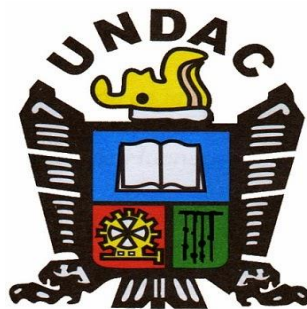


**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRION**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**ESCUELA DE FORMACION PROFESIONAL DE INGENIERIA**

**METALÚRGICA**



**TESIS**

**Cálculo del rendimiento y ajustes del hidrociclón en el circuito de  
molienda en Minera Chinalco Perú S.A. – Junín, 2019**

**Para optar el título profesional de:**

**Ingeniero Metalurgista**

**Autor: Bach. Miguel Ángel ZAVALETA SCHWARTZ**

**Asesor: Mg. Cayo PALACIOS ESPÍRITU**

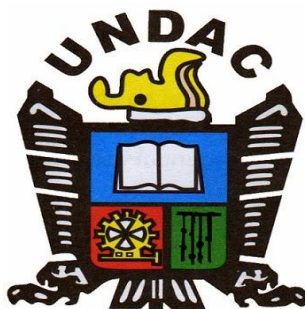
**Cerro de Pasco – Perú – 2019**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRION**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**ESCUELA DE FORMACION PROFESIONAL DE INGENIERIA**

**METALÚRGICA**



**TESIS**

**Cálculo del rendimiento y ajustes del hidrociclón en el circuito de  
molienda en Minera Chinalco Perú S.A. – Junín, 2019**

**Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:**

---

**Dr. Hildebrando Aníval CONDOR GARCIA**  
**PRESIDENTE**

---

**Mg. Luis Villar REQUIS CARBAJAL**  
**MIEMBRO**

---

**Mg. Manuel Antonio HUAMAN DE LA CRUZ**  
**MIEMBRO**

## **DEDICATORIA**

Este trabajo está dedicado a mis queridos padres, Delia y Graciano, que día a día me motivan por seguir adelante y no decaer ante cualquier circunstancia y adversidad, a mis hermanos Isabel, Mary, Luis, Delia y Jose por apoyarme siempre.

## **RECONOCIMIENTO**

Agradezco enormemente a Dios nuestro señor por guiar siempre mi camino, y presento mi total reconocimiento a la Gerencia de Procesos de Minera Chinalco Perú S.A., por haberme permitido desarrollar mis capacidades como profesional dentro de sus instalaciones en el área de Operaciones Planta, y así poder lograr realizar mi trabajo de investigación titulada “Calculo del rendimiento y ajustes del hidrociclón en el circuito de molienda de Minera Chinalco Perú S.A.”, cumpliendo de este modo uno de mis más anheladas metas en mi continuo desarrollo profesional..

A mi familia por siempre estar a mi lado motivándome a seguir adelante y por la gran oportunidad que me dieron en un difícil momento de seguir estudiando y cumplir mi meta de ser un gran profesional, y sobre todo el de ser una persona de bien para la sociedad.

A los Ingenieros de mi alma mater la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión por haber sido parte de mi desarrollo profesional durante los 5 años de educación universitaria, donde me inculcaron los conocimientos y capacidades que eh fortalecido actualmente como un buen Ingeniero Metalurgista.

## RESUMEN

Actualmente en minera Chinalco Perú S.A., se cuenta con etapas fundamentales para el procesamiento de sus minerales, lo que implica un riguroso estudio para poder obtener la mayor recuperación y grado de concentración en su producto final. Tomando en cuenta que una de sus etapas más importantes es el proceso de clasificación.

El presente trabajo abarca el cálculo del rendimiento y ajustes del sistema de clasificación constituido por 4 nidos de hidrociclones que forman un circuito cerrado con dos molinos de bolas. Antes de realizar el muestreo se tomó como condición la presión de ingreso del flujo a la batería de hidrociclones y la velocidad de alimentación.

Se realizaron tres muestreos durante el mes de agosto, de los cuales se obtuvieron resultados homogéneos de propiedades de corriente de flujo, se tomaron muestras en la alimentación a los hidrociclones, muestras en el rebose y underflow y se calcularon el porcentaje de sólidos, gravedad específica, densidad de pulpa y otras variables operacionales. Se obtuvieron datos de tonelaje a partir del software de procesos Py system. Para realizar los ajustes de los hidrociclones se tomaron 2 días antes de la segunda parada de planta mayor.

La finalidad del presente trabajo es el de operar con una buena alimentación, en el circuito de flotación, con partículas valiosas ya liberadas, en otras palabras, partículas mineralizadas de tamaño adecuado para una máxima recuperación de estas.

**Palabras Clave:** Nido de hidrociclones, batería de hidrociclones, rendimiento, ajustes.

## ABSTRACT

Currently, at Minera Chinalco Perú S.A., there are fundamental stages for the processing of its minerals, which implies a rigorous study to obtain the greatest recovery and concentration in its final product. Taking into account that one of its most important stages is the classification process.

This paper covers the calculation of the performance and adjustments of the classification system consisting of 4 hydrocyclone nests that form a closed circuit with two ball mills. Before sampling, the pressure to enter the flow to the hydrocyclone battery and the feed rate were taken as a condition.

Three samples were taken during the month of August, of which homogeneous results of flow current properties were obtained, samples were taken in the feed to the hydrocyclones, samples in the overflow and underflow and the percentage of solids, specific gravity were calculated, pulp density and other operational variables. Tonnage data was obtained from the Py system process software. To adjust the hydrocyclones, they were taken 2 days before the second stop of the main floor.

The purpose of this work is to operate with a good feed, in the flotation circuit, with valuable particles already released, in other words, mineralized particles of adequate size for maximum recovery of these.

**Keywords:** Hydrocyclone nest, hydrocyclone battery, performance, adjustments.

## INTRODUCCION

La elección del flujo idóneo en la alimentación al hidrociclón está directamente relacionado a la presión diferencial y a la velocidad de la corriente de pulpa, por tal razón se aplicarán métodos matemáticos para poder calcular el rendimiento y realizar el ajuste en los hidrociclones en función a las muestras tomadas y pruebas realizadas.

Se calculará el d50 llamado “tamaño de corte de un clasificador “, que es un parámetro de importancia en el procesamiento de minerales, ya que sus aplicaciones son diversas porque a la vez sirve para diseñar hidrociclones y verificar la eficiencia de los hidrociclones existentes, optimizar su funcionamiento, y corregir el corto circuito (BY-PASS) en los clasificadores. El contenido por capítulos se muestra a continuación:

**En el capítulo I**, Identificación y determinación del problema, formulación del problema, formulación de objetivos, justificación de la investigación, importancia y alcances de la investigación, limitaciones de la investigación.

**En el capítulo II**, Antecedentes de estudio, determinación de términos, formulación de hipótesis e identificación de variables.

**En el capítulo III**, Tipo de investigación, diseño de la investigación, población y muestra investigación, métodos de investigación, técnicas e instrumentos de recolección y técnicas de procesamiento y análisis de datos.

**En el capítulo IV**, Descripción del trabajo de campo, presentación análisis e interpretación de resultados, prueba de hipótesis, evaluación de eficiencia del proceso de tratamiento y discusión de resultados

## INDICE

**DEDICATORIA**

**RECONOCIMIENTO**

**RESUMEN**

**ABSTRACT**

**INTRODUCCION**

**INDICE**

**LISTA DE TABLAS**

**LISTA DE FIGURAS**

### **CAPITULO I**

#### **PROBLEMA DE INVESTIGACION**

1.1.	Identificación y determinación del Problema.....	1
1.2.	Delimitación de la investigación .....	3
1.3.	Formulación del Problema .....	3
	1.3.1 Problema Principal.....	3
	1.3.2 Problemas Específicos.....	3
1.4.	Formulación de Objetivos .....	4
	1.4.1. Objetivo General .....	4
	1.4.2. Objetivos Específicos .....	4
1.5.	Justificación de la Investigación.....	4
1.6.	Limitaciones de la Investigación .....	5

### **CAPITULO II**

#### **MARCO TEORICO**

2.1.	Antecedentes de Estudio .....	6
2.2.	Bases teóricas - científicas .....	14
2.3.	Definición de términos básicos.....	59
2.4.	Formulación de Hipótesis.....	59
	2.4.1. Hipótesis General .....	59
	2.4.2. Hipótesis Específicas.....	60
2.5.	Identificación de Variables.....	60
2.6.	Definición operacional de variables e indicadores .....	61

### **CAPITULO III**

#### **METODOLOGIA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACION**

3.1.	Tipo de Investigación.....	62
3.2.	Método de investigación .....	62
3.3.	Diseño de Investigación .....	63
3.4.	Población y Muestra .....	65



3.5.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	65
3.6.	Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	65
3.7.	Tratamiento estadístico .....	66
3.8.	Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación .....	66
3.9.	Orientación ética .....	66

#### **CAPITULO IV**

#### **RESULTADOS Y DISCUSION**

4.1.	Descripción de Trabajo de Campo.....	67
4.2.	Presentación Análisis e Interpretación de Resultados.....	71
4.3.	Prueba de Hipotesis.....	90
4.4.	Discusión del Resultados .....	91

#### **CONCLUSIONES**

#### **RECOMENDACIONES**

#### **BIBLIOGRAFÍA**

#### **ANEXOS**

## **LISTA DE TABLAS**

Tabla 1 – Cuadro de corrientes de flujo y cálculo de corrientes

Tabla 2 – Relación de recuperación sólido, líquido y pulpa

Tabla 3 - Factores que relacionan  $d_{50c}$  con P80 para relaciones de cargas circulantes

Tabla 4 – Análisis granulométrico de la alimentación y del underflow del hidrociclón

Tabla 5– Calculo de la recuperación de sólidos y recuperación corregida de solidos

Tabla 6 – Calculo de la recuperación de solidos por el método de dilución

Tabla 7 – Calculo de la pendiente “m”

Tabla 8 – Análisis granulométrico producto de la reducción del fujo volumétrico

Tabla 9 – Análisis granulométrico producto del incremento de agua

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Partes del nido de hidrociclones
- Figura 2 – Partes de un hidrociclón
- Figura 3 – Tipos de descarga de un hidrociclón
- Figura 4 – Distribuidor radia
- Figura 5 – Canaleta de finos
- Figura 6 – Canaleta de gruesos
- Figura 7 – Válvulas compuerta
- Figura 8 – Principio de Funcionamiento
- Figura 9 – Entrada y salidas de corrientes de un hidrociclón
- Figura 10– Calculo del  $d_{50}$ , la precisión de separación y cortocircuito.
- Figura 11. Una curva perfecta de separación del hidrociclón.
- Figura 12 - Una curva de separación “sin orden”
- Figura 13 - Camino de la fracción por cortocircuito
- Figura 14 - Dimensiones principales internas de un hidrociclón
- Figura 15 - Diámetro del ápex contra la capacidad volumétrica
- Figura 16 - Gráfica de la capacidad del hidrociclón típico.
- Figura 17 - Hidrociclón en circuito abierto
- Figura 18 - Instalación de hidrociclón típica en circuito cerrado.
- Figura 19 - Factores que relacionan  $d_{50c}$  a P80 para varias relaciones
- Figura 20 - Ubicación del Proyecto Toromocho - Minera chinaco Perú S.A.
- Figura 21 - Flowsheet del circuito de molienda área 210
- Figura 22 – Circuito de clasificación con hidrociclones
- Figura 23 – Especificaciones técnicas de los hidrociclones
- Figura 24 – Balance de masa en el nido de hidrociclones

- Figura 25 – Balance de masa en cada hidrociclón
- Figura 26 – Calculo del D50, D50 corregido y by pass %
- Figura 27 – Calculo del D25 y D75 en la curva corregida
- Figura 28 – Capacidad de pulpa del ápex vs diámetro del ápex
- Figura 29 – Balance masico actual
- Figura 30 – Balance masico modificado
- Figura 31 – Calculo del nuevo D50c2 del incremento de flujos
- Figura 32 – Calculo de eficiencia y reducción de flujos
- Figura 33 – Dashboard después de la reducción - Py system DCS
- Figura 34 – Dashboard de procesos después de la reducción - Py system
- Figura 35 – Balance masico actual con 299% de carga circulante
- Figura 36 – Balance masico modificado a 350% de carga circulante
- Figura 37 – Calculo de eficiencia y reducción de flujos
- Figura 38 – Dashboard de procesos después del incremento de CC- Py system DCS
- Figura 39 – Dashboard de procesos después del incremento de CC- Py system
- Figura 40 – Corrientes de flujo existentes
- Figura 41 – Corrientes de flujo variando el flujo de agua
- Figura 42 – Calculo de eficiencia y reducción de flujos
- Figura 43 – Dashboard de procesos después del incremento de agua - Py system DCS
- Figura 44 – Dashboard de procesos después del incremento de agua - Py system

## **CAPITULO I**

### **PROBLEMA DE INVESTIGACION**

#### **1.1. Identificación y Determinación del Problema**

Minera Chinalco Perú S.A., es una empresa minera que se encuentra ubicada en la ex ciudad de Morococha departamento de Junín, cuya actividad principal es la del procesamiento de minerales y transporte de concentrados de Cu hacia el puerto del Callao, es considerado uno de los mayores productores de cobre. La unidad minera de Toromocho tiene un yacimiento de pórfidos de cobre e intrusivos de Skarn.

En los últimos años las operaciones de la Minera se han ido incrementado, debido a la modificación e implementación de nuevos estándares, basados en estudios y pruebas metalúrgicas que le dan un mayor valor agregado al concentrado de cobre, así como la modificación de circuitos para limpiar aún más los concentrados.

Actualmente se está ejecutando el proyecto de expansión, y se encuentra en la etapa de comisionamiento y precom de la planta concentradora, la cual contara con un nuevo circuito de molienda, de flotación y espesamiento de relaves, y tendrán equipos tales como un molino de bolas, un molino SAG, dos baterías de hidrociclones, dos bancos de 7 celdas rougher bulk y dos espesadores de relaves high

rate. Las leyes de cabeza del mineral, se mantienen en 0.48% de cobre, 0.53% de molibdeno y 15gr/tn de Ag.

Entre las principales etapas del proceso, tenemos la etapa de clasificación, la cual es un punto crítico de separación dentro de la planta concentradora, ya que se encarga de clasificar las partículas minerales de tamaño grueso y fino.

Para poder optimizar la eficiencia y precisión es necesario realizar el cálculo del rendimiento y ajuste del Hidrociclón, a través de la toma de muestras de los flujos de entrada y salida, y determinar las variables de corriente de pulpa y la distribución granulométrica del mineral, para que de tal modo puedan modificarse parámetros de operación tales como tiempo de residencia en molinos, flujo de agua, presión de alimentación, retorno de carga circulante y la velocidad de corriente de pulpa.

Con la elaboración de este trabajo se pretende enviar un tamaño de partícula ideal para el circuito de flotación, y material grueso para la remolienda.

El circuito de clasificación es un proceso en el que se generan muchos inconvenientes con respecto a las características variables de granulometría en el que se presentan los minerales, debido a la dureza por ser del tipo Hornfels (mineral de alta dureza) procedentes de la molienda SAG y molinos de bolas, sumado a los parámetros de operación que deben ser controlados para una óptima clasificación.

Lo poca confiabilidad de obtener datos precisos durante el proceso de clasificación, nos orienta a aplicar técnicas matemáticas y análisis en laboratorio de las pulpas que nos permita conocer el estado de los flujos. La etapa de clasificación en el circuito de molienda de minera Chinalco Perú, está constituido por 4 nidos de hidrociclones de 18 unidades cada una, los cuales trabajan las 24 horas del día en 2 turnos.

Lo que se desea es contribuir al continuo desarrollo de las operaciones en el circuito de clasificación, evaluando la cantidad de solidos recuperados en el underflow, a

través de la aplicación de cálculos matemáticos, bajo un soporte de automatización DCS (sistema de control distribuido) y PLC (control lógico programable), para obtener datos confiables al momento de realizar el ajuste.

## **1.2. Delimitación de la investigación**

Los beneficios que se obtendrían al conocer el rendimiento de separación de los hidrociclones serían el encontrar el ajuste ideal para una mejor clasificación en el circuito de molienda, para proporcionar una adecuada separación de sólidos por tamaños, enviando partículas adecuadas para el proceso de flotación e incrementando la eficiencia del clasificador, calculados a partir del D50c.corregido. Los cálculos realizados aplicando métodos matemáticos servirán para generar una base de datos en función a las pruebas realizadas, que a la vez ayudarán a mantener los flujos de diseño de cada hidrociclón con el objetivo de mantenerlos en buenas condiciones.

Los hallazgos procedentes del presente trabajo ayudarán a implementar los flujos de masa y agua, como variables operacionales para la puesta en marcha en el nuevo circuito de clasificación del proyecto de expansión de MCP.

## **1.3. Formulación del Problema**

### **1.3.1. Problema Principal**

- ¿De qué modo es posible realizar el ajuste del hidrociclón para optimizar la clasificación de partículas minerales en el circuito de molienda, en Minera Chinalco Perú?

### **1.3.2. Problemas Específicos**

- ¿Cuáles son las corrientes de pulpa en el circuito de clasificación?
- ¿Cuál es el motivo del incremento del cortocircuito?
- ¿Cuánto es el cortocircuito que se está dando actualmente en la planta?

- ¿Cuánta es la carga circulante generada?
- ¿Cuál es la eficiencia de los hidrociclones en el circuito de clasificación?

#### **1.4. Formulación de Objetivos**

##### **1.4.1. Objetivo General**

- Determinar el ajuste adecuado para incrementar la eficiencia de clasificación en el circuito de molienda a través de una serie de pruebas realizadas en el hidrociclón del circuito de molienda de Minera Chinalco Perú S.A.

##### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- Evaluar los flujos de corriente dentro del circuito de clasificación.
- Calcular el D50 inicial y D50c corregido.
- Obtener el análisis granulométrico al flujo de alimentación y al underflow
- Determinar y relacionar variables de la corriente de flujo de entrada y salida
- Hallar el porcentaje de distribución del análisis granulométrico actual
- Realizar modificaciones en los flujos de corriente de pulpa y equipo

#### **1.5. Justificación de la Investigación**

En la actualidad la mayoría de circuitos de clasificación de plantas concentradoras presentan una distribución granulométrica variable debido a que los tiempos de residencia en la molienda no se mantienen constantes o por la falta de controles en cuanto a la distribución de flujos de masa.

En el caso de la clasificación que se da en el circuito de molienda de Minera Chinalco Perú, se mantienen los estándares granulométricos, es decir que el producto P80 del molino SAG se mantiene constante en rangos de diferencia bajos, sumado al producto de los molinos de bolas que envían un producto granulométricamente similar, sin embargo, es necesario conocer en este caso que las partículas minerales



que son clasificadas a través del overflow para el proceso de flotación, presentan mucho grueso, y que el flujo de partículas en el underflow presenten incrementos de finos generando la extensión de un by pass o cortocircuito de pulpa, debido a que se ha incrementado los flujos de sólidos y agua en la alimentación a los hidrociclones, como también incrementos en las presiones, es por ellos que se realizaron pruebas de ajuste empleando y modificando variables que están ligadas directamente a la operación

#### **1.6. Limitaciones de la Investigación**

La realización del trabajo de investigación se ha dado sin ningún inconveniente, ya que se ha tenido el apoyo de los operadores del área como supervisores de planta, brindando la fácil accesibilidad a la sala de control y laboratorios de planta para el desarrollo de las pruebas a desarrollar.

## **CAPITULO II**

### **MARCO TEORICO**

#### **2.1. Antecedentes de Estudio**

Para el desarrollo de la investigación se cuenta con información proporcionado por otros autores, haciendo referencia a la aplicación de métodos matemáticos en plantas concentradoras.

##### **2.1.1. Diseño de un Hidrociclón para clasificación de partículas sólidas de lechado de cal en planta concentradora - Paredes, Diego 2018**

###### **Cálculo de d50c Corregido**

Para calcular el d50c corregido lo realizaremos por medio de método de Plitt utilizaremos y lo compararemos d50c previamente calculado. Para poder calcular el d50c tomaremos en cuenta los parámetros siguientes:

- $D_o/D_c = 0.20$
- $D_u/D_c = 0.12$
- $D_i/D_c = 0.25$
- $H_c/D_c = 2.5$

Para poder obtener la siguiente formula:

$$d_{50c} = \frac{k * (Dc)^{0.46} * (0.25Dc)^{0.6} * (0.20Dc)^{1.21} * e^{0.063 * \%v/v_{inlet}}}{(0.12Dc)^{0.71} * (2.5Dc)^{0.38} * Q^{0.45} * (G.E. - 1)^{0.5}}$$

*Valores Tabulados de Porcentaje de Sólido en Volumen y peso:*

Presión Ingreso (PSI)	Diámetro de Hidrociclón (Pulg)	Caudal (litros/seg)	%V/V(Inlet)	%W/W (Inlet)
6	6	4.5	26.350	49.684
8	6	5.1	27.288	50.879
10	6	5.9	27.990	51.756
12	6	6.5	28.548	52.443
15	6	7.0	29.211	53.247
8	10	12.0	24.052	46.640
10	10	13.0	24.854	47.722
12	10	14.0	25.491	48.566
15	10	15.0	26.248	49.553
8	15	20.0	21.158	42.551
<b>10</b>	<b>15</b>	<b>22.0</b>	<b>22.049</b>	<b>43.842</b>
12	15	25.0	22.757	44.847
15	15	28.0	23.600	46.021

Fuente: Elaboración propia

De la tabla anterior podemos observar que  $d_{50c}$  más cercano del parámetro planteado es de 90.60  $\mu\text{m}$ . Por tal razón tomaremos los siguientes parámetros para el dimensionamiento de nuestro Hidrociclón expuesto a continuación:

- Diámetro de Ciclón = 15 Pulg
- Caudal de Ingreso = 22 l/seg = 79.2 m<sup>3</sup> /h
- Presión de Ingreso a Ciclón = 10 Psi
- Porcentaje de Sólidos (volumen) = 22.049%
- Porcentaje de sólidos (Peso) = 43.842%

### 2.1.2. Diseño y operación de un Hidrociclón para mejorar la técnica de lavado de suelos - Edgar Doroteo Reyes, 2010

El comportamiento dentro de un hidrociclón es muy complejo y variable, a pesar de la simpleza del sistema mecánico. Las relaciones teóricas son

inferiores a las empíricas, esto a consecuencia de las simplificaciones que deben hacerse en el desarrollo matemático y práctico. Es muy frecuente que con pulpas diluidas (<15%) pueden hacerse predicciones razonables del comportamiento del hidrociclón. Las variables de diseño incluyen los tamaños de la alimentación, y las aberturas del localizador del vórtice y del ápice, el tamaño del hidrociclón y su forma (Kelly, et. al., 1990). Las variables de operación dependen de la corriente de alimentación y comprenden las siguientes:

- Caída de presión (y rapidez de flujo de la alimentación)
- Concentración de los sólidos
- Tamaño y forma de los sólidos
- Densidades de los sólidos (o de los líquidos)
- Densidad media del líquido
- Viscosidad media del líquido

Debido a que muchas de estas variables ejercen interacción, no es posible considerarlas de manera individual. En vez de esto, se evalúa el rendimiento del hidrociclón en función de las correlaciones aplicando tres criterios: la curva de rendimiento (frecuentemente como una correlación para d50), la relación de derrame a descarga interior y la caída de presión.

