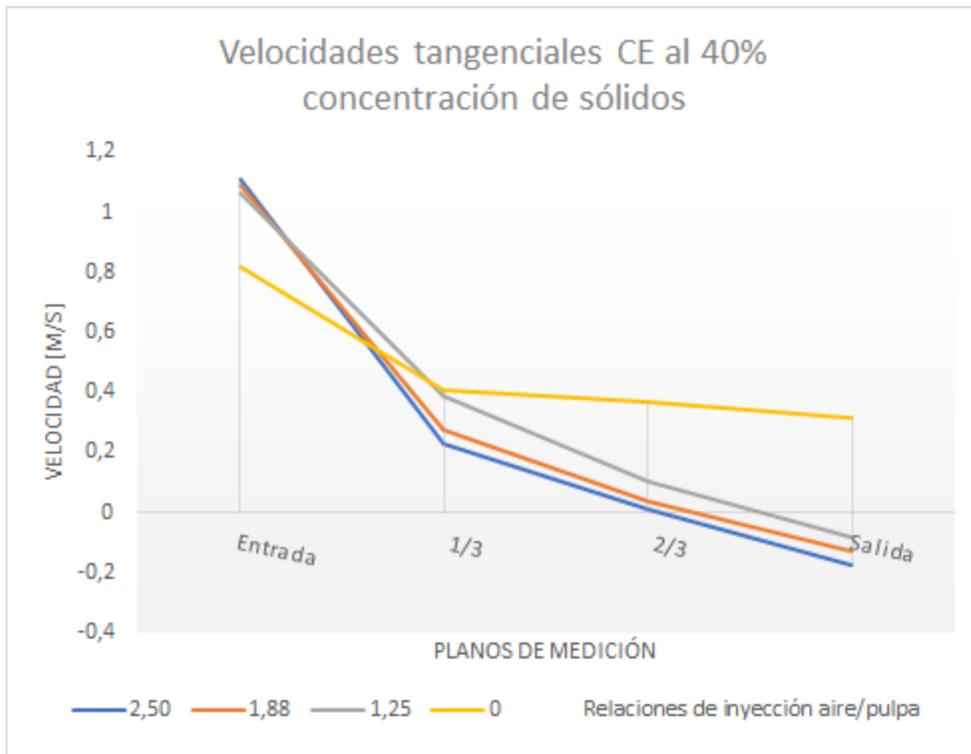


Figura 4.4: Resultados de las velocidades tangenciales a lo largo de la geometría CE con una pulpa con concentración de sólidos del 40 %, utilizando el modelo *Mixture*.

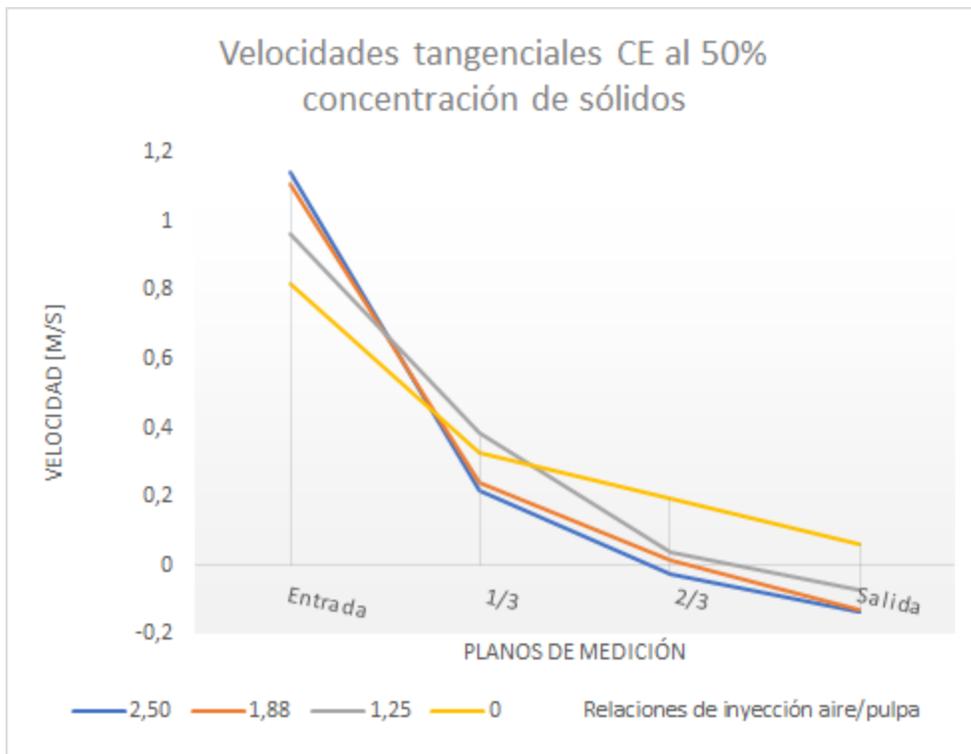


Figura 4.5: Resultados de las velocidades tangenciales a lo largo de la geometría CE con una pulpa con concentración de sólidos del 50 %, utilizando el modelo *Mixture*.

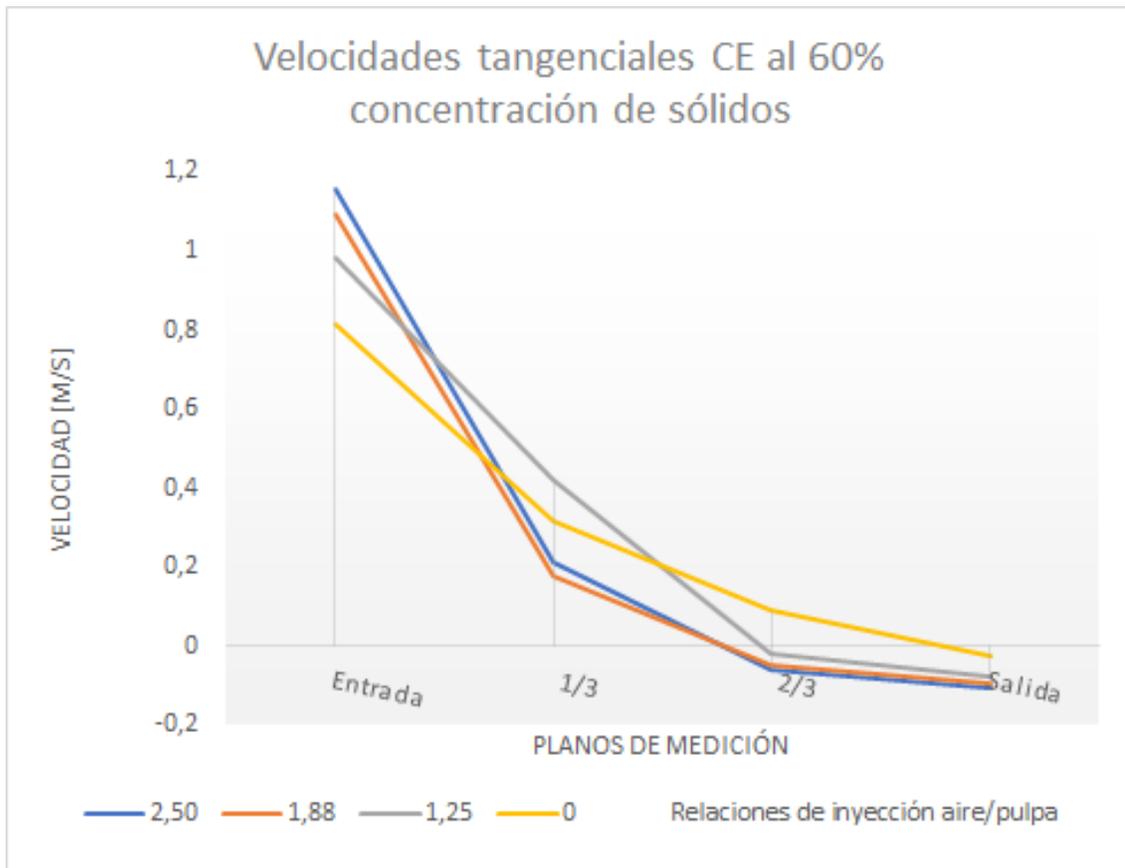


Figura 4.6: Resultados de las velocidades tangenciales a lo largo de la geometría CE con una pulpa con concentración de sólidos del 60 %, utilizando el modelo *Mixture*.

Tabla 4.3: Flujos máxicos en las simulaciones de la geometría CE con las condiciones de operación bases.

#	Concentración de sólidos en peso [%]	Relación inyección R_{iny}	Caudales [kg/s]			Error absoluto conservación de la masa [%]
			Inyección	Salida Axial	Salida Tangencial	
1	40	2,50	1,369	0,935	0,434	3,117
2	40	1,88	1,394	0,935	0,459	5,101
3	40	1,25	1,339	0,879	0,460	0,985
4	40	0	1,324	0,872	0,452	0,002
5	50	2,50	1,509	1,024	0,485	4,000
6	50	1,88	1,520	1,011	0,509	4,822
7	50	1,25	1,528	0,998	0,530	5,388
8	50	0	1,448	0,957	0,491	0,006
9	60	2,50	1,648	1,135	0,513	2,978
10	60	1,88	1,641	1,117	0,524	2,608
11	60	1,25	1,661	1,095	0,566	3,898
12	60	0	1,597	1,062	0,536	0,001

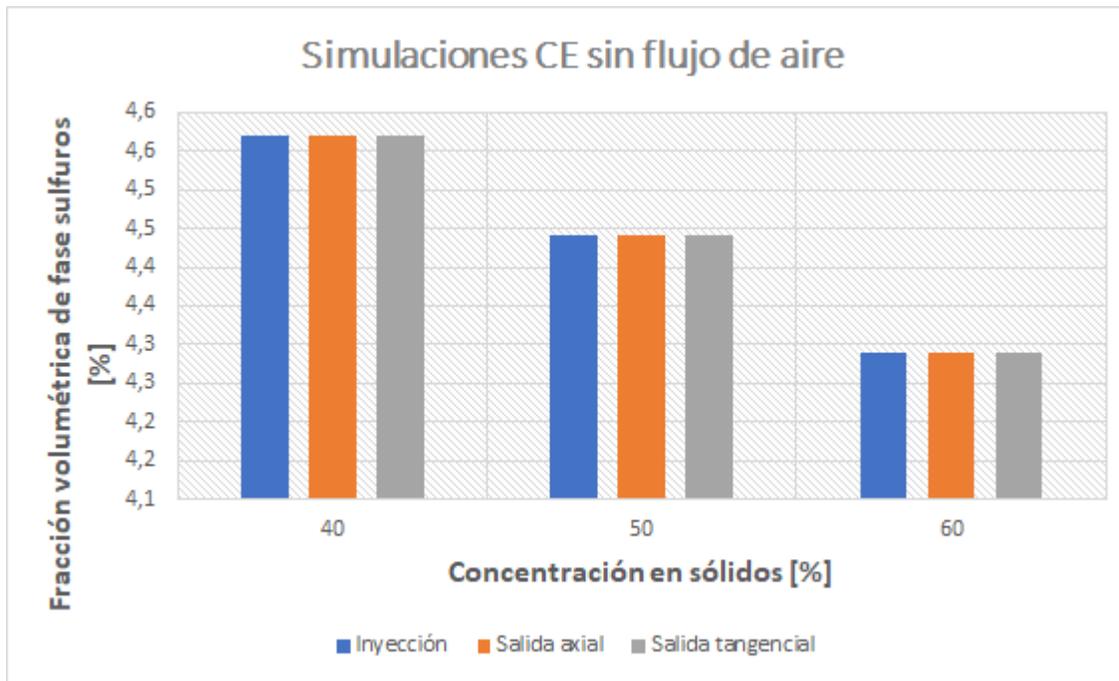


Figura 4.7: Variación en la concentración de la fase de sulfuros entre inyecciones y salidas de la CE, para los 3 casos sin inyección de aire.

4.1.3. Análisis parcial de resultados

A partir de las figuras (4.4), (4.5) y (4.6) se puede apreciar que prácticamente todos los promedios de velocidad tangencial para la salida tangencial de la celda son negativos, lo que indica un cambio de sentido en la rotación de la pulpa, efecto perjudicial para la separación por hidrociclón.

Para el caso de concentración del 60 % (Figura (4.6)), la velocidad tangencial a la salida incluso es negativa cuando no existe inyección de aire, por lo que la celda no es capaz de operar bajo ninguna de esas condiciones de trabajo.

Cuando la concentración de sólidos es del 50 % (Figura (4.5)), la velocidad tangencial se mantiene con el mismo signo solo en el caso de inyección de pulpa sin aire, mientras que en los casos en que $R_{iny} > 0$, a 2/3 de la celda, la velocidad tangencial se encuentra cercana a cero, lo que evidencia una destrucción de la helicoide en el flujo.

Finalmente, de acuerdo a lo observado en la Figura (4.4) para la concentración de sólidos del 40 %, el comportamiento de la separación por hidrociclón es marginalmente mejor a cuando la concentración es del 50 %.

Dicho lo anterior, dado que la celda no es capaz de operar bajo una concentración del 60 %, pero si lo es al operar a la concentración del 50 %, también lo va a poder hacer cuando es del 40 %, se seleccionan los casos de estudio de la Tabla (4.4).

Tabla 4.4: Condiciones de operación casos de interés.

#	Concentración de sólidos [%]	Caudal de inyección de aire [L/min]	Caudal de inyección de pulpa [L/min]	Relación de inyección R_{iny}
5	50	150	60	2,50
6	50	113	60	1,88
7	50	75	60	1,25
8	50	0	60	0

4.2. Simulación de los casos de interés

4.2.1. Selección de la malla

Dada la necesidad de simulaciones de mayor precisión, se selecciona la quinta malla mas fina de la Figura (4.1), dicha malla tiene las características de la Tabla (4.5) y parámetros de la calidad de la Tabla (4.6). El mallado utilizado se muestra en la Figura (4.8).

Para la geometría CEM, se utiliza la misma configuración del mallado descrito en esta sección, dada la similitud geométrica con la CE, respaldado por los parámetros de calidad que varían menos de un 1 % respecto a los presentados en la Tabla (4.6).

Tabla 4.5: Características malla de la geometría CE para la simulación de los casos de interés.

Número de elementos	409.164
Número de nodos	577.088
Diferencia porcentual de la velocidad tangencial respecto a la mejor malla	8,48
Diferencia porcentual de la velocidad axial respecto a la mejor malla	0,09
Tamaño elementos gruesos [mm]	6,4
Tamaño elementos finos [mm]	2

Tabla 4.6: Parámetros de calidad del mallado de la geometría CE para la simulación de los casos de interés.

Valor de estudio	Aspect Ratio	Skewness	Orthogonal Quality
Mínimo	1,158	1,66E-06	0,035
Máximo	9,744	0,964	0,993
Promedio	1,824	0,222	0,776
Desviación estándar	0,458	0,133	0,132

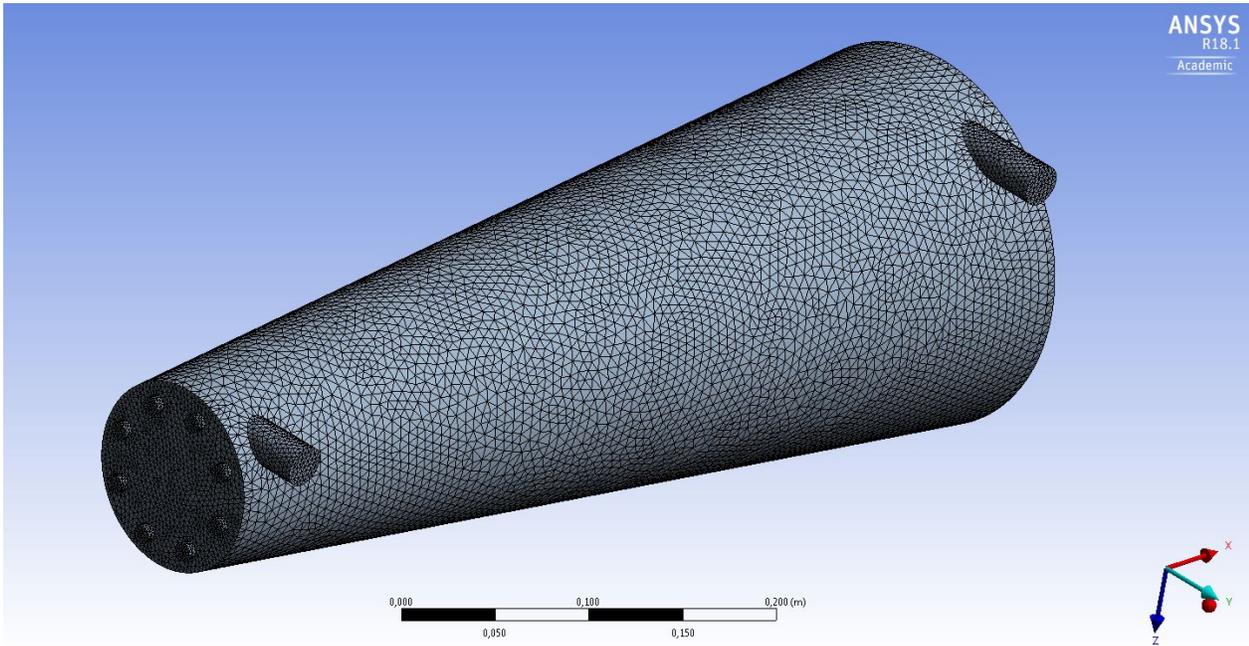


Figura 4.8: Mallado de la geometría CE para la simulación de los casos de operación de interés.

