

Propuesta de arreglo en la geometría de hidrociclones en la etapa de remolienda de la planta de piratas de Fresnillo PLC mediante simulación.

Zavala Puente R. D.^{1*}, Andrade Martínez J.², Alvarado Macías G.², Nava Gómez D.², Espinosa Serrano E.², Cruz Gaona R.¹, Rodríguez Torres I.¹, Torres Valle S.E.³, y Rosales Marín G.^{1,2}

¹ Instituto de Metalurgia UASLP. Av. Sierra Leona 550, Lomas 1 Sec., 78210 San Luis, S.L.P.

² Unidad Académica Multidisciplinaria Región Altiplano UASLP. Carretera Cedral km 5+600, Ejido San José de las Trojes C.P. 78700 Matehuala, S.L.P.

³ Fresnillo PLC. Proaño s/n, 99000 Fresnillo de González Echeverría, Zacatecas

a191104@alumnos.uaslp.mx

RESUMEN

En el procesamiento de minerales, las etapas de reducción de tamaño y clasificación juegan un papel crucial, ya que para extraer el mineral valioso es necesario liberarlo de la ganga o roca encajonante. Este proceso se lleva a cabo mediante eventos de fractura que fragmentan el mineral, seguido de una clasificación usualmente basada en hidrociclones, los cuales separan las partículas según los tamaños requeridos para la liberación óptima del mineral. En este estudio, se propone un arreglo geométrico de los hidrociclones para lograr una mayor eficiencia en la clasificación. Para tal fin, se realizó un muestreo en un circuito de remolienda de la planta de Piratas de Fresnillo PLC, en la etapa de clasificación para el diagnóstico de este a través de la determinación de los parámetros de operación. Se emplearon técnicas de tamizaje mediante equipo RO-TAP y Cyclosizer para obtener las distribuciones granulométricas de la alimentación y producto de a la batería de hidrociclones, así como las descargas de los flujos de finos(overflow) y los gruesos (underflow). Además, el modelo matemático para hidrociclones propuesto por Nageswararao programado en el Software MinProSim fue calibrado para identificar la influencia de los parámetros operativos y la geometría de la batería de hidrociclones en la clasificación. Se encontró que el reducir el diámetro del ápex a 1 ¼ de pulgadas genera un tamaño D_{80} de 0.082 mm en los gruesos lo cual, logra hacer más eficiente la etapa de remolienda.

PALABRAS CLAVE: *Modelo de Nageswararao, Hidrociclones, Simulación Matemática, Remolienda*

ANTECEDENTES

La clasificación “es un método de separación de mezclas de minerales en dos o más productos con base a la velocidad con la que las partículas caen en un medio fluido” (Heiskanen, como lo citó Wills, 2016), para el caso de los productos finos en medio líquido, considerando producto fino como aquel menor a 200 μm . El principio de clasificación reside sobre las fuerzas que interactúan en la partícula durante su sedimentación.

En caso de considerar una partícula esférica en un medio fluido ideal de tamaño infinito (Figura 2), con una densidad definida, se encuentra interactuando con tres fuerzas: la de la gravedad, con un vector positivo hacia abajo; fuerza de empuje, hacia arriba consecuente del desplazamiento del fluido, y una fuerza de arrastre hacia arriba. La velocidad terminal, viene dada por la ecuación de Stokes (Ecuación 2):

$$v_t = \frac{g d^2 (\rho_s - \rho_f)}{18 \eta} \quad (2)$$

donde “ v_t ”, es la velocidad terminal; “ g ”, la fuerza de gravedad; “ d^2 ”, el diámetro partícula al cuadrado; “ ρ_s ”, la densidad del sólido; “ ρ_f ”, la densidad del fluido; y “ η ” la viscosidad del fluido. La ecuación anterior describe el comportamiento de la partícula de manera que a una fuerte velocidad tangencial en relación con la velocidad del fluido se clasificará hacia los finos, y en contraparte, una menor hacia los gruesos; encontrándose también, que la densidad, pero mayormente el tamaño de partícula influye sobre la clasificación.

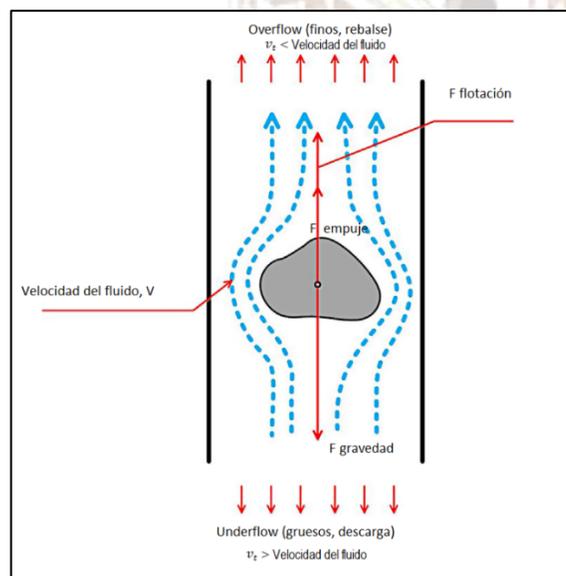


Figura 1. Esquema de las fuerzas que interactúan en una clasificación en un medio líquido. (Wills B A, 2016).