### **Correlaciones teóricas para d50**

El punto de corte al 50% denominado como d50 es el parámetro más importante para describir el rendimiento de hidrociclón, siendo equivalente a la abertura de una criba, se han hecho intentos para correlacionarlo con las variables de operación y de diseño. Muchas de las relaciones teóricas utilizan la hipótesis de la órbita en equilibrio, es decir, equilibran la fuerza centrífuga

que actúa hacia afuera contra la fuerza de arrastre debida al flujo de líquido entrante, lo cual resulta:

$$d_{50} = \left[ \frac{18\mu \cdot v(r)r}{(\rho_s - \rho_l)v^2(t)} \right]$$

Donde :

$v(r)$  : Velocidad radial en el hidrociclón

$\rho_s$  : Densidad del sólido

$\rho_l$  : Densidad de la pulpa

Las ecuaciones finales derivadas de ésta difieren en cuanto a la suposición del lugar geométrico de velocidad cero. Una de las correlaciones más rigurosas (Bradley, et. al., 1959) se basa en el lugar geométrico.

$$d_{50} = 3(0.38)^n \frac{D_I^2}{K_c} \left[ \frac{\mu}{D_c I_v} \cdot \frac{(1 - R_{(+)}l)}{\rho_s - \rho_l} \cdot \tan \frac{\theta}{2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Donde :

$d_{50}$  : Diámetro de corte, donde es el tamaño de la separación

$K_c$  : Parámetro que depende del diseño

$D_I$  : Diámetro interior de la entrada de alimentación

$D_c$  : Diámetro interior del hidrociclón

$I_v$  : Flujo volumétrico de la entrada

$R_{(+)}$  : Fracción de masa del líquido de la alimentación que sale por la descarga inferior

$\theta$  : Ángulo del cono del hidrociclón

Rietema (1960) afirma que el enfoque de la órbita en equilibrio no es válido porque supone que las partículas tienen suficiente tiempo para alcanzar las

velocidades de equilibrio y que esto puede no ser cierto respecto a los tiempos cortos de residencia que ocurren en los hidrociclones. Su enfoque supone que la partícula de d50 es aquella partícula que comienza su recorrido en el centro de la admisión, y que apenas logra llegar a la pared en el ápice. La correlación se obtuvo considerando el movimiento de la partícula de d50 sobre la distancia DI en el tiempo de residencia disponible, suponiendo condiciones laminares.

El segundo miembro de la ecuación es aproximadamente constante y se le llama el número característico del ciclón.

### **2.1.3. Técnicas matemáticas aplicadas a cálculos en planta concentradora, Javes, Joseph, 2013**

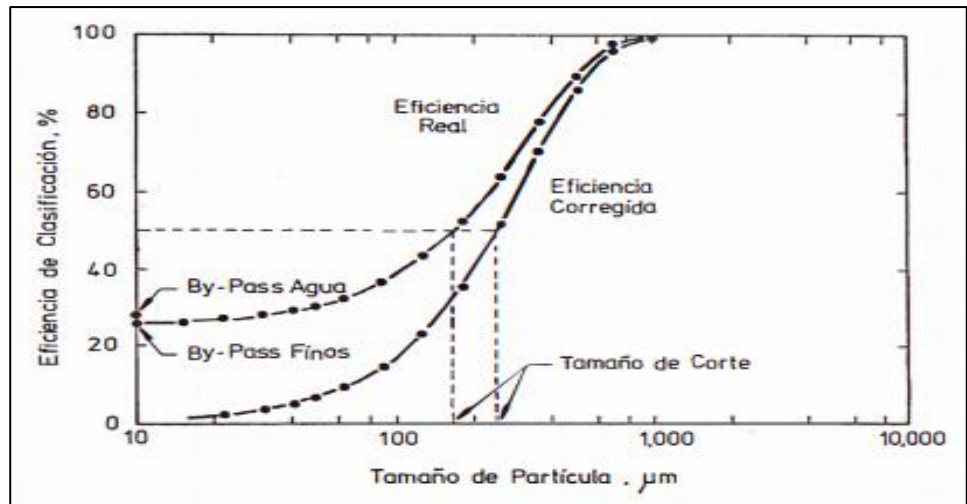
#### **Modelos empíricos para Hidrociclones**

La simulación de un circuito de molienda requiere de modelos para molinos y para los hidrociclones, los modelos de molinos que se usan están basados en la teoría fenomenológica de molienda como un proceso cinético de primer orden y en la teoría de tiempos de residencia. Estas teorías han sido capaces de producir modelo robusto que representan los molinos industriales con precisión necesaria. Con los hidrociclones ha sucedido algo distinto, hasta el momento se usan modelos empíricos tales como Lynch and Rao o el de Plitt, los que son de aplicación aceptable. La principal desventaja de estos modelos es el rango de aplicabilidad y la escasa información que los acompaña. El Hidrociclón consiste de una parte superior cilíndrica unida una base cónica con salida de rebose por boquilla del vórtice (Vortex Finder) y salida de la descarga por el ápex situadas en la parte superior e inferior, respectivamente. La alimentación en forma de pulpa se introduce bajo presión tangencial a

través de una boquilla de admisión ubicada en la parte superior cilíndrica del hidrociclón, los productos abandonan el Hidrociclón a lo largo del eje central en ángulo recto con respecto a la dirección de entrada. En los puntos de salida las corrientes que fluyen remueven en direcciones opuestas. La clasificación de partículas sólidas de diferentes pesos contenidas en la corriente de entrada se produce como resultado de la conversión de la dirección y de la velocidad del flujo de la corriente de entrada en las salidas, a la fuerza centrífuga y a las fuerzas de gravedad que actúan sobre las partículas. Una partícula suspendida en un fluido rotando en el Hidrociclón tiende a moverse sobre las paredes del mismo si la fuerza centrífuga que actúa sobre ella es mayor que la fuerza de arrastre, ya que de otro modo la partícula tiende a moverse radialmente hacia dentro. Aunque puede producirse el corto circuito dentro del Hidrociclón causando que las partículas gruesas aparezcan.

### **Eficiencia de Clasificación**

El hidrociclón queda caracterizado por su curva de eficiencia de clasificación definida para cada tamaño de partícula como la fracción de los sólidos de ese tamaño en la alimentación que es recuperada en la descarga. De esta manera, se espera que la eficiencia así definida alcance sus más altos valores (cerca e inferiores a 1) para las partículas más gruesas en la alimentación y que contrariamente dichos valores sean menores para las partículas finas de tamaño de corte deseado.



Se describe el comportamiento típico del hidrociclón incorporado a un circuito Cerrado de Molienda /Clasificación.

### Modelo de Plitt

Este modelo también propone correlaciones, pero con una mayor cantidad de variables, las ecuaciones son las siguientes:

#### Ecuación de la Presión de Alimentación:

$$P = a_1 Q^{1.78} e^{(0.0055 PVS)} / ((DC)^{0.37} (DI)^{0.94} h^{0.38} (DU^2 + DO^2)^{0.87})$$

*PVS = Porcentaje de sólidos en volumen de la alimentación del ciclón.*

*DC = Diámetro interior del ciclón, pulgadas.*

*DI = Diámetro interior de la boquilla de alimentación, pulgadas.*

*H = Altura libre del ciclón (distancia entre el extremo inferior del vortex y el Superior del apex), pulgadas*

*a<sub>1</sub> = Constante empírica características del mineral*



**Ecuación del Tamaño Corregido:**

$$d_{50}^c = (a_2(DC)^{0.46} (DI)^{0.60} (DO)^{1.21} e^{0.063P}) / ((DU)^{0.71} h^{0.38} Q^{0.45} (p_s - 1)^{0.5})$$

Donde:

$p_s$  = densidad del sólido, g/cc.

$a_2$  = Constante empírica característica del mineral.

$$\ln(D_{50c}) = C_o + 0.3846(D_o) - 0.2857(D_u) + 0.0935(P) - 0.0192(W_{OF})$$

Donde:

$D_{50}^c$  : Tamaño de corte corregido, micrones.

$D_o$  : Diámetro del vortex.

$D_u$  : Diámetro del apex.

$P$  : Presión PSI

$W_{OF}$  : Agua en el rebose ( $m^3/hr$ ).

Para el cálculo del parámetro  $C_o$  se determina para cada muestreo y se toma el valor promedio tal como se muestra en la tabla N° III.7.

	$D_u$	$D_o$	$P$	$W_{of}$	$D_{50c}$	$C_o$
<b>MUESTREO C1</b>	2.5	5.125	10.5	205	56.00	7.702
<b>MUESTREO C2</b>	2.5	5.125	10.5	204	80.00	8.024
<b>MUESTREO C3</b>	2.5	5.125	10.5	198	76.00	7.873
<b>MUESTREO C8</b>	2.5	5.125	10.5	166	60.00	7.005
<b>MUESTREO C10</b>	2.5	5.125	10.5	206	60.00	7.775
<b>MUESTREO C11</b>	2.5	5.125	10.5	183	65.00	7.416
<b>MUESTREO C13</b>	2.5	5.125	10.5	164	62.00	7.014
<b>MUESTREO C14</b>	2.5	5.125	10.5	186	60.00	7.392
					<b><math>C_o</math></b>	<b>7.525</b>

**Tabla N° III.7**

La ecuación del tamaño de corte corregido queda expresada en función de los parámetros  $D_o, W_{of}$  y  $P$ :

$$\ln(D_{50c}) = 7.525 + 0.3846(D_o) - 0.2857(D_u) + 0.0935(P) - 0.0192(W_{OF})$$

El modelo global desarrollado es del tipo dinámico ya que se asume valores iniciales para diferentes corrientes y se va interaccionando de acuerdo al

método numérico del algoritmo de Wegstein (método de la secante) hasta obtener valores estables en cuyos puntos está en régimen estacionario.

## 2.2. Bases teóricas - científicas

### 2.2.1. Hidrociclones

Los hidrociclones son equipos destinados principalmente a la separación de suspensiones sólido – líquido, y son usados en casi todos los sectores.

Un hidrociclón está compuesto por una cámara de alimentación en la parte superior, una cámara cilíndrica donde se desarrolla el vórtice y un fondo cónico donde se produce la separación. Posee adicionalmente dos salidas concéntricas a la cámara cilíndrica, una superior por donde se evacua el material de menor densidad y otra inferior por donde se evacua el material más denso. La alimentación puede ser tangencial o envolvente, las principales partes de un nido y un hidrociclón se muestran en la figura 1 y 2.

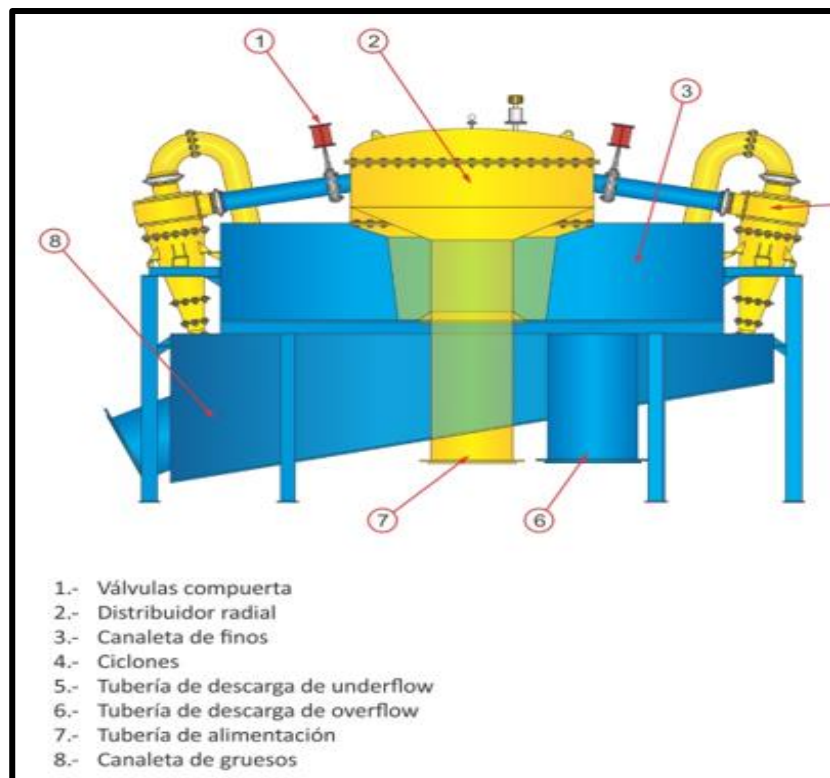


Figura 1 – Partes del nido de hidrociclones.

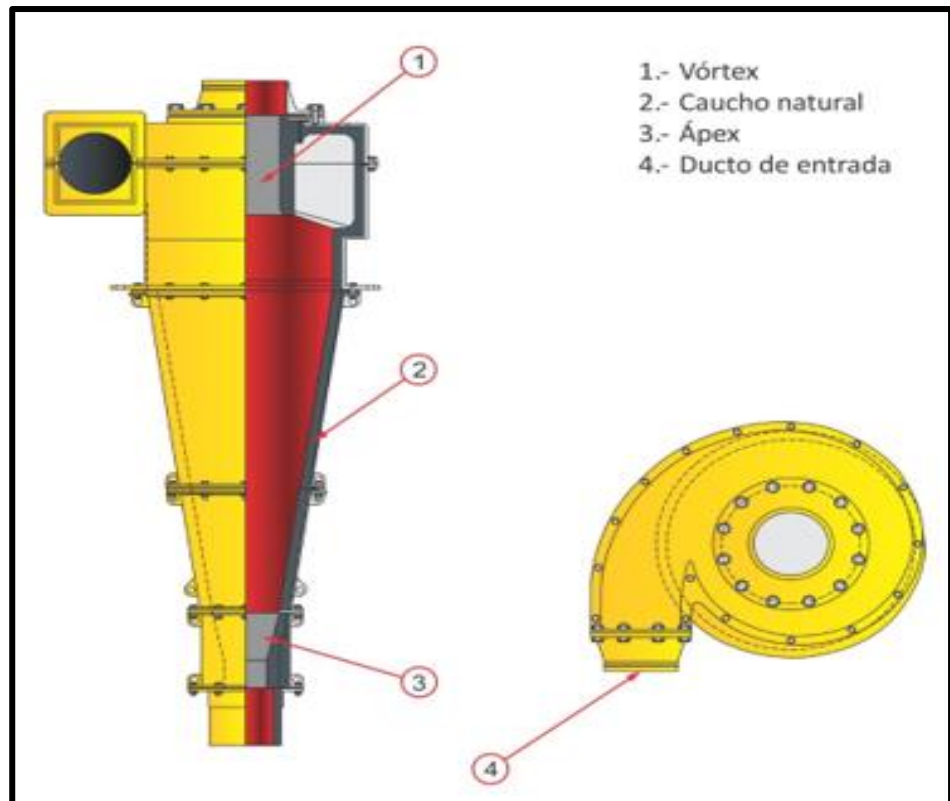


Figura 2 – Partes de un hidrociclón.

### 2.2.1.1. Objetivo del Hidrociclón

El principal objetivo de un hidrociclón es tratar un determinado caudal de pulpa y separarlo en dos fracciones, una llamada sobre flujo u “overflow” la que arrastra los elementos más finos y/o menos densos y otra llamada bajo flujo o “underflow” la que contiene los elementos más grandes y/o más densos y usualmente son más gruesos que el diámetro de corte.

La entrada tangencial de la alimentación al hidrociclón produce un movimiento en vórtice en tres dimensiones. Los perfiles de descarga a través del Index de un hidrociclón se muestran en la figura 3, donde se observa que de los tres ejemplos de descarga del underflow de un hidrociclón la descarga por sombrilla es la adecuada, demostrando el efecto de separación.

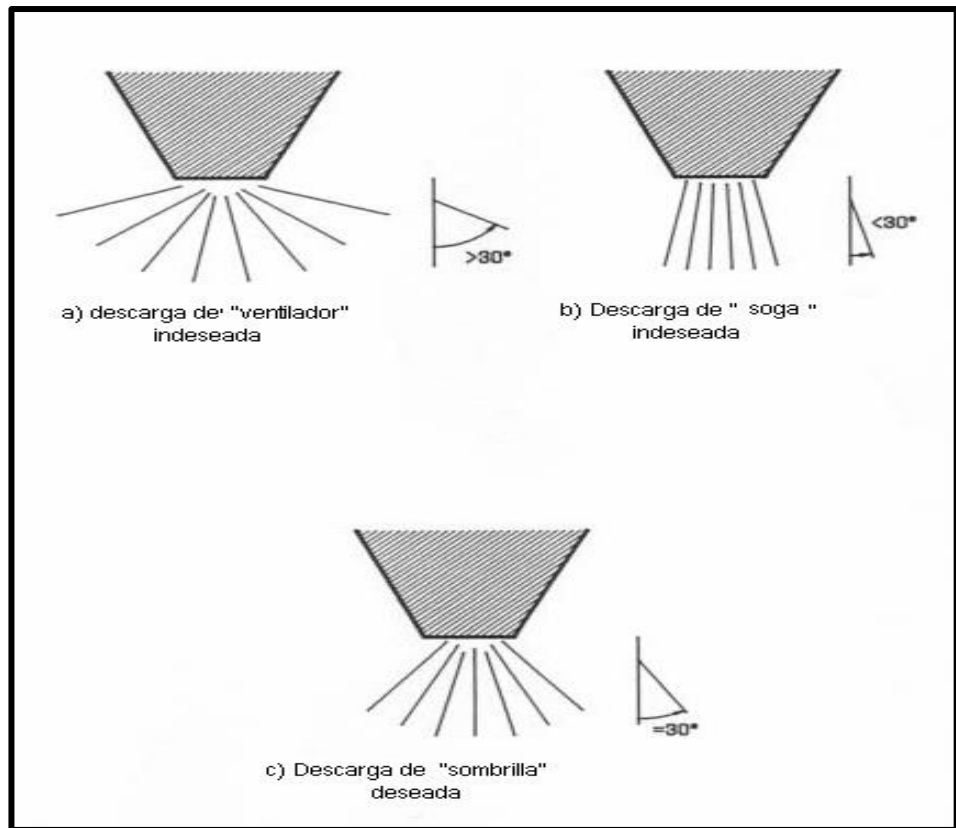


Figura 3 – Tipos de descarga de un hidrociclón.

## 2.2.2. Nido de Hidrociclones

Los nidos de hidrociclones del circuito de molienda de Minera Chinalco Perú, son equipos de clasificación de partículas, con 9,650mm de diámetro y 6,076mm de alto, cada nido tiene una capacidad de 8,400m<sup>3</sup>/h, están compuestos por 18 ciclones de 660mm de diámetro (14 en operación y 4 en stand by), un distribuidor rotatorio de 2,428mm de diámetro, dos canaletas para los productos de la clasificación y 18 válvulas neumáticas para controlar la operación de cada ciclón.

### 2.2.2.1. Distribuidor Radial

El distribuidor radial recibe la pulpa de las bombas a través de una tubería de alimentación de 900mm de diámetro, está formado por una parte cilíndrica de 2,428mm de diámetro cuya función es alimentar de forma homogénea a todos los ciclones que están operando mediante tuberías de 325mm de

diámetro, en total dispone de 18 tuberías, el interior del distribuidor está revestido con caucho natural de 12mm de espesor. En su parte superior cuenta con un manómetro y una tubería de 273mm de diámetro para el agua de lavado.

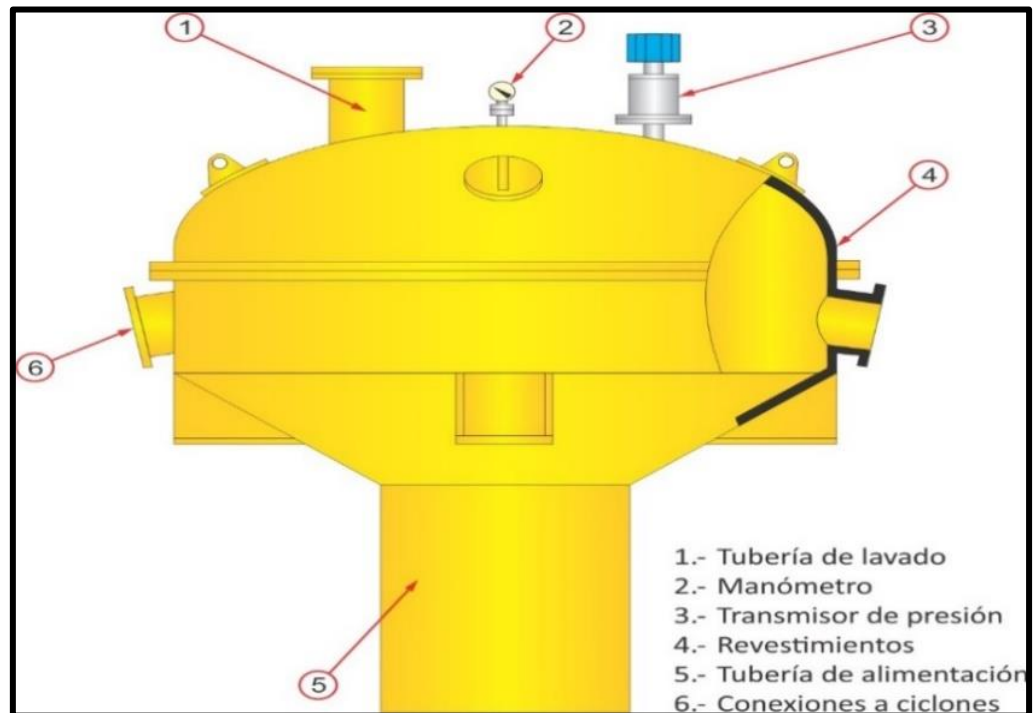


Figura 4 – Distribuidor radial.

#### 2.2.2.2. Canaleta de Finos

La canaleta de finos es de forma cilíndrica hecha de acero estructural, las caras internas están revestidas de caucho natural de 12mm de espesor y su base está revestida con cerámicos de 25mm de espesor, la función de la canaleta es recolectar los finos (overflow) provenientes de la clasificación de los ciclones y descargarlos por la tubería de descarga de 42pulg de diámetro.

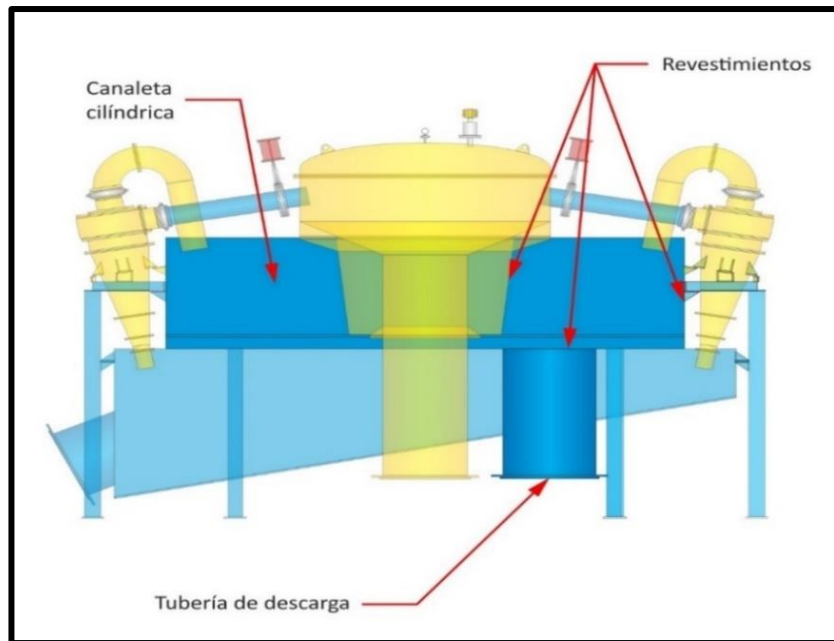


Figura 5 – Canaleta de finos.

