

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Metalúrgica.

Profesor Patrocinante
Andrés Ramírez

**ESTUDIO DEL IMPACTO DE LA CONCENTRACIÓN EN LA
EFICIENCIA DE MINI HIDROCICLONES PARA LA ELIMINACIÓN
DE PARTÍCULAS FINAS DE BENTONITA.**

MOIRA ISABEL PEÑA SALAS

Informe de Memoria de Título
para optar al Título de
Ingeniero Civil Metalúrgico

Abril 2024

RESUMEN

La minería representa una actividad económica fundamental en Chile, sin embargo, esta comprende un fuerte impacto ambiental, es por ello que en la actualidad se busca el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan optimizar de los recursos y disminuir los efectos negativos que deja en el medio ambiente.

El presente estudio se enfocó en investigar el efecto de la concentración en la eficiencia de mini hidrociclones para la eliminación de partículas finas de bentonita.

Mediante una serie de experimentos se evaluó cómo diferentes concentraciones de bentonita influyen en el rendimiento de los mini hidrociclones, donde se trabajó con dos escenarios: el primero a una concentración de 1 g/L y el segundo a 0.5 g/L, evaluando la recuperación y concentración de partículas.

Los resultados indicaron que al trabajar con una concentración de 1g/L, se obtuvo una eficiencia levemente superior a la de 0.5g/L. La variación de la concentración no condujo a cambios significativos para cada escenario en el rendimiento del hidrociclón.

Mediante el uso de CFD, se buscó evaluar el comportamiento del minihidrociclón computacionalmente, a través del software de Ansys Fluent se logra la validación de los resultados experimentales, lo que genera confianza con el modelo.

El éxito de esta investigación puede tener un impacto significativo en el proceso, ya que podría ser un precedente que permita la optimización de los procesos.

ABSTRACT

In Chile, mining represent a fundamental economic activity, however, involves a significant impact in the enviornment, that is why in the present it is seek the development of new tecnologies that allow us to optimize the resources and reduce the negative effects that leaves in the enviornment.

The main focus of this paper is to investigate the effects of efficiency of concentration in the mini-hydrocyclons for the elimination of bentonite fine particles.

Using a series of experiments was evaluate how differrent concentrations of feeding bentonite have an impact in mini-hydrocyclons performance, where we have 2 scenearios; the first with a concentration of 1 g/L and the second with 0.5 g/L, evaluating the recovery and particle concentration.

The results indicate that working at a 1 g/L concentration can give a better efficiency tan 0.5 g/L concentration. This didn't show any significant changes for every scenary in the hydrocyclon perfomance.

Fort he evaluation of the mini-hydrocyclon behaviour, it was use CFD with the Ansys Fluent software that can validate the experimental results.

The success of this investigation can mean a significant impact in the process and make this a precedent that allow the optimization of process.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia, especialmente a mis padres, quienes han estado siempre a mi lado, brindándome un apoyo incondicional durante este largo proceso.

A mis amigos, aquellos que han sido mis compañeros desde el inicio de nuestra vida universitaria, donde hemos estado apoyándonos mutuamente en todo momento. También, a todas esas personas que fui conociendo en el camino y estuvieron junto a mí.

A mi compañera de trabajo, por su constante apoyo y lealtad en este trabajo, que fueron fundamentales para enfrentar este desafío.

A mi pareja, quien estuvo a mi lado en esta etapa final, brindándome su apoyo emocional y siendo un pilar en los momentos buenos y difíciles. Su respaldo constante fue muy importante para alcanzar este logro. También a su familia que estuvieron para darme contención, y a mis mascotas que me daban calma en mis momentos de angustia.

Agradecimiento por el auspicio a los proyectos "DESIGN AND MANUFACTURING OF A CLUSTER OF NOVEL SMALL HYDROCYCLONES FOR REMOVAL OF FINE PARTICLES FROM CLARIFIED WATER IN MINING INDUSTRY: CFD SIMULATIONS AND EXPERIMENTAL WORK" - N° 11220582 y al Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería (CRHIAM/ANID/FONDAP/1523A0001)

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	2
Objetivo general	2
Objetivos específicos.....	2
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
Minería y Metalúrgica	3
Procesamiento de minerales.....	3
La clasificación	5
Mini hidrociclones.....	11
Arcillas	12
Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)	15
Geometría	17
Mallado.....	18
Fluent	19
Solución.....	19
4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	21
Diseño hidrociclón	21
Preparación mineral	22
Análisis granulométrico bentonita.....	23
Curva de calibración.....	24
Desarrollo experimental.....	26
Experimentos de una fase	28
Experimentos de dos fases.....	29
Desarrollo computacional.....	30
Geometría	31

Mallado.....	32
Fluent	33
5. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	40
Pruebas experimentales.....	40
Simulación en Ansys Fluent	43
Comparación de resultados experimentales con otra fuente	47
6. CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES.....	49
7. BIBLIOGRAFIA	51
8. ANEXOS	55
Anexo A.....	55
Anexo B.....	55
Anexo C.....	57
Anexo D.....	58

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1. Circuito de conminución en el proceso de concentración (Yanque Calachua, 2021).....	4
Figura 2. Imagen referencial hidrociclón (Meneses, 2018).....	6
Figura 3. Partes y flujos de un hidrociclón (Vega, 2019).	7
Figura 4. Parámetros de diseño hidrociclón (Vega, 2019).....	9
Figura 5. Descarga tipo spray y roping, respectivamente (Villalobos, 2017)...	10
Figura 6. Estructura laminar de la bentonita (Picasso & Sun Kou, 2008).....	15
Figura 7. Ejemplo geometría hidrociclón en 2D y 3D (Vega-Garcia et al., 2020).	18
Figura 8. Ejemplo malla en hidrociclón (Vega-Garcia et al., 2020).....	18
Figura 9. Geometría mini hidrociclón (Elaboración propia).....	21
Figura 10. Minihidrociclón y carcasa, respectivamente (Elaboración propia)..	22
Figura 11. Molino de bolas (Elaboración propia).	23
Figura 12. Análisis granulométrico bentonita (Elaboración propia).....	24
Figura 13. a) Turbidímetro modelo HI 98703, HANNA b) Ilustración disolución patrón (Elaboración propia).	25
Figura 14. Curva de calibración bentonita (Elaboración propia).....	26
Figura 15. Plataforma experimental (Elaboración propia).....	27
Figura 16. Equipo 2 variador de frecuencia ,3 bomba centrífuga,4 manómetro y 5 agitador, respectivamente (Elaboración propia).	28
Figura 17. Interfaz Workbench.....	31
Figura 18. a) Boceto minihidrociclón. b) hidrociclón en 3D.....	31
Figura 19. Calidad de la malla.	32
Figura 20. Malla hidrociclón	33
Figura 21. Interfaz Fluent.....	34
Figura 22. Modelo multifásico a) y viscoso b).....	35
Figura 23. Condiciones de borde de entrada (a) y salida (b).....	36
Figura 24. Monitoreo residuales, continuidad y velocidad.	44
Figura 25. Representación de flujos en simulación.	44
Figura 26. Presión simulada.	45
Figura 27. Columna de aire.....	47

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1. Dimensiones del mini hidrociclón.	22
Tabla 2. Parámetros bentonita.	24
Tabla 3. parámetros para realización curva de calibración.	25
Tabla 4. Condiciones de operación.	28
Tabla 5. Condiciones de operación.	29
Tabla 6. Condiciones de operación para ambos escenarios.	30
Tabla 7. Métodos.	36
Tabla 8. Controles.	37
Tabla 9. Valores iniciales.	38
Tabla 10. Ajustes.	38
Tabla 11. Parámetros para ejecución de cálculo.	39
Tabla 12. Flujos obtenidos para cada concentración en mL/s.	40
Tabla 13. Lectura obtenida del turbidímetro para cada prueba.	41
Tabla 14. Lectura obtenida del turbidímetro para cada prueba.	41
Tabla 15. Concentraciones en g/L para escenario 1 y 2.	42
Tabla 16. Resumen resultados.	43
Tabla 17. Flujos del procedimiento experimental y de la simulación.	45
Tabla 18. Presión obtenida en Bar.	46
Tabla 19. Comparación resultados para minihidrociclón A y B.	47
Tabla 20. Mediciones disolución patrón.	55
Tabla 21. Resultados pruebas N°1 escenario 1.	55
Tabla 22. Resultados pruebas N°2 escenario 1.	56
Tabla 23. Resultados pruebas N°3 escenario 1.	56
Tabla 24. Parámetros calculados escenario 1.	56
Tabla 25. Resultados pruebas N°1 escenario 2.	57
Tabla 26. Resultados pruebas N°2 escenario 2.	57
Tabla 27. Resultados pruebas N°3 escenario 2.	57
Tabla 28. Parámetros calculados escenario 2.	58

1. INTRODUCCIÓN

La minería es una de las actividades económicas más importantes para el país, ha formado parte de la historia de Chile. Esta actividad necesita renovarse siempre, lo ha sido desde tiempos remotos, cuando apenas se iniciaba la extracción de minerales y lo sigue haciendo año a año (Herbert, 2006).

Actualmente la minería y metalúrgica brinda muchos beneficios a los países en los que se desarrollan, pero a su vez trae consigo un alto impacto ambiental, debido al uso de recursos hídricos, los cuales son escasos en el norte de nuestro país, donde se ubican la mayoría de las mineras.

El desarrollo de nuevas tecnologías para la optimización de los recursos son claves para el futuro de la minería y el desarrollo de la sociedad. La búsqueda de nuevos yacimientos, el reaprovechamiento de los residuos, desarrollo de nuevos procesos con menor consumo de energía y uso eficiente del agua.

Una de las estrategias más estudiadas en el procesamiento de minerales es el mejoramiento de los procesos de clasificación y concentración.

Partiendo de la hipótesis de que se puede mejorar la calidad de las aguas que se reciclan en los procesos metalúrgicos mediante la implementación de mini hidrociclones para eliminar las partículas finas, y en este sentido evitar que estas sean recirculadas en los procesos industriales. Con la búsqueda de los parámetros óptimos por medio del modelado fluidodinámico computacional y experimentalmente.

Se trabajará en un circuito con un minihidrociclón, que tiene como objetivo investigar el rendimiento de estos equipos en la eliminación de partículas finas presentes en el agua, a través de la recuperación y la relación de concentración se determinará su eficiencia, y mediante el uso de CFD se compararán y validarán los resultados experimentales y teóricos.

2. OBJETIVOS

Objetivo general

Estudiar la eliminación y/o disminución del contenido de partículas finas arcillosas presentes en el agua de los procesos de concentración de minerales, utilizando mini hidrociclones.

Objetivos específicos

Realización de pruebas experimentales para calcular la eficiencia de un mini hidrociclón a diferentes concentraciones.

Simulación de un mini hidrociclón utilizando dinámica de fluidos computacional aplicando el software Ansys Fluent.

Validar el modelo computacional a través de su comparación con los datos obtenidos experimentalmente.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Minería y Metalúrgica

En la actualidad, Chile depende esencialmente de sus recursos naturales y de su riqueza minera, es decir, del desarrollo de la industria minería y metalúrgica, las cuales son importantes para la economía nacional y mundial.

La minería se ha desarrollado en Chile desde la época pre-colombina, la cual ha pasado por muchas etapas y desarrollos hasta llegar a ser lo que es hoy, la principal actividad económica del país (Vallejos, 1994).

La minería es una actividad industrial encargada de la extracción y obtención selectiva de aquellas sustancias sólidas, líquidas o gaseosas, existentes en la corteza terrestre para su transformación en minerales, materias primas y/o productos energéticos que permitan cubrir las necesidades para el desarrollo de la sociedad (Herbert, 2017).

La metalúrgica se desarrollaba en el continente mucho antes de la llegada de los españoles, de hecho, las primeras evidencias del trabajo con metales en Latinoamérica datan del año 1500 A.C en la región de los Andes Centrales, dichos hallazgos consisten en láminas de oro y cobre nativo martilladas (Museo Chileno de Arte Precolombino, 2001).

La metalurgia es la rama que, a través de la ciencia y la tecnología, se ocupa de la obtención de metales a partir de los minerales extraídos por la minería, los cuales pasan por procesos de transformación y tratamiento hasta obtener el grado de pureza que se necesite y sea útil para la industria.

Procesamiento de minerales

Los minerales no siempre se encuentran en la naturaleza, y, generalmente se encuentran con leyes muy bajas que no permiten utilizar las tecnologías establecidas para la obtención del metal, por lo que se le debe recurrir a métodos que permitan aumentar su concentración.

Los métodos de concentración de minerales se constituyen por un conjunto de etapas, con objetivos que permitan, primero liberar las menas de interés, para luego separarlos

y obtener al menos dos productos, el primero con una alta ley de metal que se denominará concentrado y el segundo con una baja ley llamado relave. En resumen, el objetivo de los procesos de concentración de minerales es, separar la mena de la ganga (Departamento Metalúrgica, 1983).

El procesamiento de minerales sigue a la explotación minera con el objetivo de preparar al mineral para la extracción del metal valioso o entregar un producto final.

Es así, como la primera fase del procesamiento de minerales es la conminución que busca la reducción de tamaño de partículas, esta consta de dos etapas: trituración o chancado y molienda, el conjunto del proceso reduce el tamaño para liberar minerales valiosos de la ganga y facilitar su concentración (Departamento Metalúrgica, 1983).

El chancado se encarga de la reducción de las partículas de mayor dimensión y la molienda de las partículas producto del chancado. Para que la operación sea eficiente se debe evitar que las partículas sean reducidas en sobre medida, y es mediante un clasificador que se consigue retirarlas oportunamente del circuito. Luego ese mineral seguirá por el procesamiento de minerales (Departamento Metalúrgica, 1983). En la **Figura 1** se presenta el circuito de conminución.