4.2.2. Resultados simulaciones

Las velocidades tangenciales de los planos descritos en la Figura (4.3), se muestran en las figuras (4.9) y (4.10) para las geometrías CE y CEM respectivamente.

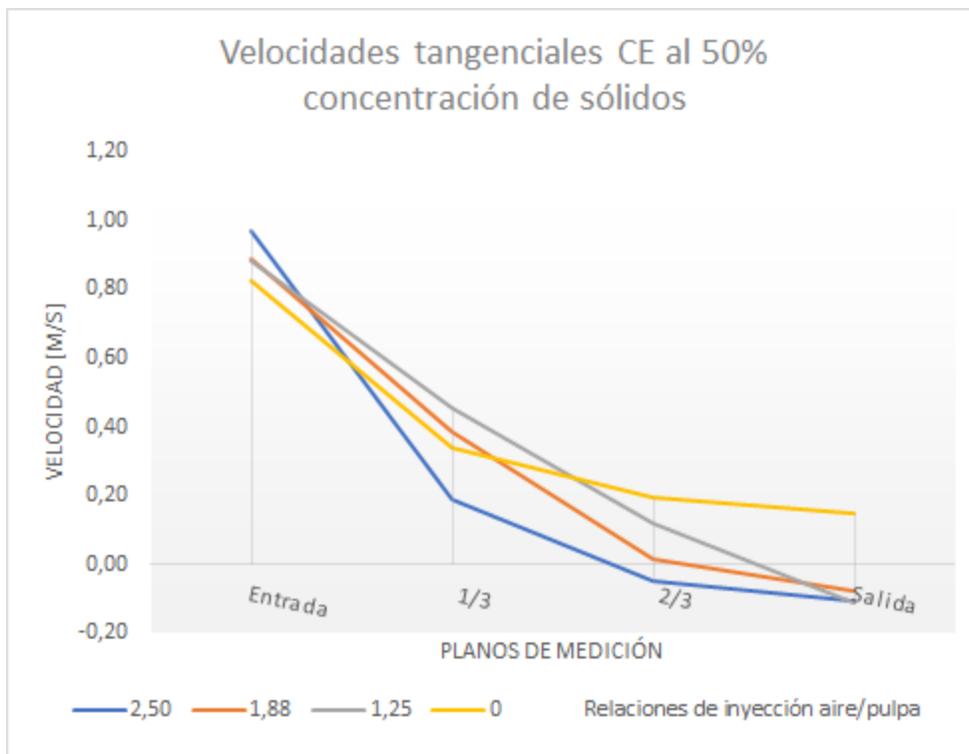


Figura 4.9: Resultados de las velocidades tangenciales a lo largo de la geometría CE con una pulpa con concentración de sólidos del 50%, utilizando el modelo *Euleriano*.

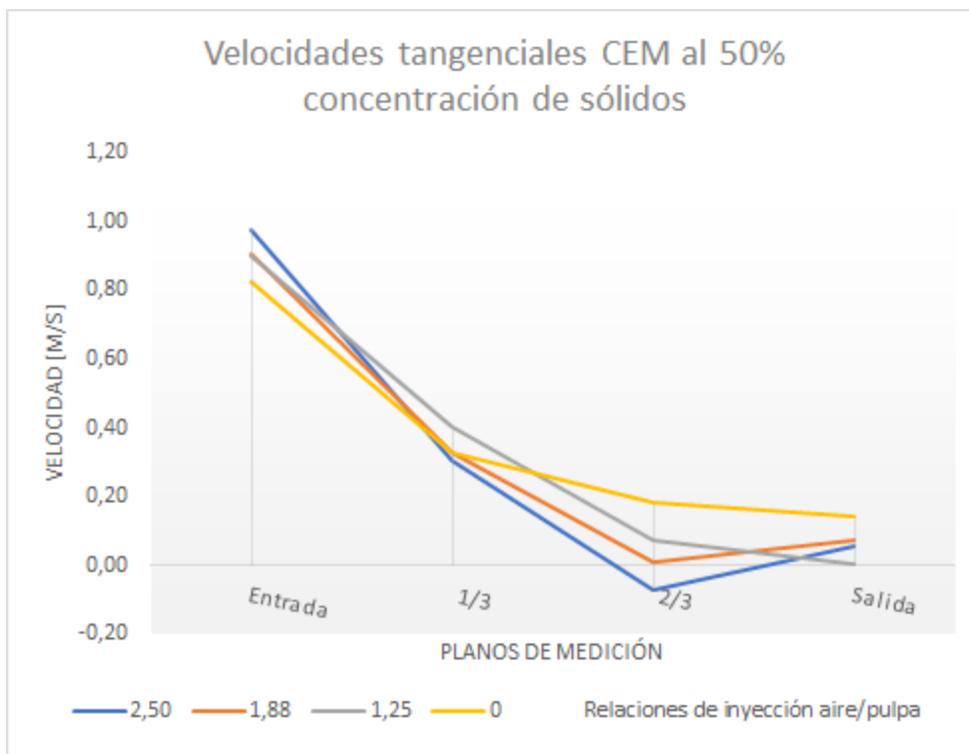


Figura 4.10: Resultados de las velocidades tangenciales a lo largo de la geometría CEM con una pulpa con concentración de sólidos del 50%, utilizando el modelo *Euleriano*.

En las tablas (4.7) y (4.8) se puede apreciar como es la concentración de aire en las salidas de las geometrías CE y CEM respectivamente, siendo el porcentaje restante para completar el 100 % el volumen de pulpa en cada salida.

Tabla 4.7: Fracciones volumétricas de aire en las salidas tangencial y axial de la geometría CE sometida a las condiciones de operación de interés.

#	Relación de inyección R_{iny}	Fracción volumétrica de aire [%]	
		Salida tangencial	Salida axial
5	2,5	76,64	66,2
6	1,88	68,8	61,03
7	1,25	57,14	52,46
8	0	0	0

Tabla 4.8: Fracciones volumétricas de aire en las salidas tangencial y axial de la geometría CEM sometida a las condiciones de operación de interés.

#	Relación de inyección R_{iny}	Fracción volumétrica de aire [%]	
		Salida tangencial	Salida axial
5	2,5	75,7	67,58
6	1,88	67,88	61,76
7	1,25	58,53	53,74
8	0	0	0

En las tablas (4.9) y (4.10) se presenta el balance másico de las simulaciones sobre las geometrías CE y CEM respectivamente, junto a si el modelo es capaz o no de evidenciar una separación por efecto hidrociclón de la fase sulfuros de la fase ganga.

Tabla 4.9: Flujos másicos en las simulaciones de la geometría CE con las condiciones de operación de los casos de interés, utilizando la concentración en sólidos del 50 %.

#	Relación de inyección R_{iny}	Caudales [kg/s]			Error absoluto conservación de la masa [%]	Separación por hidrociclón
		Inyección	Salida axial	Salida tangencial		
5	2,5	1,4510	0,9630	0,4796	0,6	Nulo
6	1,88	1,4503	0,9432	0,5139	0,5	Nulo
7	1,25	1,4495	0,9189	0,5442	0,9	Nulo
8	0	1,4480	1,0002	0,4478	0	Despreciable

Tabla 4.10: Flujos máxicos en las simulaciones de la geometría CEM con las condiciones de operación de los casos de interés, utilizando la concentración en sólidos del 50 %.

#	Relación de inyección R_{iny}	Caudales [kg/s]			Error absoluto conservación de la masa [%]	Separación por hidrociclón
		Inyección	Salida axial	Salida tangencial		
5	2,5	1,4510	0,9602	0,4907	0	Nulo
6	1,88	1,4503	0,9538	0,5122	1,1	Nulo
7	1,25	1,4495	0,9119	0,5229	1	Nulo
8	0	1,4480	0,9353	0,5126	0	Nulo

En los gráficos de las figuras (4.11) y (4.12) se muestran las velocidades tangenciales y axiales globales sobre todo el dominio de las fases al interior de las geometrías CE y CEM.

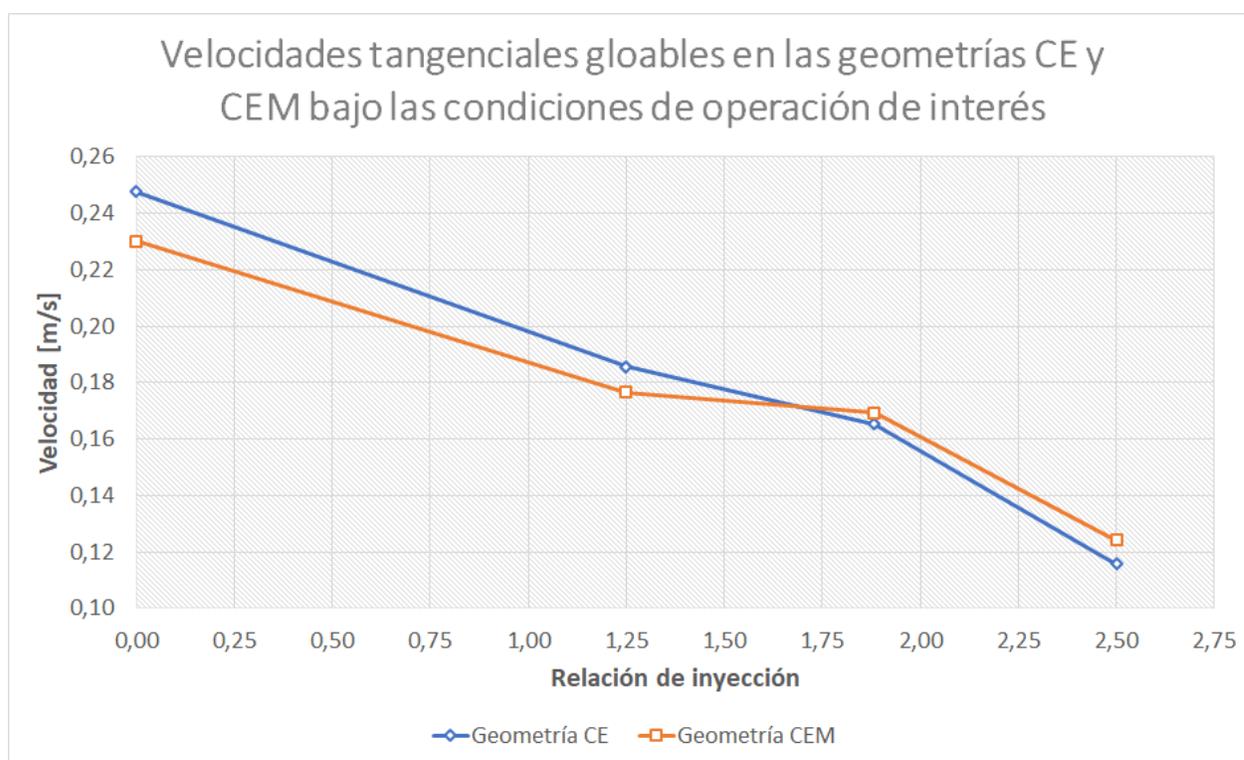


Figura 4.11: Velocidades tangenciales globales de las geometrías CE y CEM, obtenidas como un resultado de una integración volumétrica sobre el volumen de control.

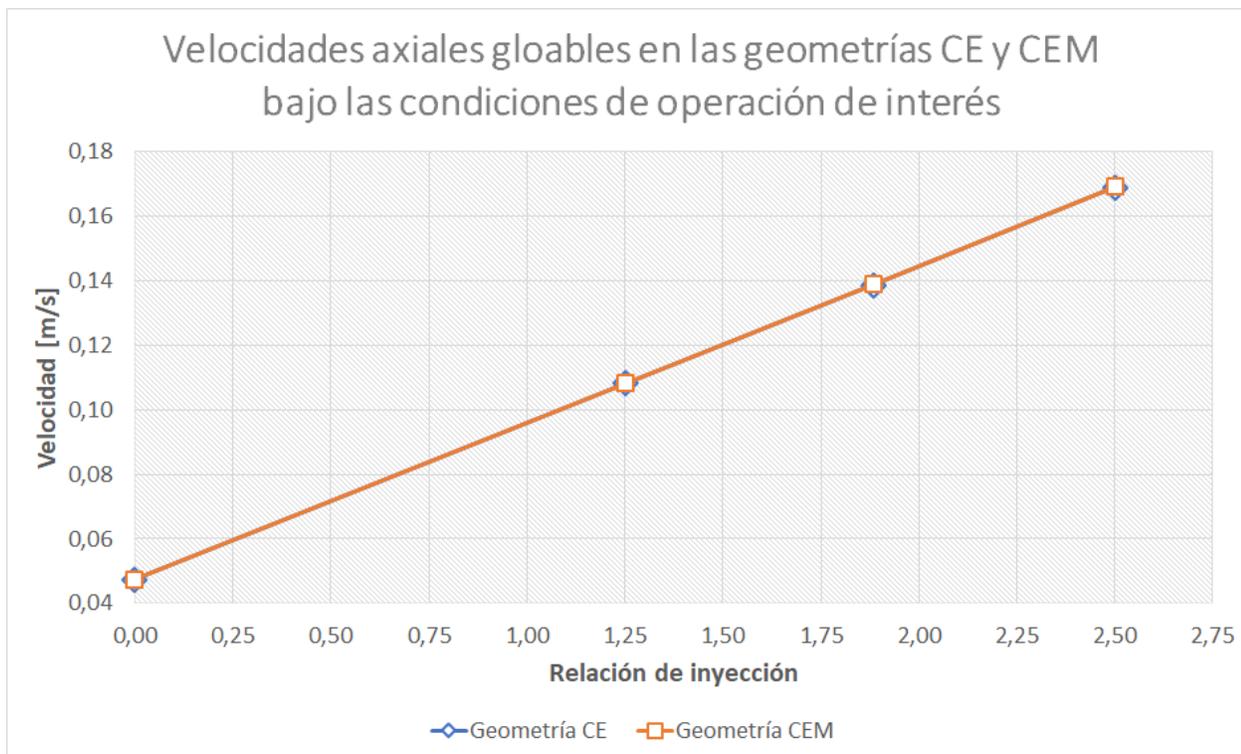


Figura 4.12: Velocidades axiales globales de las geometrías CE y CEM, obtenidas como un resultado de una integración volumétrica sobre el volumen de control.

En las figuras (4.14) se muestra el resultado de las Pathlines de todas las simulaciones de los casos de interés sobre las geometrías CE y CEM, destacando gráficamente la magnitud de la velocidad de la fase sulfuros de cobre.

En las figuras (4.15), (4.16), (4.17) y (4.18) se muestran resultados gráficos de las simulaciones sobre un plano a lo largo de las celdas, descrito según la Figura (4.13). En particular, se estudia la fracción en volumen de las fase aire, de la fase sulfuros y para esta última, su velocidad tangencial y axial a lo largo del plano.