### 2.2.2.3. Canaleta de Gruesos

La canaleta de gruesos es de forma cilíndrica hecha de acero estructural donde los revestimientos de las paredes y las bases son cerámicos de 25mm de espesor, su función es recolectar las partículas gruesas (underflow) de la descarga de los ciclones, la base tiene una inclinación de 14° y descarga el contenido a través de una conexión de 42 pulga de diámetro.

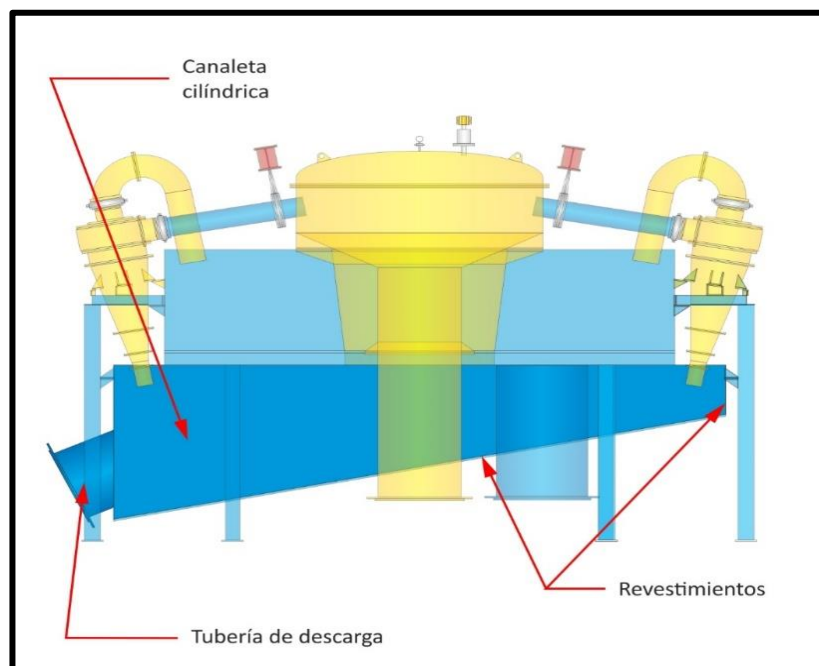


Figura 6 – Canaleta de gruesos.

#### 2.2.2.4. Válvulas Compuerta

Las válvulas compuerta están ubicadas en la alimentación de los ciclones (18), compuestas de un cilindro neumático de 250mm de diámetro, la cual acciona una compuerta con la finalidad de controlar la apertura o cierre de la alimentación a cada ciclón según lo requerido por operaciones, estas válvulas trabajan a una presión de 0.06 a 0.12MPa

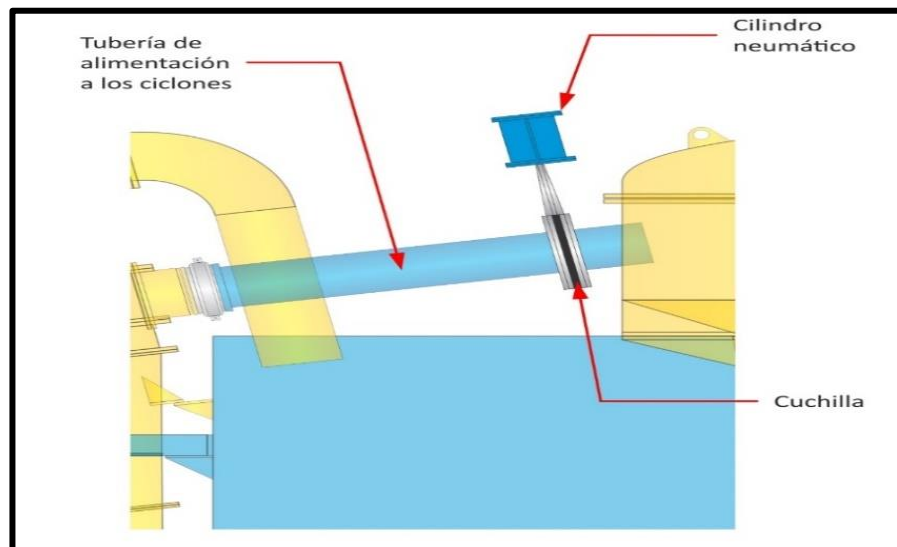


Figura 7 – Válvulas compuerta.

#### 2.2.2.5. Principio de Funcionamiento

Se da desde que la pulpa es enviada por las bombas de alimentación al nido de ciclones, pasa por la tubería de alimentación al distribuidor que se encarga de direccionar-repartir en forma homogénea a cada ciclón, al ingresar la pulpa se mueve de forma helicoidal en la sección cilíndrica del ciclón hasta llegar a la sección cónica, es aquí donde las partículas experimentan fuerzas centrífugas, parte del fluido inferior escapa por el ápex debido a que son las partículas de mayor tamaño y el restante experimenta un movimiento helicoidal contrario, es decir se desplaza hacia arriba, las partículas del fluido que realizan este movimiento son las de menor tamaño debido a que la fuerza

centrífuga es mayor que la fuerza de gravedad y se desplazan para ser descargados por el vortex

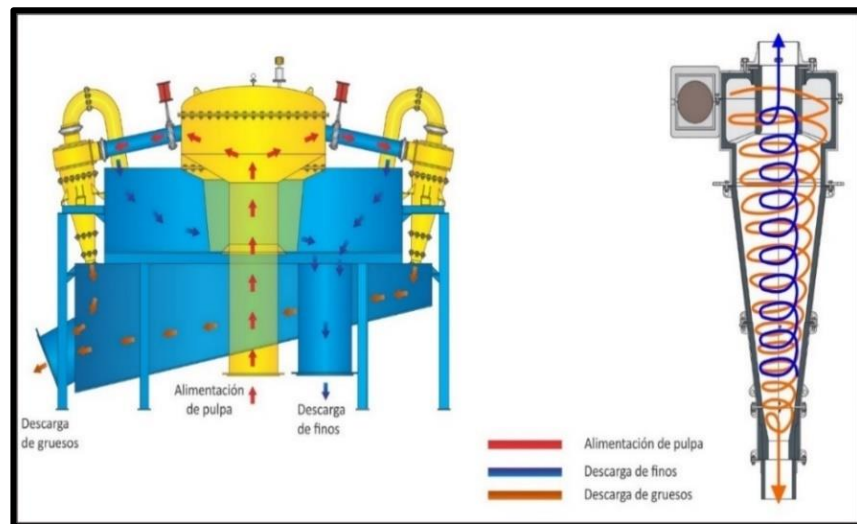


Figura 8 – Principio de Funcionamiento.

### 2.2.3. Medios de Optimización

#### 2.2.3.1. Determinación del tonelaje de tratamiento

El tonelaje de tratamiento de un circuito de molienda está determinado por la alimentación fresca del mineral y la carga circulante, por lo que es necesario para su evaluación conocer los tonelajes en los diferentes puntos, así como los flujos de pulpas y cantidad de agua, además se debe conocer, la gravedad específica y la granulometría del mineral. En el presente trabajo se considera una capacidad de tratamiento de 1500 toneladas secas por día

Así mismo se hace necesario conocer las condiciones operativas del circuito de molienda a fin de poder comparar con las posibles modificaciones que se realicen en el circuito, en la tabla 3.1 se indica

- La densidad de la pulpa.
- Porcentaje de sólidos en peso
- Porcentaje de agua
- Dilución.



- Gravedad específica

### **2.2.3.2. Clasificación de Partículas**

Se denomina clasificación a la separación de un conjunto de partículas de tamaños heterogéneos en dos porciones, cada uno conteniendo partículas de granulometría homogéneas u otra propiedad específica que el conjunto original; la clasificación se realiza por diferencia de tamaños y por gravedad específica que originan diferentes velocidades de sedimentación, entre las partículas de un fluido (Agua o aire), cuando sobre ellas actúan campos de fuerzas como el gravitatorio u otros.

### **2.2.3.3. Capacidad del Hidrociclón**

La velocidad de flujo de la pulpa en un hidrociclón está directamente relacionada a la diferencial de presión entre la alimentación y los orificios de salida del hidrociclón. Puesto que estos orificios están abiertos a la atmósfera, la presión diferencial es igual a la lectura del medidor de presión a la entrada del hidrociclón (o alimentador central del grupo de hidrociclones).

La lectura de presión de la alimentación se debe anotar al momento en el que se toman las muestras para el análisis de rendimiento de separación del hidrociclón. Esta presión, junto con la velocidad de flujo de alimentación al hidrociclón, serán usadas para el cálculo del rendimiento y ajustes del Hidrociclón, para estudiar la capacidad del hidrociclón.

### **2.2.3.4. Malla Óptima de Liberación de Partículas**

Teniendo en cuenta que el objetivo fundamental de la molienda es liberar el mineral valioso del estéril entonces es necesario conocer el tamaño óptimo donde la partícula ya se encuentra liberada dado que nos servirá como parámetro principal para el diseño del clasificador, el grado de liberación es

un factor de suma importancia en el proceso de flotación debe de ser estudiada cuidadosamente a fin de obtener importantes conclusiones, porque, como se sabe afecta en la buena recuperación de las partículas valiosas.

#### **2.2.3.5. Modelos matemáticos para la optimización de Hidrociclones**

Entre los principales tenemos:

- Modelo de Dalstrom.
- Modelo de Bradley.
- Modelo de Yoshika – Hotta.
- Modelo de Lynch – Rao.
- Modelo de Plitt.
- Modelo de Krebs Engineers.
- C.I.M.M. Chile.

#### **2.2.4. Rendimiento de la separación en el Hidrociclón**

Es el óptimo resultado del proceso de clasificación donde se desarrolla la evaluación de las propiedades de una corriente de pulpa al realizar un balance de masa de sólidos y del volumen del agua para las corrientes alrededor del hidrociclón, además de calcular la recuperación de sólidos, agua y pulpa.

Del mismo modo calcular la recuperación de sólidos en base a tamaño por tamaño y dibujar la curva de separación de sólidos del hidrociclón.

En un circuito de molienda, las tareas primarias del hidrociclón son:

- Remover las partículas finas del circuito.
- Retornar las partículas gruesas al molino.

Se considerarán los sólidos y agua en la alimentación del hidrociclón:

- Los sólidos están divididos entre underflow y overflow.
- El agua está dividida entre el underflow y el overflow.

- Cada partícula se va al underflow o al overflow de acuerdo a su tamaño (y a la densidad de los sólidos).

La división de sólidos difiere de la división del agua, pero es altamente influenciada por esta. El balance de la masa de sólidos y de agua debe por lo tanto ser determinado separadamente.

Antes de hacer un balance de masa y de volumen alrededor del hidrociclón, se deben estudiar las propiedades de una corriente de pulpa.

#### 2.2.4.1. Propiedades de una Corriente de Pulpa

Existen 15 propiedades de interés (variables operativas) en la corriente de una pulpa. Al realizar un balance de ingreso de pulpa al hidrociclón estas se representan en un cuadro donde se muestran los parámetros de operación.

Cuando se evalúa el rendimiento de un hidrociclón basado en un grupo completo de datos, ya se conocerán las siguientes propiedades para las corrientes de overflow y underflow:

- Flujo de masa de los sólidos
- Porcentaje de sólidos por peso
- Densidad de los sólidos

Para el propósito de los flujos, la densidad del agua es 1.00 t/m<sup>3</sup>. A partir de estas propiedades conocidas, se puede calcular todos los otros valores en el cuadro presentado. Veamos cómo funciona el cuadro:

#### Cuadro de Flujos dentro de un Circuito

LEYENDA			
<u>tn/hr</u> (sólidos)	Ge	<u>m3/hr</u> ( sólido)	
<u>tn/hr</u> (agua)	% sólidos en peso	<u>m3/hr</u> (agua)	% sólidos por vol.
<u>tn/hr</u> (pulpa)	Densidad de pulpa	<u>m3/hr</u> (pulpa)	
% total (pulpa)	Densidad de agua	% total (pulpa)	

## Fórmulas para el Cálculo de Variables:

$$\text{Flujo total de la pulpa} = \frac{\text{Flujo total de solidos}}{\% \text{ de solidos por peso}}$$

$$\text{Flujo total del agua} = \frac{\text{Flujo total de la pulpa}}{\text{Flujo total de solidos}}$$

$$\text{Flujo del volumen de solidos} = \frac{\text{Flujo total de solidos}}{\text{Desinsidad de los solidos}}$$

$$\text{Flujo total del volumen de agua} = \text{Flujo total del agua}$$

$$\text{Flujo del volumen de la pulpa} = \frac{\text{Flujo del volumen de solidos}}{\text{Flujo del volumen del agua}}$$

$$\% \text{ solidos por volumen} = \frac{\text{Flujo del volumen de solidos}}{\text{Flujo del volumen de la pulpa}}$$

$$\text{Densidad de la pulpa} = \frac{\text{Flujo total de la pulpa}}{\text{Flujo de volumen de la pulpa}}$$

$$\% \text{ Solidos} = \frac{\text{Densidad de pulpa} - 1}{\text{Densidad de pulpa} * \left( \frac{\text{gravedad especifica} - 1}{\text{gravedad especifica}} \right)} * 100$$

$$\text{Gravedad especifica} = \frac{(\% \text{ solidos en fraccion})(\text{densidad de pulpa})}{1 - (\text{densidad de pulpa})(1 - \% \text{ de solidos})}$$

$$\% \text{ Solidos en volumen} = \frac{\text{gravedad especifica}}{\left( \frac{\% \text{solidos}}{100} + g_e \right) - \frac{\% \text{solidos}}{100} * g_e}$$

Tabla 1 – Cuadro de corrientes de flujo y cálculo de corrientes.

## Entradas y Salidas del Flujo del Hidrociclón:

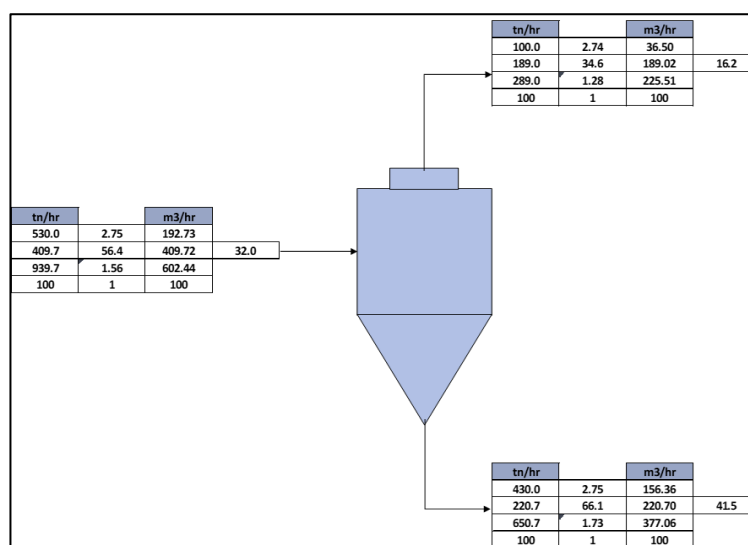


Figura 9 – Entrada y salidas de corrientes de un hidrociclón.

### 2.2.4.2. Recuperación de Sólidos, Agua y Pulpa

La recuperación (R), de sólidos, agua y por consiguiente pulpa dado por un hidrociclón se refiere al underflow y overflow se relaciona con el peso (masa).

La recuperación de sólidos es el porcentaje de los sólidos en la alimentación que se va al underflow, cuya relación es la siguiente.

$$R (\% \text{ de solidos}) = \frac{\text{Velocidad del flujo de masa de sólidos en el bajo flujo (t/h)}}{\text{Velocidad del flujo de masa de sólidos en la alimentación (t/h)}}$$

La recuperación de agua es el porcentaje del agua en la alimentación que se va al bajo flujo.

$$R (\% \text{ de solidos}) = \frac{\text{Velocidad del flujo de masa de agua en el bajo flujo (t/h)}}{\text{Velocidad del flujo de masa de agua en la alimentación (t/h)}}$$

La recuperación de pulpa es el porcentaje de pulpa en la alimentación que se va al bajo flujo.

$$R (\% \text{ de solidos}) = \frac{\text{Velocidad del flujo de masa de pulpa en el bajo flujo (t/h)}}{\text{Velocidad del flujo de masa de pulpa en la alimentación (t/h)}}$$

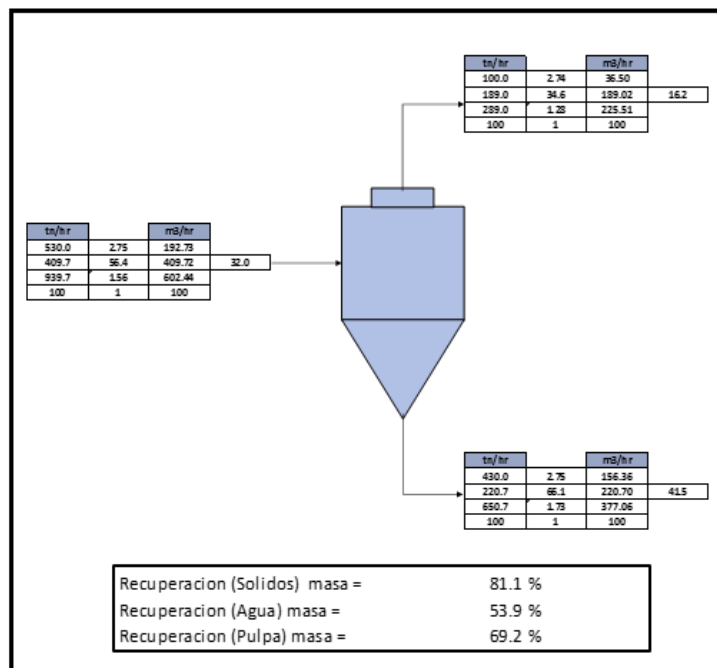


Tabla 2 – Relación de recuperación sólido, líquido y pulpa.

## Calculando la Recuperación de Sólido:

### 2.2.4.3. Recuperación de sólidos tamaño por tamaño

$$Y = \frac{\% \text{ de sólidos de "tamaño d" en el bajoflujo x R (sólidos)}}{\% \text{ de sólidos de tamaño d en la alimentación}}$$

La recuperación de sólidos de la alimentación en el underflow para un rango de tamaño de partículas específico es igual a:

“Tamaño d” se refiere a los tamaños promedio de partículas de un grupo específico.

### 2.2.4.4. Promedio del Tamaño de Partícula

Para todas las clases de tamaños, el promedio del tamaño de la partícula, d, es el promedio aritmético del tamaño de abertura del tamiz el cual define la clase de tamaño. Ejemplo, d para 200 + 150 micrones la clase de tamaño es:

$$\frac{200 + 150}{2} = 175 \text{ micrones}$$

Existen dos excepciones:

- Para su muestra, la clase de tamaño más grueso no está basado en el promedio aritmético, sino en una relación especial la cual se presenta a continuación.
- La clase de tamaño más fino “d” de su muestra, es arbitrariamente agrupada en 15 micrones.

Para estimar el tamaño promedio del tamaño más grueso para su muestra, se realizan los siguientes pasos que se muestran a continuación:

Por ejemplo, si la muestra pasa una malla de 4750 micrones, pero algún material es retenido en la siguiente malla, entonces:

$$4750 \text{ micrones} - 3350 \text{ micrones} = 1400 \text{ micrones} = D$$

Calcule el tamaño de la partícula promedio “d”

Por lo tanto, en este ejemplo:

$$(0.25 \times 1400 \text{ micrones}) + 3350 \text{ micrones} = 3700 \text{ micrones}$$

#### 2.2.4.5. Cálculo de los Sólidos Recuperados en el Underflow

Para calcular la recuperación de sólidos (Y), por cada tamaño, se tienen que seguir los cuatro siguientes pasos.

- a) Se escribe el tamaño de distribución F/U (% en peso).
- b) Si el tamaño más grueso para la muestra no fue de 9,500 micrones, se calcula el tamaño promedio para el tamaño más grueso.
- c) No considere las mallas que no tengan material retenido
- d) Se calcula Y para cada tamaño y la recuperación de sólidos

$$Y = \frac{\% \text{ de tamaño de sólidos } d \text{ en el underflow} \times R \text{ (sólidos)}}{\% \text{ de tamaños de sólidos } d \text{ en la alimentación}}$$

#### 2.2.4.6. Curva de Rendimiento de Separación

El rendimiento de la separación de un hidrociclón se puede expresar en un diagrama ó en una gráfica llamada la curva de rendimiento de separación.

Para obtener la curva de rendimiento de separación de un hidrociclón, simplemente se grafica los valores de sólidos recuperados (Y), contra el tamaño de partícula promedio “d”, para la clase de tamaño.

En la curva de rendimiento de separación se tienen tres características principales las cuales son:

- El tamaño de corte d50

- Una fracción por cortocircuito
- Una precisión de separación

Aquí están las definiciones, como se muestra en la figura N°10.

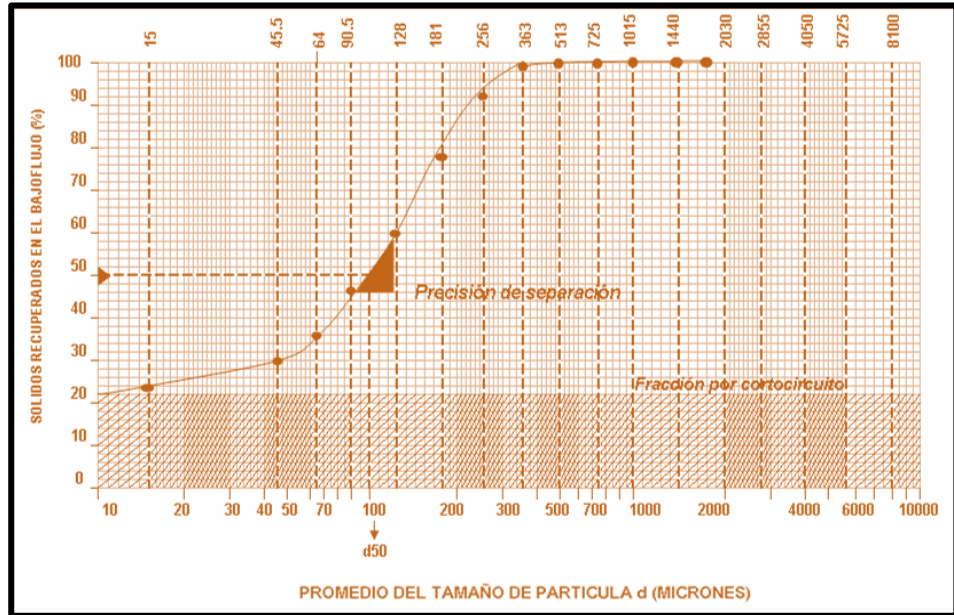


Figura 10– Cálculo del  $d_{50}$ , la precisión de separación y cortocircuito. En forma ideal un clasificador deberá separar de una mezcla original de partícula, en dos porciones una de partículas gruesas de tamaño mayor a un cierto valor llamado  $d_{50}$  y otra de partículas menores al  $d_{50}$  (finos). Pero en la práctica no ocurre así, sucediendo que partículas menores al  $d_{50}$  pasan a la fracción gruesa y viceversa.