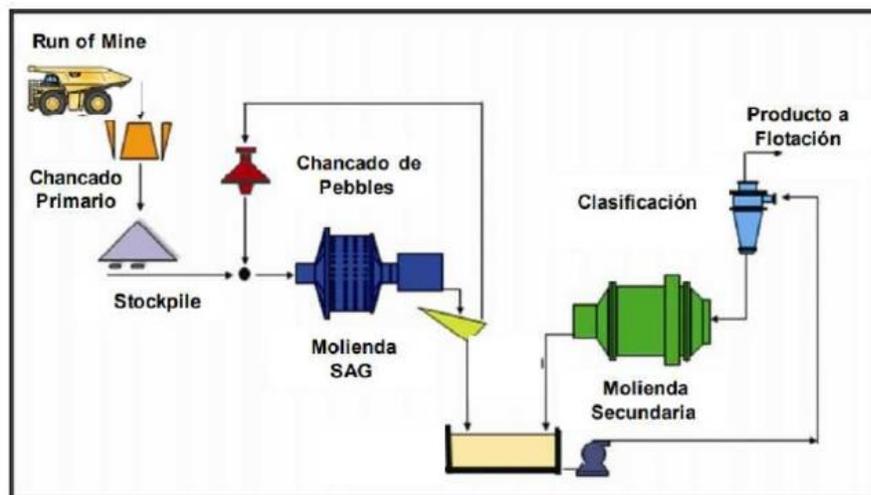


Figura 1. Circuito de conminución en el proceso de concentración (Yanque Calachua, 2021).

La clasificación

La clasificación tiene por objetivo, la separación física de las partículas por tamaños. Esta se puede hacer en seco o en húmedo, obteniendo una fracción gruesa o sobre tamaño y una fracción fina o bajo tamaño.

Los clasificadores reciben el material chancado o molido, lo clasifican retornando al proceso anterior, el sobre tamaño y al siguiente el bajo tamaño. Existen diferentes tipos de clasificadores, pero el más utilizado en la industria minera son los hidrociclones (Departamento Metalúrgica, 1983).

Los equipos clasificadores utilizados en el presente son muy ineficientes y su mejoramiento por leve que este sea, produce un impacto económico en las plantas procesadoras de minerales (Miranda, 2004).

Los hidrociclones son equipos estáticos que utilizan la fuerza centrífuga para la separación de partículas, estas partículas están suspendidas en el líquido y se someten a esta fuerza por acción de su misma energía cinética.

El primer hidrociclón fue patentado por Bretney el 26 de mayo de 1891, En Estados Unidos de América. Su aplicación principal fue del tipo industrial, en la industria minera fue introducido en 1939 en la Dutch State Mines en Holanda. Originalmente fueron diseñados para la separación de suspensiones sólido-líquido y clasificación de partículas, pero en la actualidad se usan para sólido-sólido, líquido-líquido y separación gas-líquido (Meneses, 2018).

Su objetivo principal es separar los sólidos suspendidos en un determinado flujo de masa de alimentación en dos salidas, una que lleva la suspensión de sólidos más gruesos de un determinado tamaño de corte denominado *underflow* y el *overflow* que contiene la suspensión de sólidos más finos (Bernal & Jiménez, 2021). Lo cual se observa en la **Figura 2**.

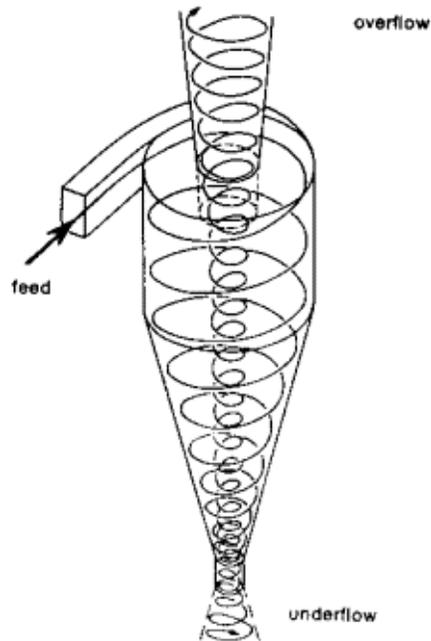


Figura 2. Imagen referencial hidrociclón (Meneses, 2018).

En palabras simples se puede decir que, la mayoría de las partículas más pesadas salen por la parte inferior del dispositivo y las partículas más livianas por la parte superior, correspondientes a *spigot* y *vortex*, respectivamente. Sin embargo, hay que considerar que en los procesos de concentración de minerales siempre existe la contaminación de una corriente con otro a la cual se le denomina cortocircuito (Miranda, 2004).

En la **Figura 3** se puede observar la estructura de un hidrociclón que se compone de una sección cilíndrica, correspondiente al cuerpo de alimentación y de una sección cónica que incluye el cuerpo cónico y el ápex. El flujo de alimentación entra tangencialmente en la parte superior de la sección cilíndrica a una cierta presión, el *vortex* da salida a la corriente superior y el *spigot* que da salida a la corriente inferior (Villabeitia, 2016). La clasificación se genera mientras las partículas se encuentran en la sección cilíndrica.

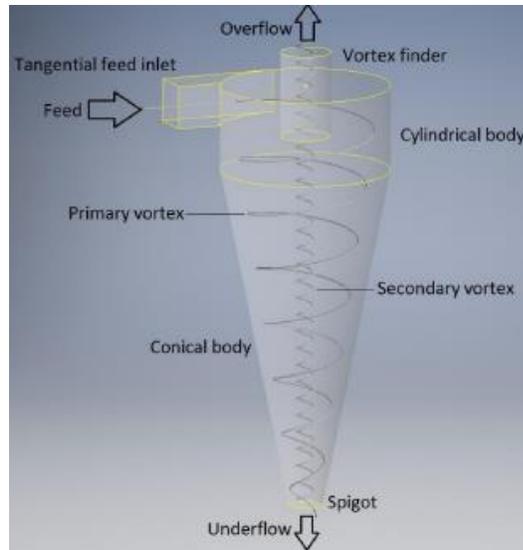


Figura 3. Partes y flujos de un hidrociclón (Vega, 2019).

El flujo de alimentación se compone de una pulpa que contiene agua más partículas sólidas de mineral. En este flujo, hay un equilibrio de fuerzas que influirá en la trayectoria y, por consiguiente, en la clasificación de las partículas. Donde se incluyen las fuerzas de arrastre y centrífuga (Bernal & Jiménez, 2021).

Lo mencionado anteriormente se fundamenta en un modelo donde una partícula de un cierto tamaño alcanza un equilibrio en la posición radial en la cual su velocidad de sedimentación terminal se iguala a la velocidad radial en oposición, es decir, la fuerza centrífuga (F_c) es igual a la fuerza de arrastre (F_D) en la dirección contraria y matemáticamente se expresa en la Ecuación 1 y 2:

$$F_c = \frac{v_\theta^2}{r} v_p (\rho_s - \rho) \quad \text{(Ecuación 1)}$$

$$F_D = \frac{1}{2} C_D - (v_r - u_r)^2 \rho_f A_0 \quad \text{(Ecuación 2)}$$

Donde:

v_θ es la velocidad de la partícula.

v_p es el volumen de la partícula.

ρ_s y ρ son las densidades del sólido y fluido, respectivamente.

C_D es el coeficiente de arrastre.

v_r y u_r son las velocidades radiales del fluido y partícula, respectivamente.

A_0 es el área de la sección transversal de la partícula.

En el equilibrio las partículas se irán por el *overflow* si el fluido fluye hacia el centro del hidrociclón, y las partículas se irán por el *underflow*, si se mueve hacia las paredes del equipo.

La separación en un hidrociclón está determinada por el balance de fuerzas mencionado anteriormente, que perturban a las partículas en todo momento, y se produce porque las partículas de tamaños diferentes se mueven en distintas trayectorias (Vega, 2020).

Dentro de un hidrociclón existe un núcleo de aire, que tiene aproximadamente la forma de un cilindro y se extiende a lo largo del eje de simetría del hidrociclón, la forma del núcleo de aire no es fija en el tiempo y experimentalmente se observa que, aunque su radio permanece aproximadamente constante, su posición fluctúa tanto radial como longitudinalmente. Esto puede evitarse operando el hidrociclón en contrapresión. (Miranda, 2004). Se debe considerar que en hidrociclones de diámetro pequeño el núcleo de aire no presenta información concreta de su efecto.

En un hidrociclón que opera con agua los perfiles de velocidades muestran que en las zonas cercanas a la pared del hidrociclón, presentan velocidades menores que las vistas en la zona central (He et al., 2022)

El diámetro del hidrociclón va desde una pulgada y puede llegar hasta las 70 pulgadas, donde la separación de las partículas se verá afectada principalmente por este y su geometría, mientras más grande sea el diámetro, la separación que se producirá será de minerales más gruesos, mientras que si el hidrociclón tiene un diámetro menor separará partículas finas. El tamaño de corte es definido como el diámetro de una partícula que tiene una probabilidad de ser separada. La separación de partículas se basa en la diferencia de densidades entre el mineral y el líquido, agua en este caso. Mientras más alta sea la diferencia de densidades la separación será más fina (Bernal & Jiménez, 2021).

El diseño y la operación de un hidrociclón depende de los patrones de flujo que se producen en el interior del equipo, Estos son gobernados por el número de *Reynolds* (Re) de la corriente de pulpa en el hidrociclón (Bernal & Jiménez, 2021).

Los parámetros de diseño se relacionan principalmente con el diámetro (D), se tiene el diámetro de entrada (D_i), diámetro de buscador de vórtice: (D_o), longitud o altura: (L_c), longitud de buscador de vórtice: (L_v), longitud hidrociclón. Los cuales se pueden observar en la **Figura 4**.

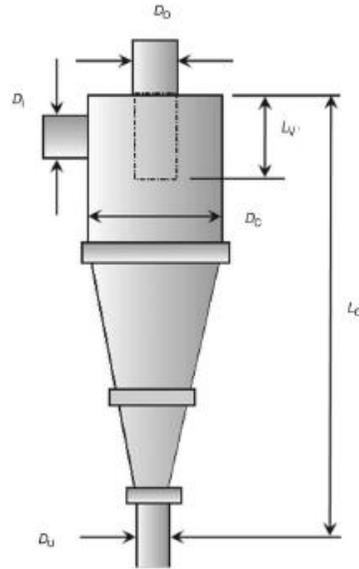


Figura 4. Parámetros de diseño hidrociclón (Vega, 2019).

Los parámetros de operación en un hidrociclón son el caudal y presión de alimentación, la diferencia de densidad de alimentación y los parámetros de partículas de alimentación, parámetros del fluido de alimentación, tales como: la viscosidad y la reología (Tian et al., 2018)

En un hidrociclón existen dos tipos de descargas, tipo *spray* y *roping*, siendo esto crucial para el funcionamiento y la clasificación. La operación óptima está asociada a una descarga tipo *spray* y cercana al *roping*, si el proceso está asociado a una descarga *roping* será un proceso indeseado ya que se tendrá una mala clasificación del mineral (Villalobos, 2017). En la **Figura 5** se muestran las descargas para un mejor entendimiento.

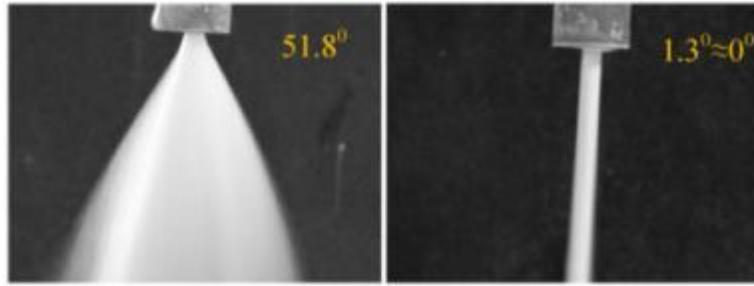


Figura 5. Descarga tipo *spray* y *roping*, respectivamente (Villalobos, 2017).

Se dice que la eficiencia de un hidrociclón depende de varios parámetros: tamaño de partículas de alimentación, se espera que la eficiencia de separación sea mayor con el tamaño de partículas de alimentación, su disposición tiene un impacto en la eficiencia de separación de las partículas finas (Tian et al., 2018).

El rendimiento de separación del hidrociclón depende principalmente de sus características geométricas, tales como, el diámetro, la geometría de entrada, el ángulo del cono, la profundidad del buscador de vórtices, entre otras. Este se puede mejorar al disminuir la viscosidad del fluido de alimentación y ajustando la reología del fluido, esto se puede hacer mediante el agregado de adiciones y el elevamiento de la temperatura del fluido (Tian et al., 2018).

Dentro de las principales ventajas de un hidrociclón se encuentran su estructura simple, su tamaño pequeño, su alta capacidad, su bajo costo de mantención y de operación, este equipo también presenta desventajas y se debe a la baja eficiencia de clasificación, al cortocircuito que se produce dentro de las salidas y que aún no se tiene una total compresión de estos.

Actualmente, son empleados principalmente en la industria minera en la clasificación de líquidos, espesamiento, ordenamiento de partículas por densidad o tamaño y lavado de sólidos, el uso de este equipo no se limita a la industria minera, sino que también se utilizan en las industrias de construcción, alimentación, química, textil, petroquímica, metalúrgica, entre otras (Hao et al., 2022).

Como se mencionó anteriormente, los hidrociclones se han utilizado por más de un siglo, pese a ello la geometría no ha sufrido cambios, es por ello que el diseño de nuevas geometrías abre un paso a la optimización de hidrociclones.

Mini hidrociclones

Un mini hidrociclón presenta la geometría y configuración similar a la de un hidrociclón convencional, pero se diferencia en que su diámetro es mucho más pequeño, si su diámetro es menor o igual a 15 mm se le denominará mini hidrociclón (He et al., 2022).