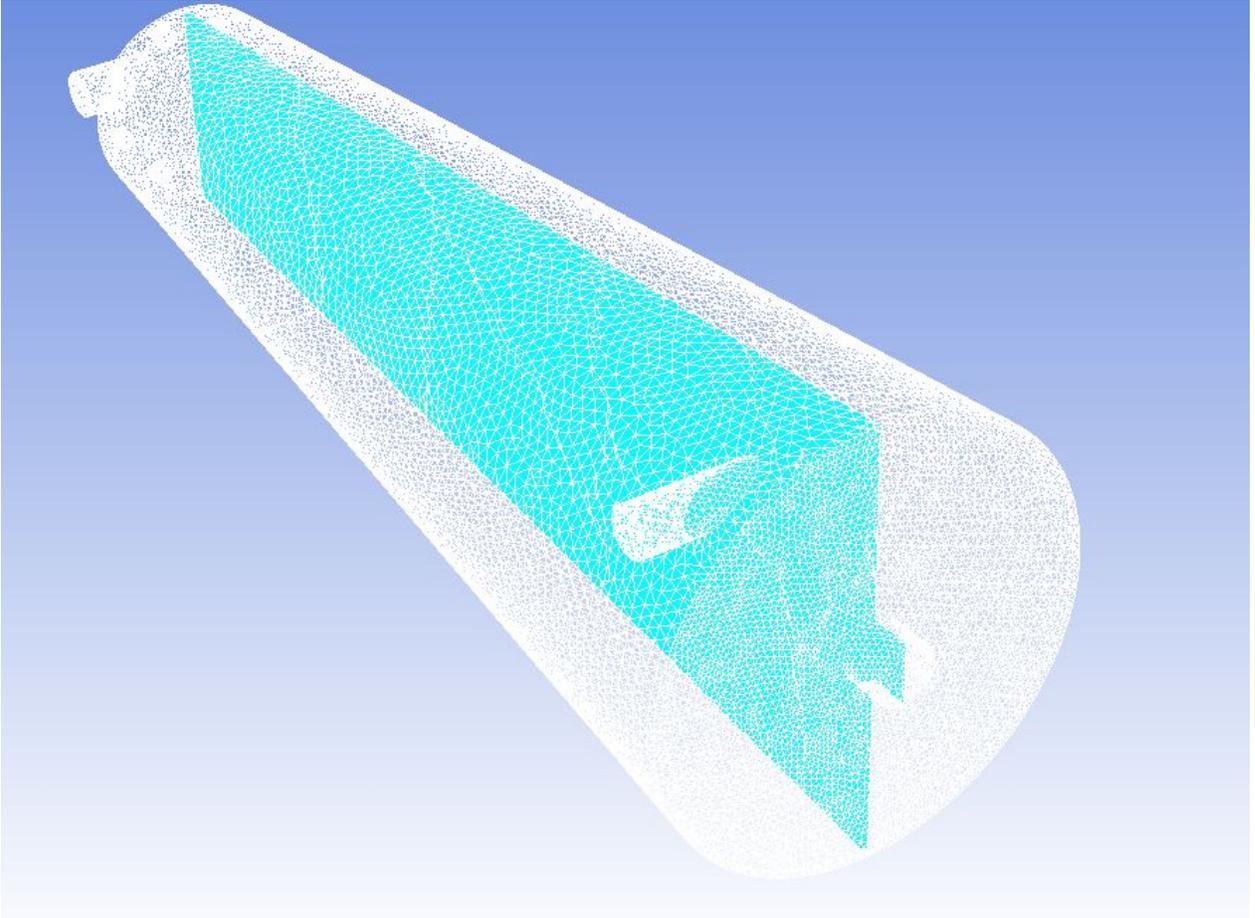
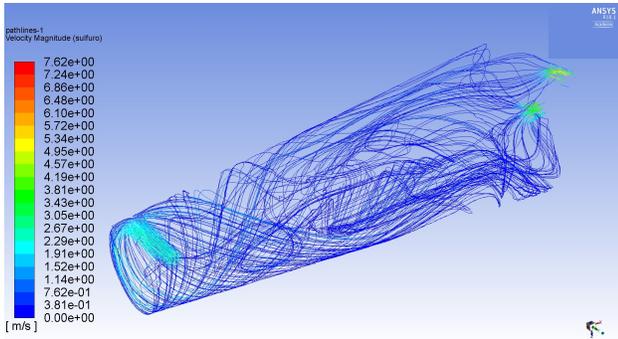
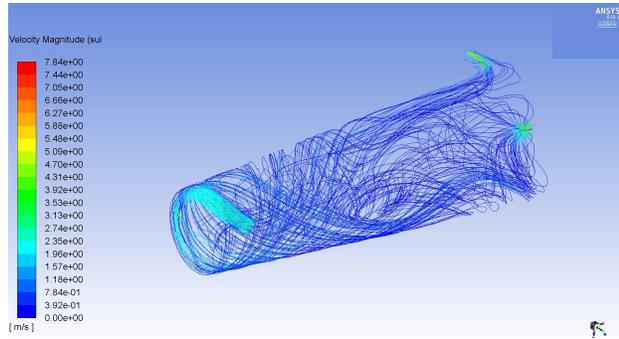


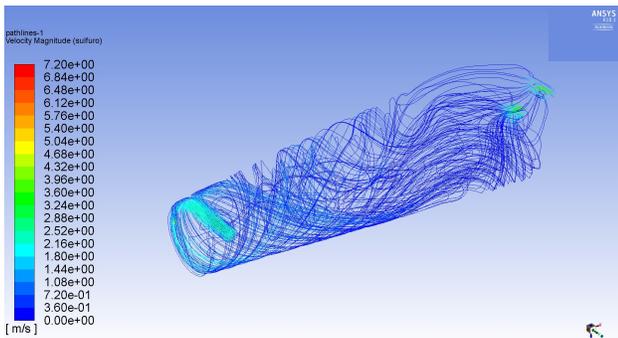
Figura 4.13: Plano vertical transversal a lo largo de toda la geometría CE, sobre el cual se obtienen resultados gráficos..



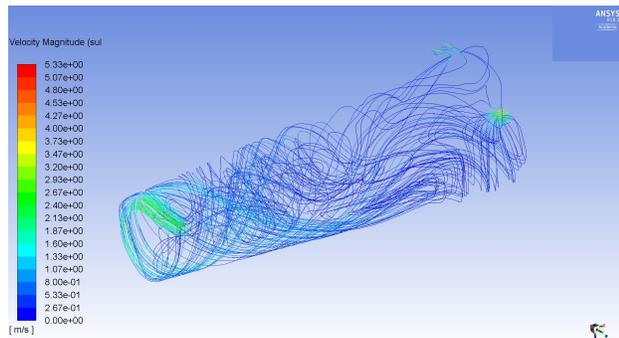
(a) Simulación CE inyección de aire de 150 L/min



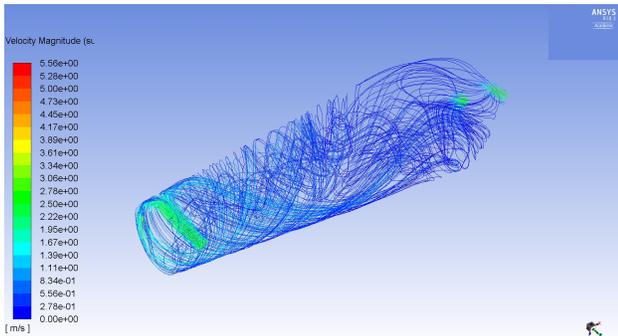
(b) Simulación CEM inyección de aire de 150 L/min.



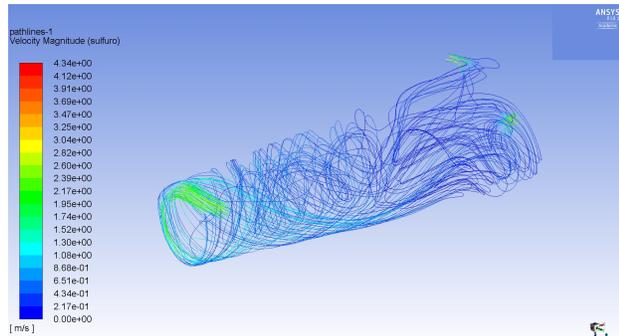
(c) Simulación CE inyección de aire de 113 L/min.



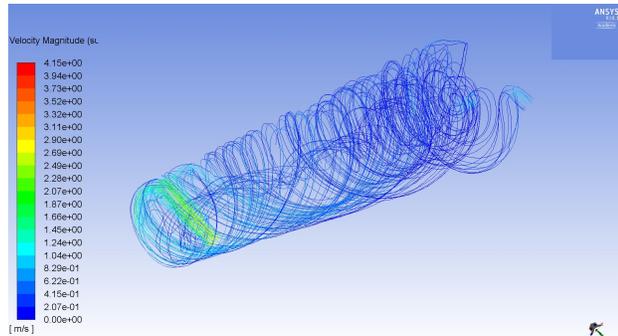
(d) Simulación CEM inyección de aire de 113 L/min.



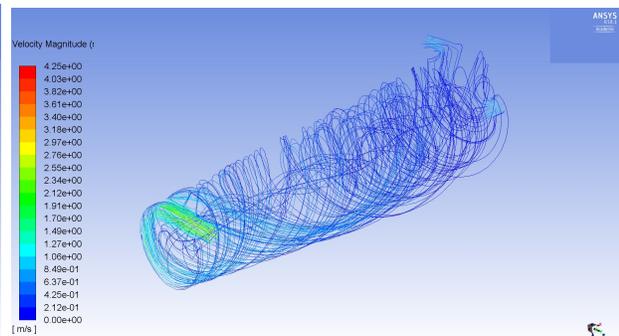
(e) Simulación CE inyección de aire de 75 L/min.



(f) Simulación CEM inyección de aire de 75 L/min.

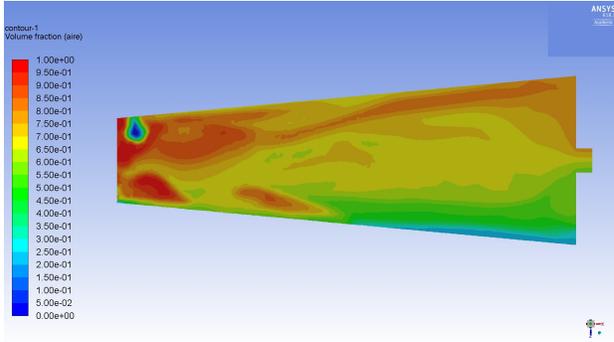


(g) Simulación CE inyección de aire de 0 L/min.

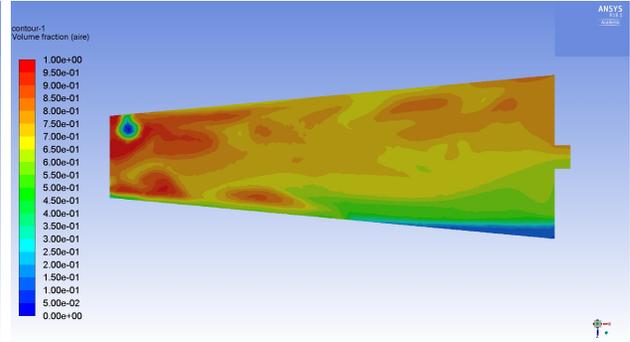


(h) Simulación CEM inyección de aire de 0 L/min.

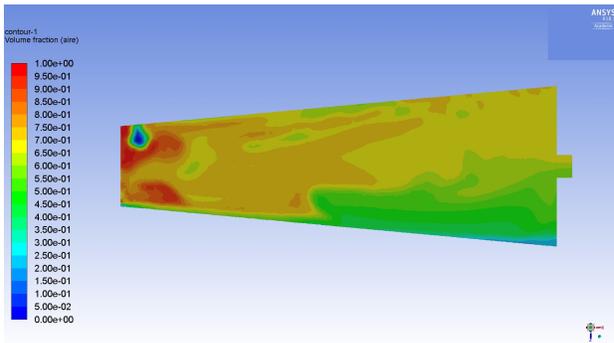
Figura 4.14: Pathlines de velocidad absoluta en $[m/s]$ de la fase sulfuros de cobre, para las simulaciones de las geometrías CE y CEM con una concentración en sólidos del 50 % en peso.



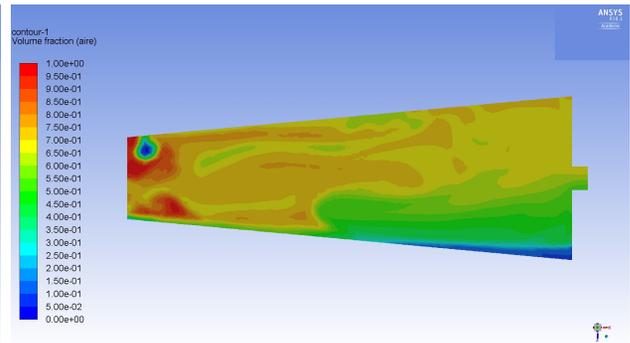
(a) Simulación CE inyección de aire de 150 L/min



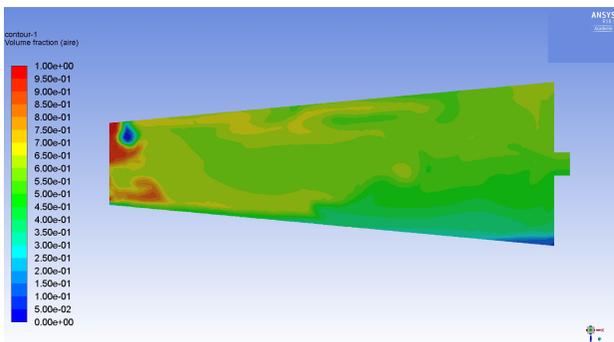
(b) Simulación CEM inyección de aire de 150 L/min.



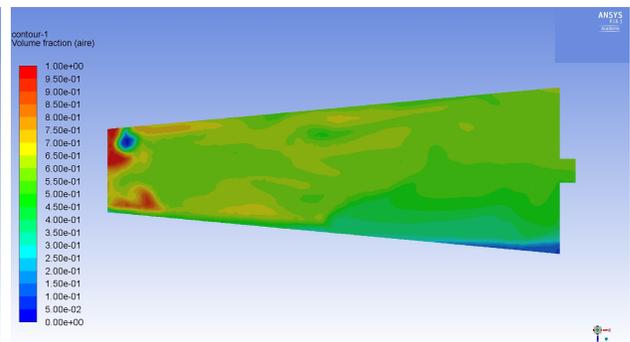
(c) Simulación CE inyección de aire de 113 L/min.



(d) Simulación CEM inyección de aire de 113 L/min.

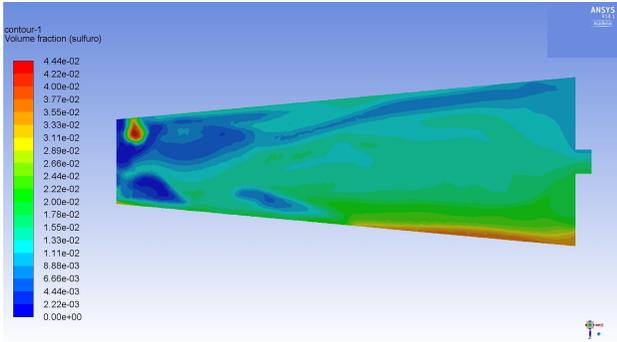


(e) Simulación CE inyección de aire de 75 L/min.

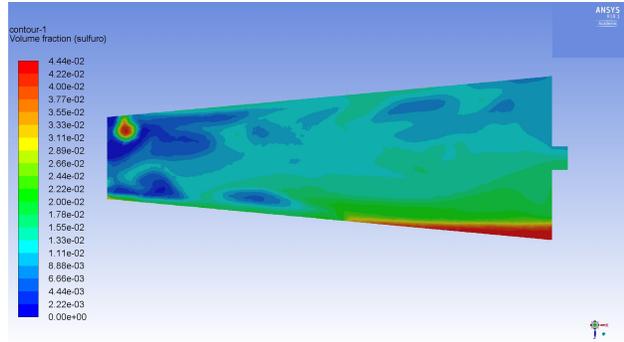


(f) Simulación CEM inyección de aire de 75 L/min.

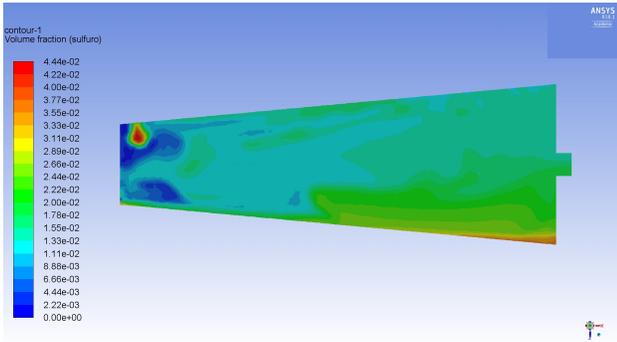
Figura 4.15: Fracción en volumen de la fase aire en el plano de estudio transversal a lo largo de la celda, para las geometrías CE y CEM con una concentración en sólidos del 50% en peso.



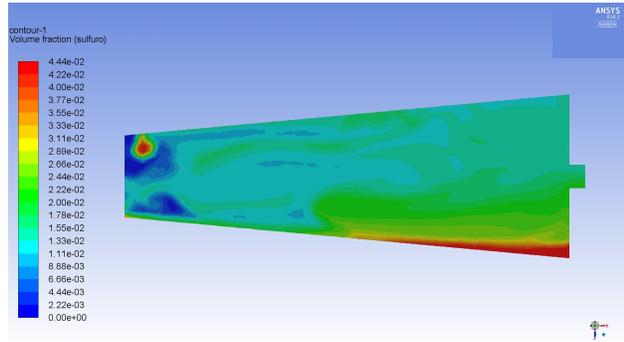
(a) Simulación CE inyección de aire de 150 L/min



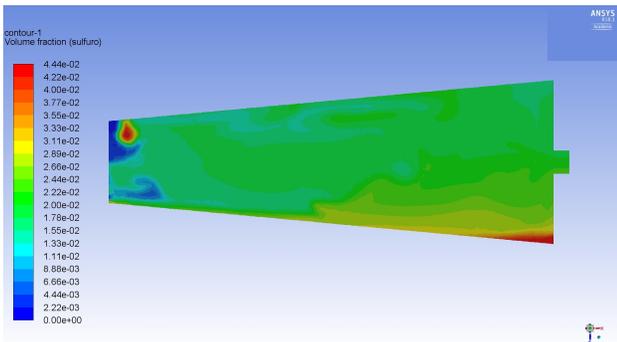
(b) Simulación CEM inyección de aire de 150 L/min.



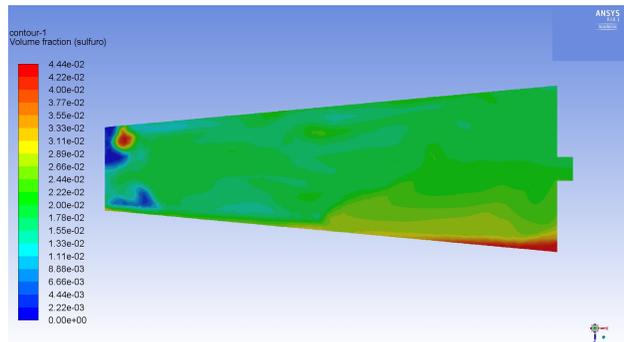
(c) Simulación CE inyección de aire de 113 L/min.