Principios de la clasificación en hidrociclones.

Los hidrociclones son clasificadores centrífugos con una estructura (Figura 2a y Figura 2b) que permite una selectividad en su clasificación, de tal manera que, la alimentación al mismo generan una fuerza centrífuga que conforma una espiral que es tangencial a las paredes del mismo, donde las partículas gruesas son descargadas por esta fuerza ejercidas en ello con la gravedad y las partículas finas tienen una salida debido a la espiral interna que se constituye por las mismas fuerzas centrífugas (Figura 2,b).

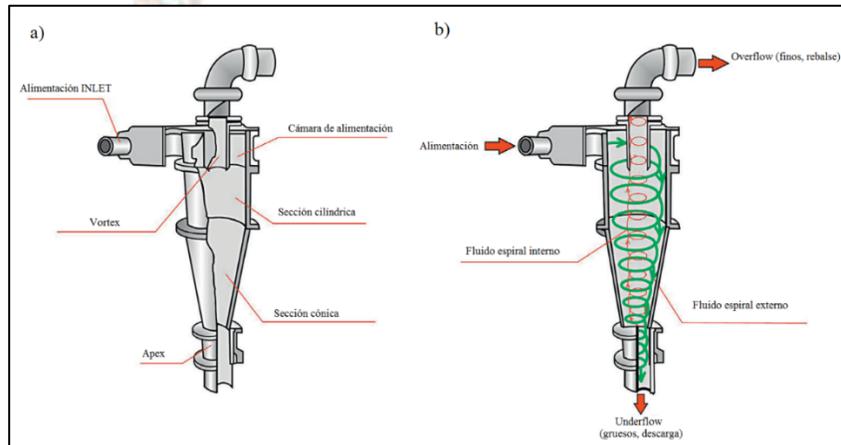


Figura 2. a) Estructura de un hidrociclón; b) Características físicas de clasificación dentro de un hidrociclón. (Wills B A, 2016)

Los hidrociclones logran la clasificación de partículas basándose en la diferencia de tamaño y densidad de estas a través de la fuerza centrífuga generada por un flujo tangencial de pulpa (mezcla de partículas sólidas y agua) en su interior. El proceso básicamente comienza cuando la pulpa ingresa al hidrociclón de forma tangencial, lo que genera un vórtice rotatorio dentro del cilindro. A medida que la pulpa gira, las partículas son sometidas a una fuerza centrífuga. Las partículas más grandes y pesadas (normalmente no liberadas o con mayor densidad) son empujadas hacia las paredes del hidrociclón, mientras que las partículas más pequeñas y ligeras (las que tienden a estar liberadas) permanecen cerca del centro del vórtice. Las partículas más grandes y pesadas se desplazan hacia el fondo del hidrociclón y son evacuadas por la boquilla inferior (descarga o "underflow") mientras que las partículas más finas y ligeras, que quedan atrapadas en el centro del vórtice, son expulsadas a través del tubo superior (descarga o "overflow").

El tamaño de las partículas clasificadas puede controlarse ajustando variables como la presión de entrada, el diámetro de los ciclones, el tamaño del vórtice o las dimensiones de las boquillas de descarga. Esto permite ajustar el corte de tamaño de separación según las necesidades del proceso.

Parámetros operativos del hidrociclón

Los parámetros que afectan el tamaño de corte (D50) de la clasificación de un hidrociclón (Austin y Concha, 1994)) son: a) variables de diseño; b) parámetros de material; c) de operación; y d) perturbaciones.

- a) Variables de diseño: El dimensionamiento de un molino es el que establece el comportamiento de su clasificación. Tenemos entonces que el diámetro es la variable de la que más depende. Por ejemplo, la separación de partículas pequeñas requerirá de un hidrociclón pequeño. Por otra parte, tenemos que los tamaños de alimentación, vortex y ápex, son los que afectan el tamaño de corte del hidrociclón. El D50 aumenta si se aumenta el diámetro del vortex y el área de alimentación y disminuye al aumentar el diámetro del ápex (Austin y Concha, 1994).
- b) Parámetros de material: La manera en la que viene dado el material se influye en cómo se presentará el tamaño de corte del mismo. Por ejemplo, se encuentran diferencias entre material mezclado y material compuesto.
- c) Variables de operación: Las variables de entrada y de salida son las que definen el comportamiento de clasificación, en un hidrociclón, mayormente estudiadas. En el caso de la entrada son el flujo de alimentación, la concentración y la presión. Se ha estudiado que la concentración de material, en relación con el flujo volumétrico, es la variable que más influye sobre la clasificación. Por otro lado, el flujo de alimentación aumentándose, pero manteniéndose constante con relación a las otras variables, disminuye el D50, no obstante, esto se pueda deber al aumento de la presión, ya que se ha encontrado (Trawinsky, como lo cita Austin y Concha, 1994) que en un aumento de la misma disminuye el D50.
- d) Perturbaciones: La principal perturbación que afecta la clasificación es la distribución granulométrica de entrada al hidrociclón. Se realizan ajustes para mantener constante el D50; otra son los cambios de proporción de componentes que son característicos de la mena.