Es sabido que el rendimiento depende de sus características geométricas, por lo que la modificación de un parámetro, tal como el diámetro, influye en el rendimiento de separación de un hidrociclón. Según estudios realizados los mini hidrociclones pueden separar partículas más finas de manera más eficiente en comparación con hidrociclones convencionales. Además, se produce un tamaño de corte más pequeño (Hao et al., 2022).

Dentro de un hidrociclón se producen fuerzas centrífugas y al utilizar hidrociclones de diámetro pequeños las fuerzas centrífugas que se forman en ellos son más grandes, lo que facilita la separación de partículas finas. Es por ello que estos dispositivos se han ido implementando para la realización de separaciones difíciles entre fases (Cilliers & Harrison, 1997).

Estos dispositivos requieren poco mantenimiento y se pueden limpiar de manera fácil, además estos se pueden diseñar a través de la impresión en 3D y sus materiales son diversos, estos se pueden hacer de resina, metálicos, etc. En un mini hidrociclón la aparición del núcleo de aire no es claro, se requiere de mayores estudios en un futuro para tener más información en este caso (He et al., 2020).

La incorporación de los mini hidrociclones es algo que no lleva muchos años, sin embargo, se han realizado múltiples estudios y experimentos con la utilización de mini hidrociclones en diferentes tipos de aplicaciones industriales, de lo obtenido de dichos informes se ha extraído información de su uso, las aplicaciones que se le pueden dar, lo que se espera para el futuro, entre otros, la cual se presenta de forma resumida a continuación:

- Un mini hidrociclón puede separar eficazmente partículas finas de escala micro y sub-micro del medio fluido portador. Donde la precisión de

separación se puede ajustar cambiando su dimensión geométrica o regulando los parámetros de operación (Lv et al., 2015)

- Se ha investigado el rendimiento de mini hidrociclones en la eliminación de micro plásticos presentes en ríos y océanos, los cuales generan un gran daño al ambiente, a los animales e incluso a los humanos (He et al., 2022).
- Uso de hidrociclones en la concentración de suspensiones microbianas (Cilliers & Harrison, 1997).
- Se ha estudiado la aplicación de mini hidrociclones en la concentración de suspensiones de levadura, se estudia la deshidratación de la levadura de panadería en un hidrociclón para cuantificar el proceso de separación (Cilliers & Harrison, 1997).
- Se puede utilizar para la eliminación de partículas finas de las aguas residuales (Liu et al., 2022).
- Se presenta un interés para aplicaciones biológicas y medioambientales, en particular para la separación de partículas finas y células, así como su miniaturización para aplicaciones de micro dispositivos (Liu et al., 2022).
- Para la eliminación de micropartículas, se espera que los mini hidrociclones logren tanto una alta recuperación como una gran relación de concentración (Vega-Garcia et al., 2018).
- Para la separación a pequeña escala, un hidrociclón o un conjunto de hidrociclones son suficientes para tratar el fluido que contiene partículas finas (He et al., 2022)
- A gran escala es necesario la combinación de mini hidrociclones para aplicaciones industriales (Tian et al., 2018)

Arcillas

Es una asociación de minerales arcillosos (silicatos completos hidratados de aluminio) de fino tamaño de partícula originada por la alteración hidrotermal de rocas ígneas, que, húmeda es plástica y seca, dura y quebradiza. Esta abundantemente distribuida en la naturaleza y es constituyente importante de la corteza terrestre (de Pablo, 1964).

En su estado natural se componen de uno o varios minerales arcillosos y otros minerales, tales como; cuarzo, feldespatos, plagioclasas, piroxenas, rutilo, limonita y materia orgánica, sus propiedades por tanto dependerán de su origen, mineralogía y de los tratamientos posteriores a lo que hayan sido sometidos luego de su formación, agregando nuevos minerales, transformándolos o alterándolos mecánicamente (de Pablo, 1964).

Las arcillas pueden tener diferentes clasificaciones, una de ellas dependerá si permaneció en su lugar de formación o si fueron llevadas a lugares diferentes al de su origen, esta corresponde a primarias o residuales, respectivamente. Otra de sus clasificaciones se basa en tres simples criterios: su composición química y contenido iónico, su espesor de la unidad estructural, su orden y simetría, que son resultado de su origen y de los procesos de metamorfismo a los que estuvieron sometidos. En resumen, se puede decir que su clasificación depende principalmente de su origen y de los minerales que contenga (de Pablo, 1964).

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, se dividen en grupos, donde estas se definen según su composición química, específicamente por la cantidad de sílice que presenta. Se tiene el grupo de caolinita, illita, clorita y esmectita.

Las esmectitas corresponden a un grupo constituido por filosilicatos, sus propiedades fisicoquímicas dependerán de su estructura y tamaño de grano, el cual es muy fino, dentro de este grupo existen las montmorillonitas las cuales son unas de las más conocidas en aplicaciones industriales. La bentonita es un mineral perteneciente al tipo de montmorillonita, es un mineral no metálico de origen sedimentario (Picasso & Sun Kou, 2008).

La bentonita fue descubierta en el año 1888 en Fort-Benton, en la región de Rock-Creed en el estado de *Wyoming*, Estados Unidos, lugar de donde tomó su nombre (Dérivé & Esme, 1952).

La bentonita se compone principalmente de montmorillonita, silicato de magnesio y aluminio hidratado, que se presenta en forma de láminas cristalinas de tamaño coloidal (Bello & Balmaseda, 1996).

Químicamente se compone fundamentalmente por sílice y alúmina en la proporción 4:1, con un número variable de moléculas de agua. La bentonita es un mineral de grano muy fino, en su forma natural, es una roca de consistencia análoga a del caolín, untuosa, se pega a la lengua, es de color blanco o ligeramente de color amarillo (Hoyos de Castro, 1944).

Dentro de sus propiedades se encuentra una elevada superficie específica que le confiere una gran capacidad de adsorción y absorción. Este presenta un gran poder de hinchamiento en agua, este aumenta como mínimo cinco veces su tamaño, su hinchamiento se debe a dos razones: la primera es que cada molécula de agua atrae a otra y esto hace que se separen más las moléculas, y la segunda debido a la adsorción de agua en la estructura del tipo montmorillonita origina una separación entre los paquetes de capas (Andrade et al., 2005).

Esta se puede clasificar en altamente hinchable o sódica, poco hinchable o cálcicas y moderadamente hinchables o intermedias.

Resumiendo, se puede decir que la bentonita tiene un tamaño de partícula pequeño, menor a 2 μm , es altamente hinchable, gran superficie específica, capacidad de adsorción y absorción, presenta gran viscosidad y tixotropía a bajas concentraciones de sólidos. En la **Figura 6** se muestra la estructura de la bentonita.

La bentonita tiene múltiples usos, algunos de ellos son en la industria de la cerámica, se utiliza en arenas sintéticas que se manipulan en la fundición del hierro del acero, se emplea en decoloración y clarificación de diversos materiales y en procesos industriales de purificación de aguas que contengan diferentes tipos de aceites industriales y otros contaminantes, también se puede utilizar como desinfectante y estabilizante en las perforaciones de las rocas y de las tierras que contienen granos duros y arena (Rodríguez & Torrecillas, 2002).

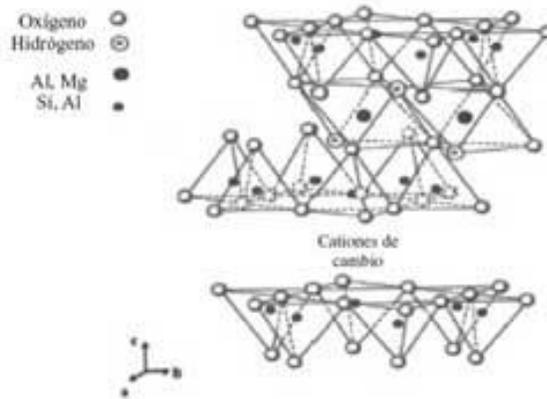


Figura 6. Estructura laminar de la bentonita (*Picasso & Sun Kou, 2008*)

Los criterios de clasificación utilizados por la industria se basan en su comportamiento y propiedades fisicoquímicas y la clasificación industrial más aceptada establece tipos de bentonitas en función de su capacidad de hinchamiento en agua (Hoyos de Castro, 1944).

Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

La dinámica de fluidos computacional abreviado como CFD, es el área de conocimiento que trata sobre la simulación numérica de flujos de fluidos, transferencia de calor y fenómenos relaciones tales como reacciones químicas, combustión, entre otras aplicaciones (Osorio et al., 2012). Es una herramienta que permite simular en un sistema mediante el cálculo computacional. El CFD tuvo su origen a partir de la combinación de dos disciplinas: mecánica de fluidos y cálculo numérico.

El desarrollo inicial de CFD en las décadas de 1960 y 1970 estuvo impulsado por la necesidades de la comunidad aeroespacial, sin embargo, la CFD moderna abarca todas las disciplinas en el que el flujo de un fluido es importante (González, 2018).

Los métodos de discretización más utilizados son el métodos de las diferencias finitas, métodos de elementos finos y método de volúmenes finitos, dónde este último es el más operado.

Utiliza algoritmos basados en métodos numéricos para resolver las ecuaciones que gobiernan el flujo de fluidos, lo que se establece en las leyes de conservación de la física, conservación de la masa, momentum y energía. Lo que permitirá conocer de forma cuantitativa y cualitativa el comportamiento de los fluidos (González, 2018).

Conservación de masa

La tasa de incremento de masa dentro de un elemento de fluido es equivalente a la tasa neta de flujo de masa en las caras del elemento (Villalobos, 2017). En su forma diferencial se expresa en la **Ecuación 3**.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (\text{Ecuación 3})$$

Conservación de momentum

De acuerdo con la segunda ley de Newton, la fuerza neta sobre un elemento de fluido es igual a la tasa de variación del momentum, existen dos tipos de fuerzas que actúan sobre un elemento: de superficie y de cuerpo (Ecuación 4) (Villalobos, 2017).

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = \rho g_i + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Las ecuaciones de Navier-Stokes describen el comportamiento de un fluido. La ecuación general se observa en la **Ecuación 5** (Villalobos, 2017).

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(2\mu e_{ij} - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot u)\delta_{ij} \right) \quad (\text{Ecuación 5})$$

Todas las ecuaciones de conservación resueltas en CFD poseen esta forma, con cuatro términos: tiempo, advectivo, difusivo y fuente, los cuales se presentan el mismo orden en la ecuación.

Existen diferentes software para simular, algunos de ellos son: *Ansys Fluent*, *OpenFoam*, *Flow-3D*, *Star CCM+*, entre otros.

Modelos de turbulencia

El número de Reynolds es un parámetro adimensional que indica el grado de turbulencia de un fluido. Se han desarrollado modelos capaces de modelar la turbulencia a diferentes escalas y precisión (Villalobos, 2017). A continuación, se presentan las tres categorías.

Reynolds-averaged Navier Stokes (RANS): el carácter turbulento del fluido es promediado en el tiempo. Tienen un bajo costo computacional (Villalobos, 2017).

Large Eddy Simulation (LES): este método involucra un filtrado especial de las ecuaciones de Navier-Stokes en forma transiente. Estos modelos requieren mallas más finas por lo que son más precisos (Villalobos, 2017).

Direct numerical simulation (DNS): resuelve directamente las ecuaciones de Navier-Stokes en mallas lo suficientemente finas que permitan abarcar el espectro hasta la escala de Kolmogorov, en donde se calcula el flujo medio y también las fluctuaciones turbulentas (Villalobos, 2017).

Modelo de esfuerzo de Reynolds (RSM)

Este modelo resuelve las 6 componentes del tensor de Reynolds. Es el más completo y complejo de los modelos RANS, ya que tiene un alto costo computacional, pero permite obtener resultados más precisos (Villalobos, 2017).

Modelos multifásicos

Estos modelos permiten la simulación de sistemas donde están presentes dos o más fases, tales como líquido, sólido y gas. Los modelos más utilizados son: modelo Volumen de fluido (VOF); Modelo Euler-Euler; Modelo Euler-Lagrangiano (Villalobos, 2017).

Para llevar a cabo una simulación se deben seguir ciertos pasos, principalmente se divide en geometría, mallado, simulación y resultados (Cogollo, 2020). A continuación, se presenta brevemente cada etapa.

Geometría

La creación de la geometría es el primer paso en cualquier análisis numérico. Se puede importar la geometría o hacer a través de *SpaceClaim* en el programa mismo, generalmente la figura se realiza a partir de planos en 2D y luego esta es pasada a 3D. En la **Figura 7** se muestra el hidrociclón desde un plano y luego en tres dimensiones.

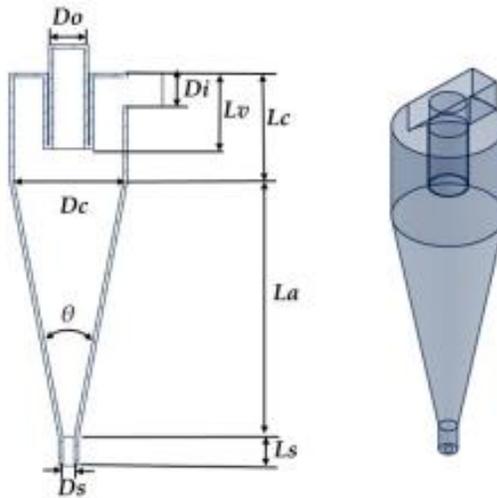


Figura 7. Ejemplo geometría hidrociclón en 2D y 3D (Vega-Garcia et al., 2020).

Mallado

Una vez creada la geometría esta pasa a una nueva etapa donde se debe generar la malla, lo que se hace es dividir el modelo en pequeños volúmenes, mientras más pequeñas sean las divisiones del fluido la simulación será más precisa, la forma de estos volúmenes finitos es variada, puede ser: tetraédrica, hexaédrica, prismática, entre otros. De acuerdo con esto la malla se puede clasificar en estructurada, semi estructurada y no estructurada. De acuerdo con esto se puede observar su calidad, los elementos de la malla. En la **Figura 8** se observa un ejemplo de una malla.