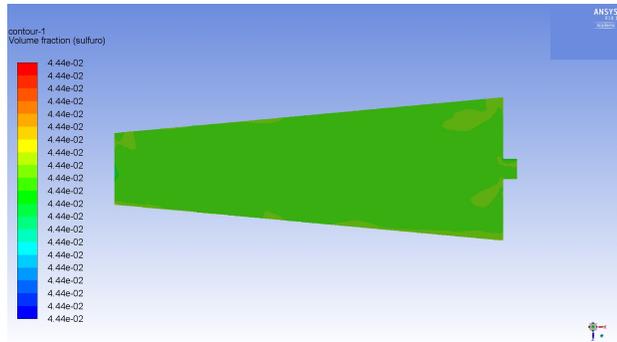
(d) Simulación CEM inyección de aire de 113 L/min.



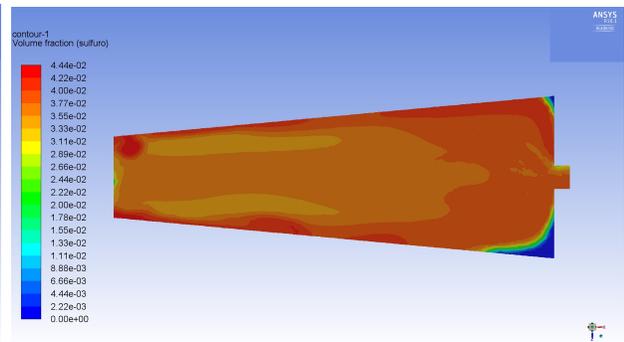
(e) Simulación CE inyección de aire de 75 L/min.



(f) Simulación CEM inyección de aire de 75 L/min.

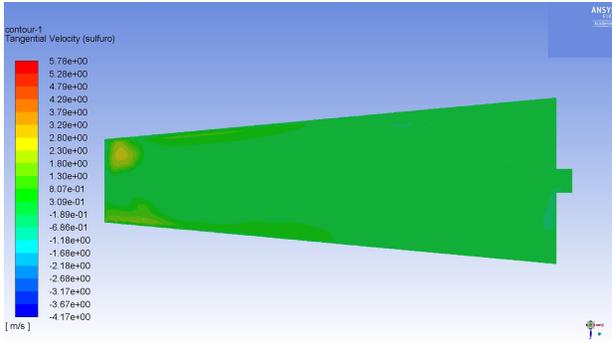


(g) Simulación CE inyección de aire de 0 L/min.

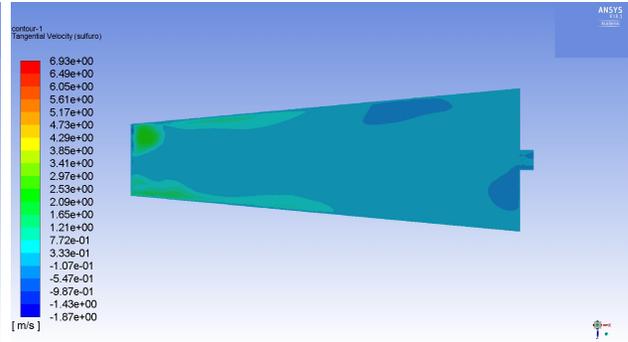


(h) Simulación CEM inyección de aire de 0 L/min.

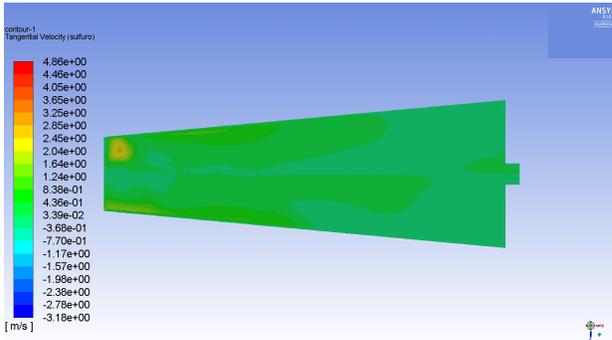
Figura 4.16: Fracción en volumen de la fase sulfuros de cobre en el plano de estudio transversal a lo largo de la celda, para las geometrías CE y CEM con una concentración en sólidos del 50 % en peso.



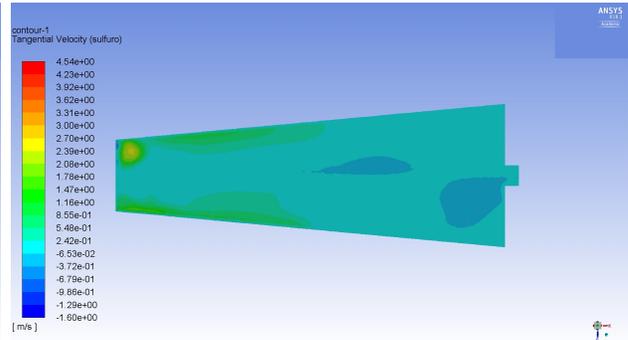
(a) Simulación CE inyección de aire de 150 L/min



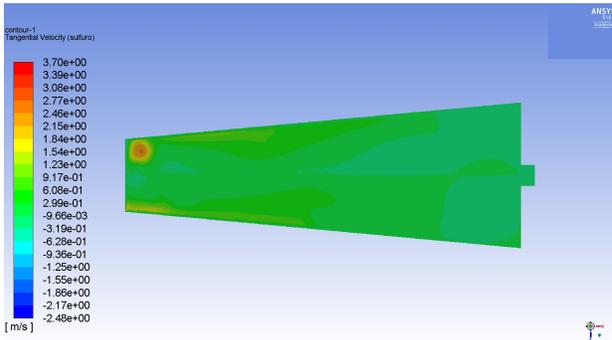
(b) Simulación CEM inyección de aire de 150 L/min.



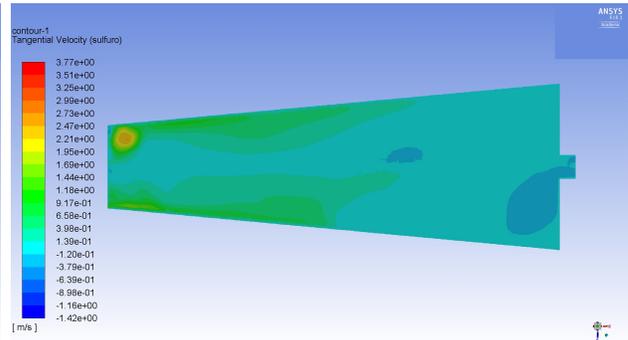
(c) Simulación CE inyección de aire de 113 L/min.



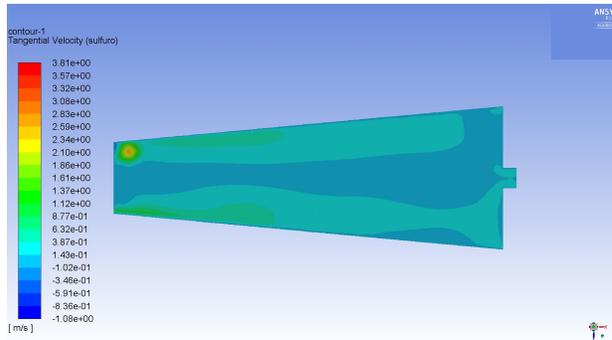
(d) Simulación CEM inyección de aire de 113 L/min.



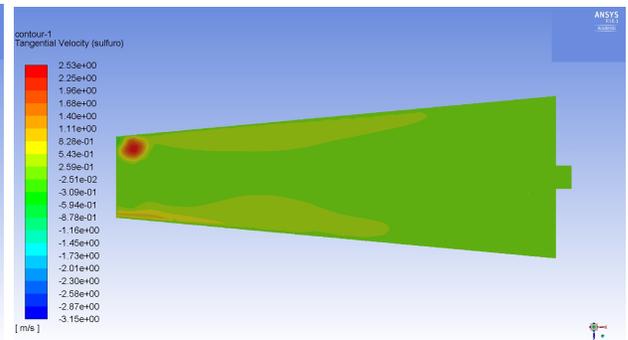
(e) Simulación CE inyección de aire de 75 L/min.



(f) Simulación CEM inyección de aire de 75 L/min.

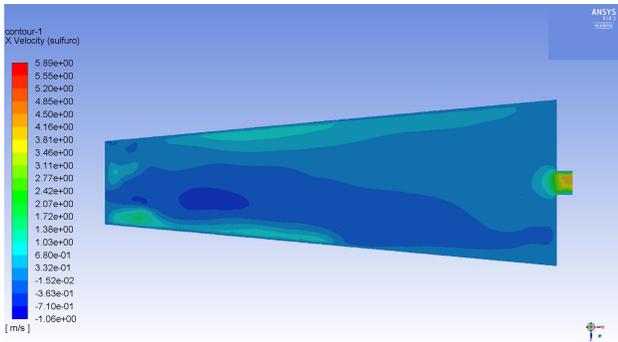


(g) Simulación CE inyección de aire de 0 L/min.

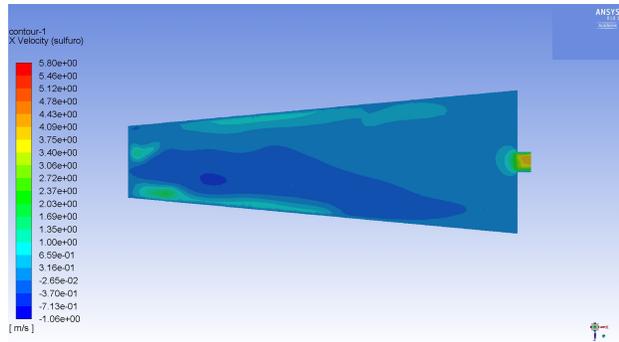


(h) Simulación CEM inyección de aire de 0 L/min.

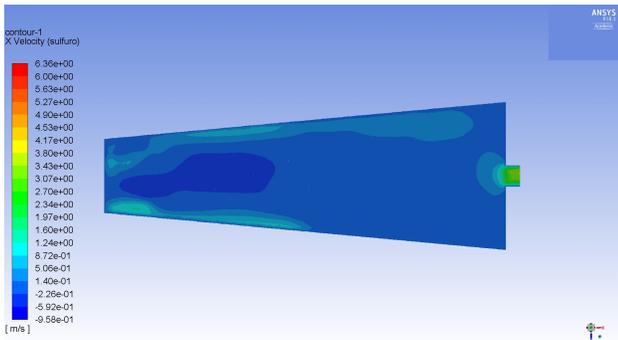
Figura 4.17: Velocidad tangencial en $[m/s]$ de la fase sulfuros de cobre en el plano de estudio transversal a lo largo de la celda, para las geometrías CE y CEM con una concentración en sólidos del 50% en peso.



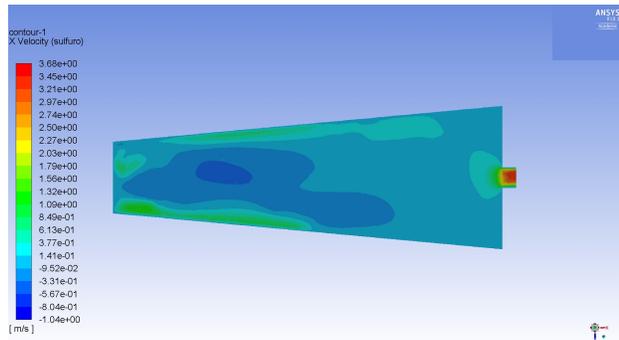
(a) Simulación CE inyección de aire de 150 L/min



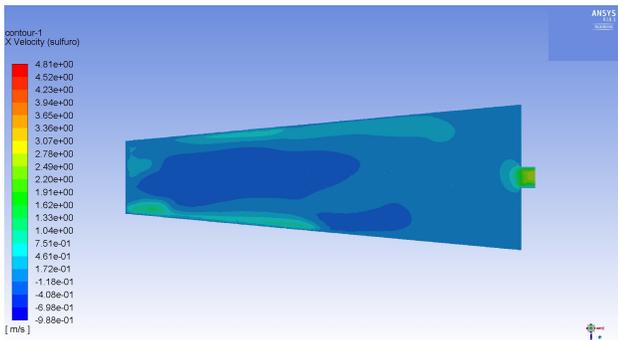
(b) Simulación CEM inyección de aire de 150 L/min.



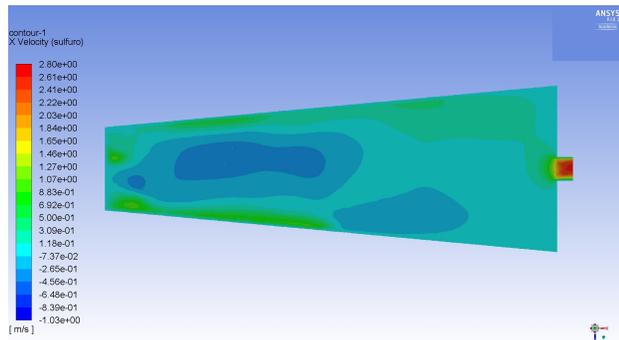
(c) Simulación CE inyección de aire de 113 L/min.



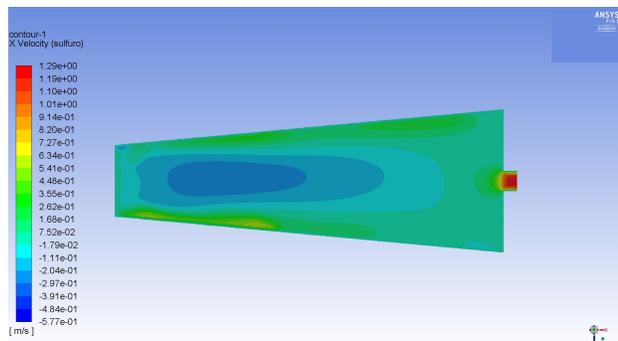
(d) Simulación CEM inyección de aire de 113 L/min.



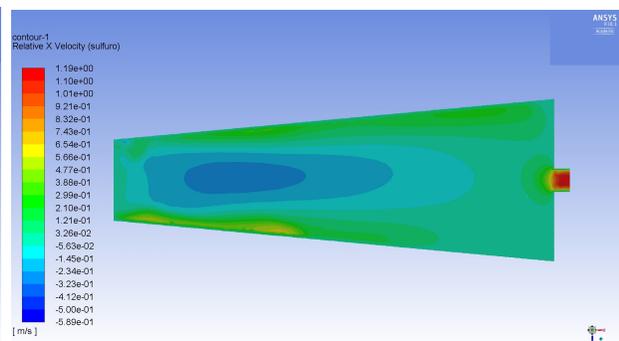
(e) Simulación CE inyección de aire de 75 L/min.



(f) Simulación CEM inyección de aire de 75 L/min.



(g) Simulación CE inyección de aire de 0 L/min.



(h) Simulación CEM inyección de aire de 0 L/min.

Figura 4.18: Velocidad axial (positivo hacia la derecha) en $[m/s]$ de la fase sulfuros de cobre en el plano de estudio transversal a lo largo de la celda, para las geometrías CE y CEM con una concentración en sólidos del 50% en peso.

4.2.3. Análisis parcial de resultados

A partir de las figuras (4.9) y (4.10) se puede apreciar una fuerte disminución de la velocidad de tangencial de salida respecto a la de entrada, llegando en algunos casos a existir velocidades tangenciales negativas, lo que evidencia una destrucción parcial o total del efecto hidrociclón y cambios en el sentido de giro (figuras (4.14a), (4.14b), (4.14c), (4.14d), (4.14e) y (4.14f)). Esta disminución de velocidad se puede deber a las grandes dimensiones de la celda, lo que permite que exista en el centro de estas volúmenes de pulpa en condiciones de estancamiento o a bajas velocidades (figuras (4.17) y (4.18)), llegando incluso a velocidades axiales negativas o de contraflujo (zonas de colores más cercanas al azul oscuro en las figuras (4.18)). La pulpa que se encuentra en condiciones cercanas al reposo, puede en efecto frenar a la pulpa que tiene un flujo helicoidal cerca del manto de la celda.

Analizando en conjunto las figuras (4.14) y (4.12), se rescata que en efecto la inyección de aire axial contribuye a un aumento de la velocidad en dicha componente, sin embargo, el intercambio de momentum del aire con las partículas de pulpa que ingresan de forma tangencial, provoca una disminución considerable de la velocidad tangencial, lo que en consecuencia afecta de forma negativa al efecto hidrociclón.

Si bien, las condiciones geométricas tanto de la CE como la de la CEM, propician un caudal de salida de forma predominante por la eyección axial (tablas (4.9) y (4.10)), la mayor concentración en volumen de aire se encuentra en la salida tangencial, lo cual es favorable para la formación de la espuma portadora de los sulfuros de cobre. Dado lo presentado en las figuras (4.15), la mayor concentración volumétrica de aire en la salida tangencial podría estar explicada por la tendencia natural del aire a flotar dentro de la celda por la diferencia de densidades con la pulpa.