Curva de eficiencia en los hidrociclones

La curva de eficiencia o clasificación es una representación gráfica que muestra el comportamiento del equipo en cuanto a la separación de partículas de diferentes tamaños. Esta curva es fundamental para entender el rendimiento del hidrociclón y optimizar su operación. Se basa en la representación gráfica del tamaño de partícula, normalmente en micras (μm) contra la fracción acumulada de partículas que pasan

por el "overflow" o fracción fina, es decir, el porcentaje de cada tamaño de partícula que es clasificado como finos (desviación superior).

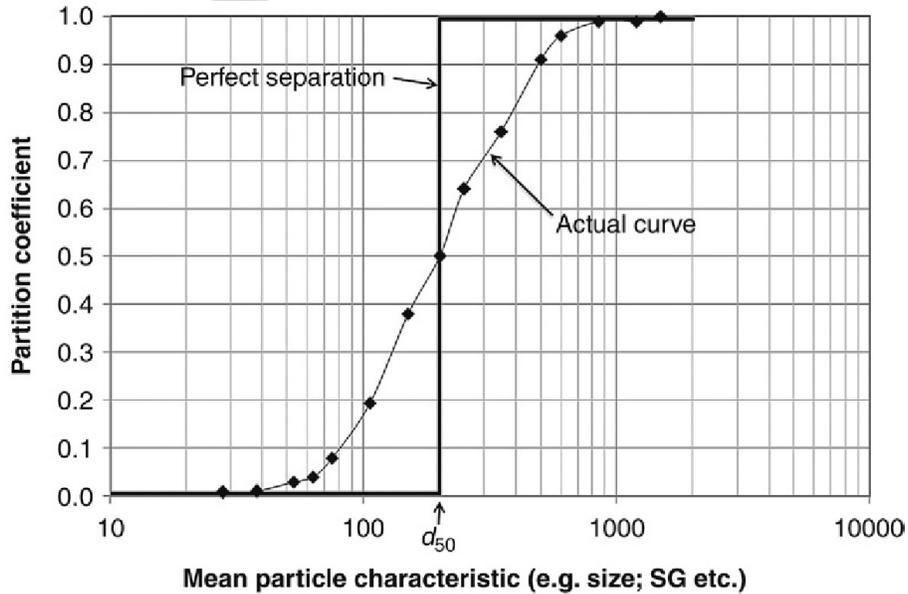


Figura 3. D50, suponiendo que se analiza el punto de corte de 200 micras. (Tromp, como lo citó Gupta y Yan, 2016).

Siendo el tamaño de partícula una de las variables más relevantes en la evaluación de los parámetros operacionales y metalúrgicos, es el comportamiento del mineral a través de las etapas de su procesamiento; la variable dependiente de la operación del equipo para tratarlo y beneficiarlo. La importancia de definir y cuantificar esta variable reside en este hecho. Se caracteriza por sus dimensiones y medida, siendo para usos generales y prácticos las dimensiones de área, largo y ancho de partícula las que generalmente se estudian. Para su cuantificación se usan tamices (de la serie Tyler, con una razón de progresión geométrica, $\sqrt{2}$, en su abertura), estandarizados para su análisis. Así se cuantifica el tamaño mayor al que es retenido el tamaño de partícula a una abertura dada, por ejemplo, el tamiz de la serie Tyler #200 contiene una abertura de 74 μm .

Para definir la eficiencia de clasificación (Figura 1, Tromp, como lo citó Gupta y Yan, 2016) se grafica la relación de la clasificación que se tiene en el producto grueso entre la alimentación (ecuación 1) entre tamices.

$$\varepsilon = \frac{gg_i}{aa_i} \quad (1)$$

donde “ ε ” es la eficiencia; “ g ”, es el tonelaje de gruesos; “ g_i ” el porcentaje de producto retenido del análisis de la distribución granulométrica; “ a ”, el tonelaje de alimentación a clasificación; y “ a_i ” el porcentaje de peso retenido en el análisis de distribución granulométrica efectuado en la alimentación a clasificación.

Suponiendo que la separación perfecta se dé en el intervalo de corte, donde el pasante a partir de ese punto sea un rango que llegue al 0%, y lo que esté por encima de este, alcance a llegar a un 100% del material clasificado, el punto de corte de la separación es el “D50” como se muestra en la Imagen 16 este punto de corte nos da una gráfica de distribución.