Figura 8. Ejemplo malla en hidrociclón (Vega-Garcia et al., 2020).

Fluent

Una vez generada la malla la cual permite la discretización del dominio computacional se procede a la resolución de las ecuaciones que gobiernan el fluido. En este paso se deben elegir los modelos tales como: multifase, fases discretas, turbulencia, entre otros, se deben definir y aplicar las condiciones de contorno y los parámetros necesarios para comenzar los cálculos, estas pueden ser condiciones de entrada y salida, tales como; caudal, velocidad, presión, etc., es importante que estas condiciones se definan correctamente ya que estas nos permitirán obtener una buena solución. Una vez definido todo se comienza con el cálculo.

Solución

Cuando el cálculo de la simulación haya terminado, es posible obtener y analizar los resultados que se necesiten, tales como la ecuación de continuidad, los flujos de entrada y salida, la columna de aire, la presión, entre otros.

La simulación basada en computadora es un gran contribuyente a la comprensión de los procesos debido a la capacidad de simular física y química complejas, desarrollar modelos validados y luego usarlos en la ampliación y, más recientemente, la reducción de procesos, así como como optimización y control de procesos (Fletcher, 2022).

Las ventajas del uso de CFD es que se pueden hacer grandes en cálculos en poco tiempo, es posible visualizar el proceso y se evitan costos experimentales. Dentro de las desventajas lo principal es el requerimiento computacional relativamente alto, las habilidades para el manejo del software, la limitación de licencias, entre otros.

La dinámica de fluidos computacional actualmente es utilizada en diferentes industrias, sobre todo en ingeniería mecánica, civil, minería, metalúrgica, aeronáutica, entre otros. Se puede aplicar en el diseño aerodinámico, en ingeniería biomédica, en estructuras hidráulicas, energía eólica, en la ingeniería de procesos, etc.

Con el desarrollo de la dinámica de fluidos computacional y la tecnología informática de la alta velocidad, CFD se ha vuelto crucial para estudiar el campo de flujo interno de los hidrociclones, Además, se ha logrado un proceso considerable en la investigación teórica, fabricación de equipos y aplicaciones tecnológicas (Hao et al., 2022).

CFD actualmente está jugando un papel importante como herramienta de diseño, junto con su papel como herramienta de investigación.

4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

En este capítulo se muestra la metodología realizada para este trabajo. Esto se organizó de la siguiente manera: Se diseñó y construyó el mini hidrociclón, se obtuvo y preparó el material, se construyó el set up, la preparación para la realización de las pruebas experimentales y al mismo tiempo del desarrollo computacional, lo mencionado anteriormente será detallado a continuación.

Diseño hidrociclón

Para la elaboración del hidrociclón se consideró la geometría que se observa en la **Figura 9**, con sus respectivas dimensiones correspondientes con un mini hidrociclón. Para la impresión del equipo se utilizó la impresora *Phrozen Sonic Mighty 8K resin 3D printer* y el material con el que se fabricó fue con resina. Cada parámetro se especifica en la **Tabla 1**.

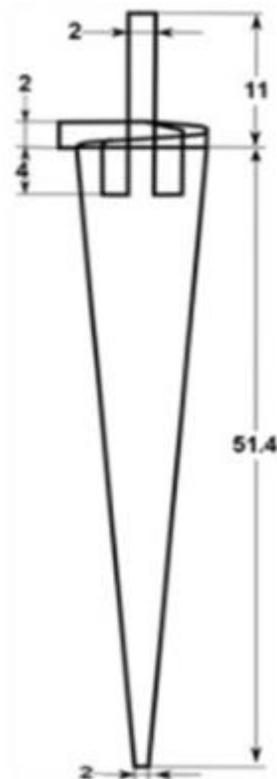


Figura 9. Geometría mini hidrociclón (Elaboración propia).

Tabla 1. Dimensiones del mini hidrociclón.

Parámetros	Dimensiones (mm)
Diámetro [Dc]	10
Entrada [Di]	2
Diámetro de vortex finder [Do]	2
Diámetro del spigot [Du]	2
Altura del cilindro [Lc]	51.4
Longitud del vortex Finder [Lv]	11
Ángulo del cono [θ]	10

El dispositivo principal se compone de un mini hidrociclón y este va dentro de una carcasa, las cuales se pueden observar a continuación en la **Figura 10**:



Figura 10. Minihidrociclón y carcasa, respectivamente (Elaboración propia).

Preparación mineral

El mineral arcilloso que se utilizó para la investigación fue bentonita sódica, este tuvo que ser sometido a ciertos procesos antes de poder trabajar con el mineral. Lo primero que se hizo con el mineral seco fue molerlo, este procedimiento se realizó con

un molino de bolas de acero ubicado en el laboratorio de flotación que se muestra en la **Figura 11**, el tiempo de residencia fue de 30 minutos, luego el mineral se tamizó para poder separar las partículas finas de las gruesas, esto se hizo con un tamiz de 100 μm , las partículas gruesas fueron puestas una vez más en el molino por 10 minutos y se trabajó con el mineral con un tamaño de partícula menor a 100 μm , finalmente se prepararon muestras de bentonita, estas fueron tomadas en una balanza obteniendo muestras de 15 y 30 g con las cuales se llevaran a cabo las pruebas experimentales.



Figura 11. Molino de bolas (Elaboración propia).

Análisis granulométrico bentonita

La bentonita fue llevada a analizar para determinar su granulometría donde se obtuvieron parámetros importantes de este y se obtuvo la curva de distribución de densidad y distribución acumulada, que se observa en la **Figura 12**, mientras que los parámetros obtenidos se muestran en la **Tabla 2**.

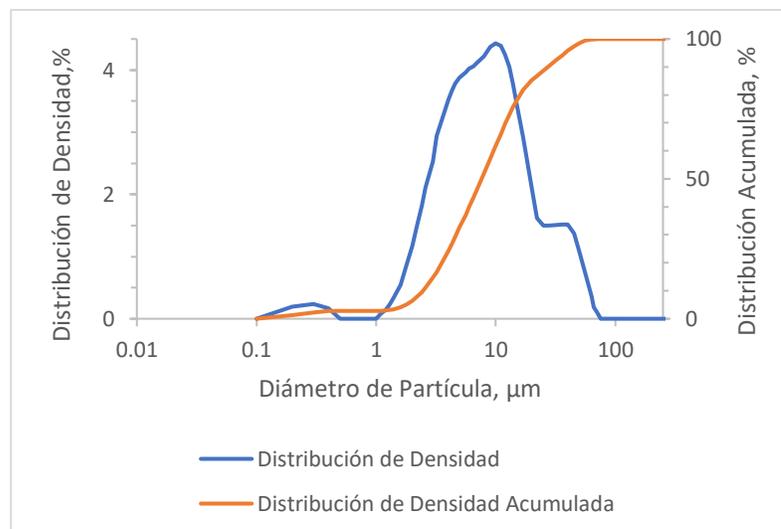


Figura 12. Análisis granulométrico bentonita (Elaboración propia).

Tabla 2. Parámetros bentonita.

Parámetros	Dimensiones
D ₅₀ [μm]	7.642
Tamaño medio [μm]	12.019

Curva de calibración

La curva de calibración es un método muy utilizado en química analítica para determinar la concentración de una sustancia en una muestra desconocida, sobre todo en disoluciones, es decir, es la representación gráfica de una señal que se mide en función de la concentración de un analito (Antezana, 2019).

La elaboración de esta consta de dos pasos: preparar la disolución patrón y la obtención de la función señal-concentración. Una vez obtenida la curva de calibración se puede utilizar para conocer la concentración de analito en una muestra desconocida (Antezana, 2019).

La realización de este procedimiento se hizo con disoluciones de concentraciones conocidas de analito, en este caso de bentonita, las mediciones se llevaron a cabo con un turbidímetro (**Figura 12**). La concentración se midió en ppm (partes por millón), el rango fue de 250 a 1750 ppm, en un volumen de 10ml, las muestras se masaron en

una balanza de alta precisión, se trabajó con 7 disoluciones patrón, las cuales se muestran en la **Figura 13**.

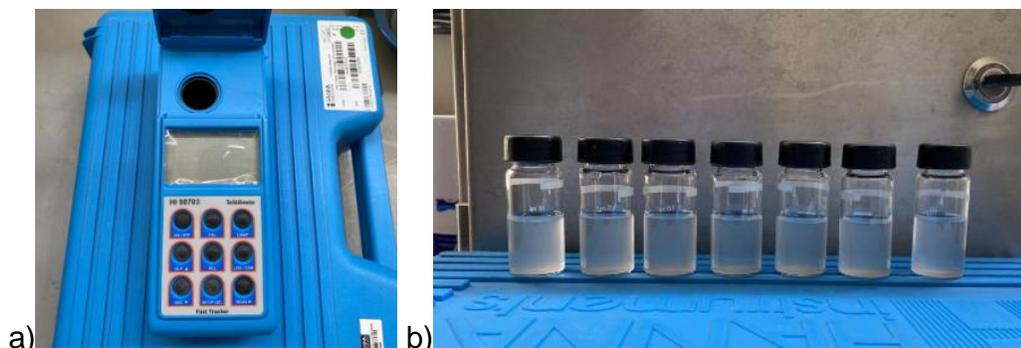


Figura 13. a) Turbidímetro modelo HI 98703, HANNA b) Ilustración disolución patrón (Elaboración propia).

Luego las disoluciones fueron llevadas al turbidímetro, se hicieron 4 mediciones y luego se trabaja con el promedio para minimizar el error. Los valores de la concentración y de las lecturas obtenidas del turbidímetro se pueden observar en la **Tabla 3**, donde se muestra el valor promedio de NTU, en la **Tabla 20** se pueden observar todas las mediciones realizadas.

Tabla 3. parámetros para realización curva de calibración.

Concentración teórica [ppm]	Concentración real [ppm]	Muestra [g]	NTU promedio
1750	1757	0.01757	557.75
1500	1510	0.0151	437.75
1250	1264	0.01264	308
1000	1017	0.01017	272.75
750	755	0.00755	168.5
500	502	0.00502	100.25
250	247	0.00247	57.125

Finalmente, con los datos obtenidos es posible construir el gráfico: NTU en función de la concentración en ppm, esta representación gráfica se conoce como curva de calibración, que se observa en la **Figura 14**:

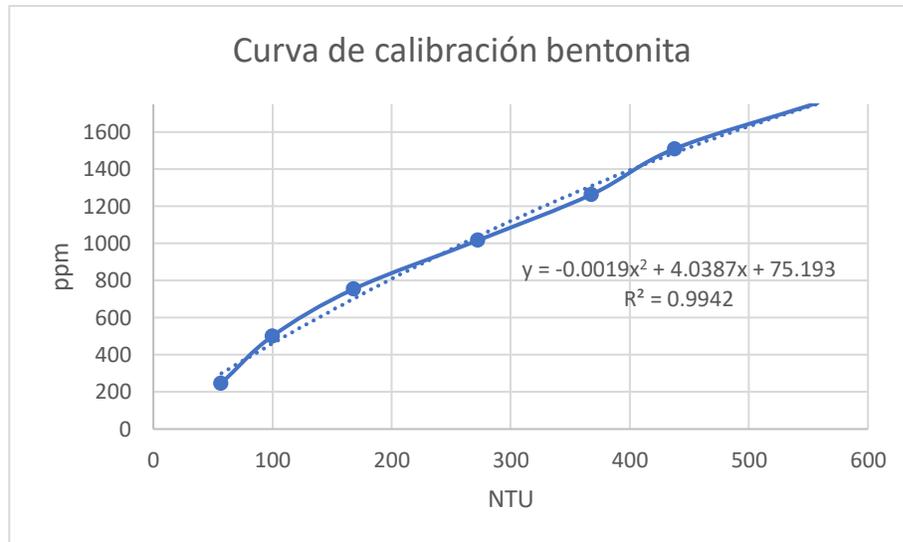


Figura 14. Curva de calibración bentonita (Elaboración propia).

De esta curva se obtiene la expresión matemática (Ecuación 6) que nos permitirá determinar las concentraciones desconocidas que se obtengan de las pruebas experimentales.

$$y = -0.0019x^2 + 4.0387x + 75.193 \quad \text{(Ecuación 6)}$$

Donde: x e y corresponden a concentraciones.

Desarrollo experimental

Para llevar a cabo las pruebas experimentales, una vez impreso el hidrociclón se montó la plataforma experimental en el laboratorio de procesamiento de minerales. El equipo de trabajo se muestra en la **Figura 15**. Se construyó una estructura metálica para instalar de manera vertical el hidrociclón y que sirva de soporte. El desarrollo experimental se dividió en pruebas de una fase (solo agua) y dos fases (agua y mineral).



Figura 15. Plataforma experimental (Elaboración propia).

El sistema de trabajo consta de:

1. Hidrociclón con su carcasa
2. Variador de frecuencia
3. Bomba centrífuga
4. Manómetro
5. Agitador
6. Soporte metálico
7. Estanque
8. Mangueras

La bomba centrífuga permitió el funcionamiento de todo el sistema el cual fue conectado a través de mangueras. En la **Figura 16** se observan de manera más detallada algunos equipos.



Figura 16. Equipo 2 variador de frecuencia ,3 bomba centrífuga,4 manómetro y 5 agitador, respectivamente (Elaboración propia).

Las condiciones de operación para llevar a cabo el desarrollo experimental se muestran en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Condiciones de operación.