4.3. Simulación de los casos de interés en la Propuesta de Diseño

4.3.1. Directrices del nuevo diseño

El análisis de los resultados previos arroja que a la celda se le deben disminuir los diámetros menor y mayor del cono truncado, para así disminuir la cantidad de pulpa que se encuentra en estado de reposo o cercano a este.

De igual manera, una inyección de aire de forma tangencial en vez de axial, puede contribuir al efecto hidrociclón, sin afectar el grado de mezcla deseado entre las fases.

Finalmente, la entrada y salida tangencial de pulpa, se mantienen en la parte más alta de la celda, para tratar de recuperar la mayor cantidad posible de aire, aprovechando su flotabilidad. La disposición de estas conexiones de pulpa se mantienen según la geometría CEM, para evitar cambios en el sentido de giro del flujo helicoidal.

4.3.2. Geometría PD

La geometría PD y sus dimensiones generales se muestran en la Figura (4.19) y Tabla (4.11) respectivamente.

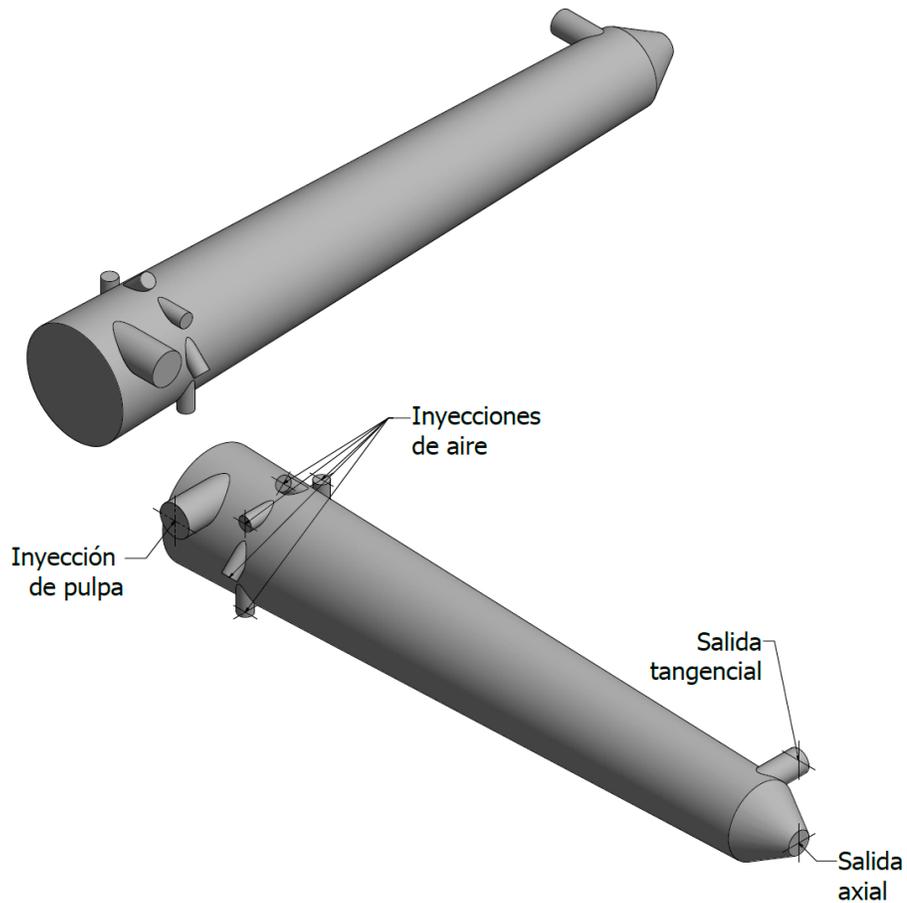


Figura 4.19: Diseño CAD de la Propuesta de Diseño (PD).

Tabla 4.11: Dimensiones del diseño CAD de la Propuesta de Diseño (PD).

Dimensión	Valor [mm]
Largo	460
Diámetro menor del cono	50
Diámetro mayor del cono	75
Diámetro de inyección de pulpa	22,57
Diámetro salida tangencial	16
Diámetro salida axial	16
Diámetro inyecciones de aire	8 x 10

4.3.3. Análisis de sensibilidad

Los análisis de sensibilidad de la geometría PD se muestran en los gráficos de las figuras (4.20) y (4.21). Para las simulaciones se utiliza la malla descrita según la Tabla (4.12), con sus parámetros de calidad asociados según la Tabla (4.13). La malla escogida se puede apreciar en la Figura (4.22).

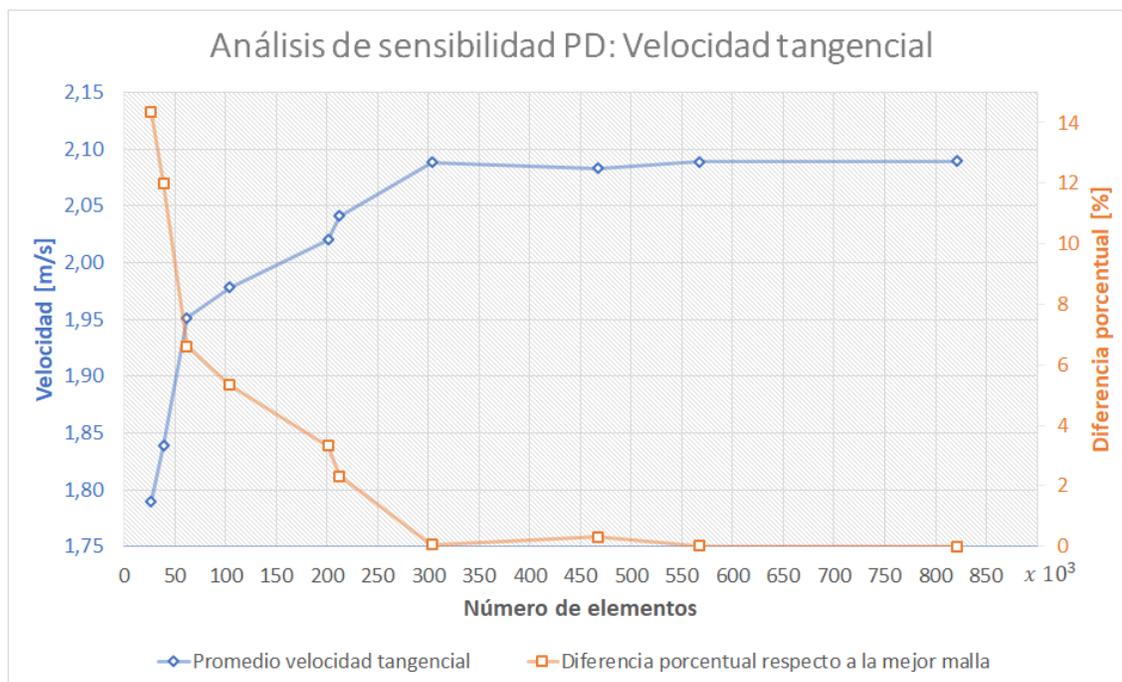


Figura 4.20: Análisis de sensibilidad sobre el promedio de la velocidad tangencial para la geometría PD.

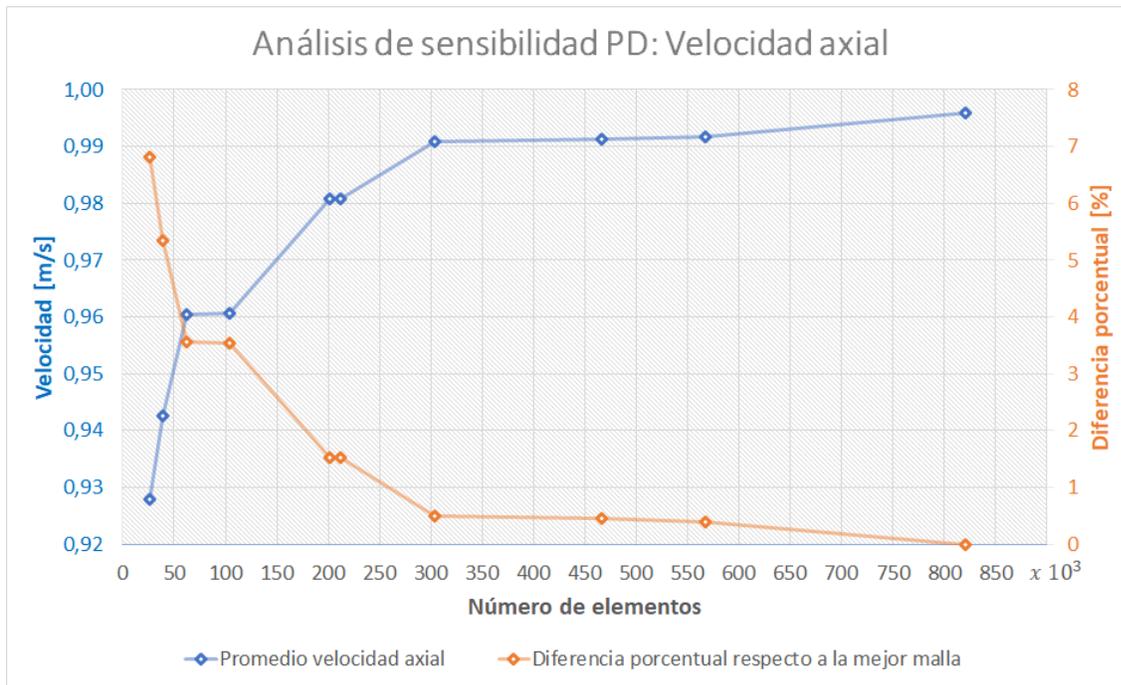


Figura 4.21: Análisis de sensibilidad sobre el promedio de la velocidad axial para la geometría PD.

Tabla 4.12: Características malla de la geometría PD para la simulación de los casos de interés.

Número de elementos	212.236
Número de nodos	307.788
Diferencia porcentual de la velocidad tangencial respecto a la mejor malla	2,32
Diferencia porcentual de la velocidad axial respecto a la mejor malla	1,57
Tamaño elementos gruesos [mm]	4
Tamaño elementos finos [mm]	1,5

Tabla 4.13: Parámetros de calidad del mallado de la geometría PD para la simulación de los casos de interés.

Valor de estudio	Aspect Ratio	Skewness	Orthogonal Quality
Mínimo	1,1646	2,81E-06	0,047
Máximo	10,711	0,952	0,994
Promedio	1,862	0,238	0,759
Desviación estándar	0,487	0,146	0,145

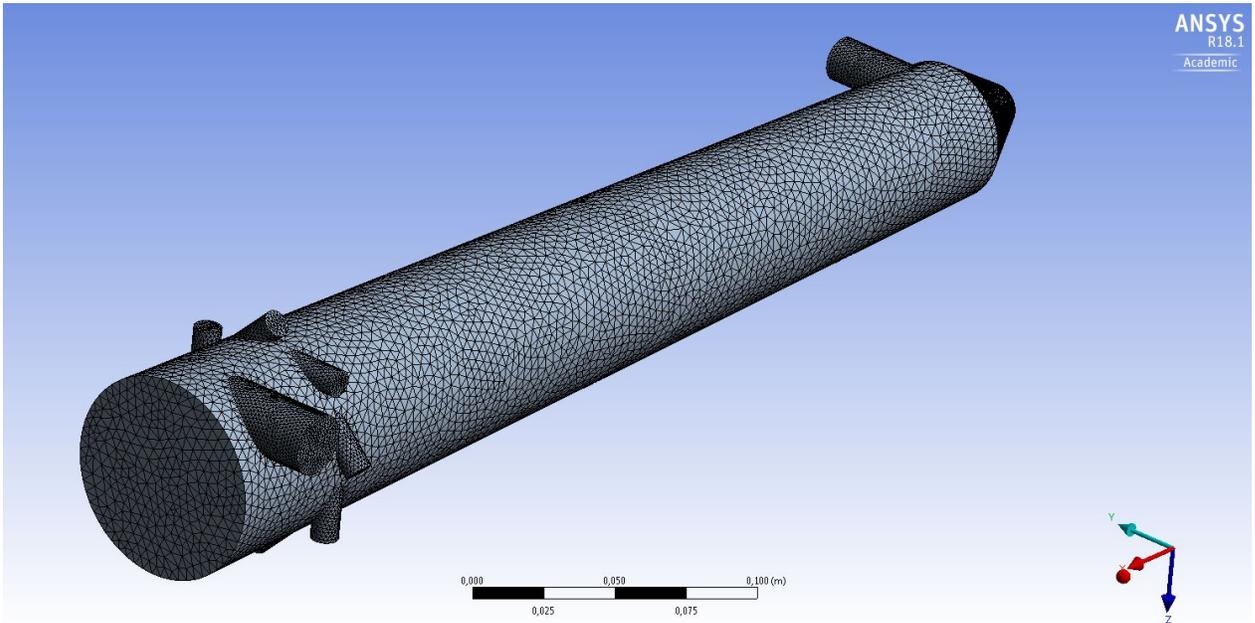


Figura 4.22: Mallado de la geometría PD para la simulación de los casos de operación de interés.

4.3.4. Resultados simulaciones

Para la geometría PD, los planos perpendiculares al eje de la celda son los descritos según la Figura (4.23).

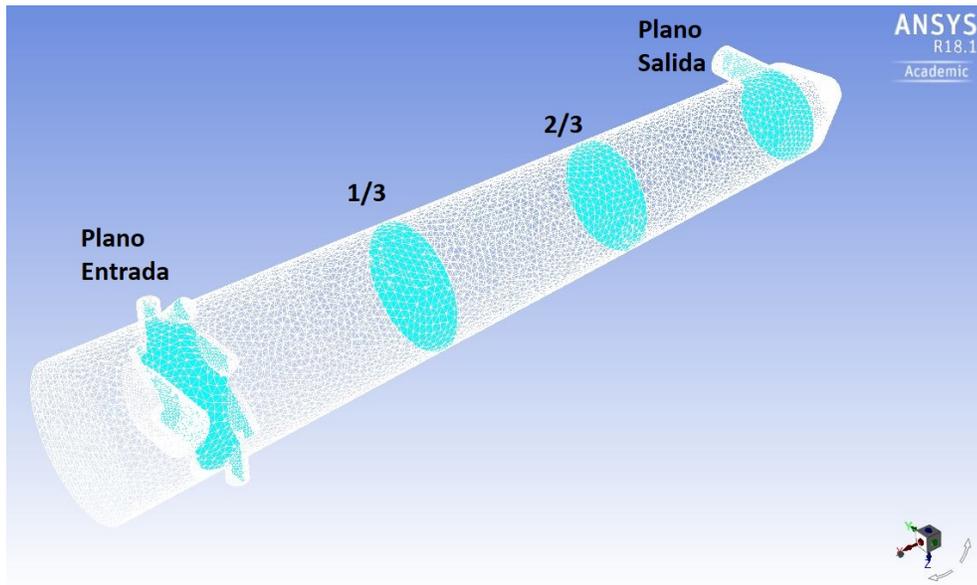


Figura 4.23: Planos de estudio perpendiculares al eje de la celda de flotación, distribuidos de forma equidistantes entre la entrada tangencial de aire y salida tangencial.

Las velocidades tangenciales en los planos de la figura Figura (4.23) se muestran en el gráfico de la Figura (4.24).

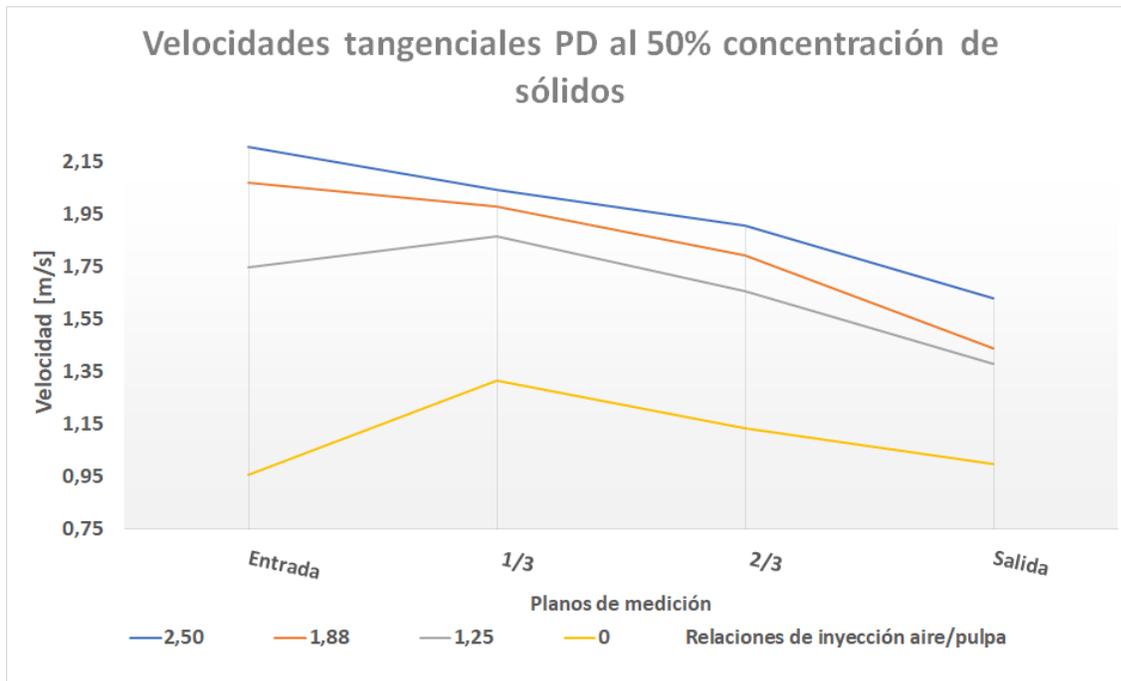


Figura 4.24: Resultados de las velocidades tangenciales a lo largo de la geometría PD con una pulpa con concentración de sólidos del 50 %, utilizando el modelo *Mixture*.