#### 2.2.4.7. Tamaño del Corte $D_{50}$

El tamaño de la partícula que corresponde a un 50% de sólidos recuperados en el underflow es el tamaño de corte  $d_{50}$  del hidrociclón. Es el valor del tamaño de partículas que tiene la misma posibilidad de ir a la fracción gruesa (underflow) o a la fracción fina (overflow). Por ejemplo, el tamaño de corte  $d_{50}$  es de aproximadamente 120 micrones. Las partículas que tienen 120 micrones en diámetro (en promedio) tienen un 50% de posibilidades de irse al bajo flujo y un 50% de irse al sobre flujo.



D50 Simple, viene a ser el d50 hallado gráficamente ya sea en un papel semi logarítmico o logarítmico, que resulta de cortar la curva de partición del clasificador hallado gráficamente, en 50% EU y EO; luego el punto proyectar verticalmente al eje de las abscisas donde se encuentra el tamaño de las partículas y el punto donde corte a esta será el d50 simple en micrones, entonces es necesario para determinarlo graficar la curva de partición.

Para determinar el d50 simple hay dos métodos conocidos, variando solamente la forma de cálculo matemático, pero el grafico es el mismo para ambos casos y por ende el resultado será similar.

D50 calculado, viene a ser el d50 calculado matemáticamente a partir de un modelo matemático sin ser necesario primero graficar la curva de partición.

Se halla a partir del modelo de Rossín Rammler

$$Y = 100 - 100 e^{-0.69311 \left( \frac{x}{d_{50}} \right)^m}$$

**Donde:**

**Y** = Euc (% de partición de las arenas para cada malla).

**X** = tamaño promedio de partícula de cada malla.

**d50** = tamaño de corte del clasificador calculado.

**m** = Precisión de separación propia para cada clasificador

El cálculo se hace conociendo de antemano el porcentaje de partición simple (Porcentaje Eu y porcentaje Eo) hallado matemáticamente. Le damos el tamaño promedio de las partículas (x), hacemos una pequeña regresión lineal y aplicando la técnica de mínimos cuadrados hallamos los valores de “m” y d50 calculado y remplazando estos valores en la ecuación obtendremos la ecuación que gobierna la curva de partición de un determinado clasificador.

Para aclarar, los términos de d50 simple y calculado podemos relacionarlo con el F80 y el P80; para determinarlo hay 2 métodos. Uno es el método gráfico que se le obtiene a partir de la curva de Gaudin – Shumman y de Rossín Rammler, si lo comparamos con el d50 podríamos decir que el F80 y el P80 hallado gráficamente es el simple y el hallado matemáticamente sin necesidad de previo grafico vendría a ser el F80 y P80 calculado. Sirve para ajustar la curva de partición debido a los errores que se puedan cometer tanto, en los muestreos, pesadas, análisis granulométrico, entre otras.

D50 corregido, viene a ser el d50 obtenido al corregir la curva de partición simple y por ende los % de partición por efecto del By-pass del clasificador: Los porcentajes de partición que vienen a ser los sólidos recuperados corregidos en el underflow, se calculan a partir de la siguiente formula:

$$\%Eu_c = \frac{Eu - Bp}{1 - Bp} * 100$$

**Donde:**

**%Euc** = Porcentaje de partición corregida de las arenas del clasificador o solidos recuperados corregidos.

**Eu** = Fracción de partición simple de las arenas del clasificador o solidos recuperados en el underflow.

**Bp** = By – Pass del clasificador

Se corrige la curva de partición para conocer el d50 corregido y para conocer cuánto se puede incrementar la eficiencia del clasificador, corrigiendo o eliminado en lo mínimo posible el By – Pass.

Se entiende por By – Pass o corto circuito de un clasificador al proceso donde las partículas finas ya liberadas son arrastradas por acción mecánica del agua sin previa clasificación y viceversa, partículas gruesas que faltan liberarse son arrastradas al rebose también por acción del agua.

Todo lo dicho indica que para eliminar este corto circuito es necesario mantener la mayor cantidad de sólidos en las arenas del clasificador y la mayor cantidad de agua en el rebose del clasificador, ya que al regresar nuevamente partículas finas a la molienda consume energía inútilmente y limita el tonelaje del procesamiento del mineral, y por otro lado si partículas gruesas no liberadas se van a la etapa de flotación implicara esto en la baja recuperación de las partículas valiosas redundando todo esto en la rentabilidad económica de la empresa.

Es por esto que en algunas plantas concentradoras la posición que dan a sus hidrociclones son diversos, pudiendo ser estos inclinadas y hasta horizontales con la finalidad de eliminar el By – Pass y aumentar la eficiencia del clasificador. El d50 corregido nos sirve para comparar cuanto se incrementa la eficiencia del clasificador al corregir el By – Pass, como se obtiene esto, primero hallamos la eficiencia con el d50 simple, como parámetro, luego con el d50 corregido, sirve como dato para utilizar en los modelos de Plitt.

#### **2.2.4.8. Fracción de Cortocircuito**

Existe una fracción de la alimentación al hidrociclón la cual se va al underflow sin sujetarse a clasificación. Esta ocurrencia crea un espacio entre el extremo inferior de la curva de rendimiento de separación y el eje horizontal de la gráfica. La fracción por cortocircuito consiste principalmente de partículas finas que son arrastradas por el agua al underflow.

La recuperación de agua debido a bajoflujo,  $R$  (agua), a menudo da un estimado aproximado de la fracción por cortocircuito de sólidos en el U/F.

#### 2.2.4.9. Precisión de la Separación

La precisión de la separación es una medición de la habilidad del hidrociclón de distinguir entre partículas gruesas y partículas finas. La precisión de la separación es observada en la parte de mayor inclinación (y la parte central) de la curva: A mayor inclinación de la curva mejora la separación.

Un clasificador que puede separar perfectamente partículas en base al tamaño, tendrá una curva de separación como la siguiente representación:

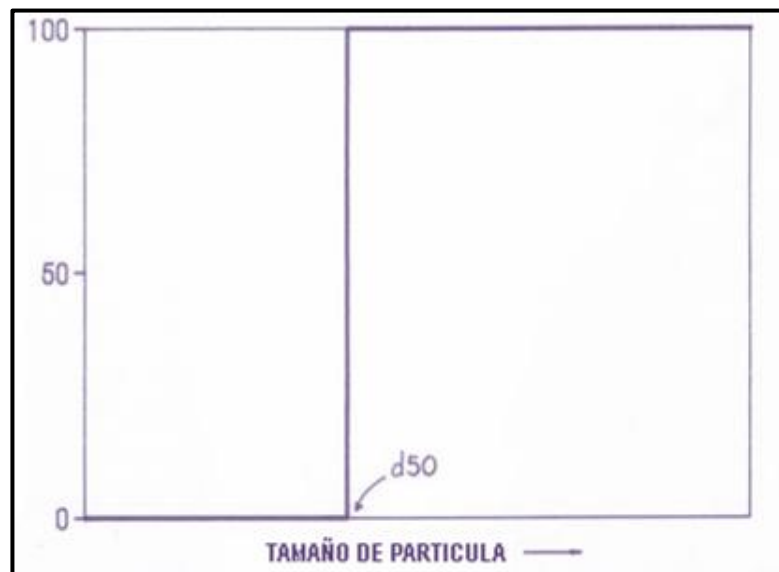


Figura 11. Una curva perfecta de separación del hidrociclón. En esta figura 11, la separación perfecta indica que todas las partículas en la alimentación de tamaño de corte más fino de  $d_{50}$  se van al overflow. Todas las partículas más gruesas que el tamaño de corte  $d_{50}$ , se van al underflow. Un clasificador que no pueda lograr ninguna separación ordenada tendría una curva de separación como se muestra en la Figura 12.

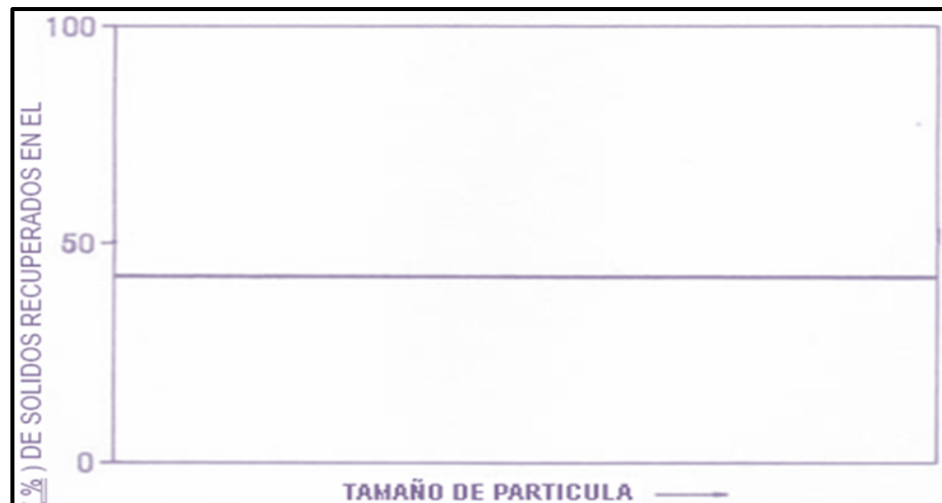


Figura 12 - Una curva de separación “sin orden”.

Cuando la curva de separación es horizontal,  $d_{50}$  es indefinido. Cualquier partícula tiene una probabilidad uniforme de irse al underflow o al overflow. Los hidrociclones pueden alcanzar el mejor rendimiento de separación cuando se tiene:

- El tamaño de corte  $d_{50}$  que desea
- La fracción por cortocircuito más pequeña posible.
- La clasificación más precisa posible.

Cuando se reúnen, estos tres criterios, también se alcanzará el desplazamiento equivocado mínimo de partículas gruesas y de partículas finas.

Considerando lo anterior para estimar la eficiencia de separación del hidrociclón, se podrá realizar lo siguiente:

- Corrección de la curva de rendimiento de separación.
- Estimación de la precisión de separación del hidrociclón
- Descripción de la eficiencia de separación del hidrociclón

Existen dos medidas de la precisión de separación de un hidrociclón:

- I.S., El índice de selectividad.

- “m”, una variable figurada.

Ambas medidas están relacionadas a la curva de recuperación corregida.

Primero veamos el índice de selectividad.

**a. Índice de Selectividad**

El índice de selectividad es determinado por las lecturas de los valores de d25c y d75c de la curva de recuperación corregida.

$I.S = \frac{d_{25c}}{D_{75c}} =$	Tamaño de partícula correspondiente a un 25% de los sólidos recuperados Tamaño de partícula
-----------------------------------	--

El mejor valor para el índice de selectividad es de 1.0, el promedio es de 0.5 a 1.

Se puede determinar la otra medida de precisión de clasificación “m” con una ecuación lineal.

**2.2.4.10. Curva de Separación Corregida**

La fracción por cortocircuito no es clasificada por el hidrociclón, y va a la corriente del underflow.

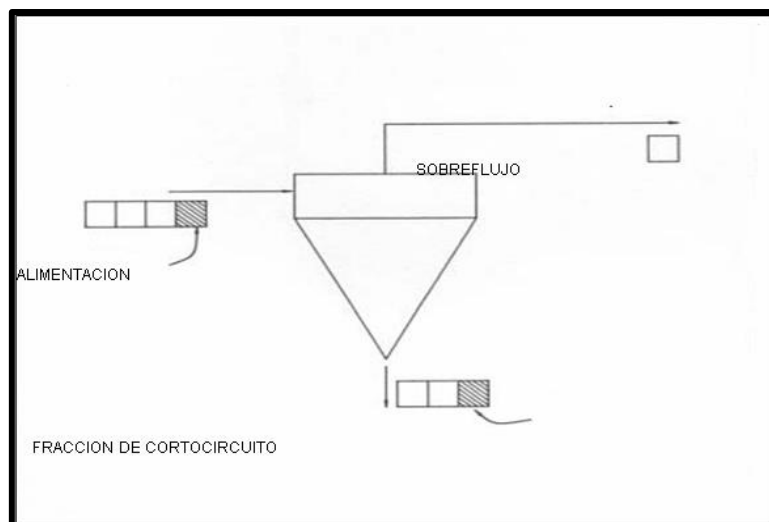


Figura 13 - Camino de la fracción por cortocircuito.

Para dibujar la curva de rendimiento de separación corregida, se tienen que seguir los siguientes pasos.

- Estimar la fracción por cortocircuito para la curva de separación.
- Calcular la recuperación corregida,  $Y'$ , para cada clase de tamaño.

$$Y' = \frac{Y - \text{cortocircuito}}{100 - \text{cortocircuito}}$$

### 2.2.5. Ajustes en el Hidrociclón

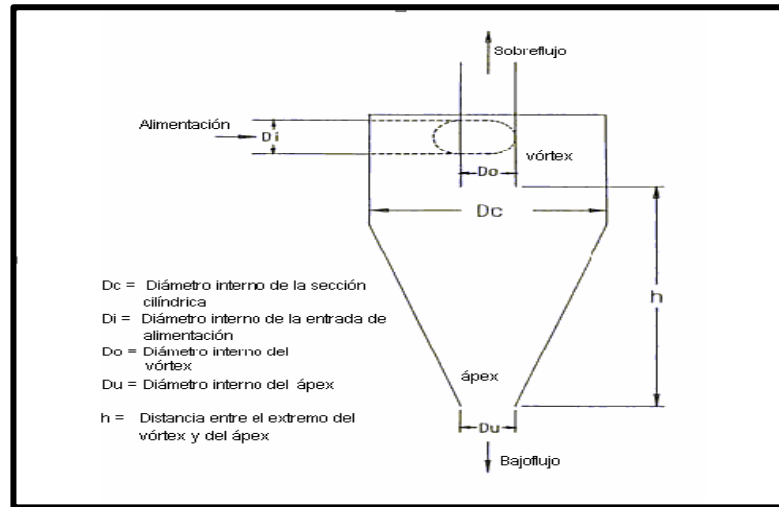


Figura 14 - Dimensiones principales internas de un hidrociclón.

Se tiene que tener en cuenta lo siguiente para realizar el ajuste del hidrociclón:

- Tener en cuenta que los términos “hidrociclón” y “unidad” son intercambiables.
- Una “instalación” de hidrociclones se refiere a cualquier número de unidades usadas para la clasificación de sólidos en la etapa específica de un proceso. Varios hidrociclones podrían ser agrupados como paquetes ó como grupos. Una instalación también podría consistir de una sola unidad.
- La palabra “instalación” implica que todas las unidades dentro de la instalación tienen dimensiones iguales y que les son alimentadas cantidades de pulpa equivalentes.
- El  $d_{50c}$  representa el tamaño de corte corregido de una instalación. Sin

embargo, se asume que este valor de  $d_{50c}$  es el mismo para unidades individuales en la instalación.

- Una “aplicación” de hidrociclón se refiere al uso específico de la instalación del hidrociclón en la planta. El uso de hidrociclones en el circuito de molienda, circuito de remolienda, y planta de relleno son ejemplos de aplicaciones de hidrociclón.
- La razón de “ajuste” implica cambios razonables a las condiciones de operación existentes. Cambios extremos no se pueden expresar como “ajustes” ya que ellos podrían requerir un cambio completo en los equipos.

#### **2.2.5.1. Capacidad del Ápex y % de Sólidos en el Underflow del Hidrociclón**

Para un hidrociclón en operación, el ápex debe ser lo suficientemente grande para permitir la existencia de un vortex de aire y el paso de todas las partículas clasificadas por el circuito como “gruesas”. Por otra parte, el ápex no puede ser tan grande como para minimizar el cortocircuito del agua (y partículas finas) al underflow.

#### **2.2.5.2. % de Sólidos en el Underflow**

Como se observó en el “Rendimiento del Hidrociclón”, cualquier cantidad de agua que se va a la corriente de bajo flujo de un hidrociclón, arrastra partículas finas. La fracción de cortocircuito de partículas finas en el underflow es una de las fuentes principales de imperfección en las características de separación de tamaños del hidrociclón. Cuando el diámetro del ápex es muy grande, sale un exceso de agua (y arrastra partículas finas) con partículas gruesas; esto afecta negativamente el rendimiento de separación.



Cuando el diámetro del ápex es muy pequeño, tiende a ocurrir la “soga”, esto también es detrimental en el rendimiento porque el aire no puede entrar a la unidad a través del ápex, y el aire del vortex pierde prominencia. Por lo tanto, la función del ápex es permitir el paso de partículas gruesas al underflow con la cantidad de agua mínima, y sin condición de sogas. El diámetro de un ápex tiene un pequeño efecto sobre el tamaño de corte corregido,  $d_{50c}$ , del hidrociclón. Sin embargo, el  $d_{50c}$  es mucho más sensible a otros factores como el % de sólidos en la alimentación del hidrociclón ó diámetro del vortex.

En resumen, siempre se debe reservar los ajustes del diámetro del ápex para alcanzar el % objetivo de sólidos en el underflow. Esto minimizará el efecto negativo de la fracción de cortocircuito en el rendimiento de separación.

El grueso de los sólidos en el underflow determina principalmente el % máximo de sólidos alcanzable en el ápex bajo un patrón de descarga normal de “sombrilla” (sin sogas).

Con sólidos muy gruesos (tales como los de la primera etapa del molino de bolas en una planta), el underflow debería aproximarse a un 55% de sólidos por volumen. Con partículas finas (circuitos de remolienda), se podría obtener solamente un 40% de sólidos por volumen ó incluso menos.

Un buen criterio de diseño para la mayoría de circuitos de molienda es dimensionar el ápex del hidrociclón con un objetivo de 50% de sólidos por volumen. Se podría hacer más pruebas de la planta para afinar más el diámetro del ápex; su meta será maximizar el % de sólidos en el underflow ajustando el diámetro del ápex. Dicho ajuste puede producir beneficios importantes en términos de rendimiento de clasificación a un costo muy bajo.

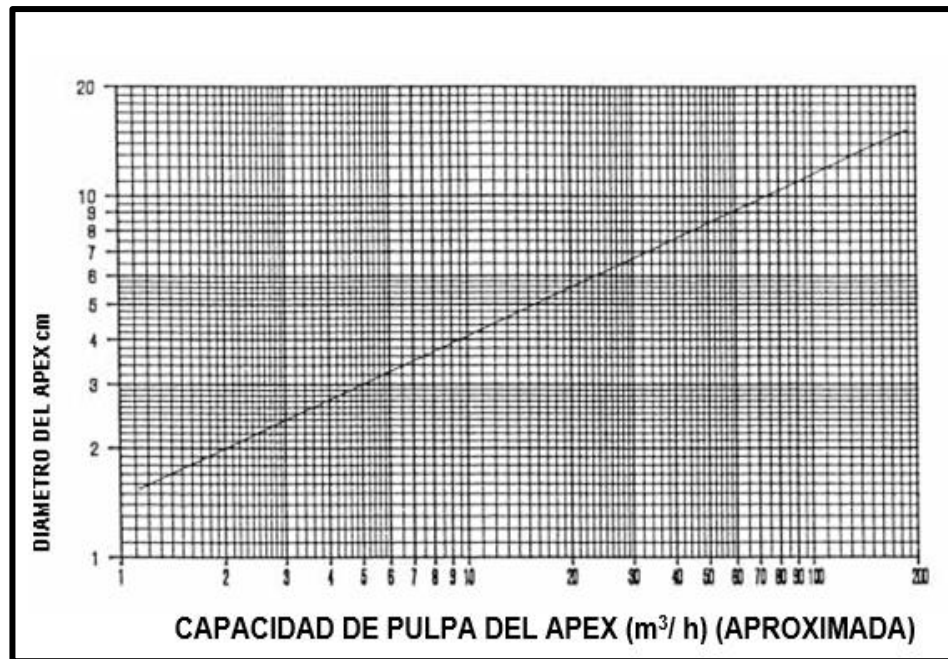


Figura 15 - Diámetro del ápex contra la capacidad volumétrica (aproximadamente, después de Arterburn, 1982).

La abertura del ápex indicada permitirá calcular la velocidad de flujo volumétrico de la pulpa y del aire con una descarga de “sombrilla” normal.

Para determinar el diámetro del ápex que reúna la capacidad deseada mientras mantiene un patrón de descarga aceptable, se tiene que mantener lo siguiente.

Se tiene que determinar el volumen de la pulpa que fluirá en el ápex de cada hidrociclón en la instalación y determinar las condiciones operativas existentes:

- La velocidad de flujo total de los sólidos secos (t/h) en el underflow
- El número de ápex (unidades) en la instalación.
- La densidad de los sólidos que fluyen a través del ápex (g/cc ó t/m<sup>3</sup>).
- El % de sólidos deseado de la pulpa en el ápex (normalmente el 50% por volumen)

Usando la información anterior se calcula la capacidad de pulpa requerida de un ápex con la siguiente ecuación:

Velocidad de flujo total			
de sólidos en el	$\times \frac{1}{\text{densidad de sólidos}}$	$\times \frac{1}{\% \text{ de sólidos por volumen}}$	= Capacidad de
<u>bajoflujo (t/h)</u>			pulpa requerida de
# de ápex	(t/m <sup>3</sup> )		un ápex (m <sup>3</sup> /h)

### 2.2.5.3. Presión de Alimentación y Diámetro del Vortex

La capacidad volumétrica de alimentación de la pulpa de un hidrociclón es determinada en primer lugar por:

- La presión de alimentación a la entrada del hidrociclón
- El diámetro del vortex

En la planta, la presión de alimentación de la pulpa es usualmente medida en “psi” (libras por pulgada cuadrada – psi por sus siglas en inglés) ó “kPa” (Kilopascales). En este módulo, nosotros usamos la unidad de “kPa”. Usted puede usar el siguiente factor de conversión cuando usted quiera convertir unidades de “kPa” a unidades “psi”:

1 psi = 6.9 kPa
-----------------

En la planta, la presión de alimentación de la pulpa en una instalación es generalmente indicada por el medidor de presión localizado en el distribuidor de la pulpa. Nosotros podemos asumir que la misma presión de alimentación existe en la entrada de cada hidrociclón en la instalación.

En adelante se mostrarán la relación general que existe entre la presión de alimentación del hidrociclón (P), capacidad volumétrica (Q), y el diámetro del vortex (Do). Ya que la meta es alcanzar el ajuste de las condiciones operativas del hidrociclón, teniendo P, Q, y Do para condiciones “existentes”

y para condiciones “nuevas”. Estas variables han sido definidas de la siguiente manera:

- La relación general entre P, Q, y Do es:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left( \frac{Q_2}{Q_1} \right)^2 \times \left( \frac{Do_1}{Do_2} \right)^2$$

- Cuando  $Do_1 = Do_2$ :

$$\frac{P_2}{P_1} = \left( \frac{Q_2}{Q_1} \right)^2$$

- Cuando  $Q_1 = Q_2$ :

$$\frac{P_2}{P_1} = \left( \frac{Do_1}{Do_2} \right)^2$$

#### 2.2.5.4. Elección del Número de Hidrociclones

Cuando un cambio ocurre en la planta, la velocidad de flujo volumétrico de la pulpa en una instalación de hidrociclón no debe ser más grande que la de su capacidad de diseño original. En este caso, será necesario cambiar el número de unidades operacionales en la instalación.