Parámetros	Unidad de medida
Presión	Bar
Frecuencia	Hertz
Velocidad	m/s
Volumen estanque	L
Concentración	g/L
Flujos	mL/s
Tiempo	S

Experimentos de una fase

Las primeras pruebas experimentales que se llevaron a cabo fueron con agua, primero se le agregó agua de grifo a temperatura ambiente en el estanque, se agregó un volumen de 30 L, luego se hizo funcionar el sistema y se observó su funcionamiento, se buscaba que el flujo de la descarga fuera tipo spray, por lo que en base a eso se fueron modificando las variables, tales como la frecuencia, la cual hacía variar la presión y su a vez los flujos, una vez que se cumplió la condición principal, se fijaron los parámetros y se hizo funcionar el equipo durante diferentes tiempos para comprobar si

el efecto se perdía con un prolongado uso de tiempo del sistema y a su vez para la estabilización del sistema. Las condiciones de operación y los parámetros obtenidos se muestran en la **Tabla 5**, donde la frecuencia, la presión y el volumen fueron parámetros constantes.

Tabla 5. Condiciones de operación.

Parámetros	Especificaciones
Presión	2.65
Frecuencia	50
Volumen	30
Tiempo	16
Volumen O	275
Volumen U	555
Flujo O	17.5
Flujo U	34.69
Flujo total	52.19

Experimentos de dos fases

Para el experimento de dos fases, se utilizó agua y un mineral, las primeras pruebas fueron realizadas con cuarzo, el cual fue molido y tamizado, logrando un tamaño de partícula menor a 20 μm , las cuales sirvieron para analizar el comportamiento del sistema con mineral, con los parámetros especificados anteriormente y así obtener los primeros resultados preliminares que involucraran dos fases. El procedimiento para esta etapa es el siguiente: se agrega el mineral al estanque y este se mezcla con un agitador, una vez unificadas ambas fases se inicia el funcionamiento del resto de los equipos, donde la suspensión circula por todo el sistema, entra al hidrociclón y luego es separada en dos corrientes, antes de tomar las muestras se da tiempo para que el sistema se estabilice por lo que se espera entre 5 y 10 minutos, luego de eso es posible llevar a cabo todas las pruebas necesarias, para

la toma de muestras se utilizaron vasos precipitados donde se tenía uno para *overflow*, *underflow* y para ambas salidas juntas. Este mismo procedimiento se hizo para las pruebas con bentonita, donde se tenían dos escenarios de trabajo, las condiciones de trabajo se muestran en la **Tabla 6**, donde el parámetro de variación es la concentración, lo cual servirá de comparación para analizar el comportamiento del hidrociclón. Para la obtención de cada corriente, se tomaron muestras de 16 segundos para cada salida, luego de eso se calculan los flujos, la velocidad y otros parámetros que se especificarán más adelante, los cuales servirán para el análisis de resultados que se verá en el capítulo 5.

Tabla 6. Condiciones de operación para ambos escenarios.

Parámetros	Escenario 1	Escenario 2
Concentración [g/L]	1	0.5
Masa (g)	30	15
Presión [B]	2.65	2.65
Frecuencia [Hz]	50	50
Volumen [L]	30	30

Desarrollo computacional

El desarrollo de la simulación se hace en el software *Ansys*, ocupando el servidor del departamento y trabajando con 20-30 núcleos. Se inicia en *Workbench*, este consta de tres etapas, la geometría, mallado y la simulación en *Fluent*, las cuales se desarrollan de manera consecutiva, las cuales se detallarán más adelante, en la **Figura 17** se muestra la interfaz de *Workbench*.

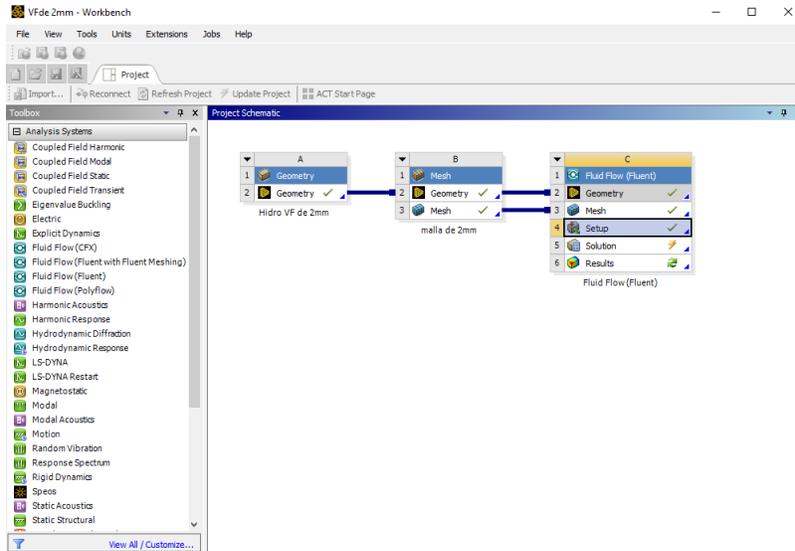


Figura 17. Interfaz *Workbench*.

Geometría

La creación de la geometría es el primer paso del programa, la cual se desarrolla en *Workbench SpaceClaim*, se crea el hidrociclón con un diámetro de 10 mm, haciendo un boceto en 2D y luego este se pasa a 3D. Una vez creada la geometría, se define como un fluido y se puede pasar a la siguiente etapa de mallado. En la **Figura 18** se observa el boceto (a) a través de un plano y el minihidrociclón (b) desde una vista trimétrica, izquierda y frontal, respectivamente.

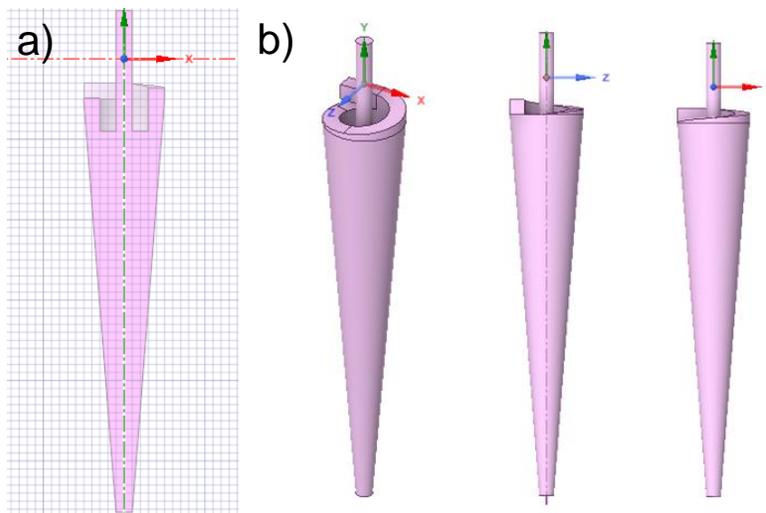


Figura 18. a) Boceto minihidrociclón. b) hidrociclón en 3D.

Mallado

En esta sección se le crea una malla al hidrociclón en la sección de *mesh* del programa, lo primero que se hace es dividir la figura en volúmenes pequeños con la finalidad de obtener una malla de mejor calidad.

Para determinar el tipo de malla con la que se iba a trabajar se debe tomar en cuenta la geometría, la complejidad del flujo y los recursos computacionales. En este caso se trabaja con una malla semiestructura compuesta principalmente por hexaedros, esta era adecuada por el tipo de geometría donde esta tiene componentes regulares e irregulares, obteniendo mallas estructuradas en zonas más ordenadas y en zonas más irregulares para adaptarse mejor a la forma se usan no estructuradas. (García-Cuevas et al., 2020).

En base a esta elección es que permitió obtener una malla de buena calidad, siendo eficiente y precisa, en la **Figura 19** se observa que la calidad de la malla es adecuada, donde predomina una alta calidad ya que mirando la escala se tienen elementos correspondientes a los colores que representan una calidad superior, donde la calidad más alta se presenta en la parte interna del hidrociclón.

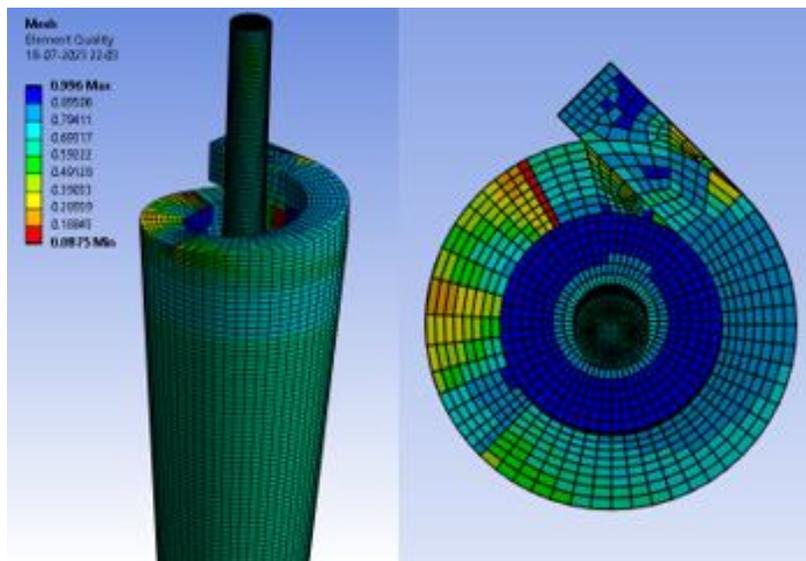


Figura 19. Calidad de la malla.

Para la determinación de la cantidad de elementos, se tomó en consideración el estudio base de nuestra investigación y se complementó con otro estudio acerca del desempeño de hidrociclones con CFD. Se analiza la independencia de la malla para

garantizar que los resultados de las simulaciones sean independientes del número de elementos de la malla, donde se consideran mallas con diferentes números de elementos poliédricos que van desde 1×10^5 hasta 7.5×10^5 . La evaluación de la convergencia se basó en la caída de presión total, flujos y desbordamiento (Vega, Design and optimisation of mini-hydrocyclones for the separation of particles in the micron size range, 2019). Considerando el tipo de malla que se compone por elementos hexaédricos y tomando también como referencia el trabajo de (Cogollo, 2020) donde se tiene el mismo tipo de elementos y que se trabajó con una malla de 505 100 elementos, es que determina trabajar con un número cercano a los 500 000 elementos.

Finalmente, en nuestro caso la malla cuenta con 498 878 elementos y 510 901 nodos. En la **Figura 20** se puede observar el mallado desde una vista frontal.

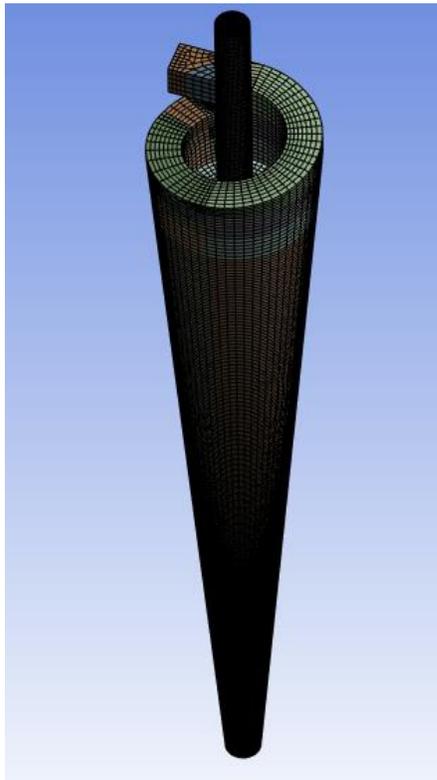


Figura 20. Malla hidrociclón

Fluent

Antes de comenzar esta etapa, en el paso anterior se deben haber definidos las entradas y salidas para poder pasar a la siguiente etapa. En esta sección se deben

definir ciertos parámetros, condiciones, modelos, entre otros, para poder simular el minihidrociclón. En la **Figura 21** se observa el inicio de *Fluent*.

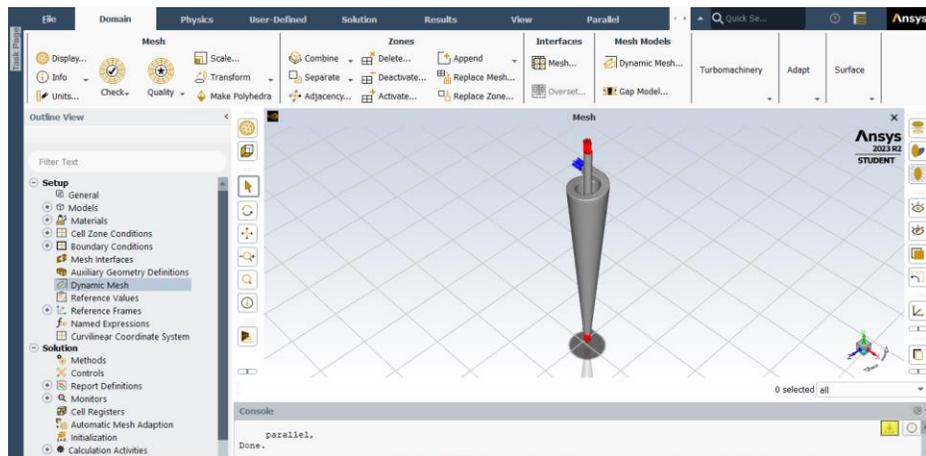


Figura 21. Interfaz *Fluent*.

Se debe seguir una cierta cantidad de pasos, lo primero que se debe intervenir es *setup* y finalmente en *solution*, Cabe aclarar que se especifican los parámetros seleccionados y los que no se detallan son los datos dados por el programa.

1. Setup

1.1 Materiales

Lo primero que se debe hacer es agregar los materiales, el programa trae por defecto el aire y se agrega agua líquida, para trabajar con ambos.

1.2 General

Se debe seleccionar la gravedad, y la aceleración gravitacional de 9.81m/s^2 en el eje y , además se selecciona el tiempo transiente.

1.3 MODELOS

Se deben seleccionar los modelos, en este caso se trabaja con dos: multifase; volumen de fluido (VOF) y turbulento; *Reynolds stress model* (RSM).