En la Tabla (4.14) se puede apreciar como es la concentración de aire en las salidas de la geometrías PD, siendo el porcentaje restante para completar el 100 % el volumen de pulpa en cada salida.

Tabla 4.14: Fracciones volumétricas de aire en las salidas tangencial y axial de la geometría PD sometida a las condiciones de operación de interés.

#	Relación de inyección R_{iny}	Fracción volumétrica de aire [%]	
		Salida tangencial	Salida axial
5	2,5	69,9	71,2
6	1,88	62,18	65,02
7	1,25	51,87	57,51
8	0	0	0

En la Tabla (4.15) se presenta el balance másico de las simulaciones sobre la geometrías PD, junto a si es o no capaz el modelo de evidenciar una separación por efecto hidrociclón de la fase sulfuros de la fase ganga.

En el gráfico de la Figura (4.25) se muestran las velocidades tangenciales y axiales globales sobre todo el dominio de las fases al interior de la geometría PD.

Tabla 4.15: Flujos máxicos en las simulaciones de la geometría PD con las condiciones de operación de los casos de interés, utilizando la concentración en sólidos del 50 %.

#	Relación de inyección R_{iny}	Caudales [kg/s]			Error absoluto conservación de la masa [%]	Separación por hidrociclón
		Inyección	Salida axial	Salida tangencial		
5	2,5	1,4636	0,7699	0,6877	0,4	Nulo
6	1,88	1,4629	0,7630	0,7145	0,9	Despreciable
7	1,25	1,4621	0,7238	0,7353	0,2	Despreciable
8	0	1,4606	0,6703	0,7903	0	Despreciable

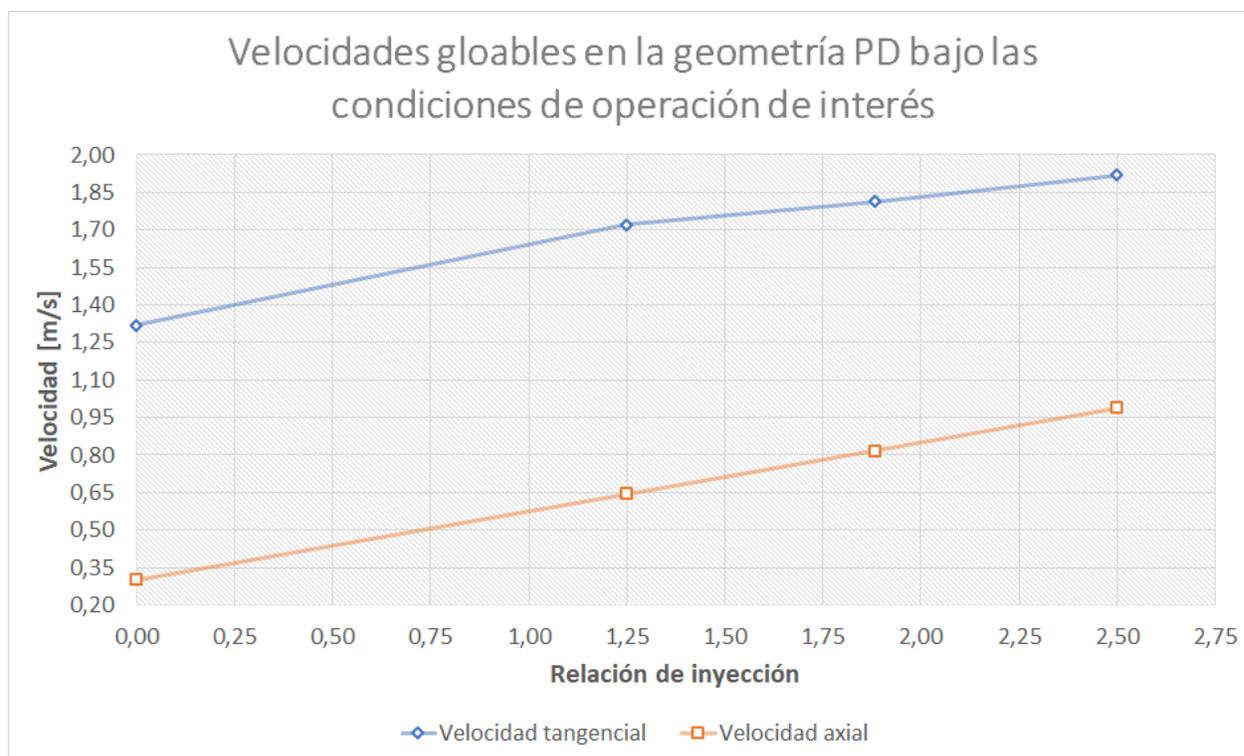
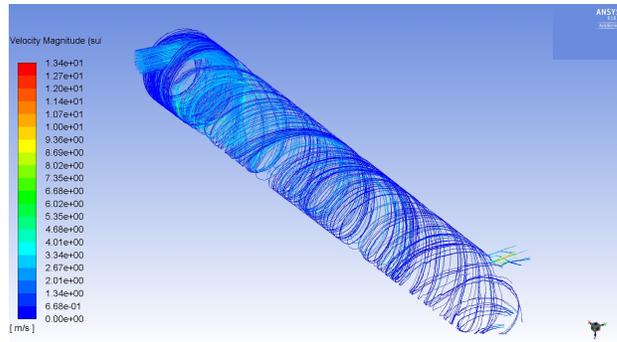


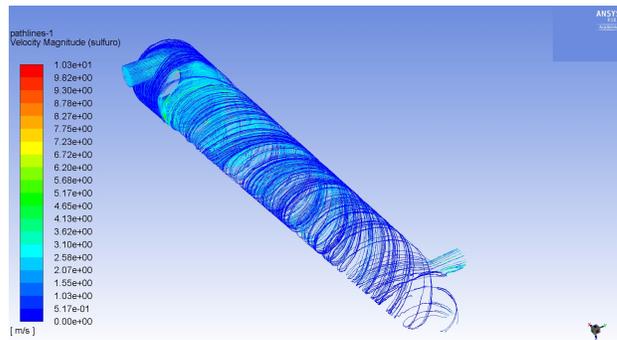
Figura 4.25: Velocidades globales de la geometría PD, obtenidas como un resultado de una integración volumétrica sobre el volumen de control.

En las figuras (4.26) se muestra el resultado de las Pathlines de todas las simulaciones de los casos de interés sobre la geometrías PD, destacando gráficamente la magnitud de la velocidad de la fase sulfuros de cobre.

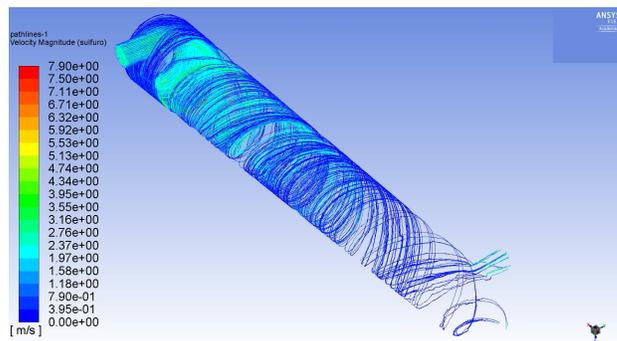
En las figuras (4.27), (4.28), (4.29) y (4.30) se muestran resultados gráficos de las simulaciones sobre un plano a lo largo de las celdas, análogo al plano de la Figura (4.13). En particular, se estudia la fracción en volumen de las fase aire, de la fase sulfuros y para esta última, su velocidad tangencial y axial a lo largo del plano.



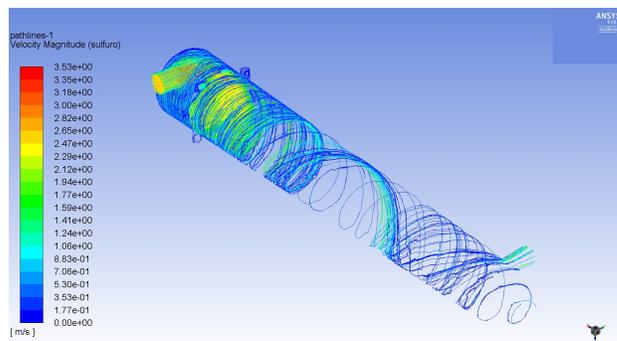
(a) Simulación PD inyección de aire de 150 L/min



(b) Simulación PD inyección de aire de 113 L/min.

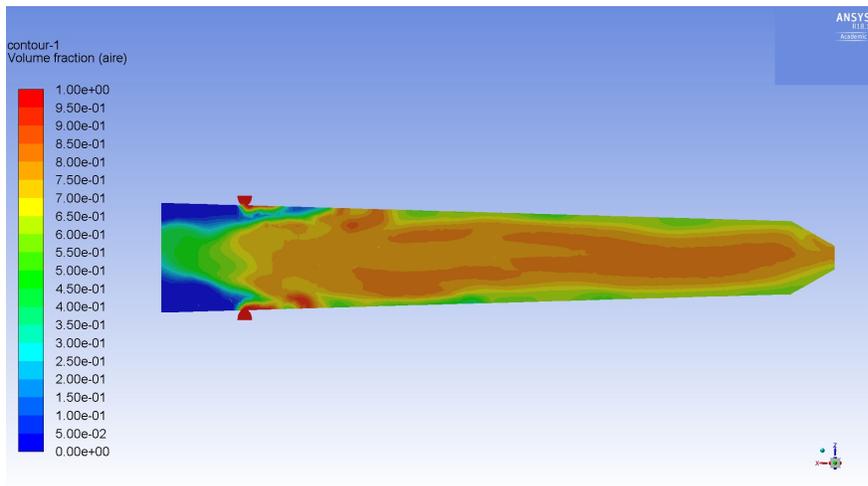


(c) Simulación PD inyección de aire de 75 L/min.

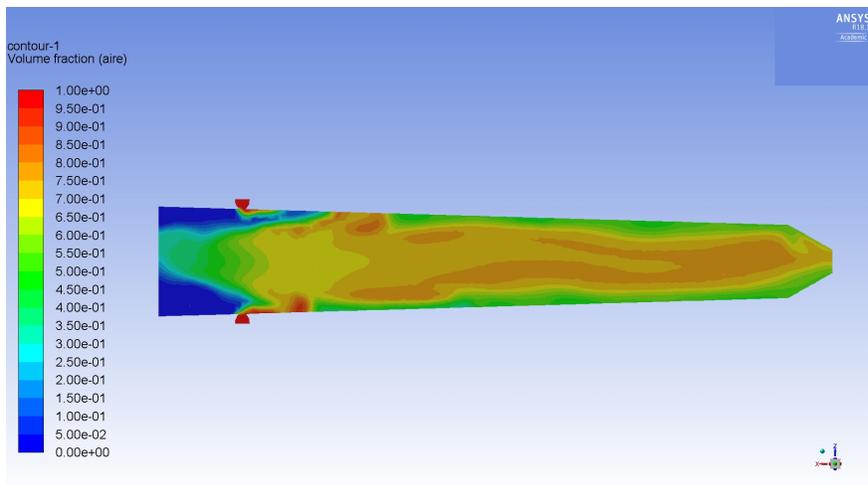


(d) Simulación PD inyección de aire de 0 L/min.

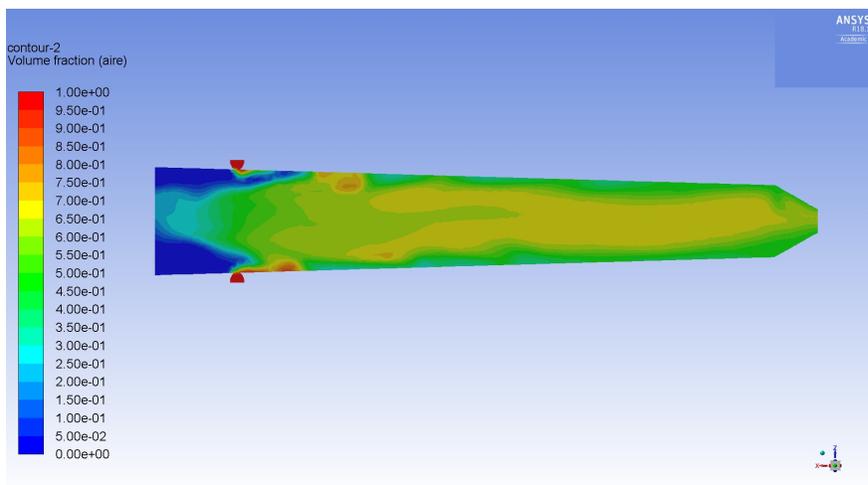
Figura 4.26: Pathlines de velocidad absoluta en $[m/s]$ de la fase sulfuros de cobre, para las simulaciones de la geometría PD con una concentración en sólidos del 50% en peso.



(a) Simulación PD inyección de aire de 150 L/min

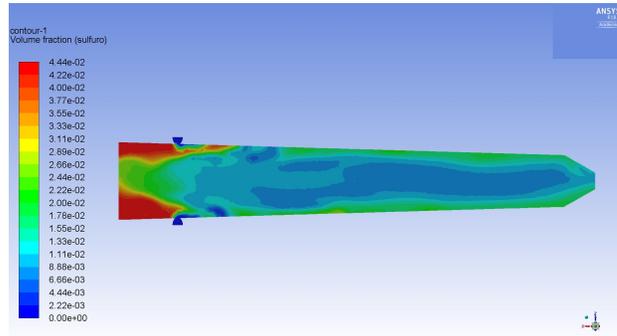


(b) Simulación PD inyección de aire de 113 L/min.

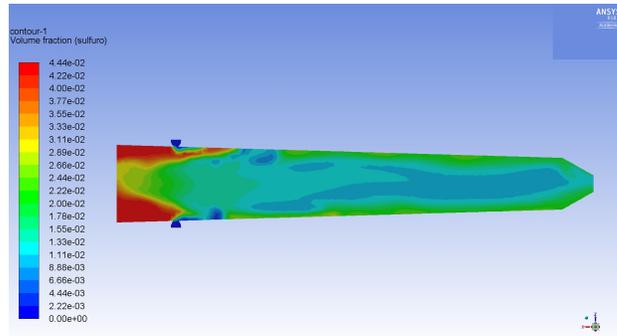


(c) Simulación PD inyección de aire de 75 L/min.

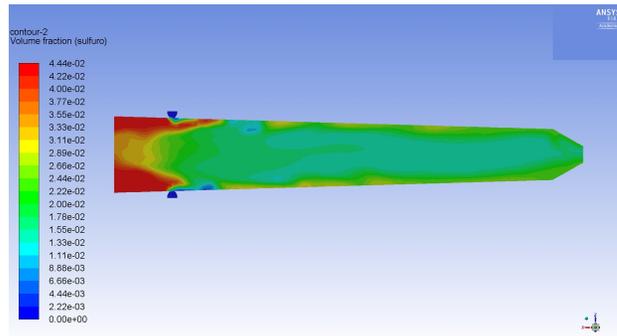
Figura 4.27: Fracción en volumen de la fase aire en el plano de estudio transversal a lo largo de la celda,, para las simulaciones de la geometría PD con una concentración en sólidos del 50 % en peso.



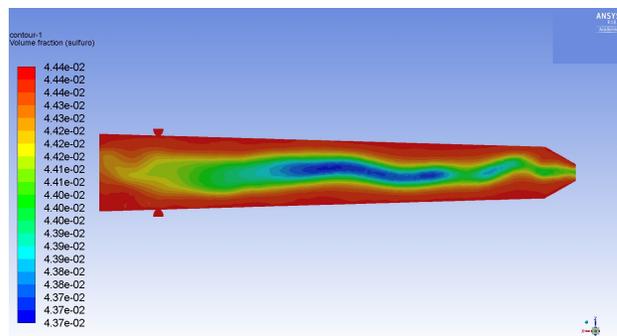
(a) Simulación PD inyección de aire de 150 L/min



(b) Simulación PD inyección de aire de 113 L/min.

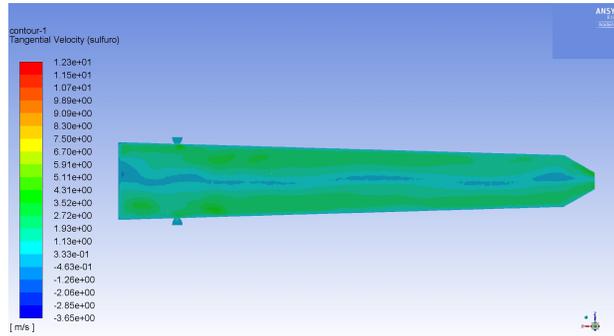


(c) Simulación PD inyección de aire de 75 L/min.