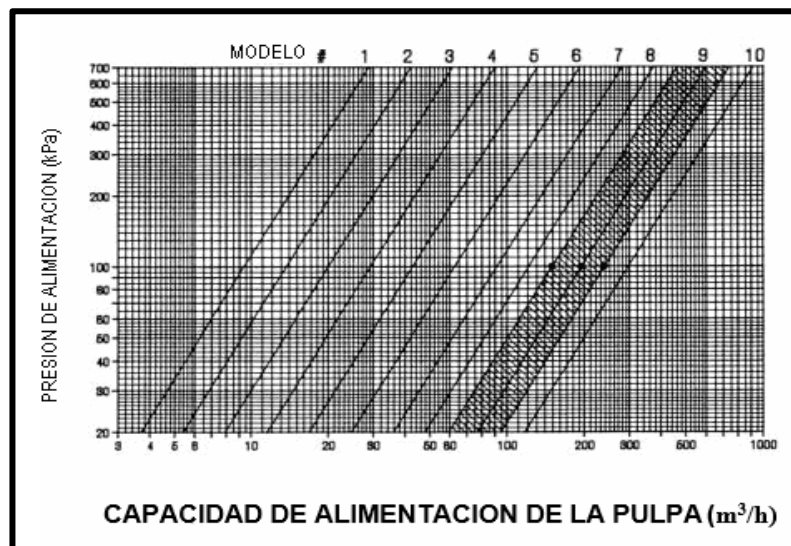


Figura 16 - Gráfica de la capacidad del hidrociclón típico.

En la gráfica de la figura 16, cada una de las “curvas” representa la relación entre la capacidad contra la presión de alimentación de un hidrociclón singular con el diámetro estándar del vortex para el número del modelo dado. El número del modelo normalmente corresponde al diámetro nominal del cuerpo de un hidrociclón específico (en la sección cilíndrica).

Para una presión de alimentación dada, se puede incrementar la capacidad de alimentación de un hidrociclón incrementando el diámetro del vortex.

Podría suceder que la clasificación del hidrociclón y los requerimientos de capacidad sean incompatibles. Por ejemplo, se podría tener que seleccionar un hidrociclón muy grande para obtener un  $d_{50c}$  más grande; en este caso, la capacidad del hidrociclón podría ser mayor que la velocidad de alimentación volumétrica total de la pulpa e incluso tener una presión de alimentación extremadamente baja. Se deberá considerar diseñar un circuito de recirculación ó seleccionar otro tipo de clasificador.

Las dos reglas siguientes siempre aplican a la selección de hidrociclones:

- Primero, especifique los hidrociclones en base a los requisitos de clasificación (p.e.  $d_{50c}$ ) a la presión de alimentación esperada.
- Segundo, seleccione el número de hidrociclones requerido en la instalación basado en la velocidad de alimentación volumétrica de pulpa y con la presión de alimentación deseada.

Algunas repeticiones serán necesarias. Su selección final debe cumplir ambos requisitos.

#### **2.2.5.5. Ecuación de Plitt para el cálculo del $D_{50c}$**

Anteriormente se determinó el tamaño de corte corregido,  $d_{50c}$ , de un hidrociclón con información sobre el rendimiento de separación del tamaño

obtenida durante una prueba en una instalación de hidrociclón.

El profesor Plitt ha realizado una serie de experimentos en los cuales determinó el valor de  $d_{50c}$  bajo una variedad de combinaciones de dimensiones del hidrociclón y de las características de alimentación. Como resultado de este trabajo, el desarrolló la siguiente ecuación que relaciona  $d_{50c}$  para una unidad individual a sus dimensiones y características de alimentación.

$$d_{50c} = \frac{K D_c^{0.46} D_i^{0.60} D_o^{1.21} \exp [0.063 (100 V)]}{D_u^{0.71} h^{0.38} Q^{0.45} (S - L)^{0.5}}$$

Esta ecuación muestra que el tamaño de corte corregido ( $d_{50c}$ ) de un hidrociclón en operación está relacionado a los siguientes factores.

- K = Una constante para una unidad de hidrociclón en particular.
- $D_c$  = El diámetro interno de la sección cilíndrica (cm)
- $D_i$  = El diámetro interno de la entrada de la alimentación (cm)
- $D_o$  = El diámetro interno del vortex (cm)
- V = La fracción de sólidos por volumen de la pulpa de alimentación
- $D_u$  = El diámetro interno del ápex (cm)
- h = La distancia entre el vortex y el ápex (cm)
- Q = La velocidad de alimentación de la pulpa, por unidad (m<sup>3</sup>/h)
- S = La densidad de los sólidos en la alimentación (t/m<sup>3</sup> ó g/cc)
- L = La densidad del líquido en la alimentación (t/m<sup>3</sup> ó g/cc)

#### **2.2.5.6. Ajustando el Rendimiento del Hidrociclón**

Se realizan los cambios deseados al rendimiento de separación de la instalación del hidrociclón en planta usando la ecuación de Plitt para el  $d_{50c}$  del hidrociclón. El ajuste se divide en dos secciones: aplicaciones del

hidrociclón en circuito abierto y aplicaciones en circuito cerrado. Se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Obtener un  $d_{50c}$  deseado variando la alimentación del agua del hidrociclón a y/o ajustes dimensionales.
- Obtener una carga circulante deseada en un circuito cerrado.
- Ajustar el agua de un hidrociclón en circuito cerrado.

Antes de hacerle un ajuste al hidrociclón, se debe contar primero con la información del rendimiento para la instalación bajo las condiciones existentes. Con esto se puede obtener esta información haciendo una prueba en la planta. Además, se deben registrar las dimensiones del hidrociclón tal como eran durante la prueba.

#### 2.2.5.7. Instalaciones de Circuitos Abiertos

En la instalación de un hidrociclón en circuito abierto no se recicla material del overflow y underflow a la alimentación de la instalación. Cualquier cambio en el rendimiento del hidrociclón no afecta las características de la pulpa alimentada al hidrociclón.

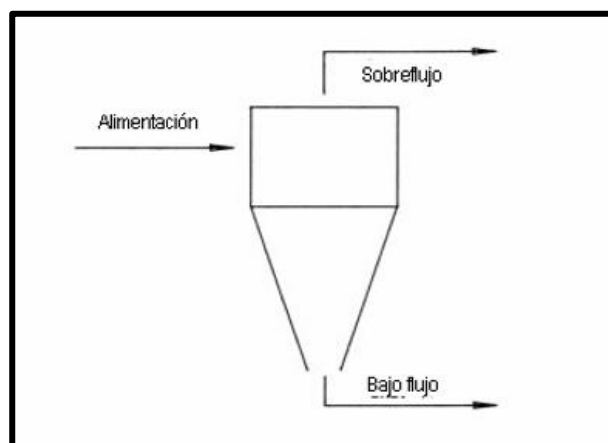


Figura 17 - Hidrociclón en circuito abierto.

El objetivo más común de rendimiento para la instalación del hidrociclón de circuito abierto es la de variar el tamaño de corte corregido,  $d_{50c}$ . A continuación, le mostraremos dos formas de hacer las variaciones.

### **2.2.5.8. Variación del D50c**

Si se desea obtener una partícula fina en el sobre flujo en una instalación de un circuito abierto, se debe disminuir el tamaño de corte corregido. Para obtener una partícula gruesa en el overflow, se debe incrementar el tamaño de corte corregido. Para disminuir el tamaño de corte corregido en la instalación del hidrociclón en circuito abierto, se puede:

- Incrementar la cantidad de agua en la alimentación del hidrociclón o disminuir el diámetro del vortex.

Esto causa:

- Una disminución de d50c
- La recuperación de sólidos en el U/F, para incrementar R (sólidos).
- Aumentar el tamaño del ápex para mantener el % de sólidos en el U/F
- Incrementar la presión de alimentación en la instalación.

Obtener un nuevo d50c para una instalación de circuito abierto a través de un ajuste a la velocidad de alimentación del agua.

### **2.2.5.9. Modificando el Flujo de Agua**

Determinar una nueva cantidad de agua para obtener un nuevo objetivo d50c para una instalación de circuito abierto es un procedimiento de prueba y error.

- Se debe asumir un nuevo valor para la cantidad de agua.
- Basado en este nuevo valor, algunos de los parámetros de la ecuación de Plitt cambiarán y usted calculará un nuevo d50c.

Si el resultante d50c es más fino ó más grueso que el que tenía como objetivo, usted puede repetir los cálculos usando diferentes cantidades de agua.

Al seleccionar un nuevo valor para la cantidad del agua, usted se limita por el % del rango de sólidos permisible en el overflow. Estas limitaciones



generalmente tienen su origen en las operaciones siguientes del proceso. En muchos casos, la cantidad permisible de agua en las operaciones siguientes del proceso es limitada por el máximo % de sólidos permisible en el sobre flujo del ciclón es definido por:

- La cantidad máxima de agua agregada a la instalación del hidrociclón.

El valor más bajo de  $d_{50c}$  alcanzable a través de un cambio en la cantidad de agua agregada a la instalación

#### 2.2.5.10. Modificando el Diámetro del Vortex

Cambiando el tamaño del vortex es una forma de alcanzar un nuevo  $d_{50c}$  si no se puede alterar la cantidad de agua en la alimentación.

#### 2.2.5.11. Instalaciones en Circuito Cerrado

Una instalación de hidrociclón de circuito cerrado es en la que el material, de cualquier corriente del producto, parcialmente ó enteramente retorna a la alimentación del hidrociclón(es).

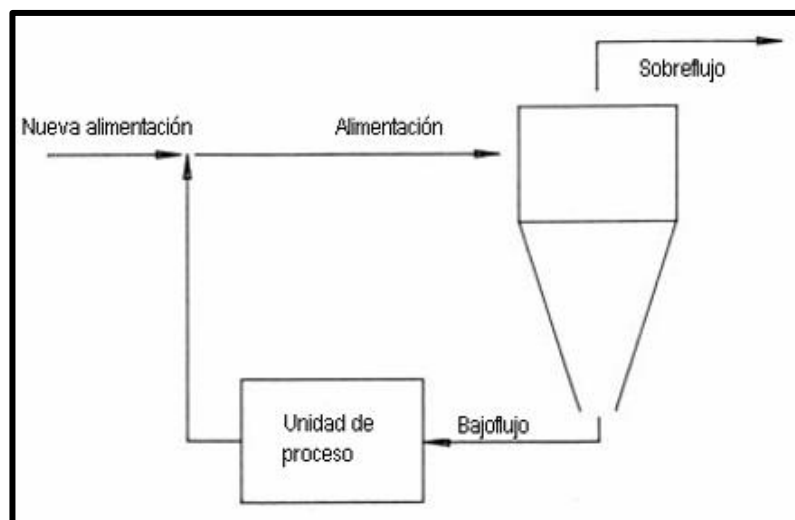


Figura 18 - Instalación de hidrociclón típica en circuito cerrado.

En una instalación de circuito abierto, nosotros podemos determinar los efectos de cambiar la cantidad de agua o el diámetro del vortex sobre el rendimiento del hidrociclón. Sin embargo, con instalaciones de circuito

cerrado, los efectos de estas mismas acciones no pueden ser fácilmente determinadas; un cambio en los hidrociclones también causará que la alimentación cambie debido al material reciclado. Con relación únicamente a sólidos:

$$\text{R de carga circulante (\%)} = \frac{\text{bajo flujo (t/h)}}{\text{sobre flujo (t/h)}}$$

#### **2.2.5.12. Molienda en Circuito Cerrado**

Cuando se quiera ajustar el rendimiento del hidrociclón en molienda de circuito cerrado, no es factible simplemente ir a la planta y cambiar la cantidad agua en la alimentación del hidrociclón. Estas son las razones desde el punto de vista de una operación de estado estable:

- La cantidad de agua total esta usualmente restringida por los requerimientos del % de sólidos del producto del circuito de molienda (p.e. alimentación al circuito de flotación).
- Cuando un circuito de molienda es estable, un cambio en la cantidad de agua al hidrociclón trastornará la estabilidad del circuito. Por ejemplo, el agua adicionada cambiara R(sólidos) los cuales afectarán entonces la carga circulante. Un cambio en la carga circulante puede conducir a un sobre flujo en la caja de bombeo o a que se vacíe de la caja de la bomba (y subsecuentemente a pulsaciones en la bomba)
- El tamaño del overflow del producto de hidrociclones en un circuito cerrado en la molienda esta intrínsecamente ligado a las características de alimentación del circuito y al rendimiento de la molienda del molino de bolas.

Por lo tanto, cambiando la cantidad de agua en un circuito cerrado de hidrociclón únicamente se puede hacer acompañado de otros cambios al circuito. Es aquí donde se podrá cambiar:

- Tamaño del producto del circuito, P80, en asociación con un cambio en tonelaje.
- Relación de carga circulante.
- Cantidad de agua en el hidrociclón(es)

Se mostrará como variar el tamaño del producto del circuito para manejar un incremento o una disminución en tonelaje mientras se mantiene la carga circulante deseada.

#### **2.2.5.13. Modificando el Tamaño de Producto**

Existen distintos motivos para querer ajustar el rendimiento del hidrociclón para alcanzar un tamaño del producto del circuito de molienda diferente. Por ejemplo, se querría incrementar el tonelaje en la planta el cual, manteniendo todo igual le dará una molienda más gruesa. Similarmente, se podría querer que el circuito alcanzara una molienda más fina reduciendo el tonelaje, incrementando la potencia del molino, ó incrementando la eficiencia de la molienda. Para alcanzar estos cambios mientras se mantienen las condiciones operativas del circuito deseado (p.e carga circulante), usted tendrá que hacer ajustes al equipo de clasificación. Normalmente se asume que el  $d_{50c}$  es directamente proporcional al P80 porque la carga circulante es estable.

Cuando se desea variar P80 de un valor existente a un nuevo valor y quiere mantener la carga circulante, se puede usar la siguiente ecuación:

$$\frac{d_{50c_2}}{d_{50c_1}} = \frac{P80_2}{P80_1}$$

Se realizarán los ajustes necesarios al hidrociclón para obtener un P80 (ó d50c) deseado mientras mantiene el volumen de la carga circulante deseada en el circuito deseado.

#### **2.2.5.14. Modificando la relación de Carga Circulante**

La importancia de la carga circulante (y la relación de la carga circulante) para la eficiencia de su circuito de molino de bolas. Podría existir un número de restricciones que limitarían la carga circulante en su planta. Estas pueden ser limitaciones en los equipos de bombeo de pulpa en el molino de bolas. Para los cálculos que siguen, se necesita definir una mejor relación entre d50c y P80 debido a los cambios en la relación de la carga circulante.

Cuando la relación de la carga circulante en un circuito de molienda cambia, d50c no es directamente proporcional a P80. “Los Factores” pueden ser usados para expresar la relación entre d50c y P80 para relaciones de CC.

En las siguientes ecuaciones, el subíndice “1” se refiere a la condición “existente” mientras el “2” se refiere a la “nueva” condición. Los factores que relacionan los valores relativos d50c a diferentes relaciones de cargas circulantes Estos factores son basados en un amplio rango de información obtenida de circuitos de molienda existentes. Se usará una de las siguientes ecuaciones:

- Para obtener d50c<sub>2</sub> cuando la relación de la carga circulante cambia, pero el P80 permanece constante:

$$\boxed{\frac{D50c_2}{D50c_1} = \left(\frac{P80_2}{P80_1}\right)^1}$$

- Para obtener d50c<sub>2</sub> cuando ambos la relación de carga circulante y cambian:

$$\frac{D50c2}{D50c1} = \left(\frac{P802}{P801}\right)^1 \times \left(\frac{\text{Factor2}}{\text{Factor1}}\right)^1$$

Relación	Carga	Circulante (%)	Factor d50c
	150		1.43
	200		1.26
	250		1.11
	300		1.00 (referencia)
	350		0.90
	400		0.82
	450		0.75
	500		0.70
	550		0.67

Tabla 3 - Factores que relacionan d50c con P80 para varias relaciones de cargas circulantes (aproximados).

Hemos diagramado los factores listados en la Tabla 3. Para cuando se necesite interpolar entre los valores enumerados de relaciones de carga circulantes para obtener el valor del factor d50c.

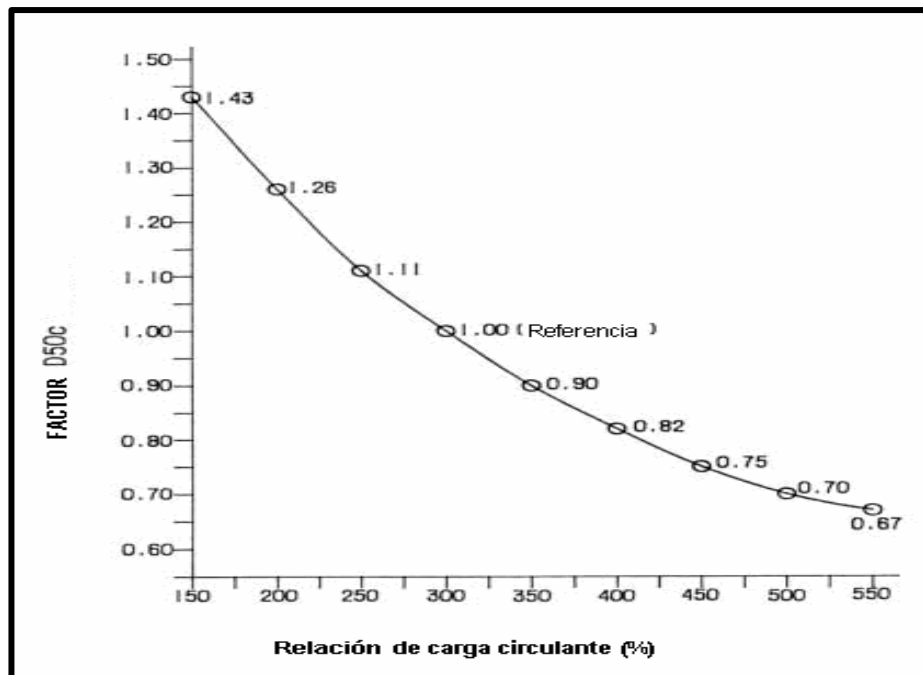


Figura 19 - Factores que relacionan d50c a P80 para varias relaciones de cargas circulantes (aproximados).

Ajustando la relación de la carga circulante significa que el flujo de velocidad de la pulpa en el bajo flujo cambiará; esto también significa que el diámetro de ambos: el ápex y el vortex tendrán que cambiar para mantener P80. Si un cambio extremo en la velocidad del flujo de la pulpa es implementado, usted probablemente tendrá que cambiar el número y/o tamaño de los hidrociclones en la instalación.

#### **2.2.5.15. Balance para determinar la Carga Circulante**

El método implica hacer un balance de materia, malla por malla, la media aritmética de las razones de todas las mallas será la razón de carga circulante. Si por decir se alimenta un determinado tonelaje en cada malla, esta tendría que ir a las arenas y rebose del clasificador, por lo tanto, la carga circulante para cada malla serie la misma, pero el análisis de malla se realiza en material seco y en la práctica estas operaciones se realizan en forma de pulpa lo que implica que no se cumpla exactamente lo indicado, siendo el medio acuoso el que distorsiona la separación indicada.

#### **2.2.5.16. Consumo de Agua con el Nuevo D50**

Para determinar el consumo de agua se usó el método que mide la densidad de la pulpa, que consiste en tomar 1 litro de pulpa en cada punto, luego lo filtramos, secamos, pesamos y podremos obtener el porcentaje de sólidos y por diferencia el porcentaje de agua, con lo que tenemos la cantidad de agua en cada punto.

#### **2.2.5.17. Variando el uso del Agua**

En un circuito cerrado de molienda, usted siempre debe operar la instalación del hidrociclón con el máximo de agua permitido (sin exceder el criterio de

diseño del equipo) en la alimentación, este máximo es definido por el proceso de aguas abajo.

Incrementando el uso del agua en los hidrociclones se presenta una oportunidad para una mejora significativa en la eficiencia de la molienda debido a que este reduce el cortocircuito de partículas finas en el underflow.

Menos partículas finas enviadas al molino de bolas significa que el “inventario de sólidos gruesos” en el molino se puede incrementar.

Es evidente, que agua extra adicionada al circuito de molienda debe irse al sobre flujo del hidrociclón; esta práctica debe por lo tanto ser analizada con respecto al circuito de flotación. Como es usual, se deben hacer varios ajustes simultáneos a los hidrociclones para acomodar un cambio en el uso del agua.

#### 2.2.5.18. Eficiencia de un Clasificador

Viene hacer el trabajo efectivo del clasificador con respecto a partículas de tamaño referente al  $d_{50}$ , esto, está dado por la siguiente formula:

$$ET = E1 \times E2 \times 100$$

**Donde:**

- ET = eficiencia total de clasificador
- E1 = eficiencia con respecto al rebose
- E2 = eficiencia con respecto a las arenas

Y este dado por:

$$E_1 = \frac{\text{Peso de partículas menores al } d_{50} \text{ en el rebose}}{\text{peso de partículas mayores al } d_{50} \text{ en el alimento}}$$
$$E_2 = \frac{\text{Peso de las partículas mayores al } d_{50} \text{ en las arenas}}{\text{peso de partículas mayores al } d_{50} \text{ en el alimento}}$$

### **2.2.6. Ubicación del Área de Estudio**

La Unidad Minera de Toromocho se encuentra en el distrito Minero de Morococha está localizado en la provincia de Yauli, Departamento de Junín, teniendo como referencia las coordenadas E376600 y N8716800 según el Sistema Universal Transversal de Mercador (UTM), zona de referencia PSAD56-18S. La altitud varía entre los 4,400 y 5,000 m sobre el nivel medio del mar. Las vías de acceso son por medio de la Carretera Central asfaltada con 142Km. y por el Ferrocarril Central que conecta el distrito con Lima y La Oroya.

El distrito de Morococha ocupa el centro del intrusivo del periodo Terciario con mineralización asociada de skarn, hornfels y brechas. Se desarrolla en sedimentos calcáreos del grupo Pucará del Jurásico sobre el flanco occidental del anticlinal regional con buzamiento semi plano ( $45^{\circ}$ – $50^{\circ}$ ) que se encuentra localizado entre el gran intrusivo pre-mineral andesítico (“diorita”) hacia el oeste y rocas volcánicas (Catalina) del periodo Pérmico – Triásico hacia el este a lo largo del eje del anticlinal regional. El yacimiento de Toromocho está ubicado dentro de la zona central de cobre del distrito de Morococha con buena zonificación polimetálica de Cu/Pb-Zn/Pb-Ag. El yacimiento mineral forma un centro de skarn y brecha asociada con la mineralización, alteración e intrusión del pórfido feldespático y la granodiorita de hace 7 millones de años.