En el modelo multifase se ven involucradas múltiples fases, en este caso agua y aire por lo que se analizan las interacciones y comportamientos que tienen en el sistema, mientras que el modelo turbulento nos permite simular y predecir el comportamiento de flujos turbulentos.

Modelo VOF

Este modelo es utilizado en la simulación de flujos multifásicos lo que nos permite resolver la dinámica de interfaces entre los fluidos. Este es ampliamente utilizado en la interacción fluido-fluido, fluido-sólido, fluido-gas.

Modelo RSM

Este modelo nos permite determinar cómo afectan las variaciones en el transporte de cantidad de movimiento y energía. Pertenece al modelo Reynolds-Averaged Navier Stokes (RANS), donde el carácter turbulento del fluido es promediado en el tiempo, es comúnmente empleado en ingeniería. RSM resuelve una ecuación de conservación para cada componente del tensor esfuerzo de Reynolds y una para la tasa de disipación.

En el primero se definen las fases, la primaria es agua y la secundaria es aire, también se define el coeficiente de tensión superficial de 0.072 N/m, constante para todo el proceso. Para el segundo modelo se toman los valores entregados. Ambos modelos se muestran en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

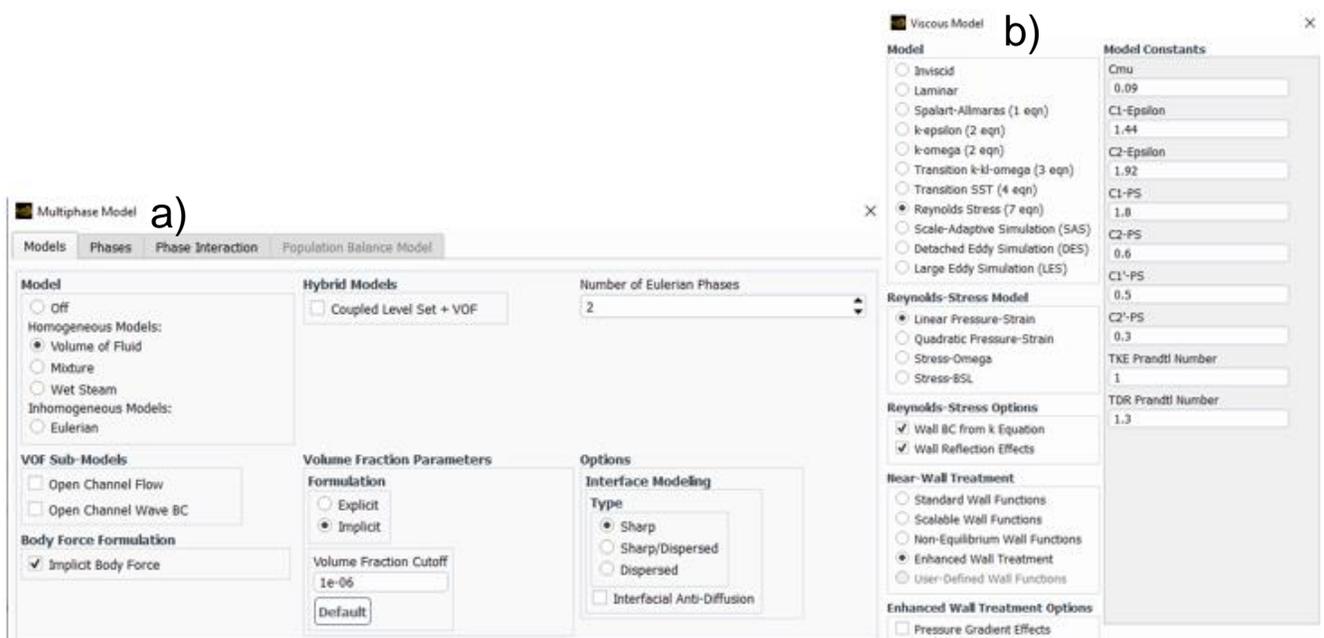


Figura 22. Modelo multifásico a) y viscoso b).

1.4 Condiciones de borde

Luego se eligen las condiciones de borde, de la entrada y las salidas, se especifica la velocidad para la entrada de 12.968 m/s, la cual se obtiene de las pruebas experimentales. Para la entrada y las salidas, se especifica el método de intensidad y diámetro hidráulico, con un diámetro hidráulico de reflujo es 0.002 m, Los parámetros para ambas salidas fueron los mismos. La presión de salida es a presión atmosférica. Se considera un *backflow* del aire en las salidas, donde se define una fracción volumétrica de 1. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se observan estas condiciones.

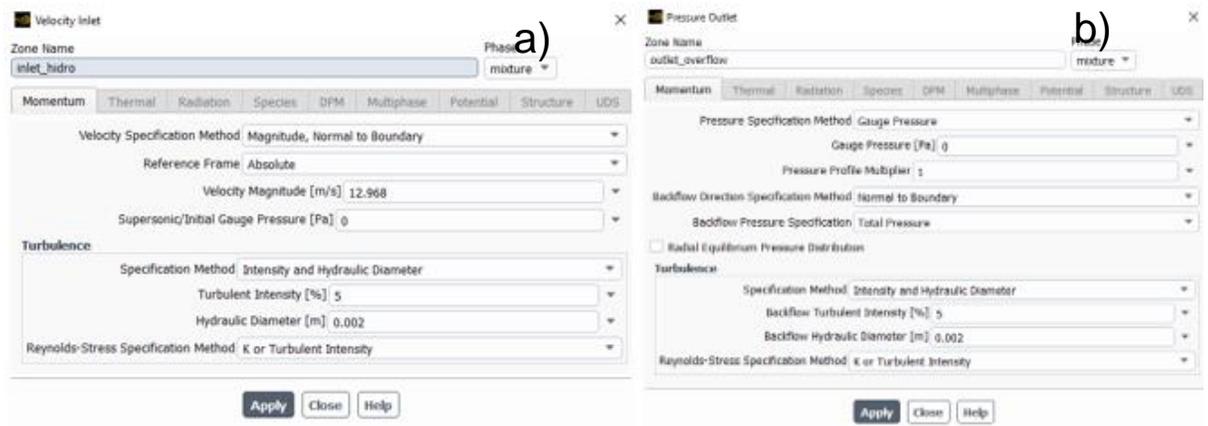


Figura 23. Condiciones de borde de entrada (a) y salida (b).

2. Solución

2.1 Métodos

Se deben seleccionar los métodos, que se presentan en la **Tabla 7.** Además, se selecciona, *Warpet-Face gradient correction*

Tabla 7. Métodos.

<i>Pressure velocity coupling</i>	
<i>Scheme</i>	<i>Simple</i>
<i>Spatial discretization</i>	
<i>Gradient</i>	<i>Green-Gauss Node based</i>
<i>Pressure</i>	<i>PRESTO!</i>

<i>Momentum</i>	<i>Second Order Upwind</i>
<i>Volumen fraction</i>	<i>Compressive</i>
<i>Turbulent Kinetic Energy</i>	<i>Second Order Upwind</i>
<i>Turbulent Dissipation Rate</i>	<i>Second Order Upwind</i>
<i>Reynolds Stresses</i>	<i>Second Order Upwind</i>

2.2 Controles

Los valores utilizados fueron los que nos arrojaba el programa, se muestran todos ellos en la **Tabla 8**.

Tabla 8. Controles.

<i>Pressure</i>	0.3
<i>Density</i>	1
<i>Body Forces</i>	1
<i>Momentum</i>	0.7
<i>Volumen Fraction</i>	0.5
<i>Turbulent kinetic Energy</i>	0.8
<i>Turbulent dissipation Rate</i>	08
<i>Turbulent viscosity</i>	1
<i>Reynolds Stresses</i>	0.5

2.3 Monitores: Monitores de residuos

Para el monitoreo se seleccionan las ecuaciones de continuidad y velocidad con un criterio de convergencia de $1e-5$ y $1e-6$.

2.4 Inicialización

En métodos de inicialización se selecciona: *Standard Initialization*, se calcula desde la entrada, los valores iniciales entregados por el programa se muestran en la **Tabla 9**.

Tabla 9. Valores iniciales.

<i>Gauge pressure</i>	0
<i>X velocity</i>	12.968
<i>Y velocity</i>	9.84e-15
<i>Z velocity</i>	5.50e-29
<i>Turbulent Kinetic Energy</i>	0.6306
<i>Turbulent Dissipation Rate</i>	587.7876
<i>Air volumen fraction</i>	0

2.5 Actividades de cálculo

Se agrega cada cuantos segundos se guarda el archivo de datos, en este caso cada 0.005 segundos.

2.6 Ejecución de cálculo

Finalmente, para ejecutar el cálculo, se configura en ajustes y el avance de tiempo que se muestran en la

Tabla 10 y 11.

Tabla 10. Ajustes.

Tamaño de paso de tiempo mínimo	1e-7
Tamaño de paso de tiempo máximo	0.0001
Factor de cambio de paso mínimo	0.5
Factor de cambio de paso máximo	1.2

Tabla 11. Parámetros para ejecución de cálculo.
Avance de tiempo

Tipo	Adaptado
Método	Específico multifásico
Método de especificación de duración	Tiempo total
Parámetros	
Tiempo total	0.1
Número de corriente global	0.2
Número de paso de tiempo fijo	1
Tamaño de paso de tiempo inicial	1e-7
Iteraciones máximas/paso de tiempo	20
Intervalo de informe	1
Intervalo de actualización del perfil	1
Intervalo de actualización de tamaño de paso de tiempo	1

5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este capítulo se presentan los resultados y análisis de las pruebas experimentales y de la simulación realizada.

Pruebas experimentales

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las pruebas experimentales del escenario 1 y escenario 2, correspondientes a una concentración de 1g/L y 0.5g/L respectivamente.

En la realización de las pruebas los parámetros a considerar fueron: alimentación inicial, alimentación de *overflow* y *underflow*, *overflow* y *underflow*. Como se comentó anteriormente se trabajó con dos escenarios.

Durante los experimentos se midieron los flujos para cada parámetro mencionado, en la **Tabla 12** se observan los flujos para cada escenario, se puede reconocer que no existe una variación determinante para cada concentración, pero si podemos mencionar que con la segunda concentración el balance es exacto.

Tabla 12. Flujos obtenidos para cada concentración en mL/s.

	1 g/L	0.5 g/L
Alimentación	51.67	51.88
Flujo O	17.19	17.19
Flujo U	34.48	34.69
Balance	0.21	0.00

En la **Tabla 14 y 14** se observa un resumen de los resultados para el escenario 1 y 2, respectivamente. Para cada uno de ellos se trabajó con 3 muestras, las cuales se especifican como prueba 1, 2 y 3, los resultados corresponden a las concentraciones desconocidas obtenidas de las lecturas tomadas por el turbidímetro.

Para facilitar la comprensión en esta sección se muestra un resumen de los resultados obtenidos. De forma completa se enseñan en el **Anexo B** y **Anexo C**, correspondiente al escenario 1 y 2, respectivamente. De cada parámetro se tomaron cinco lecturas, y a

su vez para todos los parámetros esto se repitió dos veces. Finalmente se trabaja con el promedio final calculado.

Se visualiza para ambos casos que la primera lectura de la alimentación es levemente superior en la primera prueba, esto pudo deberse a la cantidad de flujo que salía y que el sistema no se encontraba estable, mientras que en las otras dos pruebas los valores nos presentan grandes variaciones, este comportamiento se repite en ambos escenarios, lo que nos indica prácticamente valores iguales.

Tabla 13. Lectura obtenida del turbidímetro para cada prueba.

Escenario 1 (NTU)			
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Alim inicial	419	348.2	354.4
Alim O y U	320	306.9	296.7
<i>Overflow</i>	208	217.4	217.7
<i>Underflow</i>	368.2	354.4	357.9

Tabla 14. Lectura obtenida del turbidímetro para cada prueba.

Escenario 2 (NTU)			
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Alim inicial	134.2	135.2	136
Alim O y U	118.8	121.6	121.9
<i>Overflow</i>	90.43	90.01	89.78
<i>Underflow</i>	135.2	134.9	135.1

Una vez realizadas todas las pruebas y obtenidos todos los promedios, se procedió al cálculo de las concentraciones a partir de la **ecuación 6**, las concentraciones obtenidas se muestran en la **Tabla 15** y en el **Anexo D** se muestra un ejemplo de cálculo para la concentración.

Tabla 15. Concentraciones en g/L para escenario 1 y 2.

Parámetros	Escenario 1			Escenario 2		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3
[Alim inicial]	1.43	1.25	1.27	0.58	0.59	0.59
[Alim O y U]	1.18	1.14	1.11	0.53	0.54	0.54
[<i>Overflow</i>]	0.82	0.86	0.86	0.43	0.42	0.42
[<i>Underflow</i>]	1.28	1.27	1.28	0.59	0.59	0.58

Se observa que las concentraciones obtenidas no presentan oscilaciones significativas por lo que se decide calcular el promedio y trabajar con este, y así se obtienen los parámetros que permitieron analizar el rendimiento del hidrociclón. Los resultados de cada prueba se encuentran en el anexo en la **Tabla 24** y **Tabla 28** para cada escenario respectivamente. La **Tabla 16** corresponde a un resumen del cálculo de cada parámetro.

Una mayor concentración de partículas en el *underflow* está asociada a que las partículas más pesadas van hacia la pared por efecto de la aceleración centrífuga saliendo por la corriente inferior, la eficiencia de partición se genera por una diferencia en las corrientes, por la corriente de *overflow* están saliendo las partículas más livianas, se tiene que alrededor de un 40-45 % de partículas están por debajo de los 7 μm .