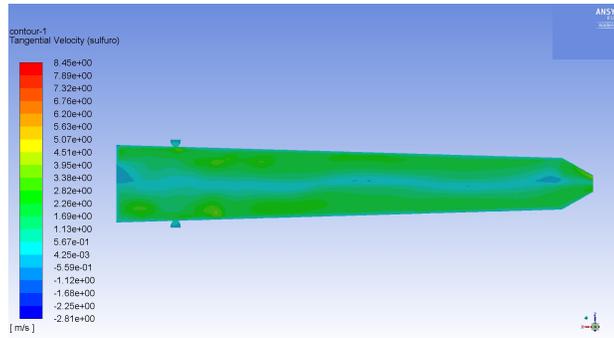


(d) Simulación PD inyección de aire de 0 L/min.

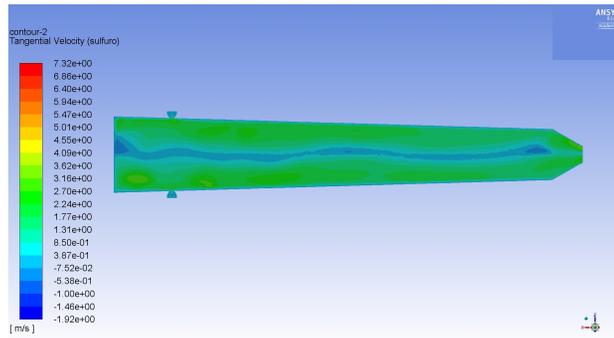
Figura 4.28: Fracción en volumen de la fase sulfuros de cobre en el plano de estudio transversal a lo largo de la celda, para las simulaciones de la geometría PD con una concentración en sólidos del 50 % en peso.



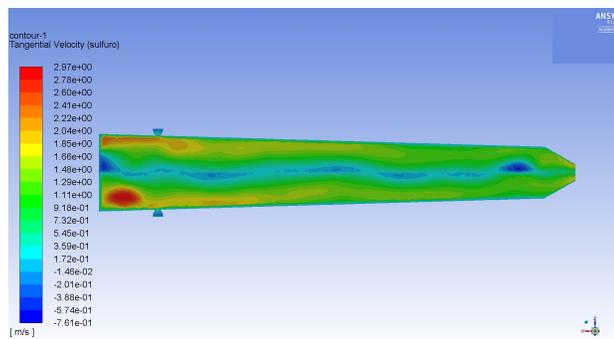
(a) Simulación PD inyección de aire de 150 L/min



(b) Simulación PD inyección de aire de 113 L/min.

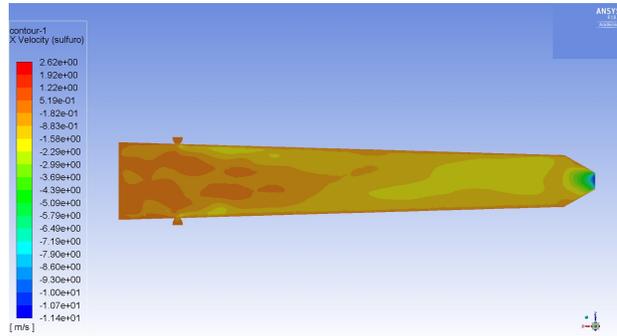


(c) Simulación PD inyección de aire de 75 L/min.

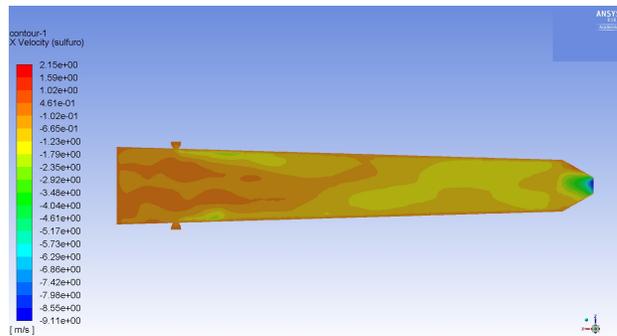


(d) Simulación PD inyección de aire de 0 L/min.

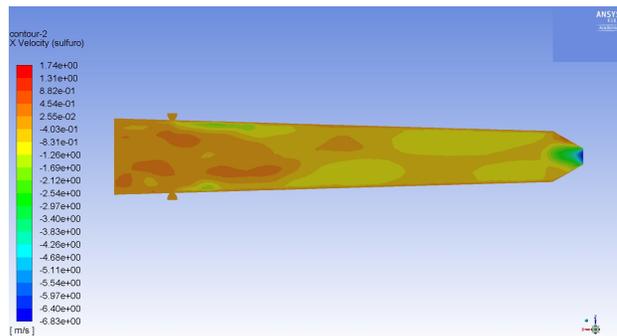
Figura 4.29: Velocidad tangencial en $[m/s]$ de la fase sulfuros de cobre en el plano de estudio transversal a lo largo de la celda, para las simulaciones de la geometría PD con una concentración en sólidos del 50 % en peso.



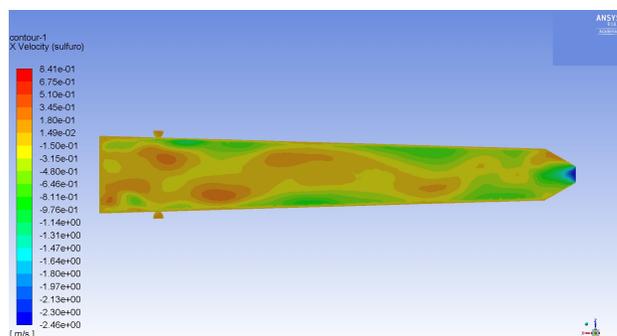
(a) Simulación PD inyección de aire de 150 L/min



(b) Simulación PD inyección de aire de 113 L/min.



(c) Simulación PD inyección de aire de 75 L/min.



(d) Simulación PD inyección de aire de 0 L/min.

Figura 4.30: Velocidad axial (negativo hacia la derecha) en $[m/s]$ de la fase sulfuros de cobre en el plano de estudio transversal a lo largo de la celda, para las simulaciones de la geometría PD con una concentración en sólidos del 50% en peso.

4.4. Indicadores de desempeño

Para finalizar el capítulo, en la Tabla (4.16) se muestra de forma comparativa los valores de desempeño hidráulico de las geometrías CE, CEM y PD bajo las condiciones de operación de interés, información complementada gráficamente en las figuras (4.31), (4.32), (4.33), (4.34) y (4.35).

Tabla 4.16: Indicadores de desempeño hidráulico de las geometrías CE, CEM y PD bajo las condiciones de operación de interés.

Geometría	Relación de inyección R_{iny}	Indicadores de desempeño				
		Se	Ma	Ve	Fr	DHG
CE	2,50	0	50	47	0	24
CE	1,88	0	75	67	0	35
CE	1,25	0	75	75	0	38
CE	0	100	100	100	18	79
CEM	2,50	0	50	50	6	26
CEM	1,88	0	50	68	8	32
CEM	1,25	100	75	71	1	62
CEM	0	100	100	93	17	77
PD	2,50	100	100	775	86	265
PD	1,88	100	100	732	87	255
PD	1,25	100	100	695	95	248
PD	0	100	100	533	119	213

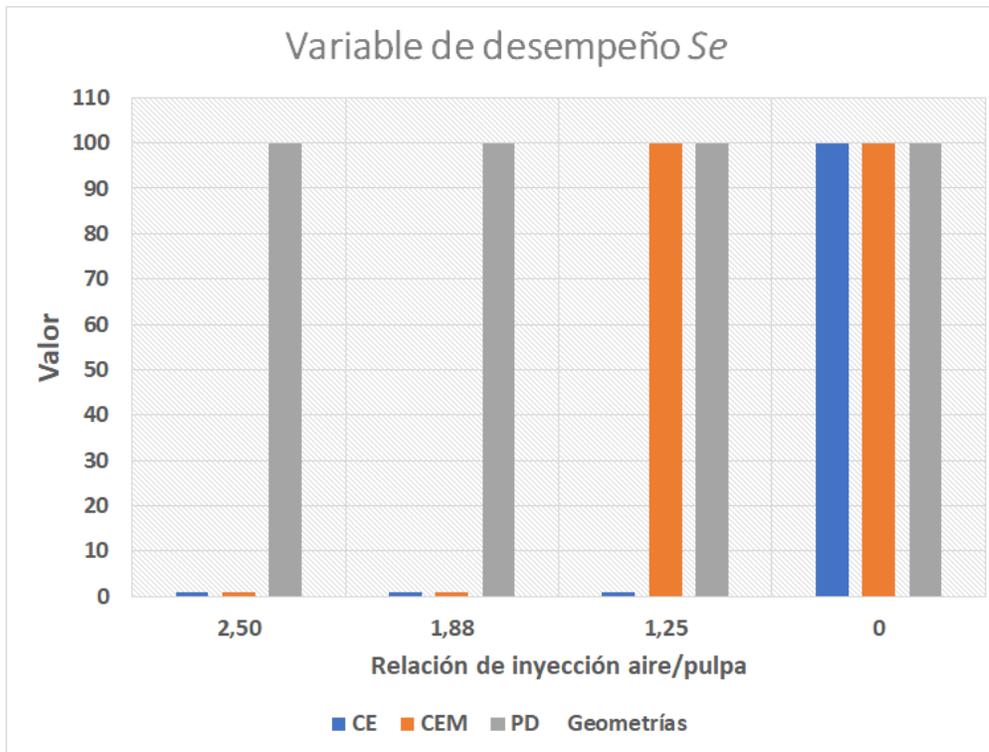


Figura 4.31: Indicador de desempeño hidráulico Se para la geometrías CE, CEM y PD bajo las condiciones de operación de interés.

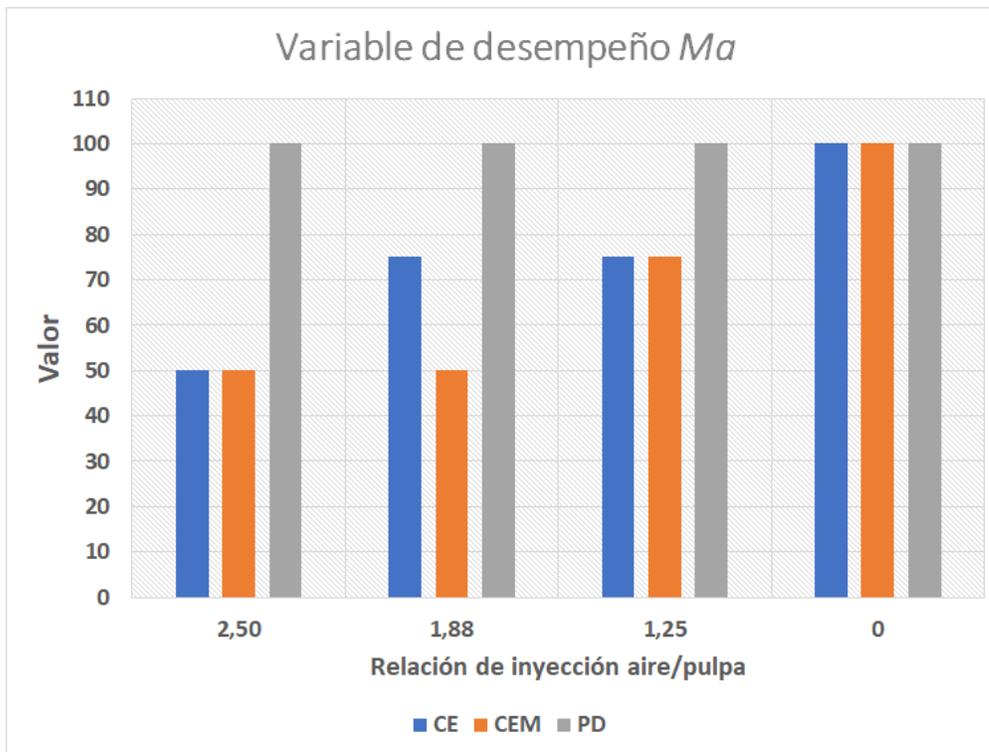


Figura 4.32: Indicador de desempeño hidráulico Ma para la geometrías CE, CEM y PD bajo las condiciones de operación de interés.

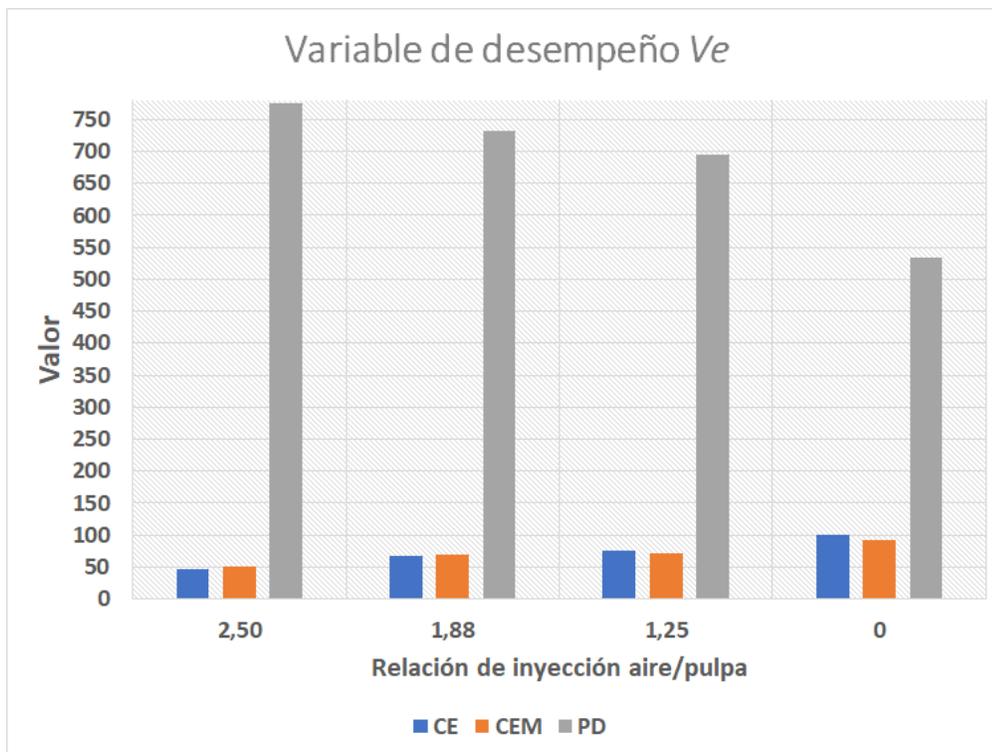


Figura 4.33: Indicador de desempeño hidráulico V_e para la geometrías CE, CEM y PD bajo las condiciones de operación de interés.

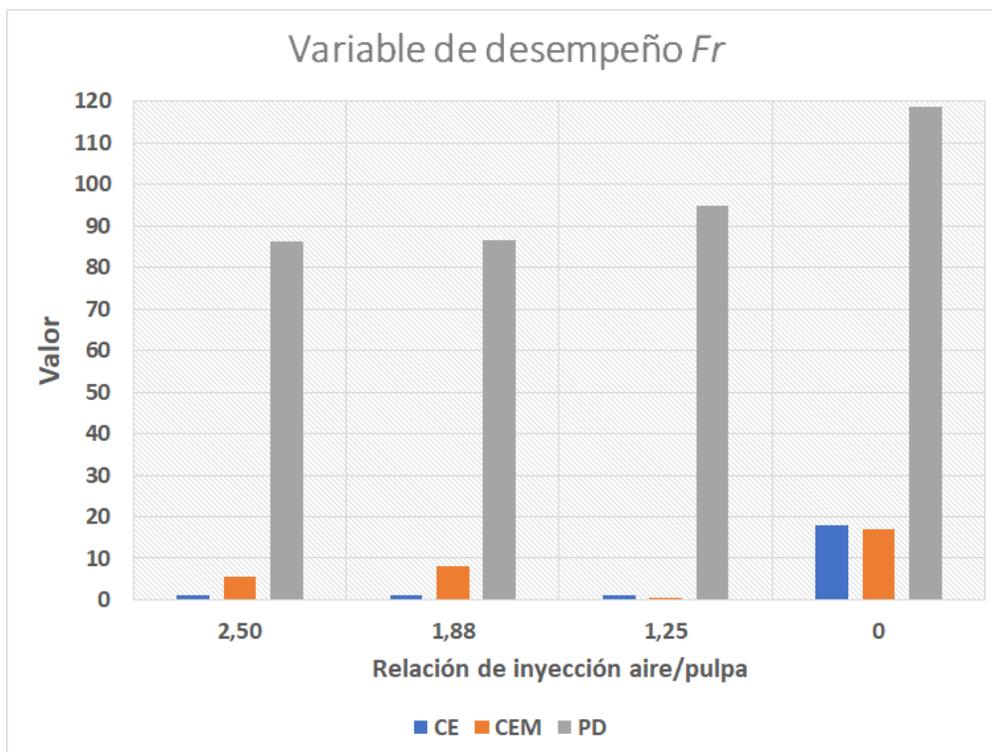


Figura 4.34: Indicador de desempeño hidráulico Fr para la geometrías CE, CEM y PD bajo las condiciones de operación de interés.