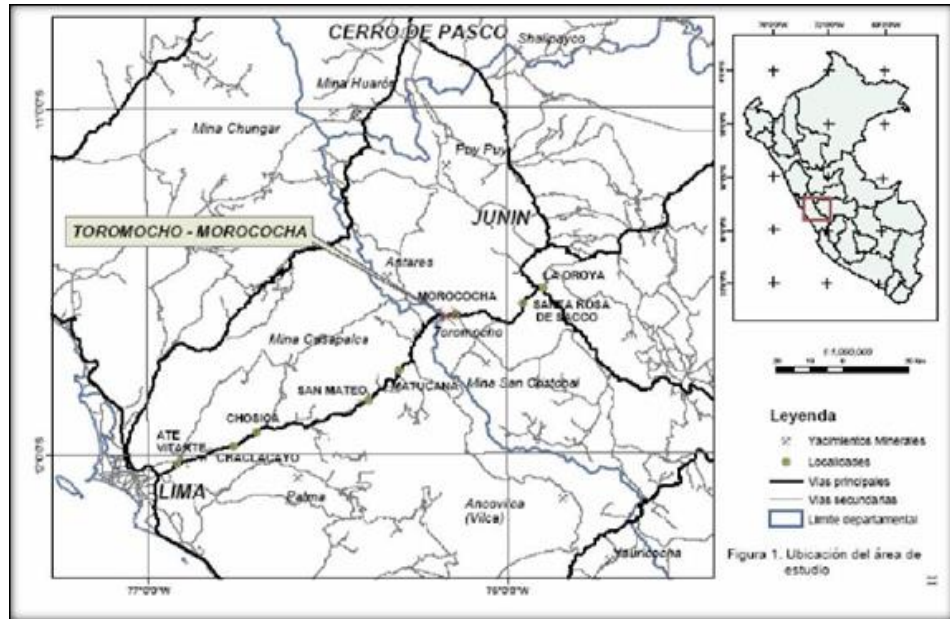


Figura 20 - Ubicación del Proyecto Toromocho - Minera chinaco Perú S.A.

### 2.2.6.1. Geología Regional

La secuencia estratigráfica del área está compuesta por las rocas del Paleozoico y Mesozoico formado por las siguientes unidades geológicas

#### a. Grupo Excelsior (Devónico)

Las rocas más antiguas conocidas en la región son las del Grupo Excelsior del periodo Devónico que afloran fuera del distrito de Morococha, Yauli, Carahuacra, San Cristóbal y Andaychagua, donde forman el núcleo del Domo de Yauli. Sin embargo, se ha encontrado algunas exposiciones de roca Excelsior a aproximadamente 520 m por debajo de la superficie en el Túnel Kingsmill.

#### b. Grupo Mitú (Pérmico)

En el distrito de Morococha, el periodo Pérmico está representado por las rocas volcánicas félsicas y andesíticas Catalina del Grupo Mitu (Formación Yauli). Las rocas volcánicas de Catalina forman el núcleo de los Anticlinales de Yauli y Morococha desde la superficie hasta 1,700 m por debajo, en el nivel del Túnel Kingsmill, pero son más extensos en las áreas de Yauli y San

Cristóbal

**c. Grupo Pucará (Triásico – Jurásico)**

El grupo Pucará fue estudiado en los Andes Centrales por Harrison (1944), Jenks (1955), Szekely and Grosse (1972), Mégard (1977), H. Kobe (1977) entre otros. Como resultado de estos estudios, el grupo Pucará fue subdividido en tres formaciones desde la parte inferior a la superior de la siguiente manera:

- **Formación Chambará:** Intercalaciones de caliza, tufos, lutitas bituminosas, alcanza una potencia máxima regional de 1,500 m.
- **Formación Aramachay:** Interestratificación de lutitas, areniscas y rocas fosfáticas cuya máxima potencia es de 600 m.
- **Formación Condorsinga:** Ubicada en el tope del Grupo, está constituida por intercalaciones de calizas, lutitas y areniscas.

**d. Grupo Goyllarisquizga (Cretáceo Inferior)**

El Grupo Goyllarisquizga está representado en el distrito de Morococha por una secuencia constituida por un conglomerado rojo basal en aparente concordancia sobre la caliza Pucará. Luego se suceden areniscas y lutitas rojas, capas de cuarcita de 6 a 15 metros de espesor y capas de caliza gris interestratificada con derrames lávicos o diques-capas de diabasa y basalto. Toda esta secuencia está expuesta al Norte, Noreste y Suroeste del distrito. Los horizontes basálticos son generalmente amigdaloides, en tanto que los diabásicos son porfiríticos. Al Norte del distrito se conocen hasta 12 horizontes con espesores que varían de 3 a 61 metros, mientras que, al Suroeste, sólo se conocen tres, con espesores de 5 a 15 metros.

#### **e. Grupo Machay (Cretáceo Superior)**

El Grupo Machay está representado por una interestratificación de calizas, las cuales están expuestas en las afueras del distrito, al Suroeste y Oeste, en las áreas de Buenaventura, Galera y Ticlio. El Grupo Machay, que yace en concordancia sobre el Grupo Goyllarisquizga, consiste de una caliza gris azulada, masiva con restos de fósiles, en la parte inferior. Luego viene una caliza gris clara que contiene horizontes de caliza carbonosa, lutácea, margosa y caliza fosfatada. Los últimos 12 m. de la secuencia son de lutita negra que contiene ammonites y pelecípodos.

#### **f. Actividad Ígnea**

La actividad ígnea en el distrito de Morococha se inició durante el periodo Pérmico con las andesitas y dacitas de los volcánicos Catalina que vienen a ser las rocas ígneas más antiguas del distrito. Los flujos volcánicos y diques capas interestratificados con las rocas sedimentarias del periodo Jurásico y Cretáceo indican que la actividad ígnea continuó durante el Mesozoico. El clímax de la actividad ígnea ocurrió en el Terciario Superior con la intrusión de diorita, monzonita cuarcífera, granodiorita, pórfido feldespático, pórfido cuarcífero, pórfido dacítico.

#### **2.2.6.2. Geología del Distrito de Morococha**

El distrito polimetálico de Morococha con una extensión de 5 por 6 Km. ocupa el centro del intrusivo Terciario con mineralización asociada de skarn, hornfels y brechas. Se desarrolla en sedimentos calcáreos del grupo Pucara del periodo Jurásico sobre el flanco occidental del anticlinal regional con buzamiento (45–50 grados) localizado entre un gran intrusivo antiguo pre-mineral andesítico (“diorita”) hacia el oeste y Rocas Volcánicas (Catalina)

del periodo Pérmico – Triásico hacia el este a lo largo del eje del anticlinal regional. Las unidades litológicas que afloran en el distrito de Morococha son tanto de naturaleza sedimentaria como ígnea y sus periodos oscilan desde el Periodo Pérmico hasta el Terciario.

#### **a. Intrusivos Terciarios**

Las rocas de caja del yacimiento de Toromocho incluyen muchas fases intrusivas de las rocas plutónicas regionales y por lo menos hay dos fases de intrusión de roca porfirítica asociada con la alteración y mineralización del yacimiento Toromocho Terciario. La secuencia de las fases intrusivas, desde las más reciente a las más antiguas, es la siguiente: Diorita Anticona (8-14 millones de años), granodiorita, pórfido feldespático, y pórfido cuarcífero de 7 a 8 millones de edad.

- **“Diorita” Anticona,** La “Diorita” Anticona es la roca intrusiva más antigua del Terciario (8-14 millones de años), expuesta al oeste y noroeste del distrito de Morococha. Es una roca andesítica de color verde a gris.
- **Granodiorita,** La granodiorita Morococha es una importante roca huésped para la mineralización. Su textura es hipidiomórfica, equigranular con un grano medio a grueso y algunas veces con una textura porfirítica.
- **Pórfido feldespático,** El pórfido feldespático es la otra roca huésped intrusiva más importante para la mineralización y es, la que más se asocia con las soluciones hidrotermal que alteran y mineralizan el yacimiento mineral de Toromocho.
- **Pórfido cuarcífero,** El pórfido cuarcífero es un intrusivo joven encontrado al suroeste del yacimiento principal. Tiene una textura

porfirítica con una matriz aplítica principalmente compuesta por plagioclasas de feldespato potásico y cuarzo con fenocristales de cuarzo (>10%).

- **Pórfido Dacítico**, Es un solo dique de pórfido félsico de 20 a 30 m de ancho que contiene numerosos ojos de cuarzo y base vidriosa de pórfido aplítico de feldespato cuarcífero con tendencia NO-SE que cruza el sudoeste del distrito de Morococha.

#### **g. Hornfels**

Aproximadamente la mitad de la roca huésped del yacimiento de Toromocho son skarns y hornfels derivado de la caliza Pucará, dolomitas, lutitas y areniscas, por contacto y alteración metasomático que circunda a la granodiorita, pórfido feldespático y pórfido cuarcífero del stock Terciario. En los alrededores y algo más alejado de las unidades de skarn y hornfels los sedimentos del Pucará son frescos, marmolizados.

- **Hornfels de Diópsido**, Los sedimentos calcáreos, que carecen de importantes componentes argílicos, comúnmente se convierten en hornfels de cuarzo-diópsido. Los hornfels de diópsido y las rocas de calcita-diópsido aparentemente también se han desarrollado de las capas más puras de carbonatos.
- **Hornfels de Wollastonita**, El Hornfels blanco jaseroide se encuentra presente en la zona norte del distrito y está compuesta principalmente por wollastonita y cuarzo muy probablemente proveniente de las areniscas calcáreas.
- **Hornfels de Biotita**, En la zona central, el hornfels de biotita tiene textura microgramo blástico y está compuesta por diversos agregados de

plagioclasas, feldespato potásico, cuarzo y biotita. Se puede encontrar una alteración de superposición a sericita y/o clorita. Los sulfuros están diseminados, reemplazando la biotita alterada a clorita.

#### **b. Skarns**

Los principales tipos de skarn dentro del yacimiento de Toromocho son el skarn tremolita/actinolita, el skarn de magnetita masiva, el skarn alterado “serpentina” y el endoskarn en contacto con los intrusivos.

- **Skarn de Tremolita Actinolita,** Los principales minerales en el skarn temprano son la tremolita, actinolita y granate.

El granate está comúnmente ubicado en base a su color que varía de marrón rojizo cerca de la intrusión de roca ígnea a verdoso a más distancia. Las venillas de cuarzo-pirita-calcopirita y calcopirita sin o con bajo contenido de pirita con halos de actinolita son comunes y aparentemente contemporáneas con la alteración biotita potásica y feldespato potásica en los intrusivos.

- **Skarn de Magnetita,** Los skarns ricos en Magnetita se presentan especialmente en skarns serpentinizados provenientes del estrato dolomítico original. Una variedad de minerales con un alto contenido de magnesio se encuentra presente en el skarn serpentinado en porciones variables incluyendo: talco, antigorita, flogopita, lizardita y clorita. Localmente, también se han identificado al olivino y forsterita. Comparado con el skarn de tremolita/ actinolita, el skarn de magnesio, serpentina alterado posee un contenido más alto de magnetita y menos sulfuros (<6%), y una baja relación de pirita y calcopirita (<1:2%). El alto contenido de magnetita podría ser ocasionado por la presencia de silicatos

de magnesio como la forsterita, talco y serpentina que no tienen grandes soluciones de sólidos en sus miembros terminales ferrosos y reflejan la naturaleza de oxidación y precipitación del ambiente que altera el skarn.

- **Endoskarn,** Algunos de los skarns formados en y cerca de los contactos de los intrusivos son endoskarn. Preferentemente se desarrollan en la granodiorita y se caracteriza por el contenido de granates, piroxenos y tremolita y actinolita que reemplaza a la plagioclasa con destrucción completa de la textura ígnea de los intrusivos. El total de los sulfuros está en el rango del 1% a 5% con leyes de cobre a menudo por encima de 1%.

### 2.3. Definición de términos básicos

**Clasificación:** Separación de partículas minerales de acuerdo al tamaño en que se encuentren mediante la fuerza centrífuga, empleando un equipo mecánico llamado hidrociclón.

**Rendimiento:** Análisis del estado en el que se encuentra operando determinado equipo cumpliendo con los estándares de diseño.

**Ajustes:** Es la forma en que un sistema se acopla haciendo que sus funciones sean más eficientes,

**Underflow:** Flujo de partículas gruesas que son distribuidas por la parte baja de un hidrociclón conocida como *Ápex*.

**Overflow:** Flujo de partículas finas que son distribuidas por la parte superior de un hidrociclón conocida como *Vortex*.

### 2.4. Formulación de Hipótesis

#### 2.4.1. Hipótesis General

La disminución o incremento del flujo de sólidos o agua en la alimentación involucra cambios en las propiedades de las corrientes de flujo del underflow

y overflow, variando variables de diseño, tales como el dimensionamiento de los diámetros de las salidas y el porcentaje de recuperación.

#### **2.4.2. Hipótesis Específicas**

La velocidad de alimentación de pulpa al hidrociclón está directamente relacionada con la presión diferencial, así como la velocidad de alimentación está directamente relacionada con el vortex index (diámetro) del equipo.

Empleando la curva de separación D50 se obtiene una recuperación de sólidos definida, sin embargo, no se tiene con exactitud cuántos finos son recuperados en una malla promedio determinada, debido al cortocircuito.

Aplicando la corrección de la curva d50, podemos inferir en los datos por cortocircuito y obtener los datos fiables para cada malla promedio, mejorando la clasificación de finos, a través de la modificación de parámetros de operación, además de poder calcular la precisión de separación en cuanto al índice de selectividad y la pendiente “m”.

Calcular parámetros operacionales dentro de una corriente de flujo se da en la alimentación, underflow y overflow, nos determina un balance de masas.

Hallando los parámetros operacionales anteriores nos permite generar una ecuación definida del modelo de Plitt para el cálculo de recuperación de sólidos en la malla corregida Y’.

### **2.5. Identificación de Variables**

#### **2.5.1. Variable Dependiente**

Representación de la curva de separación a partir del D50 corregido.

#### **2.5.2. Variable Independiente**

Ajuste de clasificación en el hidrociclón en el circuito de molienda.



### **2.5.3. Variable Interviniente**

- Gravedad específica del mineral
- Porcentaje de sólidos %S
- Densidad de pulpa
- Velocidad de pulpa
- Tamaño de partículas en el overflow
- Tamaño de partículas en el underflow

### **2.6. Definición operacional de variables e indicadores**

Clasificación de minerales en un circuito de molienda, se refiere a la separación de partículas finas de partículas gruesas, a través de equipos clasificadores como hidrociclones y zarandas vibratorias.

## CAPITULO III

### METODOLOGIA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACION

#### 3.1. Tipo de Investigación

El tipo de investigación que se aplicó al estudio es aplicado, debido a que se dio soluciones reales en el campo industrial.

#### 3.2. Método de investigación

El método empleado en la presente investigación es el método descriptivo-correlacional, porque se observarán los datos obtenidos para explicar la relación entre las variables, es decir, para saber en qué medida la variación y afectación de cada una de ellas, con la finalidad de conocer su magnitud, dirección y naturaleza. Además, se apoyará en los métodos complementarios de la inducción, deducción, explicativo, etc.

- **Inductivo-Deductivo:** Mediante este método se realizará la indagación previa para llegar finalmente al análisis específico de que prueba aplicar y mejorar la clasificación del mineral
- **Explicativa:** Durante las pruebas experimentales se hará la respectiva explicación de la causa y el efecto de cada etapa de las pruebas.

### 3.3. Diseño de Investigación

La ejecución de este trabajo de investigación se dio dentro del campo de la metalurgia extractiva en las instalaciones de Minera Chinalco Perú S.A. – Área de Operaciones Planta, la secuencia de alimentación se da de la siguiente manera:

Los nidos de ciclones (210-CY-001 al 004) son alimentados con pulpa por las bombas de alimentación a ciclones (210-PP-001 al 004), los nidos clasifican la pulpa en finos y gruesos, donde los finos (overflow) se dirigen a las primeras celdas de flotación rougher bulk de las líneas 1, 2, 3 y 4 (220-FO-001/008/015/022), previo análisis y muestreo en línea obtenido de los muestreadores de alimentación de flotación rougher bulk (220-SA-001 al 004). Los gruesos (underflow) alimentan a los molinos de bolas (210-ML-002/003).

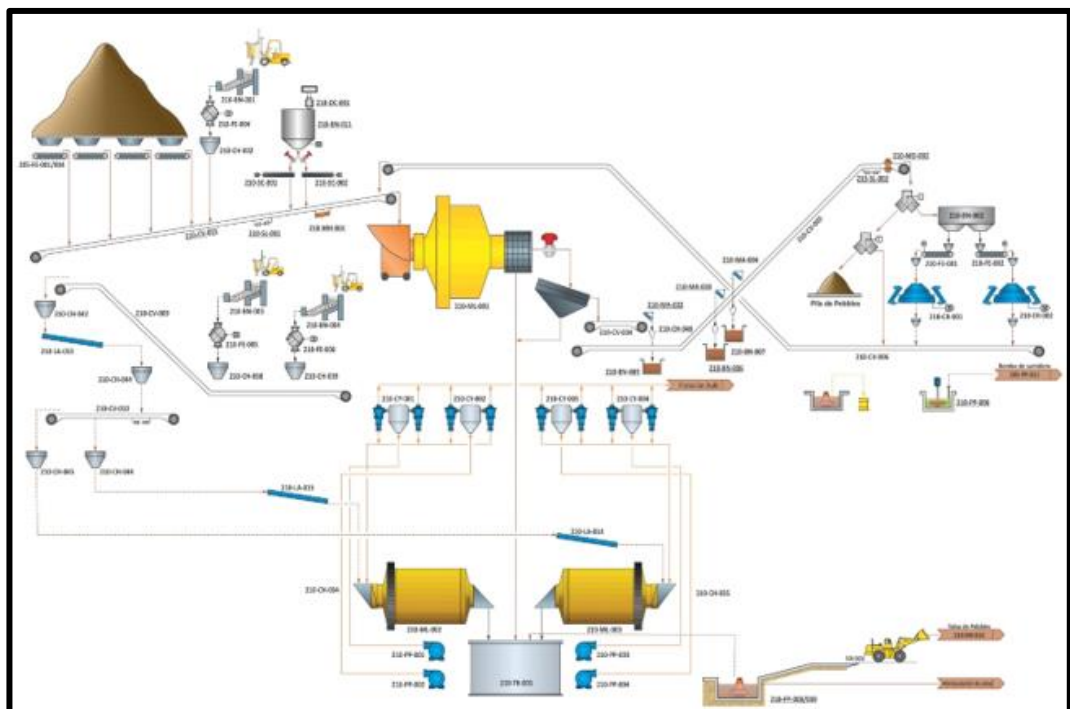


Figura 21 - Flowsheet del circuito de molienda área 210.

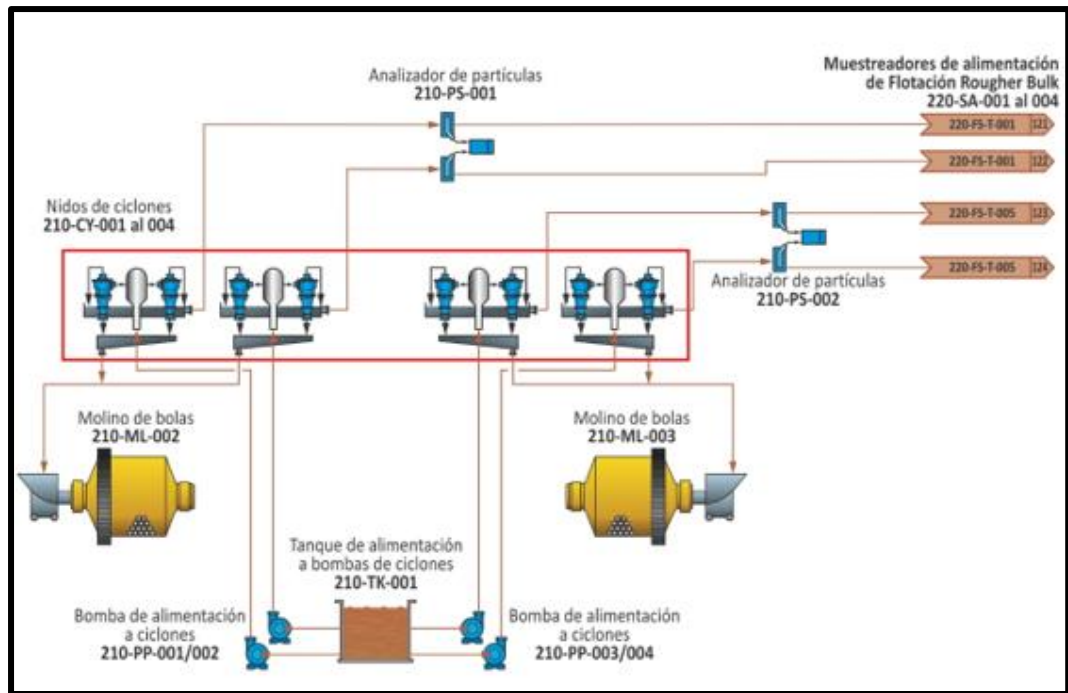


Figura 22 – Circuito de clasificación con hidrociclones.

ESPECIFICACIONES GENERALES DEL NIDO	
Nº de TAG	210-CY-001 al 004
Marca	Weihai Haiwang Hydrocyclone
Modelo	FX660-GX*18
Dimensiones: diámetro/altura (mm)	9,650/6,076
Capacidad (m³/h)	4,300-8,400
Diámetro de alimentación (mm)	900
Diámetro de descarga de overflow (mm)	1,050
Diámetro de descarga de underflow (mm)	1,050
Tamaño de partícula de alimentación (µm)	5,739
Producto (overflow) P80 (µm)	135
ESPECIFICACIONES DE LOS CICLONES	
Marca	WEIR
Modelo	CAVEX CVX-650
Cantidad	18
Vortex (mm)	280
Apex (mm)	150-160
VÁLVULAS COMPUERTAS	
Cantidad	18
Tipo	Neumático
Presión de operación (MPa)	0.06-0.12
Diámetro (mm)	250

Figura 23 – Especificaciones técnicas de los hidrociclones.

### 3.4. Población y Muestra

La población está constituida por el mineral fresco muestreado que ingresa a la planta concentradora 6500 TMSPH.

### 3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La metodología aplicada está ligada a la misma investigación. Estos incluyen la compilación bibliográfica, datos del Py system en tiempo real, muestras tomadas in situ, pruebas metalúrgicas realizadas para el análisis de malla, aspectos económicos, así como la situación, localización y tiempo, todos los cuales influyen en la calidad de la investigación, también aplicando técnicas como:

- **Observación:** Mediante esta técnica se toma apuntes de los fenómenos de ocurrencia en las pruebas experimentales.
- **Cuaderno de apuntes:** Para anotar los detalles del proceso, cálculos, incidentes de las pruebas y otros que se presentaron en el proyecto.
- **Formato de Pruebas:** Formato usado para tomar nota los parámetros y resultados de las pruebas metalúrgicas y de medición de reactivos en la planta concentradora.
- **Análisis documental:** Se realizará análisis de datos de fuentes primarias.

### 3.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Se entiende por técnica de investigación, el procedimiento de obtener información.

Para el recojo de información se utilizó los siguientes instrumentos:

Fuentes de información académica comprendiendo medios bibliográficos y electrónicos. Capacitación en hidrociclones empleando el modelo de Plitt a través de un consultor experto, cuya experiencia sirvió para reforzar el conocimiento sobre la clasificación de partículas minerales. Se empleo el Py System como sistema experto para corroborar los datos obtenidos en las pruebas metalúrgicas. Se efectuó lo siguiente:

- **Muestreo.** El muestreo de cabeza de mineral se realiza a cada 6 horas durante las guardias y cada muestra se lleva al laboratorio de metalurgia para su evaluación.
- **Preparación.** En esta etapa nos referimos a la preparación de muestra para la obtención de variables operacionales y desarrollo de las corrientes de flujos.
- **Análisis granulométrico.** En los datos de investigación se han calculado el análisis granulométrico de la alimentación y del underflow para realizar la tabulación de datos y obtención del porcentaje de sólidos recuperados en el underflow mediante el método de Plitts.

### **3.7. Tratamiento estadístico**

El tratamiento estadístico de datos se realizó empleando Excel y a partir de las tendencias del software Py system; así mismo existen gráficos de barras y líneas, para un mayor entendimiento en el análisis de datos.