De los parámetros obtenidos podemos decir que el hidrociclón se comporta de la manera esperada, el escenario 1 recupera un 75 %, este logra recuperar un 1% más respecto al escenario 2,

Analizando la relación de concentración se tiene que ambos tienen un valor mayor a 1, lo que indica una mayor concentración en la corriente de salida comparada con la corriente de entrada, la relación de concentración para el escenario 1 es 0.025 mayor que la del escenario 2, lo que indica que en el escenario 1 se concentra más, por ende, trabajando a una concentración de 1 g/L el hidrociclón tiene mejor eficiencia de separación.

Pero eso no significa que con una concentración menor no se obtengan resultados satisfactorios, en este caso la variación de la concentración no afectó el rendimiento del mini hidrociclón y se logró una alta eficiencia de separación.

Tabla 16. Resumen resultados.

Parámetros	Escenario 1	Escenario 2
OF [g/s]	0.015	0.007
UF [g/s]	0.044	0.020
ALIM [g/s]	0.058	0.028
R [%]	75	74
Relación conc	1.117	1.092
Conc Alim [g/L]	1.131	0.534

Simulación en Ansys Fluent

A continuación, se presentarán los resultados obtenidos de la simulación en Ansys Fluent.

En la  No se encuentra el origen de la referencia. se observa la representación gráfica de las ecuaciones de continuidad y velocidad, las cuales permiten observar el comportamiento que se tiene en el transcurso de la simulación.

Se realizan iteraciones para alcanzar la convergencia de la solución, a partir del criterio de convergencia se puede determinar si la solución alcanzó el estado estacionario y estable. Se comienza a trabajar con criterio de convergencia de $1e-5$, a medida que la simulación iba avanzando este iba disminuyendo, por lo que se modificó a $1e-6$, con este valor el residuo comenzó a permanecer estable, disminuyendo sus oscilaciones, y así se logró la estabilización del sistema.

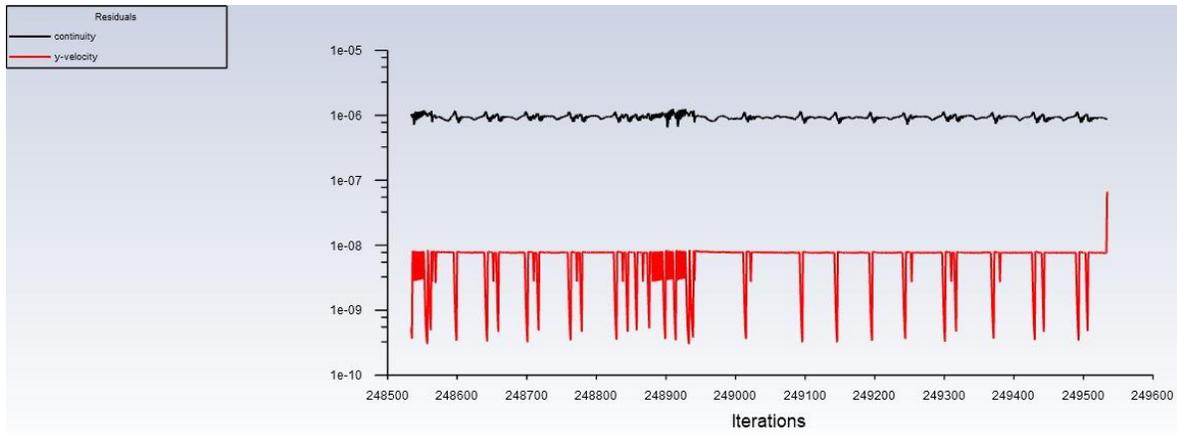


Figura 24. Monitoreo residuales, continuidad y velocidad.

En la **Figura 25** se observan los flujos de entrada y salidas de la simulación de manera gráfica y en la **Tabla 17** se especifican los valores obtenidos.

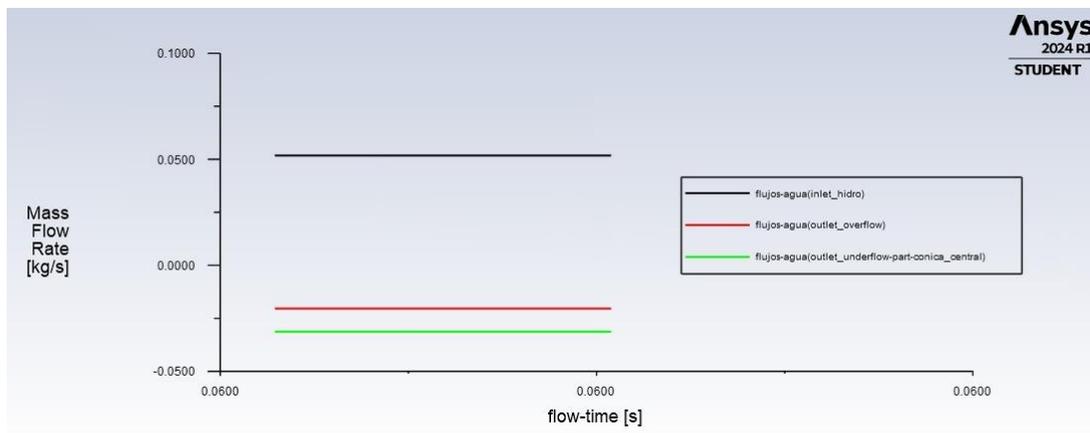


Figura 25. Representación de flujos en simulación.

En la **Tabla 17** se presentan los flujos obtenidos experimentalmente y los obtenidos a partir de la simulación lo cual nos permitirá comparar ambas situaciones.

Tabla 17. Flujos del procedimiento experimental y de la simulación.

Flujos	Flujo Experimental	Flujo Simulación
	[mL/s]	[mL/s]
Alimentación	51.77	51.78
<i>Overflow</i>	17.30	20.42
<i>Underflow</i>	34.58	31.30
Balance	0.10	0.06

Comparando los resultados de las pruebas experimentales y de la simulación, se puede decir que, si existe una diferencia para cada parámetro, en la alimentación se tiene una diferencia de 0.01 mL/s, y la de *overflow* y *underflow* es inferior a 3.30 mL, en ambos casos se tiene un balance cercano 0, el cual es buen indicador. Mediante esta simulación es que se logra verificar la precisión de las predicciones obtenidas, haciendo factible su uso para futuras modelaciones de mini hidrociclones.

En la **Figura 26** se muestra la presión en el plano yz, y cómo se refleja en hidrociclón durante la simulación, donde en las zonas donde se tienen colores azules la presión es más baja y a medida que se intensifica el color se tiene una mayor presión.

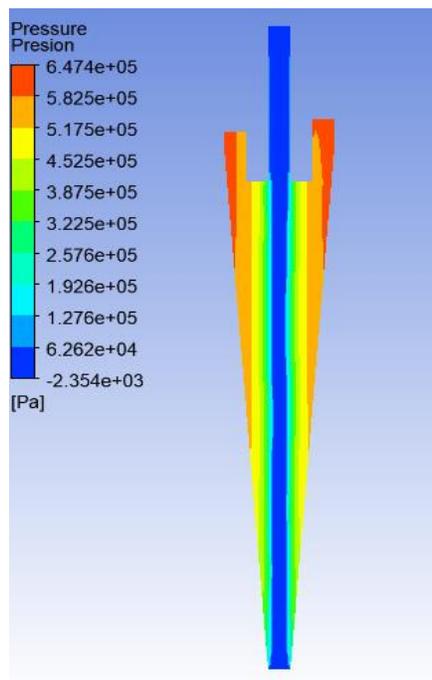


Figura 26. Presión simulada.

En la **Tabla 18** se muestra la presión con la que se trabajó en la etapa experimental y la obtenida de la simulación, se observa que se obtuvo una presión mayor en la simulación que en la experimental. La presión real sería considerada la obtenida de la simulación, tomando como referencia nuestro estudio base donde se trabajó con presiones que variaban entre 6 y 7 Bar, esto debido a que los hidrociclones con buscadores de vórtices pequeños requieren alta presión en el sistema.

Es posible que en este sistema experimental no se haya podido llegar a una presión más alta debido a la bomba centrífuga con la que se trabajó, la cual era pequeña y no permitía aumentar la velocidad y la potencia de la bomba por lo que no se logró trabajar a una mayor presión, se espera que cambiando a una bomba de mayor potencia se logre la presión requerida.

Tabla 18. Presión obtenida en Bar.

Experimental	Simulación
2.65	7.20

La columna de aire hace referencia a la presencia de aire dentro del flujo de líquido que entra en el hidrociclón, en la **Figura 27** se puede observar a través de un plano como circula el aire a través del hidrociclón lo cual es de suma importancia. La formación de esta estuvo entre los 0.035 y 0.045 segundos aproximadamente.

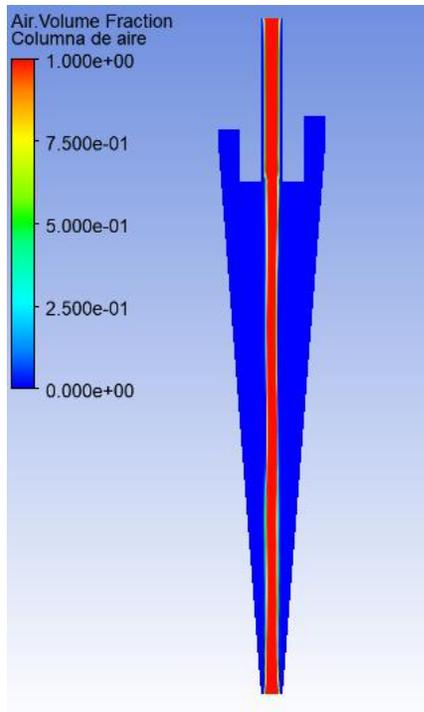


Figura 27. Columna de aire.

Comparación de resultados experimentales con otra fuente

A continuación, en la **tabla 19**, se presenta otra fuente de estudio realizada en el departamento de ingeniería metalúrgica, donde se llevó a cabo el mismo procedimiento y se realizaron los mismos experimentos con bentonita, pero en este caso hubo una variación en la geometría del hidrociclón, donde el diámetro del *vortex finder* fue de 2.6 mm, que se presenta como minihidrociclón B y el minihidrociclón A con un diámetro de 2 mm que corresponde a esta investigación.

Tabla 19. Comparación resultados para minihidrociclón A y B.

Mini hidrociclón	A		B	
Concentración inicial [g/L]	0.5	1.0	0.5	1.0
Recuperación	74%	75%	54%	55%
Relación de concentración	1.09	1.12	1.14	1.17

La variación del diámetro de *vortex finder* de un hidrociclón puede tener efectos importantes en su funcionamiento, influyendo en la eficiencia de separación y la recuperación de partículas.

Comparando ambas fuentes, podemos observar que el hidrociclón tipo A tiene una recuperación considerablemente superior a la del tipo B, se recupera un 20% más. Analizando la relación de concentración se tiene que el tipo B concentra 0.05 más respecto al hidrociclón tipo A. La modificación de las concentraciones al trabajar con ambos hidrociclones no trae consigo diferencias significativas, sin embargo, la modificación del diámetro *de vortex finder* en este escenario conduce a una baja recuperación. Por lo que, no se sustenta trabajar con el hidrociclón tipo B. Por el contrario, el hidrociclón tipo A demuestra un mejor rendimiento y eficiencia, lo que lo convierte en la opción más favorable.

6. CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES

En esta investigación sobre la eliminación de partículas finas de bentonita mediante hidrociclones, se evaluó el impacto de diferentes concentraciones en la eficiencia del proceso.

Los resultados mostraron que trabajando con una concentración de 1g/L se logra una alta recuperación de un 75%, siendo un 1% más eficiente que al trabajar con una concentración de 0.5 g/L. Se tiene que ambos escenarios tienen que el valor de la relación de concentración es mayor a 1. La concentración puede afectar significativamente el rendimiento y la eficiencia de un hidrociclón, pero en este caso y al trabajar con bentonita esto no se vio reflejado.

Según lo estudiado trabajando con ambas concentraciones el hidrociclón trabaja eficientemente y también se argumenta que a medida que aumenta la concentración el rendimiento del hidrociclón mejora ligeramente.

Al analizar los resultados obtenidos experimentalmente y los del modelado en CFD, se obtiene una gran similitud de los flujos obtenidos entre ambos. Los resultados de la simulación presentan un menor error que los experimentales. Debido a esto es que se logra la validación de la simulación, ya que hay un alto grado de precisión, lo que nos brinda confianza en esta herramienta y hace factible su uso para futuros proyectos.

Al modificar el diámetro de *vortex finder* del hidrociclón se obtiene una mayor concentración de partículas, pero la recuperación se ve afectada negativamente, esto sugiere que la elección del hidrociclón y los cambios en la geometría afectan significativamente el rendimiento del proceso. Gracias a la validación del modelo es posible el uso del software para evaluar el efecto que tiene en el funcionamiento del hidrociclón.

Se recomienda para futuras investigaciones, la realización de simulaciones con partículas para obtener un análisis más detallado del proceso. Evaluar el rendimiento de diferentes tipos de hidrociclones, como los cambios en su geometría afectan su eficiencia. Se sugiere trabajar con diferentes hidrociclones en paralelo en un sistema y así analizar de manera conjunta su rendimiento y determinar si ello puede mejorar la

eficiencia del proceso, para que en un futuro se pueda implementar a gran escala en las industrias.