Modelo matemático de clasificación en hidrociclones

Este modelo se basa en la curva de eficiencia reducida (E_{oa}), la cual es desarrollada por la curva de eficiencia observada y la curva de eficiencia corregida por el clasificador tratando un mineral en particular. La curva de eficiencia reducida es una función característica de un mineral y es independiente de la dimensión o condiciones de operación del hidrociclón (Nageswararao et al., 2004).

$$E_{oa} = R_f \left[\frac{e^\alpha - 1}{e^{\alpha d/d_{50c}} + e^\alpha - 2} \right] \quad (3)$$

donde “ R_f ” es porcentaje de recuperación de agua o cortocircuito; “ α ”, el parámetro de forma de la curva de eficiencia del hidrociclón; d_{50c} : tamaño de corte corregido (unidades).

Para el flujo volumétrico (Q) el modelo propone la siguiente expresión:

$$Q = K_{Q1} \frac{D_c^2}{\theta^{0.1}} \left(\frac{P_h}{\rho_p} \right)^{0.5} \left(\frac{D_o}{D_c} \right)^{0.68} \left(\frac{D_i}{D_c} \right)^{0.45} \left(\frac{L_c}{D_c} \right)^{0.2} \quad (4)$$

$$K_{Q1} = K_{Q0} (D_c)^{-0.1} \quad (5)$$

donde “ K_{Q1} ”, es la constante de proporcionalidad que es función de la alimentación y el diámetro del hidrociclón; “ K_{Q0} ”, constante que sólo depende de las características de alimentación (por ejemplo, gravedad específica). Su valor se encuentra en un rango de 300-600; “ D_c ” diámetro del cuerpo del hidrociclón (m); “ D_o ”, diámetro del vortex (m); “ L_c ” longitud del ciclón, m. “ P_h ” presión de alimentación, (kPa); “ θ ”, ángulo del cono (grados); “ ρ_p ” densidad de pulpa de alimentación, (t/m^3).

Para la relación del tamaño de corte corregido (d_{50c}) existe la siguiente ecuación (Ecuación 6):

$$\frac{d_{50c}}{D_c} = K_{D1} \left(\frac{D_o}{D_c}\right)^{0.52} \left(\frac{D_U}{D_c}\right)^{-0.47} \sigma^{0.93} \left(\frac{P_h}{\rho_p g D_c}\right)^{-0.22} \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{-0.5} \left(\frac{L_c}{D_c}\right)^{0.2} \theta^{0.15} \quad (6)$$

$$K_{D1} = K_{D0} (D_c)^{-0.65} \quad (7)$$

donde “ K_{D0} ”, constante que depende de las características de los sólidos alimentados, su valor resulta ser pequeño de 0.001- 0.00001; “ K_{D1} ”, constante de la relación de clasificación de tamaños; “ D_i ”, es el diámetro de entrada, (m); “ D_U ”, es el diámetro del ápex (m); “ g ”, es aceleración de la gravedad, 9.81 m/s². El porcentaje de recuperación de agua (R_f) y volumen de la pulpa en el bajoflujo (R_V) (unidades) están relacionados con:

$$R_f = K_{W1} \left(\frac{D_o}{D_c}\right)^{-1.19} \left(\frac{D_U}{D_c}\right)^{2.40} \left(\frac{P_h}{\rho_p g D_c}\right)^{-0.53} \sigma^{0.27} \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{-0.50} \theta^{-0.24} \left(\frac{L_c}{D_c}\right)^{0.22} \quad (8)$$

$$R_V = K_{V1} \left(\frac{D_o}{D_c}\right)^{-0.94} \left(\frac{D_U}{D_c}\right)^{1.83} \left(\frac{P_h}{\rho_p g D_c}\right)^{-0.31} \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{-0.25} \theta^{-0.24} \left(\frac{L_c}{D_c}\right)^{0.22} \quad (9)$$

donde “ σ ”, es término de correlación (ecuación 8); “ C_V ”, es la fracción volumétrica de sólidos en la pulpa alimentada; y “ K_{W1} y K_{V1} ”: constantes que dependen de las características de los sólidos en la alimentación, y son independientes del diámetro del clasificador para hidrociclones geoméricamente similares, que están tratando sólidos de alimentación idénticos.

$$\sigma = \frac{10^{1.82C_V}}{(8.05 * (1 - C_V)^2)} \quad (10)$$

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Muestreo

La batería de hidrociclones (Figura 4) se muestreó durante la operación de planta. El muestreo consistió en un composites de 4 cortes cada 15 minutos.



Figura 4. Batería de hidrociclones de planta Piratas de Fresnillo PLC.

Primeramente, se etiquetaron las cubetas donde se vació los cortes muestra y que corresponden a los flujos de alimentación, finos y gruesos de la batería de hidrociclones con la hora del muestreo (Figura 6). Las muestras se recolectaron mediante cortador tipo pato.

Preparación de muestra

La preparación se llevó a cabo a en el laboratorio metalúrgico de la planta de beneficio Proaño. Para ello se tomó una muestra representativa de las cubetas con contenido de muestra. Se pesaron la tarja donde estará el vaciado de la muestra húmeda, y se pesó la tarja con la muestra húmeda; se metió al horno que está a una temperatura de 180 °C, durante 12 horas, y se sacó la muestra seca, dejándola reposar unos 15 minutos para obtener el peso de la tarja con la muestra seca, y con ello el porcentaje de sólidos en el flujo (Tabla 1).