### **3.8. Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación**

La Validación y confiabilidad de los instrumentos cumplen los requerimientos de calidad para poder realizar los cálculos metalúrgicos dentro de las instalaciones del circuito de molienda de Minera Chinalco Perú.

### **3.9. Orientación ética**

Se ha efectuado una adecuada y correcta secuencia de desarrollo del presente trabajo de investigación, desde la etapa de obtención de datos, análisis e interpretación; hasta su publicación, cumpliendo las normas establecidas.

## **CAPITULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSION**

#### **4.1. Descripción de Trabajo de Campo**

##### **4.1.1. Cálculo del Rendimiento de los Hidrociclones**

Se enfoca en hallar el  $d_{50c}$ , los tamaños de partículas promedio y el cálculo de la pendiente “m” para realizar la ecuación de Plitts y obtener la recuperación de sólidos corregidos en el underflow.

Se realizó el muestreo de pulpa en el flujo de alimentación de la batería de hidrociclones y en el underflow, de la siguiente manera:

- Se extrajo 1 litro de pulpa de cada corriente de flujo (alimentación, underflow y overflow), de la cual se calcula la densidad de pulpa en el densímetro Mercy.
- Una vez hallada la densidad, se filtró la muestra en un filtro prensa del laboratorio de metalurgia, luego se secó en una mufla a una temperatura de 80° C y se pesó.
- Una vez secado el mineral se procedió a obtener la gravedad específica del mineral a través de las pruebas de fiolas en donde se obtuvo un valor de 2.95.

- Habiendo calculado estos valores, tanto la densidad como la gravedad específica se procede a realizar el cálculo del porcentaje de sólidos.
- Obtenido el porcentaje de sólidos con ayuda del peso en toneladas de sólido que nos proporciona el Py System, se procede a calcular el flujo de agua tanto en toneladas como en m<sup>3</sup> por hora manteniendo la densidad del agua en 1m<sup>3</sup>/hr.
- Calculado todas las variables operacionales en los flujos de corriente de entrada y salida se procede a plasmarlos en cuadros.

**Nota:** Se aplico el mismo método para calcular las variables operaciones de los flujos de entrada y salida al nido de hidrociclones.

Habiendo realizado el cálculo de todas las corrientes de flujo se obtuvo los siguientes resultados a escala de laboratorio y variables de flujo a escala de planta, en la corriente de alimentación:

- Sólidos (tn/hr) =	5258
- Agua (tn/hr) =	4776.4
- Flujo masico de pulpa (tn/hr) =	10034.4
- <b>Gravedad especifica =</b>	<b>2.95</b>
- <b>% de sólidos =</b>	<b>52.4</b>
- <b>Densidad de pulpa (tn/m<sup>3</sup>) =</b>	<b>1.5</b>
- Sólidos (m <sup>3</sup> /hr) =	1782.4
- Volumen del agua (m <sup>3</sup> /hr) =	4776.4
- Flujo volumétrico (m <sup>3</sup> /hr) =	6558.7
- <b>% de sólidos en volumen =</b>	<b>27.18</b>
- Presión kpa =	69
<b>En la corriente del underflow</b>	
- Sólidos (tn/hr) =	3938
- Agua (tn/hr) =	1696.4



- Flujo masico de pulpa (tn/hr) =	5634.4
<b>- Gravedad especifica =</b>	<b>2.95</b>
- % de solidos =	69.9
<b>- Densidad de pulpa (tn/m3) =</b>	<b>1.9</b>
- Solidos (m3/hr) =	1334.9
- Volumen del agua (m3/hr) =	1696.4
- Flujo volumétrico (m3/hr) =	3031.3
<b>- % de sólidos en volumen =</b>	<b>44.04</b>
En la corriente del <u>overflow</u>	
- Solidos (tn/hr) =	1320
- Agua (tn/hr) =	3080
- Flujo masico de pulpa (tn/hr) =	4400
<b>- Gravedad especifica =</b>	<b>2.95</b>
- % de solidos =	30
<b>- Densidad de pulpa (tn/m3) =</b>	<b>1.25</b>
- Solidos (m3/hr) =	447.5
- Volumen del agua (m3/hr) =	3080
- Flujo volumétrico (m3/hr) =	3527.5
<b>- % de sólidos en volumen =</b>	<b>12.685</b>

Con las variables de corrientes obtenidas se obtiene las recuperaciones tanto de sólidos, de agua como de pulpa.

- Anteriormente se obtuvieron 500 gr de solidos secos, sumados a las muestras que tomaron para realizar la prueba de gravedad especifica en las fiolas, se realizó el análisis granulométrico en húmedo.
- Creando una tabla acorde al modelo de Plitts, se realiza la tabulación de datos de las partículas promedio de cada malla, y en este caso se emplean los datos granulométricos de la alimentación y del underflow.

- Se colocan los datos en la nueva tabla, y a partir de los datos de porcentajes en peso se procede al cálculo de la recuperación de sólidos en el U/F.
- Luego una vez obtenido estos datos se procede a realizar el cálculo del d50 obtenido mediante un gráfico al que se realiza una curva con los datos de partícula promedio y sólidos recuperados, obteniendo el cortocircuito o by pass producto del flujo de agua que arrastra los finos.
- Teniendo calculado el by pass y d50, se calcula una nueva tabulación de sólidos recuperados del nuevo d50 corregido, obteniendo nuevos valores con un cortocircuito mínimo y valores más representativos.
- Con los datos del porcentaje de sólidos en la alimentación y en el underflow, se calculan la pendiente “m”, mediante una ecuación lineal.
- Ya obtenidos todos los datos se puede diseñar la ecuación de Plitts para la recuperación de sólidos corregidos a partir de tamaño de partícula promedio y el D50 corregido.

#### **4.1.2. Ajustes en Hidrociclones**

Se realizaron una serie de pruebas con el objetivo de realizar un ajuste mejorado y necesario en los procesos existentes de la planta concentradora de Minera Chinalco Perú S.A.

- Se realizó el ajuste del volumen de pulpa en la alimentación.
- Se redujo el flujo volumétrico de alimentación del hidrociclón.
- Se calculó la constante de la unidad del hidrociclón.
- Se realizó la variación de sólidos para inferir en la recuperación
- Se calculó un nuevo P80 de acuerdo a la variación de flujos.
- Se realizó el cálculo de una nueva presión
- Se calculó un nuevo D50c2 corregido en función a la carga circulante.

- Se varió el flujo de agua que ingresa en la alimentación
- Se calculo una nueva presión, mediante la relación de presión inicial, velocidad de flujos y diámetro del vortex.

De acuerdo a los datos obtenidos se realiza la recuperación de sólidos, agua y pulpa, a partir del balance de masa.

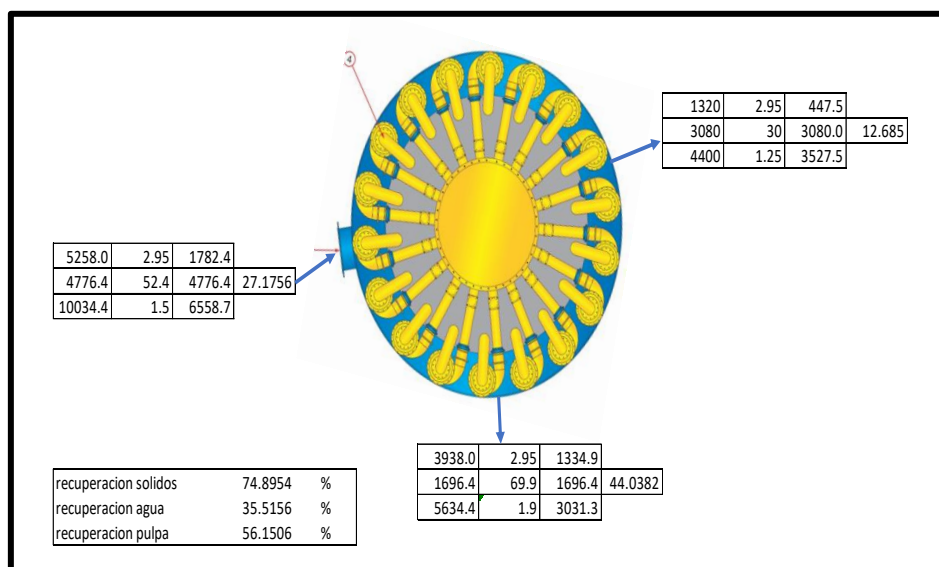


Figura 24 – Balance de masa en el nido de hidrociclones.

De las 18 unidades que conforman una batería de hidrociclones, 4 unidades se encuentran en stand by, y 14 unidades se encuentran operativas.

## 4.2. Presentación Análisis e Interpretación de Resultados

Las pruebas que a continuación se mostraran se dan en función a la operación que actualmente existen en la planta de proceso de Minera Chinalco Perú S.A.

### 4.2.1. Cálculo de las Corrientes de Flujo

La pulpa que fue muestreada tanto en el flujo de alimentación, en el overflow y en el underflow nos proporcionan los parámetros operacionales de entrada y salida en el proceso de clasificación y se muestra en el siguiente circuito:

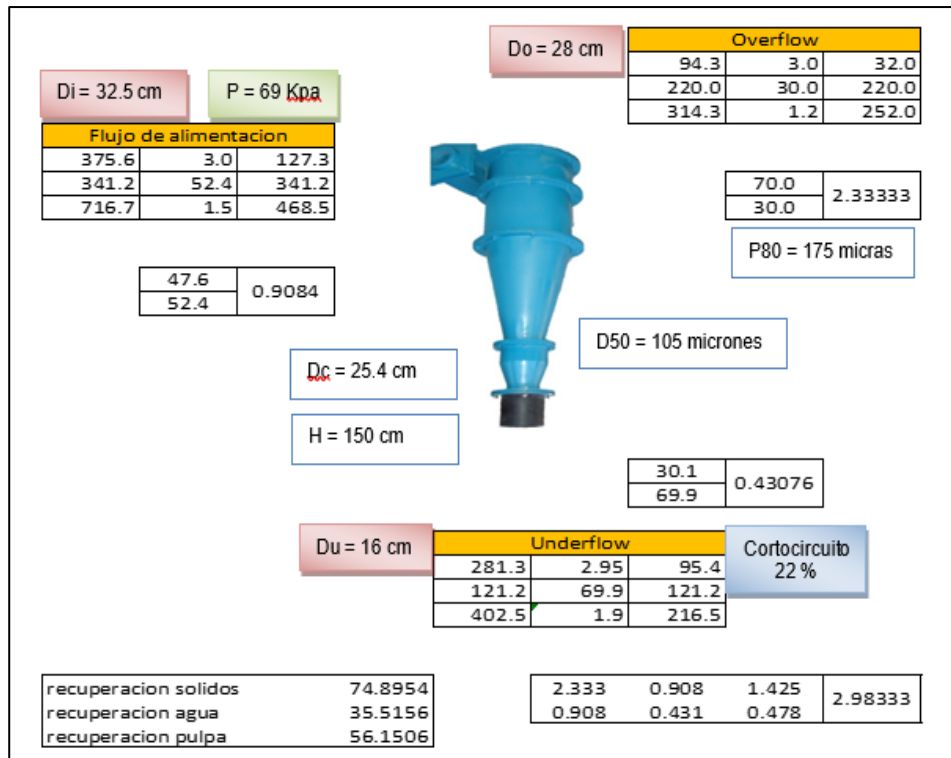


Figura 25 – Balance de masa en cada hidrociclón.

Como se observa al dividir el balance de masa general del nido de hidrociclones entre el total de unidades operativas no altera la recuperación. Aplicando la fórmula de dilución entre corrientes de flujo se obtiene la razón de la carga circulante que es 2.98, para que pueda ser aplicado en el cálculo de la pendiente “m”, variable fundamental para construir la ecuación de Plitt.

#### 4.2.2. Cálculo del Análisis Granulométrico

Posterior al cálculo de las variables de las corrientes de pulpa y balance de masa, se realiza el análisis granulométrico para determinar, el D50, la recuperación de sólidos en tamaño por tamaño, el D50 corregido, la precisión de separación, el cortocircuito o by pass y el P80.

En primer lugar, se plasma el porcentaje de solidos del alimento y del underflow para calcular los porcentajes de solidos retenidos y pasantes, en función a las 13 mallas utilizadas como se muestra en la tabla 4.

Malla #	Tamaño de apertura del tamiz (micrones)	Tamaño del tamaño de partícula d (micrones)	ALIMENTO			UNDERFLOW		
			% en peso	retenido +	pasante -	% en peso	retenido +	pasante -
3/8	9500							
3	6700							
4	4750							
6	3350							
8	2360							
10	1700	1865	0.41	0.41	99.59	0.55	0.55	99.44
14	1180	1440	1.57	1.98	98.02	2.09	2.64	97.35
20	850	1015	5.86	7.84	92.16	7.82	10.45	89.53
28	600	725	7.2	15.04	84.96	9.60	20.05	79.93
35	425	512.5	10.12	25.16	74.84	13.49	33.54	66.44
48	300	362.5	12.17	37.33	62.67	15.95	49.49	50.49
65	212	256	15.98	53.31	46.69	19.5	68.99	30.99
100	150	181	13.66	66.97	33.03	13.97	82.96	17.02
150	106	128	9.54	76.51	23.49	7.54	90.50	9.48
200	75	90.5	5.65	82.16	17.84	3.38	93.88	6.10
270	53	64	2.52	84.68	15.32	1.18	95.06	4.92
400	38	45.5	2.28	86.96	13.04	0.89	95.95	4.03
pan	0	15	12.87	100.0	0.00	4.03	100.0	0.00
			100			100.0		

Tabla 4 – Análisis granulométrico de la alimentación y del underflow del hidrociclón.

A continuación, se realiza otra tabla, pero con la conformación de nuevos datos como son el tamaño promedio de partículas de cada malla en micrones y se considera los % de sólidos del análisis granulométrico del alimento y del U/F.

Aquí se calcularán el porcentaje de sólidos recuperados en un d50 normal, y el cortocircuito, además se calculará también los sólidos recuperados corregidos en el U/F a través de una nuevo D50 corregido, se muestra en la tabla N°5.

Malla #	Tamaño de apertura del tamiz (micrones)	Tamaño del tamaño de partícula d (micrones)	Distribución de tamaño %		Sólidos recuperados en el underflow Y (%)	Recuperación corregida de los sólidos al underflow Y' (%)
			Alimentación	Underflow		
3/8	9500					
3	6700					
4	4750					
6	3350					
8	2360					
10	1700	1865	0.00	0.00	0.00	0
14	1180	1440	0.41	0.55	100	100
20	850	1015	1.57	2.09	100	100
28	600	725	5.86	7.82	100	100
35	425	512.5	7.2	9.60	100	100
48	300	362.5	10.12	13.49	100	100
65	212	256	12.17	15.95	98.16	97.64
100	150	181	15.98	19.5	91.39	88.97
150	106	128	13.66	13.97	76.60	69.99
200	75	90.5	9.54	7.54	59.19	47.68
270	53	64	5.65	3.38	44.80	29.24
400	38	45.5	2.52	1.18	35.07	16.76
pan	0	15	2.28	0.89	29.24	9.28
			12.87	4.03	23.45	1.86
		<b>Total</b>	100	100.0		
					<b>Recuperación Cortocircuito</b>	<b>74.90 22</b>
						<b>% %</b>

Tabla 5– Calculo de la recuperación de sólidos y recuperación corregida de sólidos.

#### 4.2.3. Cálculo del D50 y D50c

Para realizar el cálculo del d50 se utilizó los tamaños promedio de las partículas y el % de sólidos recuperados en todas las mallas, se graficó y se obtuvo un d50 = 105 micrones y cortocircuito del 22%, como se muestra en la figura 25.

De la misma manera para obtener un nuevo d50 corregido, se utilizaron el tamaño de partículas promedio de cada malla y los porcentajes de sólidos recuperados corregidos, graficándolos y teniendo como resultado un d50c = 130 micrones, obteniendo un by pass nulo, como se muestra en la figura 25.

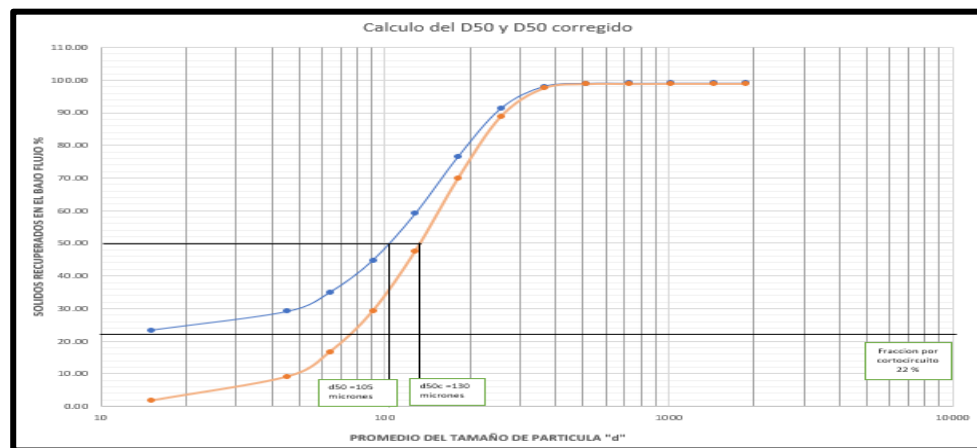


Figura 26 – Cálculo del D50, D50 corregido y by pass %.

#### 4.2.4. Cálculo del Índice de Selectividad

Calculando el índice de selectividad a partir del D50 corregido en la curva se tiene lo siguiente:

$$D_{25} = 80 \text{ micrones}$$

$$D_{75} = 185 \text{ micrones}$$

Por lo tanto, el  $IS = 80/185 = 0.4324$ , mientras el resultado se encuentre entre 0.5 a 1 indica que el clasificador está operando dentro de los rangos de eficiencia permitidos.

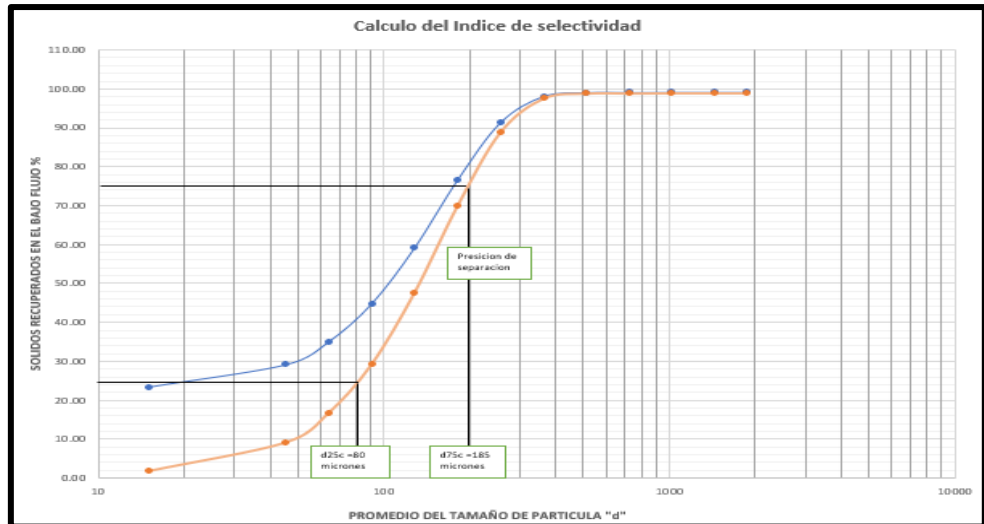


Figura 27 – Cálculo del D25 y D75 en la curva corregida.

Posteriormente se calcula el valor de la eficiencia del clasificador en función de los pesos del d50c calculado, del overflow y underflow:

$$E1 = 1.31 \text{ gr}$$

$$E2 = 0.492 \text{ gr}$$

$$E = 1.31 \times 0.492 \times 100$$

$$E = 62 \%$$

La eficiencia de clasificación actual es de 62%.

#### 4.2.5. Cálculo de la Pendiente “m”

Para calcular la pendiente “m” se emplea la razón de carga circulante, relacionada al porcentaje en peso de la alimentación y del underflow del hidrociclón empleando los siguientes criterios:

$$U = O R$$

$$F = O + U$$

U = Underflow del hidrociclón (t/hr)

O = Overflow del hidrociclón (t/hr)

R = Razón de carga circulante

$$\%Eu = \frac{U(\%u_{xi})}{F(\%f_{xi})} \times 100$$

**%Eu** = % de partición o recuperación de sólidos en el underflow

**%Uxi** = % en peso en el underflow

**%Fxi** = % % en peso en la alimentación

La razón de carga circulante que se obtuvo por medio del método de dilución en el flujo de corrientes de pulpa es de **2.98**.

Reemplazando los datos obtenidos anteriormente se tiene:

$$U = 2.98 \times O$$

$$F = 2.98 + O$$

$$F = 3.98 O$$

Posteriormente con los datos obtenidos se calculan los porcentajes de recuperación de sólidos mediante la tabulación de datos, como se muestra a continuación en la tabla N°6:

A	B UNDERFLOW	C	D ALIMENTO	A X B	C X D	Sólidos recuperados
2.98	0.55	3.98	0.4115	1.63	1.64	99.21
2.98	2.09	3.98	1.58	6.24	6.29	99.21
2.98	7.82	3.98	5.9	23.32	23.50	99.21
2.98	9.60	3.98	7.25	28.64	28.88	99.17
2.98	13.49	3.98	10.19	40.25	40.59	99.15
2.98	15.95	3.98	12.17	47.58	48.48	98.16
2.98	19.50	3.98	15.98	58.18	63.65	91.39
2.98	13.97	3.98	13.66	41.68	54.41	76.60
2.98	7.54	3.98	9.54	22.49	38.00	59.19
2.98	3.38	3.98	5.65	10.08	22.51	44.80
2.98	1.18	3.98	2.52	3.52	10.04	35.07
2.98	0.89	3.98	2.28	2.66	9.08	29.24
2.98	4.03	3.98	12.87	12.02	51.27	23.45

Tabla 6 – Calculo de la recuperación de sólidos por el método de dilución.



Una vez calculados los datos de recuperación de sólidos en el underflow, se procede a realizar la tabulación de datos en otra tabla N°7, a partir de los tamaños promedio de partículas y de los sólidos recuperados, donde aplicando una serie de logaritmos y multiplicaciones se sumarán datos para el siguiente calculo.

Una vez tabulados los datos se aplican las siguientes fórmulas de cálculo a través de una ecuación lineal empleando las siguientes formulas:

$$a = \frac{\sum X^2 \sum Y \sum X \sum XY}{N \sum X^2 - (\sum X)^2}$$

$$b = \frac{N \sum X \sum Y}{N \sum X^2 - (\sum X)^2}$$

x	y	log x (A)	log ln ( (100 )/(100- Y)) (B)	AXB	A2
1865	99.72	3.27068	0.769	2.516	10.70
1440	99.84	3.15836	0.811	2.560	9.98
1015	99.55	3.00647	0.733	2.203	9.04
725	99.86	2.86034	0.818	2.341	8.18
512.5	99.84	2.70969	0.808	2.190	7.34
362.5	98.16	2.55931	0.601	1.539	6.55
256	91.39	2.40824	0.390	0.938	5.80
181	76.60	2.25768	0.162	0.366	5.10
128	59.19	2.10721	-0.048	-0.100	4.44
90.5	44.80	1.95665	-0.226	-0.442	3.83
64	35.07	1.80618	-0.365	-0.659	3.26
45.5	29.24	1.65801	-0.461	-0.765	2.75
15	23.45	1.17609	-0.573	-0.674	1.38
Total		30.9349	3.4196	12.0129	78.3455
a =	$\frac{156.1683}{1018.4913}$	- $\frac{105.785}{956.968}$	=	$\frac{50.384}{61.523}$	0.81894
b =	$\frac{25.333974}{13}$	- $\frac{3.41959}{13}$	=	$\frac{21.914}{13}$	<b>1.68572</b> m

Tabla 7 – Calculo de la pendiente “m”.