7. BIBLIOGRAFIA

- Academy, L. (s.f.). CFD (Computational Fluid Dynamics). Obtenido de <https://lebalap.academy/f1/simulacion-cfd/>
- Allende-Seco, R., Hernando, M. M., & Garrido, M. M. (2022). *Reseña histórica de la actividad minera y metalúrgica en Chile*. Santiago de Chile.
- Andrade, L., Covelo, E., & Vega, F. (2005). Uso de arcillas especiales para depuración de aguas residuales. Recuperado el 17 de Mayo de 2023, de <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642005000100002>
- Antezana, M. (2019). ¿Qué es una curva de calibración?
- Bello, J. P., & Balmaseda, J. R. (1996). *Caracterización y estudio reológico de una bentonita colombiana*. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y vidrio. Vol.35 Núm. 5.
- Bernal, R. G., & Jiménez, J. C. (2021). *Modelación y construcción de un hidrociclón*.
- Cilliers, J. J., & Harrison, S. (1997). *The application of mini-hydrocyclones in the concentration of yeast suspensions*.
- Cogollo, M. R. (2020). *Estudio del desempeño de hidrociclones mediante la aplicación de CFD*.
- de Pablo, L. (1964). *Las arcillas. I. clasificación, identificación, usos y especificaciones industriales*.
- Departamento Metalúrgica, D. d. (1983). *Introducción a la Ingeniería metalúrgica, Curso para estudiantes de enseñanza media*.
- Déribéré, M., & Esme, A. (1952). *las arcillas coloidales y sus usos*. Madrid: Editorial Aguilar.
- ESSS. (2016). *Dinámica de fluidos computacional ¿Qué es?* Recuperado el 15 de Junio de 2023, de <https://www.esss.co/es/blog/dinamica-de-fluidos-computacional-que-es/>

- Fletcher, D. F. (2022). *The future of computational fluid dynamics (CFD) simulation in the chemical process industries.*
- García-Cuevas, L. M., Megías, A. G., García, R. N., & Igeño, P. M. (2020). *Mecánica de fluidos computacional: tipos de mallas y calidad de mallado.*
- González, A. (2018). *Historia de la dinámica de fluidos computaciones (CFD).*
- Hao, M.-x., Zhang, Y.-h., Huang, Y., Wang, H.-l., Li, H., Du, J.-q., . . . Wu, J.-w. (2022). *Effect of particle self-rotation on separation efficiency in mini-hydrocyclones.* China.
- He, F., Wang, H., Wang, J., Li, S., Fan, Y., & Xu, X. (2020). *Experimental study of mini-hydrocyclones with different vortex finder depths using Particle Imaging Velocimetry.*
- He, I., Ji, L., Sun, X., Chen, S., & Kuang, S. (2022). *Investigation of mini-hydrocyclone performance in removing small-size microplastics.*
- Herbert, J. H. (2006). *Introducción a los fundamentos de la tecnología minera.*
- Herbert, J. H. (2017). *Introducción a la Minería. Vol I, Conceptos, tecnologías y procesos.* Madrid.
- Hoyos de Castro, A. (1944). *La bentonita y sus aplicaciones.* Madrid: Consejo Superior de Invetigaciones Científicas.
- Lagos, G. E. (s.f.). *Capítulo 6: Minería, minerales y desarrollo sustentable en Chile.* Santiago, Chile.
- Lastarria, W. (1892). *Introduccion a la metalurgia general.*
- Liu, L., Sun, Y., Kleinmeyer, Z., Habil, G., Yang, Q., Zhao, L., & Rosso, D. (2022). *Microplastics separation using stainless steel mini-hydrocyclones fabricated with additive manufacturing.*
- Lv, W. j., Huang, C., Chen, J.-q., Liu, H.-l., & Wang, H.-l. (2015). *An experimental study of flow distribution and separation performance in a UU-type mini-hydrocyclone group.*

- Meneses, P. C. (2018). *Historia hidrociclón*, Scribd.
- MGraw-Hill kogakusha, L. (1974). *Principles of extractive metallurgy*.
- Miranda, E. O. (2004). *Fenomenos ondulatorios en un hidrociclón*.
- Osorio, J., Aredes, M., Zapata, O., Alves, F., & Ciro, H. (2012). *Una revisión acerca de la dinámica de fluidos computacionales (CFD) en instalaciones avícolas*.
- Picasso, G., & Sun Kou, M. d. (2008). Aplicaciones tecnológicas de las arcillas modificadas. Obtenido de http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1810-634X2008000100007&script=sci_arttext&lng=pt
- Rodríguez, L. D., & Torrecillas, R. (2002). *Arcillas cerámicas: una revisión de sus distintos tipos, significados y aplicaciones*. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio Vol. 41 Num. 5.
- Tian, J., Ni, L., Song, T., Olson, J., & Zhao, J. (2018). *An overview of operating parameters and conditions in hydrocyclones for enhanced separations*.
- Vallejos, J. P. (1994). *Historia y minería en Chile: Estudios y fuentes*. Santiago: Universidad de Santiago.
- Vega, D. (2019). *Design and optimisation of mini-hydrocyclones for the separation of particles in the micron size range*.
- Vega, D. (2020). *Hidrociclones: Diseño y modelación*.
- Vega-García, D., Brito-Parada, P., & Cilliers, J. (2018). *Optimising small hydrocyclone design using 3D printing and CFD simulations*.
- Vega-García, D., Brito-Parada, P., & Cilliers, J. (2020). *CFD modelling of particle classification in mini-hydrocyclones*.
- Villabeitia, L. G. (2016). *Caracterización de microhidrociclones*.
- Villalobos, D. A. (2017). *Simulación numérica de un hidrociclón utilizando dinámica de fluidos computacional*. Concepción, Chile.

Yanque Calachua, C. L. (2021). *Circuito de conminución de una planta de concentración*, Scribd.

8. ANEXOS

Anexo A

A continuación, se muestran todas las mediciones realizadas con el turbidímetro las cuales sirvieron para la realización de la curva de calibración.

Tabla 20. Mediciones disolución patrón.

NTU 1	NTU 2	NTU 3	NTU 4	NTU (prom)
562	555	558	556	557.75
443	434	438	436	437.75
371	366	368	367	368
277	270	273	271	272.75
172	166	169	167	168.5
102	99	100	100	100.25
60	55.5	57	56	57.125

Anexo B

En la **Tabla 21, 22 y 23**, se muestran los resultados de las pruebas experimentales del escenario 1, que corresponde a las lecturas tomadas por el turbidímetro de cada muestra para las tres pruebas realizadas.

Tabla 21. Resultados pruebas N°1 escenario 1.

Alim Inicial	Alim Over y Under		Overflow		Underflow		
NTU 1	NTU 1	NTU 2	NTU 1	NTU 2	NTU 1	NTU 2	
418	322	316	206	212	357	376	
418	325	313	203	215	358	378	
418	324	316	200	211	358	381	
420	325	319	204	215	360	375	
421	324	316	203	211	360	379	
Promedio	419	324	316	203.2	212.8	358.6	377.8
Promedio total		320		208		368.2	

Tabla 22. Resultados pruebas N°2 escenario 1.

	Alim Inicial	Alim Over y Under		Overflow		Underflow	
	NTU 1	NTU 1	NTU 2	NTU 1	NTU 2	NTU 1	NTU 2
	347	306	307	214	220	354	352
	346	309	307	214	220	356	352
	348	309	303	214	221	358	355
	349	309	303	217	216	353	355
	351	309	307	218	220	356	353
Promedio	348.2	308.4	305.4	215.4	219.4	355.4	353.4
Promedio total		306.9		217.4		354.4	

Tabla 23. Resultados pruebas N°3 escenario 1.

	Alim Inicial	Alim Over y Under		Overflow		Underflow	
	NTU 1	NTU 1	NTU 2	NTU 1	NTU 2	NTU 1	NTU 2
	353	295	293	217	220	358	355
	353	295	294	218	216	362	360
	358	296	295	217	217	356	358
	355	303	300	218	218	357	357
	353	295	301	218	218	359	357
Promedio	354.4	296.8	296.6	217.6	217.8	358.4	357.4
Promedio total		296.7		217.7		357.9	

En la **Tabla 24** **Tabla 28**. Parámetros calculados escenario 2. se muestran los parámetros calculados a partir de los resultados experimentales obtenidos para el escenario 1.

Tabla 24. Parámetros calculados escenario 1.

Parámetros	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Promedio	Desviación
Flujo O	0.017	0.018	0.018	0.017	0.00018
Flujo U	0.034	0.034	0.034	0.034	0.00018
Flujo total	0.051	0.052	0.052	0.052	0.00036
OF	0.014	0.015	0.015	0.015	0.00059
UF	0.044	0.044	0.044	0.044	0.00020
ALIM	0.058	0.059	0.059	0.058	0.00075
R	76%	74%	74%	0.75	0.00691
Relación conc	1.080	1.115	1.156	1.12	0.03776
Concentración A	1.12	1.13	1.14	1.13	0.00724

Anexo C

En la **Tabla 25, 26 y 27**, se muestran los resultados de las pruebas experimentales del escenario 2, que corresponde a las lecturas tomadas por el turbidímetro de cada muestra para las tres pruebas realizadas.

Tabla 25. Resultados pruebas N°1 escenario 2.

Alim Inicial	Alim Over y Under		Overflow		Underflow		
NTU 1	NTU 1	NTU 2	NTU 1	NTU 2	NTU 1	NTU 2	
135	119	118	90.6	89.4	137	133	
133	120	117	90.6	89	138	133	
134	121	118	90.9	89	137	134	
135	121	117	90.6	90.4	137	134	
134	120	117	90.7	93.1	137	132	
Promedio	134.2	120.2	117.4	90.68	90.18	137.2	133.2
Promedio total	118.8		90.43		135.2		

Tabla 26. Resultados pruebas N°2 escenario 2.

Alim Inicial	Alim Over y Under		Overflow		Underflow		
NTU 1	NTU 1	NTU 2	NTU 1	NTU 2	NTU 1	NTU 2	
133	121	119	88.9	88.1	133	133	
134	122	122	90.5	90.6	136	133	
136	123	120	90.3	90.8	137	135	
137	123	121	90.2	90.6	137	135	
136	124	121	90.3	89.8	135	135	
Promedio	135.2	122.6	120.6	90.04	89.98	135.6	134.2
Promedio total	121.6		90.01		134.9		

Tabla 27. Resultados pruebas N°3 escenario 2.

Alim Inicial	Alim Over y Under		Overflow		Underflow		
NTU 1	NTU 1	NTU 2	NTU 1	NTU 2	NTU 1	NTU 2	
135	120	120	89.5	90	134	135	
138	122	121	90	90.5	134	135	
137	124	120	90.5	90.3	135	136	
136	125	122	90.2	88.9	137	136	
134	123	122	90.1	90.3	133	136	
Promedio	136	122.8	121	90.06	89.5	134.6	135.6
Promedio total	121.9		89.78		135.1		

En la **Tabla 28** se muestran los parámetros calculados a partir de los resultados experimentales obtenidos para el escenario 2.

Tabla 28. Parámetros calculados escenario 2.

Parámetros	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Promedio	Desviación
Flujo O	0.017	0.017	0.017	0.017	0
Flujo U	0.035	0.035	0.035	0.035	0
Flujo total	0.052	0.052	0.052	0.052	0
OF	0.007	0.007	0.007	0.007	0.00002
UF	0.021	0.020	0.020	0.020	0.0002
ALIM	0.028	0.028	0.028	0.028	0.0002
R	74%	74%	74%	0.737	0.0010
Relación concentración	1.113	1.085	1.077	1.09	0.0189
Concentración A	0.54	0.53	0.53	0.534	0.0035

Anexo D

A continuación, se presenta un ejemplo del cálculo realizado a partir de la ecuación obtenida de la curva de calibración, para determinar la concentración desconocida de las pruebas experimentales. Se utiliza la Ecuación 6, mencionada anteriormente.

$$y = -0.0019 x^2 + 4.0387x + 75.193 \quad (\text{Ecuación 6})$$

A partir de los datos obtenidos de las lecturas del turbidímetro se obtienen los datos en NTU de: alimentación inicial, alimentación *underflow* y *overflow*, *overflow* y *underflow*. De los datos obtenidos en la **Tabla 21**, tomando el valor promedio de la alimentación inicial y reemplazando los datos en la Ecuación 7 se obtiene el resultado indicado en la Ecuación 8.

$$y = -0.0019(348.2)^2 + 4.0387(382.2) + 75.193 \quad (\text{Ecuación 7})$$

$$y = 1.25 \quad (\text{Ecuación 8})$$

Se siguió el mismo procedimiento para el cálculo de todas las concentraciones.

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Ingeniería Metalúrgica
Hoja Resumen Memoria de Título

Título: Estudio del impacto de la concentración en la eficiencia de mini hidrociclones para la eliminación de partículas finas de bentonita.
Nombre Memorista: Moira Isabel Peña Salas

Modalidad	Proyecto	Profesor(es) Patrocinante(s) Prof. Andrés Ramírez
Concepto		
Calificación		
Fecha	12.04.2024	
Prof. ^a Eugenia Araneda H.		Ingeniero Supervisor:
		Institución: Universidad de Concepción

Comisión (Nombre y Firma)	
Prof. Fernando Betancourt	Prof. Luver Echeverry

Resumen
<p>El presente estudio se enfocó en investigar el efecto de la concentración en la eficiencia de mini hidrociclones para la eliminación de partículas finas de bentonita.</p> <p>Mediante una serie de experimentos se evaluó cómo diferentes concentraciones de bentonita influyen en el rendimiento de los mini hidrociclones, se trabajó con dos escenarios: el primero a una concentración de 1 g/L el segundo a 0.5 g/L, evaluando la recuperación y concentración de partículas.</p> <p>Los resultados indicaron que al trabajar con una concentración de 1g/L, se obtuvo una eficiencia levemente superior a la de 0.5g/L. La variación de la concentración no condujo a cambios significativos para cada escenario en el rendimiento del hidrociclón.</p> <p>Mediante el uso de CFD, se buscó evaluar el comportamiento del minihidrociclón computacionalmente, a través del software de Ansys Fluent se logra la validación de los resultados experimentales, lo que genera confianza con el modelo.</p> <p>El éxito de esta investigación puede tener un impacto significativo en el proceso, ya que podría ser un precedente que permita la optimización de los procesos.</p>