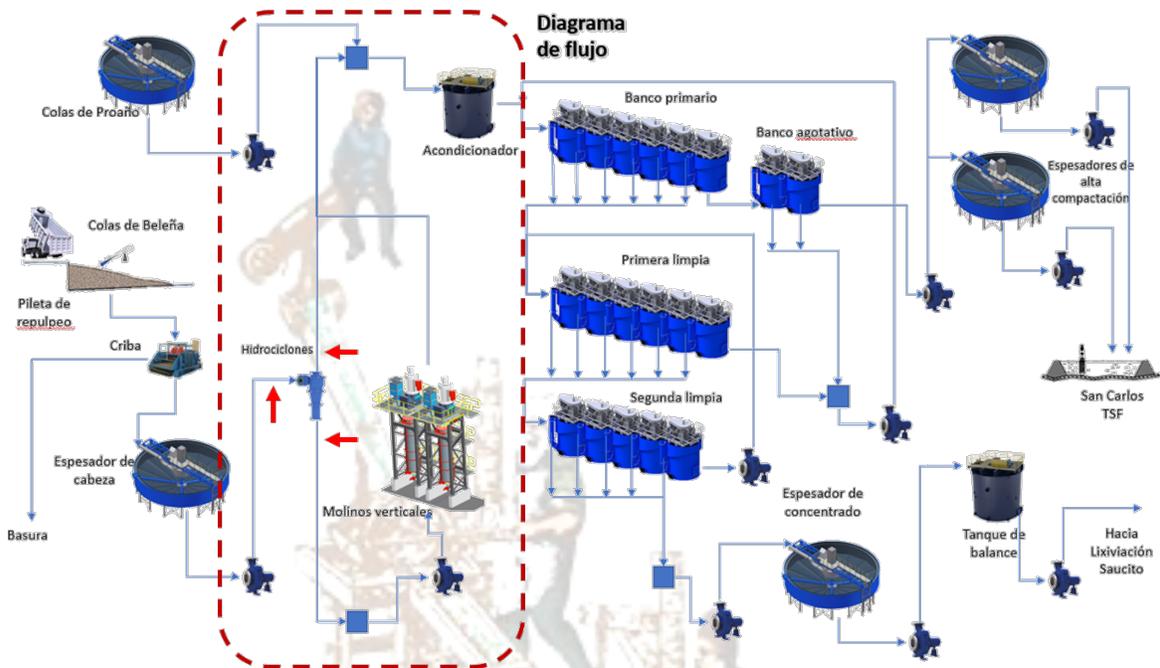


Figura 5. Diagrama de flujo de la planta de piratas, donde se indica con flechas rojas donde se llevó a cabo el muestreo.

Tabla 1. Obtención del porcentaje de sólidos.

| Muestra | Peso de Tarja (kg) | Muestra húmeda + tarja (kg) | Muestra Seca + tarja (kg) | %Sólidos (%) |
|-----------------------|--------------------|-----------------------------|---------------------------|--------------|
| Alimentación a ciclón | 0.638 | 2.64381 | 1.51923 | 43.9338721 |
| Finos de ciclón | 0.727 | 2.4026 | 1.27184 | 32.5161136 |
| Gruesos de Ciclón | 0.821 | 3.0256 | 1.90428 | 49.1372585 |

Al producto seco se le desgrumó con un rodillo de acero inoxidable de manera suave para no alterar el tamaño de partícula, subsecuentemente, al producto desgrumado, se le desgrumó con la malla #70 (350 μm).

Al producto húmedo se le hizo una deslamada en húmedo con la malla #400 (38 μm), que consecuentemente se dejó en una cubeta asentando durante un día; mientras al producto retenido se vació en una tarja previamente pesada, y se metió durante 12 horas a secar. Se pesó una vez fuera y se le hizo un tamizaje con RoTap, con las mallas #70, #100, #140, #200, #270, #325 y #400. Al pasante final se le incorporó al pasante de la malla cuatrocientos deslamado.

Al producto deslamado después del día de asentamiento, procedió a vaciársele el agua mediante sifoneo con una manguera, se dispuso en una tarja, que también previamente fue pesada, y se metió al horno durante 12 horas. Al día siguiente se le saco, homogeneizo y se procedió a tomar un aproximado de 240 gramos, que fueron desgrumados y se dispusieron en vasos de precipitado, 6 vasos con un peso de 40 gramos por vaso, para después, ser introducidos en cyclosizer.

Para la operación de granulometría en Cyclosizer, se usó un equipo de la marca Metcom con 5 hidrociclones pequeños, que opera a una presión de 185 kPa, y a una temperatura de 28 °C del fluido durante, 20 minutos de elutriación.