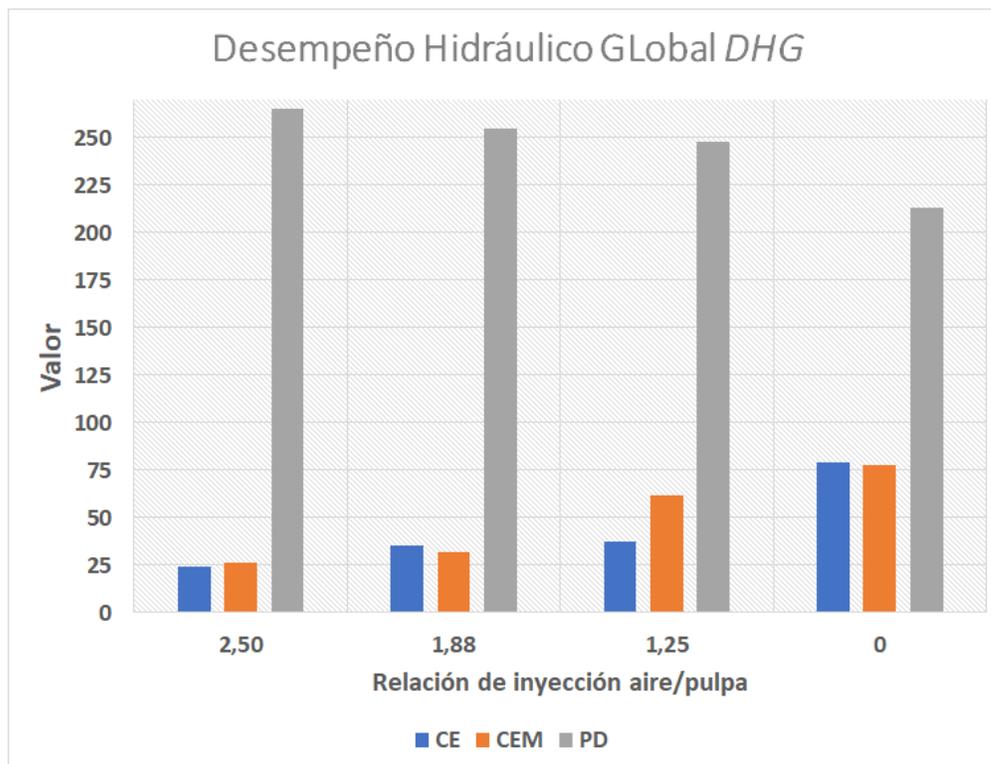


Figura 4.35: Indicador de Desempeño Hidráulico Global DHG para la geometrías CE, CEM y PD bajo las condiciones de operación de interés.

Capítulo 5

Análisis de resultados

Los análisis de sensibilidad de las figuras (4.1), (4.2), (4.20) y (4.21) muestran que las simulaciones son mucho más sensibles a las velocidades tangenciales que a las axiales, obteniendo para estas últimas los valores óptimos de convergencia incluso con mallas de menos de 100.000 elementos.

El gráfico de barras de la Figura (4.7) que muestra el efecto de la separación de la fase de sulfuros de cobre de la ganga, evidencia que en las simulaciones no se produce la separación hidráulica esperada, esto tanto para las condiciones de operación modeladas con el modelo multifásico *Mixture* como con el modelo *Euleriano*. Lo anterior es una contradicción con los resultados experimentales, que indican que cuando la geometría CE opera bajo la condición de operación # 8 de la Tabla (3.5), si existe un efecto de separación por hidrociclón.

Al modelar la geometría CE bajo las condiciones de operación bases en los únicos casos en que se mantiene la helicoidal del flujo de pulpa es cuando no existe inyección de aire y con concentraciones de pulpa del 50 % o menos, en los casos restantes existe destrucción de la helicoidal y/o cambios en el sentido de rotación. Además, en todos los casos existe una disminución de la velocidad tangencial, desde el lugar de inyección de pulpa en la entrada tangencial hasta la salida tangencial, que va del 50 % al 100 % (figuras (4.4), (4.5) y (4.6)).

El modelo multifásico *Mixture* entrega una buena primera aproximación al comportamiento fluidodinámico de la pulpa al interior de las celdas, sin embargo, este posee un error porcentual en la conservación de la masa entorno al 5 % (Tabla (4.3)), mientras que el modelo *Euleriano* la generación o destrucción de masa es despreciable con errores entorno al 1 % (tablas (4.9), (4.10) y (4.15)). Respecto a los resultados de velocidad tangencial de la pulpa, las simulaciones bajo el modelo *Mixture* se asemejan al modelo *Euleriano* solo cuando no existe inyección de aire en la celda, mientras que cuando el aire esta presente, el modelo *Mixture* sobrestima los valores de velocidad tangencial en mayor o menor medida dependiendo del caudal de aire que esta siendo inyectado a la celda.

Para las geometrías CE y CEM, el caudal másico que pasa por la salida axial va del 63 % al 70 % ((tablas (4.9) y (4.10)), esto para las fases de aire y pulpa, sin embargo, el aire posee una mayor concentración volumétrica en la salida tangencial, lo cual es favorable

para la formación de la espuma portadora de los sulfuros de cobre. Dado lo presentado en las figuras (4.15), la mayor concentración volumétrica de aire en la salida tangencial podría estar explicada por la tendencia natural del aire a flotar dentro de la celda por la diferencia de densidades con la pulpa.

Por otro lado, en la geometría PD, el caudal másico que pasa por la salida axial va desde el 45 % al 52 % (Tabla (4.15)), mientras que el mayor caudal volumétrico de aire es eyectado por la salida axial (Tabla (4.14)), lo cual es un efecto no deseado, dado que se busca compatibilizar el efecto de la concentración por hidrociclón y alta concentración de aire por la salida tangencial, para así formar una espuma rica en sulfuros de cobre.

Para las geometrías CE y CEM, las figuras (4.15) muestran que el aire tiene una tendencia natural a flotar, mezclándose con las fases de pulpa de forma activa en el primer tercio de la celda, para luego fluir en la dirección axial de forma ascendente.

En la Figura (4.11) referente a las geometrías CE y CEM, destaca que a mayor relación de inyección R_{iny} menor es la velocidad tangencial global y, de forma complementaria, analizando en conjunto las figuras (4.12) y (4.14) se observa que el aumento de la inyección de aire aumenta la velocidad axial global y dificulta la formación y permanencia de la helicoidal al interior de la celda.

El comportamiento de la velocidad tangencial en las geometrías CE y CEM, se puede deber en gran parte a que en el centro de las celdas existen volúmenes considerables de pulpa en condiciones cercanas al reposo (figuras (4.17) y (4.18)), lo que llega a generar incluso velocidades axiales negativas o de contraflujo que van frenando la velocidad tangencial de la helicoide que circula cercana al manto de la celda.

En el caso de la geometría PD, al disminuir los diámetros menor y mayor del cono de geometría CE, acercando dichos valores al tamaño de las entradas y salidas de pulpa, se logra mantener la helicoidal al interior de la celda, independiente de la condición de operación (figuras (4.26)). Si bien la helicoidal se mantiene, de todas formas existen en el centro de la celda por el lado de la inyección zonas de contra flujo (figuras (4.30)), debido a que el aire al ser menos denso, tiende a acumularse en el centro de la celda (figuras (4.27) y este comienza a fluir en el sentido contrario del flujo axial de la helicoide. Dicho efecto es el principio de los separadores por hidrociclón.

La inyección de aire de forma tangencial en la geometría PD aumenta de forma considerable la velocidad tangencial al interior de la celda (figuras (4.24) y (4.25)), en efecto a mayor caudal de aire, mayor velocidad tangencial.

Al observar los indicadores de desempeño hidráulico de la Tabla (4.16), se puede apreciar que el comportamiento fluidodinámico de las geometrías CE y CEM es en general similar, salvo un caso particular de operación, dado que en la mayoría de los casos el comportamiento fluidodinámico no deseado se desarrolla en la primera mitad de las celdas y la única diferencia geométrica entre ambos diseños es la disposición de la salida tangencial.

Los indicadores de desempeño arrojan que en general, las geometrías CE y CEM bajo condiciones de inyección de aire presentan cambios en el sentido de giro de la helicoidal,

su destrucción total o parcial, velocidades tangenciales en las que no es posible asegurar una separación por efecto hidrociclón y pérdidas considerables de velocidad tangencial en el trayecto que recorre la pulpa.

Por otro lado, la geometría PD sobresale en todos los indicadores de desempeño, tomando valores de DHG que sobrepasan al de las geometrías CE y CEM desde un 269 % hasta un 1.029 %, lo anterior gracias a que la PD mantiene la helicoidal en el mismo sentido de rotación a lo largo de todo el recorrido de la celda, con una velocidad tangencial global de hasta un 775 % por sobre la del mejor caso de operación de la geometría CE y con una pérdida máxima de velocidad tangencial del 14 %, en comparación a la mínima pérdida de la celda CEM que es de un 82 %.

Capítulo 6

Conclusiones

De los estudios realizados en el trabajo de título se puede concluir que:

- Acorde a la revisión bibliográfica el modelo multifásico *Euleriano* es capaz de simular de mejor manera la interacción aire-pulpa, lo que se respalda a través del grado de conservación de la masa encontrado en las simulaciones realizadas.
- Ninguno de los modelos multifásicos estudiados es capaz de simular la separación hidráulica entre las fases de sulfuros y ganga. Para intentar incluir el efecto de la separación hidráulica, se deben incluir modelos complementarios al modelo multifásico, que simulen de mejor manera la interacción trifásica al interior de la celda (arrastre entre fases, tamaños de partículas, tensión superficial, entre otros), en cuyo caso, dada la inestabilidad del modelo *Euleriano*, obliga a trabajar con mallas más finas y time steps más pequeños, para lo cual se necesitan computadores con mejores capacidades de procesamiento que los computadores del Laboratorio de Mecánica Computacional (LMC) del 4to piso del Campus Beauchef 851.
- La geometría original CE junto a su versión CEM, no son capaces de operar de forma satisfactoria en ninguna de las condiciones de operación de uso práctico estudiadas, dado que las velocidades tangenciales en los casos simulados que tienen inyección de aire, son inferiores al caso de operación del que se tiene validación experimental (caso # 8 de la Tabla (3.5)), el cual carece de interés real para la concentración del cobre, al no estar presente el aire necesario para el proceso de flotación.
- El principal problema de diseño de la geometría CE y CEM es el gran diámetro del cono, en relación al diámetro de las entradas y salidas de pulpa, lo que genera un gran volumen cercano al estado de reposo que termina frenando al flujo de pulpa helicoidal inyectado.
- Dado el problema descrito en el punto anterior, independiente de la diferencia geométrica entre la CE y CEM, los resultados son bastante similares, debido a que el comportamiento fluidodinámico comienza a fallar antes la primera mitad de la celda.
- El motivo de la alta concentración de aire y formación de espuma por la salida tangencial en la celda experimental real, se debe a la tendencia natural del aire a flotar y evacuar por esa vía, una vez que la helicoidal se destruye.
- La geometría PD eyecta la mayor parte del aire de forma axial, lo cual es negativo

para el proceso de concentración de cobre, dado que se estaría expulsando aire rico en sulfuros de cobre en conjunto con la ganga.

- La primera directriz de diseño, respaldada por las simulaciones de la geometría PD, es mantener una diferencia más estrecha entre los diámetros del cono con los diámetros de las entradas y salidas de pulpa, para así evitar pulpa en estado de reposo.
- La inyección de aire axial afecta de forma notable al flujo de carácter helicoidal, dado el intercambio de momentum entre la pulpa que entra a la celda con una velocidad tangencial y el aire que posee solo una componente de velocidad axial, por ende, la segunda directriz de diseño es inyectar el aire de forma tangencial en el mismo sentido de giro de la pulpa.
- La tercera directriz de diseño es mantener en futuras iteraciones de la celda cónica, su inyección de pulpa y salida de concentrado tangencial como en la geometría CEM, para evitar cualquier cambio en el sentido de giro de la helicoidal.
- Como cuarta y última directriz de diseño, se tiene que cualquier separador por hidrociclón va a generar en el centro de la helicoidal una acumulación de la fase menos densa, en este caso el aire, sin embargo, en el proceso de concentración por flotación, el aire es portador de la fase que se quiere recuperar, por lo tanto se debe buscar una forma de recuperar la alta concentración volumétrica de aire por el centro de la salida axial, ya sea por tubos de eyección concéntricos o cualquier otra variación geométrica en el extremo de la celda que permita recuperar el aire de forma separada de la ganga.

Capítulo 7

Recomendaciones

- Se recomienda seguir las 4 directrices de diseño definidas en el capítulo anterior.
- Se recomienda antes de construir una nueva celda de flotación, simular nuevos diseños de celdas de flotación cónicas siguiendo las directrices de diseño.
- Se recomienda utilizar el modelo multifásico *Euleriano* para simular.
- Para las simulaciones se recomienda modificar el extremo final de la celda (zona de eyección), de tal forma que se pueda recuperar la alta concentración de aire que se encuentra rotando en el centro de la celda, ya sea por una salida axial concéntrica/excéntrica o cualquier otra solución que cumpla la misma función.
- Se recomienda construir una celda de flotación cónica modular, que tenga salidas y entradas intercambiables, dado que es posible regular los caudales de eyección axial y tangencial modificando el diámetro de dichas salidas.

Bibliografía

- [1] Dirección General de Aguas. 2016. Atlas del agua Chile 2016, Gestión del agua [en línea] <<http://www.dga.cl/DGADocumentos/Atlas2016parte4-17marzo2016b.pdf>> [consulta: 25 junio 2018].
- [2] SONAMI 2017. Informe consumo de agua en minería 2016 [en línea] <<http://www.sonami.cl/site/wp-content/uploads/2018/04/Consumo-de-Agua-en-Miner%C3%ADa-VF.pdf>> [consulta: 24 junio 2018].
- [3] Kutscher, C. y Cantallopts, J. 2017. Proyección de consumo de agua en la minería del cobre 2017-2028 [en línea] <<https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/Proyeccion%20de%20consumo%20de%20agua%20en%201a%20mineria%20del%20cobre%202017-2028%20V4.pdf>> [consulta: 24 junio 2018].
- [4] Bulatovic, S. M. (2007). Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice - Flotation of Sulfides Ores. Amsterdam, Elsevier. 457p.
- [5] Wills, B. A. y Finch, J. A. (2015). Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery. 8^a ed. Kidlington, Elsevier. 497p.
- [6] Abulnaga, B. E. (2002). Slurry Systems Handbook. New York, McGRAW-HILL. 629p.
- [7] Vallebuona, G. 2007. Transporte de pulpa [en línea] <https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2007/2/MI42C/1/material_docente/bajar?id_material=151319> [consulta: 23 julio 2018].
- [8] Muller, S. *et al* (2009). The rheology of suspensions of solid particles. Proceedings of the Royal Society A 466(2010):1201–1228.
- [9] Pabst, W. *et al* (2006). Particle shape and suspension rheology of short-fiber systems. Journal of the European Ceramic Society 26(2006): 149–160.
- [10] Montes, G. (2015). Formulación científica proyecto Corfo L1: Prototipo Celda Flotación.
- [11] Mella, J. (2018). Simulación fluido dinámica de un prototipo de celdas de flotación. Memoria Ingeniero Civil Mecánico. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 125p.

- [12] Çengel, Y. A. y Cimbala, J. M. (2006). *Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones*. Ciudad de México, McGRAW-HILL INTERAMERICANA. 997p.
- [13] Barnes, H. A. *et al* (1989). *An Introduction to Rheology*. Amsterdam, Elsevier. 201p.
- [14] Szczygieł, I. *et al* (2017). Numerical simulation of single phase flow in a flotation machine. *Computer Assisted Methods in Engineering and Science* 20(2): 144–156.
- [15] Maharia, A. *et al* (2017). CFD Simulation of Two Phase Hydrodynamics of Mechanical Flotation Cell. En: INTERNATIONAL SEMINAR on MINERAL processing technology 2017. Dhanbad, India, Indian Institute of Technology. 7p.
- [16] Sarhan, A.R. *et al* (2017). Numerical simulation of froth formation in aerated slurry coupled with population balance modelling. *Canadian Metallurgical Quarterly* 53(1): 45–57.
- [17] Nabil, T. *et al* (2013). Computational Fluid Dynamics Simulation of the Solid-liquid Slurry Flow in a Pipeline. En: SEVENTEENTH INTERNATIONAL Water Technology Conference. Estambul, Turquía, Fatih University. 14p.
- [18] Yang, J. y Chalaturnyk, R.J. (2005). Computational Fluid Dynamics Simulation Of A Very Dense Liquid-solid Flow Using A Eulerian Model. *Computational Methods in Multiphase Flow III* 50(1): 305-314.
- [19] Sarhan, A.R. *et al* (2016). CFD simulation on influence of suspended solid particles on bubbles' coalescence rate in flotation cell. *International Journal of Mineral Processing* 146(2016): 54-64.
- [20] ANSYS Fluent 18.1 (2018) Fluent Theory Guide.
- [21] ANSYS Fluent 18.1 (2018) Fluent User's Guide.
- [22] SONAMI. s.f. Leyes y densidad de minerales. [en línea] <http://www.sonami.cl/images/stories/pdf/Leyes_y_Densidad_de_Minerales> [consulta: 30 diciembre 2018].