Finalmente, mediante el programa MinProSim, siguiendo la metodología mostrada en el diagrama de la Figura 7, se realizaron los análisis y cálculos de datos del modelo de Nageswararao 2004, y se implementó una curva de eficiencia corregida mediante la propuesta de Kelsall (Ecuación 11) (Kelsall, 1953) para analizar los datos simulados.

$$\varepsilon_c = \frac{\varepsilon - T_w}{1 - T_w} \times 100 \quad (11)$$

Donde ε_c es la curva de eficiencia corregida mediante la concepción de Kelsall y T_w es la fracción de agua en los gruesos.



Figura 6. Diagrama de la metodología que se llevó a cabo para la aplicación del modelo matemático para hidrociclones.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Balance de datos

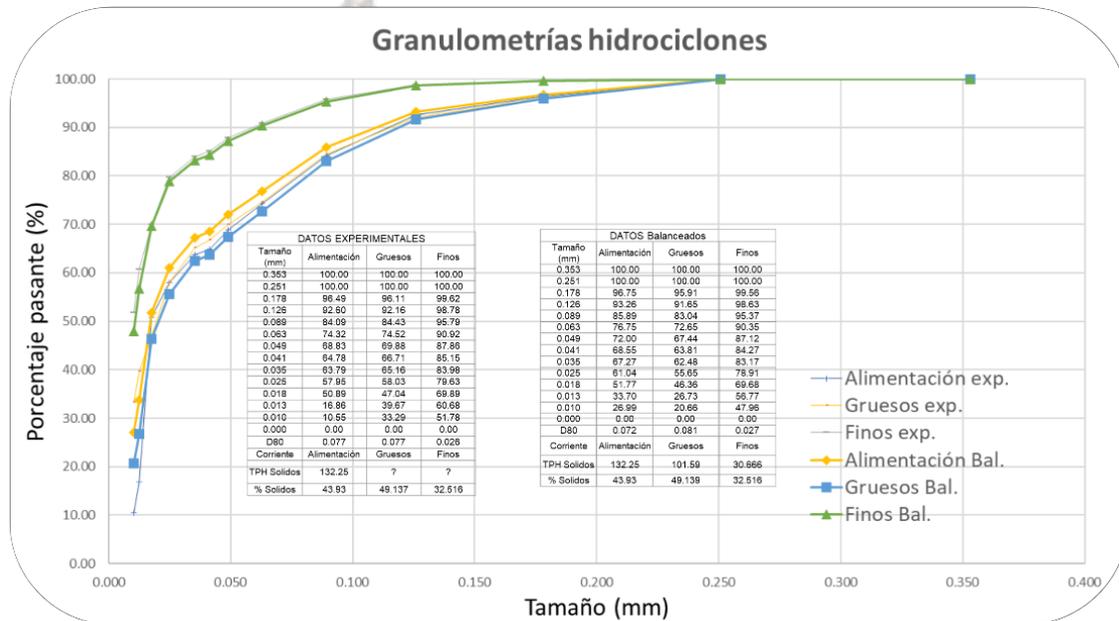


Figura 7. Gráfico de los datos granulométricos experimentales y balanceados del muestreo.

Una vez realizado el muestreo y la recopilación de datos, se procedió a realizar mediante el Software MinProSim el balance de masa y granulométrico de los puntos muestreados, Consecuentemente se realizó el ajuste de los parámetros del modelo y así se obtuvieron los siguientes resultados (Figura 8):

Se puede observar que debido al balance de las granulometrías hay una variación en la granulometría de alimentación. Este balance es necesario para poder efectuar el ajuste de datos y la simulación, ya que se observa en la clasificación de moliendas finas un efecto en las granulometrías finas debida al arrastre en los tamaños más finos conocida como el efecto anzuelo, para la evaluación de la curva de partición (Figura 9).

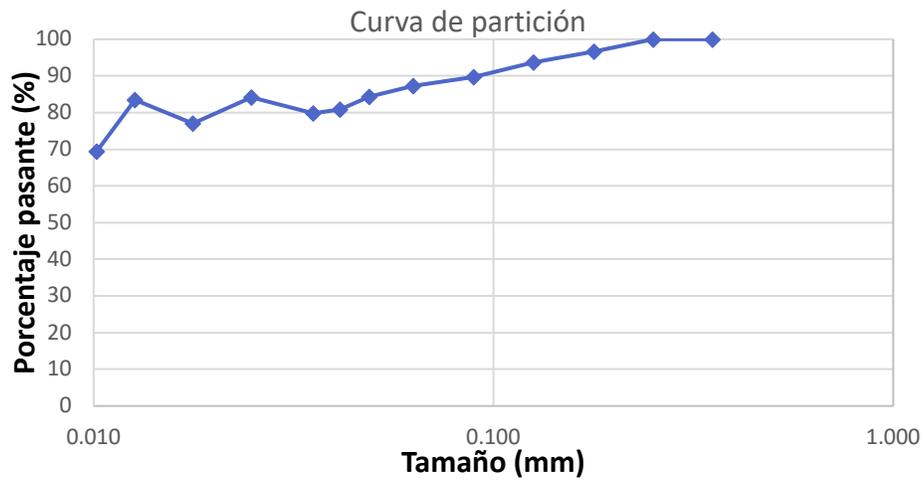


Figura 8. Curva de partición con los datos balanceados donde se puede observar un tipo de efecto anzuelo debido las partículas finas.

Propuesta de optimización

Tomando en consideración estos tamaños se procedió a realizar las simulaciones variando el diámetro del ápex del hidrociclón (Figura 10) (Tabla 2).

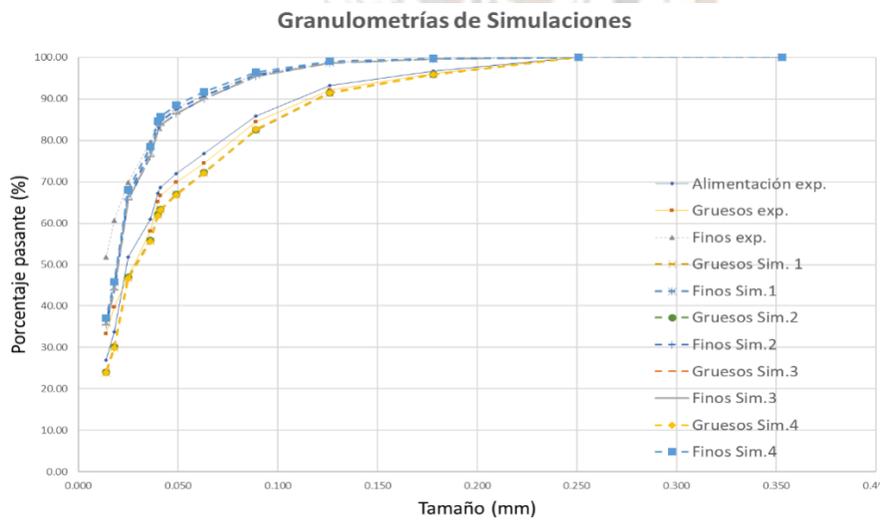


Figura 9. Pasantes simulados a diferentes diámetros de ápex.

Tabla 2. Pasantes (%) de Simulaciones modificando diámetro de ápex.

| Tamaño (mm) | DATOS Simulación 1 (apex, 1 in, 0.024 m) | | DATOS Simulación 2 (apex, 3/4 in, 0.01905 m) | | DATOS Simulación 3 (apex, 1 1/3 in, 0.0338675 m) | | DATOS Simulación 4 (apex, 1 1/4 in, 0.03175 m) | |
|-------------|--|--------|--|--------|--|--------|--|--------|
| | Gruesos | Finos | Gruesos | Finos | Gruesos | Finos | Gruesos | Finos |
| 0.353 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| 0.251 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| 0.178 | 95.80 | 99.61 | 95.79 | 99.53 | 95.84 | 99.71 | 95.83 | 99.71 |
| 0.126 | 91.43 | 98.79 | 91.41 | 98.60 | 91.47 | 99.04 | 91.46 | 99.02 |
| 0.089 | 82.57 | 95.91 | 82.58 | 95.45 | 82.59 | 96.55 | 82.58 | 96.46 |
| 0.063 | 72.10 | 90.76 | 72.16 | 89.99 | 72.07 | 91.88 | 72.07 | 91.68 |
| 0.049 | 66.90 | 87.37 | 66.99 | 86.46 | 66.83 | 88.70 | 66.84 | 88.44 |
| 0.041 | 63.25 | 84.54 | 63.35 | 83.56 | 63.15 | 86.01 | 63.16 | 85.71 |
| 0.040 | 61.92 | 83.40 | 62.03 | 82.39 | 61.82 | 84.90 | 61.83 | 84.59 |
| 0.036 | 55.69 | 77.16 | 55.82 | 76.10 | 55.56 | 78.77 | 55.58 | 78.44 |
| 0.025 | 46.79 | 66.78 | 46.93 | 65.73 | 46.63 | 68.38 | 46.66 | 68.05 |
| 0.018 | 30.02 | 44.79 | 30.15 | 43.96 | 29.87 | 46.10 | 29.89 | 45.82 |
| 0.014 | 23.95 | 36.17 | 24.05 | 35.46 | 23.81 | 37.27 | 23.83 | 37.04 |
| 0.000 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

Tabla 3. Toneladas por hora, y porcentaje de sólidos de cada corriente.

| Corriente | DATOS Simulación 1 (apex, 1 in, 0.024 m) | | DATOS Simulación 2 (apex, 3/4 in, 0.01905 m) | | DATOS Simulación 3 (apex, 1 1/3 in, 0.0338675 m) | | DATOS Simulación 4 (apex, 1 1/4 in, 0.03175 m) | |
|-------------|--|-------|--|-------|--|-------|--|-------|
| | Gruesos | Finos | Gruesos | Finos | Gruesos | Finos | Gruesos | Finos |
| TPH Sólidos | 99.31 | 32.93 | 98.21 | 34.03 | 101.00 | 31.24 | 100.68 | 31.56 |
| % Sólidos | 73.99 | 19.74 | 83.04 | 18.62 | 55.88 | 25.96 | 59.57 | 23.90 |

Por las condiciones de operación, la cuales son las que establecen el límite práctico para cada una de las modificaciones observadas, se recomienda variar el diámetro del ápex de 1.5 a 1 1/3 y 1 1/4 de pulgadas, para evitar algún tipo de atascamiento por algún guijarro de mayor tamaño que pueda presentarse en el proceso.

Para el caso de planta Piratas la recomendación, usando las curvas de partición de cada uno de los dos tamaños propuestos (Tabla 4) se recomienda finalmente usar el tamaño de 1 1/4 de pulgada, ya que con ello se logra eficientar la partición.

Tabla 4. Curvas de partición.

| Tamaño (mm) | Partición | | Partición Corregida Kellsal | |
|-------------|--|--|--|--|
| | DATOS Simulación 3 (apex, 1 1/3 in, 0.0338675 m) | DATOS Simulación 4 (apex, 1 1/4 in, 0.03175 m) | DATOS Simulación 3 (apex, 1 1/3 in, 0.0338675 m) | DATOS Simulación 4 (apex, 1 1/4 in, 0.03175 m) |
| | | | | |

| | | | | |
|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 0.353 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 0.251 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 0.178 | 97.88046765 | 97.73339212 | 95.98288754 | 96.19189908 |
| 0.126 | 95.4607023 | 95.24459471 | 91.39674877 | 92.01050019 |
| 0.089 | 92.0362199 | 91.71274379 | 84.90638739 | 86.07667951 |
| 0.063 | 87.92583323 | 87.57144226 | 77.1160437 | 79.11892811 |
| 0.049 | 84.19192104 | 83.82819461 | 70.0392255 | 72.8299423 |
| 0.041 | 81.53555179 | 81.16609715 | 65.0046555 | 68.35738405 |
| 0.035 | 79.53981392 | 79.16808129 | 61.22216854 | 65.00054139 |
| 0.025 | 76.78188253 | 76.45233024 | 55.99510961 | 60.43784039 |
| 0.018 | 73.51831585 | 73.2436144 | 49.80972897 | 55.04691511 |
| 0.013 | 70.86986454 | 70.64043142 | 44.7901657 | 50.67333839 |
| 0.010 | 68.92170589 | 68.74806296 | 41.09785482 | 47.49399266 |
| 0.000 | | | | |

Cabe resaltar que el proceso de planta Piritas, por la descarga de los espesadores que alimentan a los ciclones, puede variar con ello la presión de alimentación a la batería de hidrociclones, y aunque la idea de variación parece contraintuitiva, se puede aplicar una barrida cambiando la carga para eficientar aún más el proceso de clasificación. Se recomienda también seguir realizando muestreos para seguir analizando variaciones dentro de las granulometrías de alimentación.

CONCLUSIONES

Del presente trabajo se concluye que:

- Se determinó que el modelo matemático propuesto por Nageswararao (2004) para hidrociclones es aplicable en el análisis de la operación industrial de estos equipos, específicamente en circuitos que alimentan la molienda ultrafina. Los resultados muestran que el modelo proporciona una representación precisa de los parámetros operativos, facilitando la optimización del proceso.
- A partir de diversas simulaciones realizadas, se recomienda una reducción del diámetro del Ápex a 1 ¼ pulgadas, con el objetivo de mejorar la eficiencia en la clasificación de partículas. Esta modificación contribuiría a una mayor precisión en el proceso de separación y reducción de partículas de menor tamaño.
- Es esencial continuar con la realización de muestreos y análisis sistemáticos de la alimentación para identificar variaciones en la granulometría. Estos estudios permitirán mantener un control estricto sobre las fluctuaciones del tamaño de partícula y su impacto en el desempeño del circuito de hidrociclones.
- Se sugiere llevar a cabo análisis detallados durante cualquier modificación operativa para determinar la presión óptima de alimentación a los hidrociclones (kPa). Este

enfoque permitirá ajustar la carga alimentada y maximizar el rendimiento del proceso, garantizando la estabilidad operativa.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer al personal de planta Piratas de Fresnillo PLC, por la realización de este trabajo y la colaboración con el proceso revisado en planta, al ingeniero Sadam Elías Torres Valle, por el apoyo brindado para llevar a cabo este trabajo en la organización del muestreo.

REFERENCIAS

Agustin G. L. y Concha A. F. (1994). Diseño y simulación de circuitos de molienda y clasificación. CYTED, Programa iberoamericano de ciencia y tecnología para el desarrollo.

Kelsall, D. (1953). A further study of the hydraulic cyclone. *Chemical Engineering Science*, 2(6), 254-272.

Nageswararao, K., Wiseman, D., & Napier-Munn, T. (2004). Two empirical hydrocyclone models revisited. *Minerals Engineering*, 17(5), 671-687. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.01.017>

Wills Barry A. (2016). *Wills' Mineral Processing Technology An Introduction to the Practical Aspects of Ore*