Aplicando las fórmulas se halla la pendiente de la curva “m”, igual a **1.685**.

#### 4.2.6. Construcción del Modelo de Plitt

Habiendo calculado los datos hasta el momento se procede a construir la fórmula de Plitt para el cálculo de la recuperación corregida en el underflow:

$$Y' = 1 - \exp(-0693 \times \left(\frac{d}{130}\right)^{1.685})$$

$Y'$  = Recuperación corregida de sólidos en el underflow.

$D$  = Promedio del tamaño de partícula

$m$  = Pendiente de la curva

Con la formulación de esta ecuación de Plitts generada se podrán obtener resultados objetivos y fiables en cuanto a las recuperaciones de sólidos corregidos de forma directa introduciendo el tamaño promedio de la partícula que desea verificar al margen de by pass originado.

#### 4.2.7. Cálculo del Diámetro del Ápex en Función al %S en Volumen en el U/F

Considerando que la eficiencia del clasificador se encuentra en un 62%, se tiende a realizar pruebas con la finalidad de poder ajustar los flujos y llegar a una eficiencia promedio. Por esta razón se realizarán una serie de pruebas que consideren aumentar la eficiencia del equipo a través de los ajustes.

Para realizar el ajuste del hidrociclón se toma en cuenta lo siguientes:

- Velocidad del flujo masico en el underflow /tn/hr) = 3938
- La cantidad de hidrociclones en operación = 14
- La densidad de los sólidos (tn/m<sup>3</sup>) = 2.95

Se ajustará el hidrociclón a un 50% de recuperación de sólidos en volumen a través del underflow, aplicando los siguientes datos que se presentan en las condiciones actuales de la operación:

Velocidad de flujo total de sólidos en el bajoflujo (t/h)	x	$\frac{1}{\text{densidad de sólidos (t/m}^3\text{)}}$	x	$\frac{1}{\% \text{ de sólidos por volumen}}$	=	Capacidad de pulpa requerida de un ápex (m <sup>3</sup> /h)
# de ápex						

Reemplazando los datos existentes en la formula nos determina que:

$\frac{3938}{14}$	x	$\frac{1}{2.95}$	x	$\frac{1}{50}$	=	$\frac{3938}{2065}$	=	190.702
-------------------	---	------------------	---	----------------	---	---------------------	---	---------

Empleando una tabla de eficiencia se procede a determinar la capacidad o dimensión del ápex en función al flujo volumétrico del mineral.

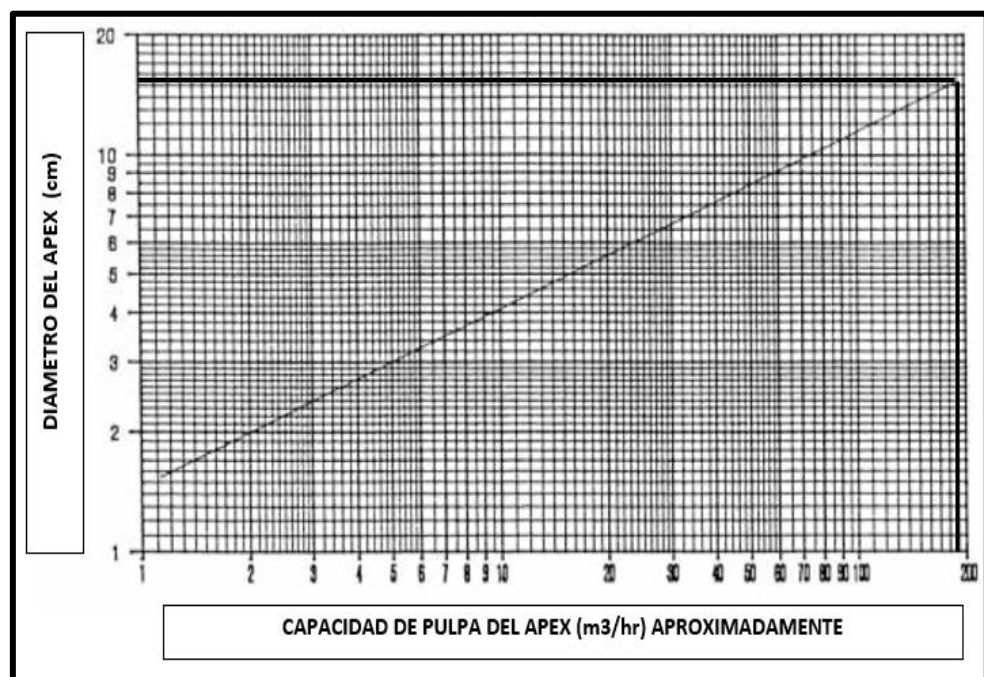


Figura 28 – Capacidad de pulpa del ápex vs diámetro del ápex.

Al interpolar el dato obtenido que es de 190.702 m<sup>3</sup>/hr, se obtiene como resultado que el diámetro del Ápex que actualmente se utiliza en los hidrociclones es de 15 a 16 cm.

#### 4.2.8. Cálculo de una Nueva Presión en Función al Incremento de Flujo Volumétrico en la Alimentación

Se incremento el flujo volumétrico de la alimentación al hidrociclón desde el cajón alimentador, actualmente se está enviando 468.5 m<sup>3</sup> de pulpa para cada

unidad, se incrementó en 100 m<sup>3</sup> la pulpa, para alcanzar la capacidad de rendimiento adecuada para cada hidrociclón.

Se calculo una nueva presión que se encuentre dentro del rango en la que la corriente de pulpa total en la alimentación pueda ingresar al hidrociclón y distribuir el mineral de forma adecuada, para calcular la nueva presión se realiza la siguiente relación:

$$P2 = 69 \times \left(\frac{568.5}{468.5}\right)^1 = 83.72 \text{ Kpa}$$

Esta prueba se realizó con la finalidad de no sobre pasar el límite del flujo volumétrico, al momento de realizar los demás ajustes debido a que la presión se encuentra en el límite de su disposición.

#### 4.2.9. Aplicación del D50c corregido

A continuación, se desarrolla la ecuación del Plitts para el D50c corregido de los hidrociclones, aplicando la siguiente formula como se ve a continuación:

$$d50c = \frac{K Dc^{0.46} Di^{0.60} Do^{1.21} \exp [0.063 (100 V)]}{Du^{0.71} h^{0.38} Q^{0.45} (S - L)^{0.5}}$$

Esta ecuación muestra que el tamaño de corte corregido (d50c) de un hidrociclón en operación está relacionado a los siguientes factores.

- K** = Una constante para una unidad de hidrociclón
- Dc** = El diámetro interno de la sección cilíndrica (cm)
- Di** = El diámetro interno de la entrada de la alimentación (cm)
- Do** = El diámetro interno del vortex (cm)
- V** = La fracción de sólidos por vol. de la pulpa de alimentación
- Du** = El diámetro interno del ápex (cm)
- h** = La distancia entre el vortex y el ápex (cm)

Q = La velocidad de alimentación volumétrica de pulpa en (m3/h)

S = La densidad de los sólidos en la alimentación (t/m3 ó g/cc)

L = La densidad del líquido en la alimentación (t/m3 ó g/cc)

$$D50c = \frac{k \times (25.4)^{0.46} \times (32.5)^{0.60} \times (28)^{1.21} \times \exp(0.0063 \times (100 \times 0.27))}{(16)^{0.71} \times (80)^{0.38} \times (468.5)^{0.45} \times (2.95 - 1)^{0.5}}$$

$$\frac{130 \times (16)^{0.71} \times (80)^{0.38} \times (468.5)^{0.45} \times (2.95 - 1)^{0.5}}{(25.4)^{0.46} \times (32.5)^{0.60} \times (28)^{1.21} \times \exp(0.0063 \times (100 \times 0.27))} = k$$

$$k = 45.77$$

#### 4.2.10. Variación del Tonelaje de Sólidos y Agua en la Alimentación

De acuerdo al análisis de investigación efectuado por el área de metalurgia, se ha disminuido el tonelaje de solidos alimentados de 5258 t/h a 5058 tn/h, actualmente se tiene un P80 de 175 micras, y se redujo a un P80 de 158 micras.

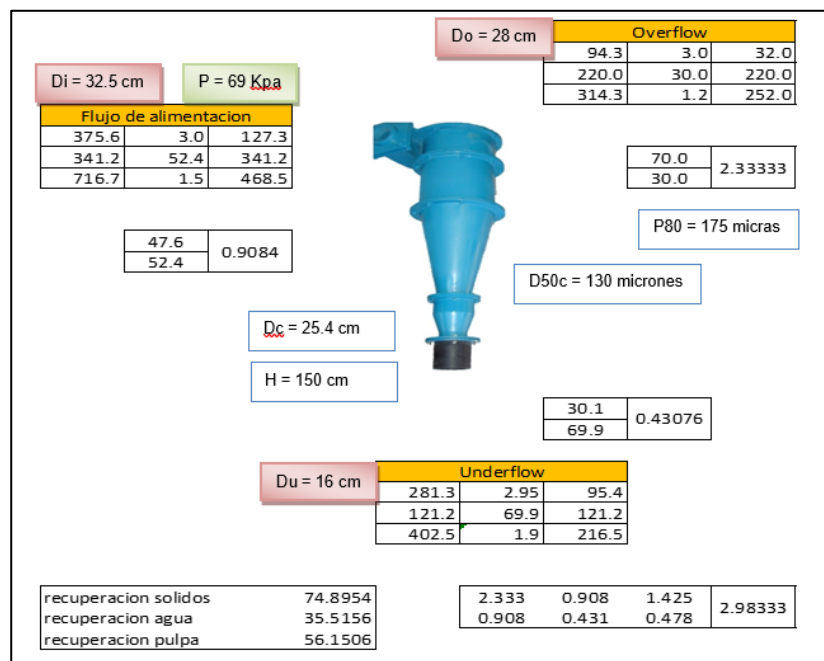


Figura 29 – Balance másico actual.

Al realizar la variación del flujo masico se ve que las propiedades de corriente de flujo de la alimentación se modifican, sin embargo, las propiedades del flujo de la corriente del underflow se mantienen constantes sin alterarse.

En el caso del overflow solo ha variado el flujo de solidos de 94.3 tn/hr a 80tn/hr, como se muestra en la figura N°29.

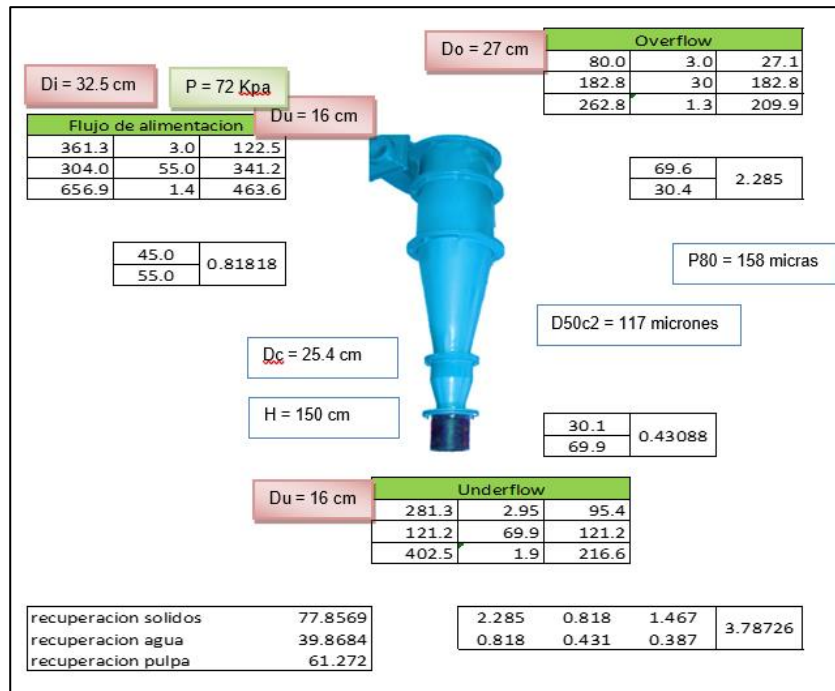


Figura 30 – Balance masico modificado.

Malla #	Tamaño de abertura del tamiz (micrones)	Tamaño del tamaño de partícula d (micrones)	ALIMENTO			UNDERFLOW		
			% en peso	retenido +	pasante -	% en peso	retenido +	pasante -
3/8	9500							
3	6700							
4	4750							
6	3350							
8	2360							
10	1700	1865	0.42	0.42	98.77	0.56	0.56	99.69
14	1180	1440	1.56	1.98	97.21	2.08	2.64	97.61
20	850	1015	5.85	7.83	91.36	7.78	10.42	89.83
28	600	725	7.2	15.03	84.16	9.53	19.95	80.30
35	425	512.5	10.11	25.14	74.05	13.30	33.25	67.00
48	300	362.5	12.15	37.29	61.90	15.8	49.05	51.20
65	212	256	15.98	53.27	45.92	19.8	68.85	31.40
100	150	181	13.65	66.92	32.27	14.5	83.35	16.90
150	106	128	9.44	76.36	22.83	7.9	91.25	9.00
200	75	90.5	5.65	82.01	17.18	3	94.25	6.00
270	53	64	2.53	84.54	14.65	1.1	95.35	4.90
400	38	45.5	2.25	86.79	12.40	0.9	96.25	4.00
pan	0	15	12.4	99.2	0.00	4	100.3	0.00
			99			100		

Tabla 8 – Análisis granulométrico producto de la reducción del flujo volumétrico.

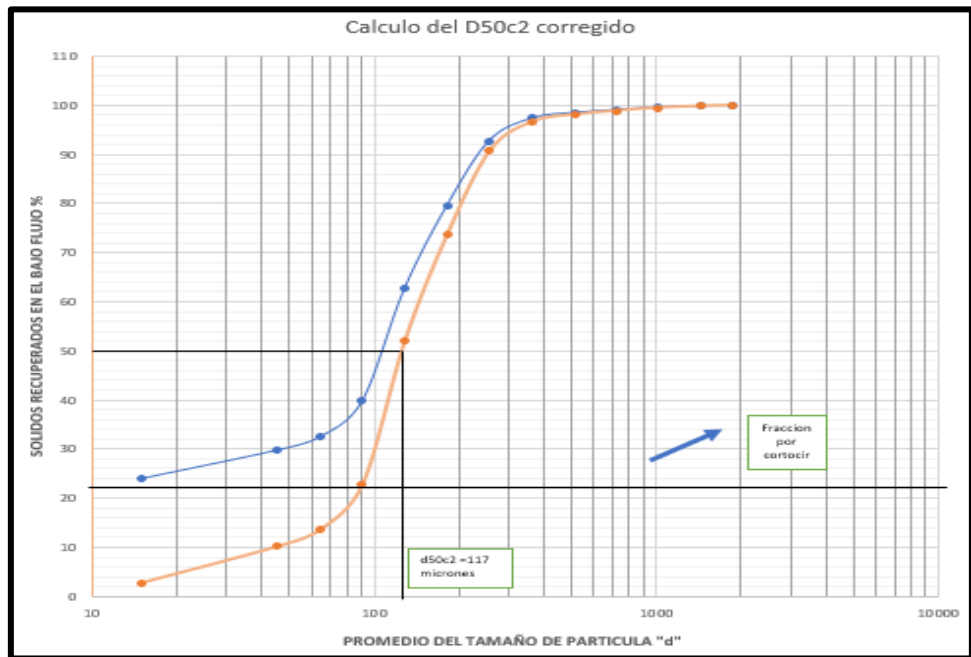


Figura 31 – Cálculo del nuevo D50c2 del incremento de flujos.

Realizando la curva de partición para el cálculo del D50c2 a partir de la disminución de flujos de sólidos y agua se obtiene que equivale a 117 micrones como se muestra en la figura 30.

Por lo tanto, al disminuir el flujo de masa de sólidos se produce un cambio directamente proporcional en la recuperación de sólidos en el overflow, sin embargo, se mantiene constantes todas las propiedades de la corriente del U/F.

La eficiencia que se mantenía en un 69% se incrementa a un 75% debido a la reducción del by pass o cortocircuito y al enviar mayor grueso al underflow para remolienda.

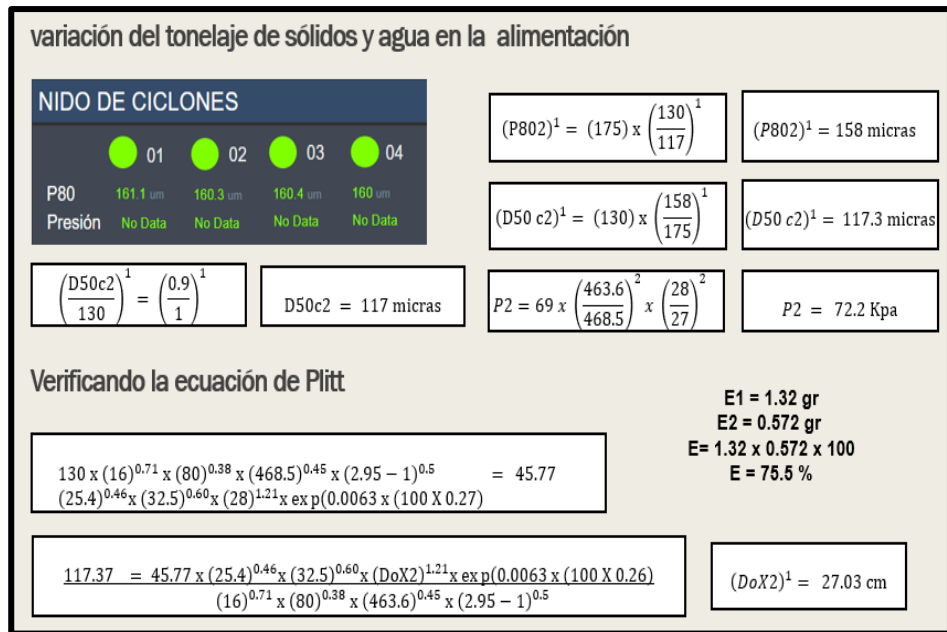


Figura 32 – Calculo de eficiencia y reducción de flujos.

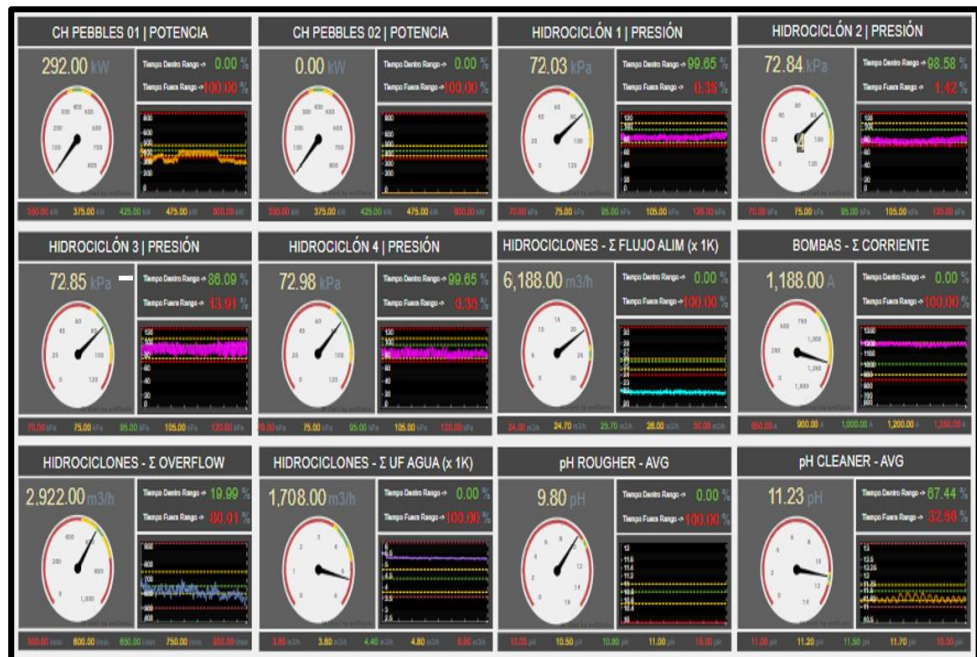


Figura 33 – Dashboard después de la reducción - Py system DCS.





Figura 34 – Dashboard de procesos después de la reducción - Py system.

#### 4.2.11. Variación de carga circulante incrementando el flujo de sólidos en el U/F

Se realizó la variación de la carga circulante de 299% del flujo de masa existente a un 350 %, con la finalidad de incrementar la cantidad de sólidos en el underflow y mejorar la eficiencia del circuito al hacerlo, ya que se reducen costos en los molinos.

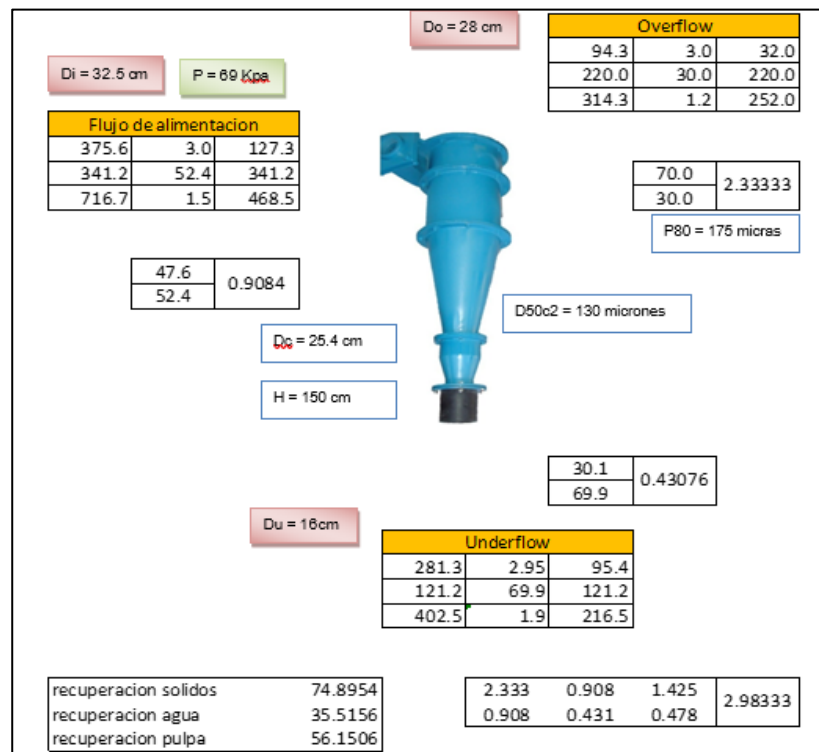


Figura 35 – Balance masico actual con 299% de carga circulante.

Al realizar el cambio en la relación de carga circulante entre el overflow y el underflow, se tiene que todas las propiedades de la corriente de alimentación han variado, en el caso del underflow solo se mantiene constante el porcentaje de sólidos, y en la corriente de flujo del overflow se mantienen todas sus propiedades constantes.

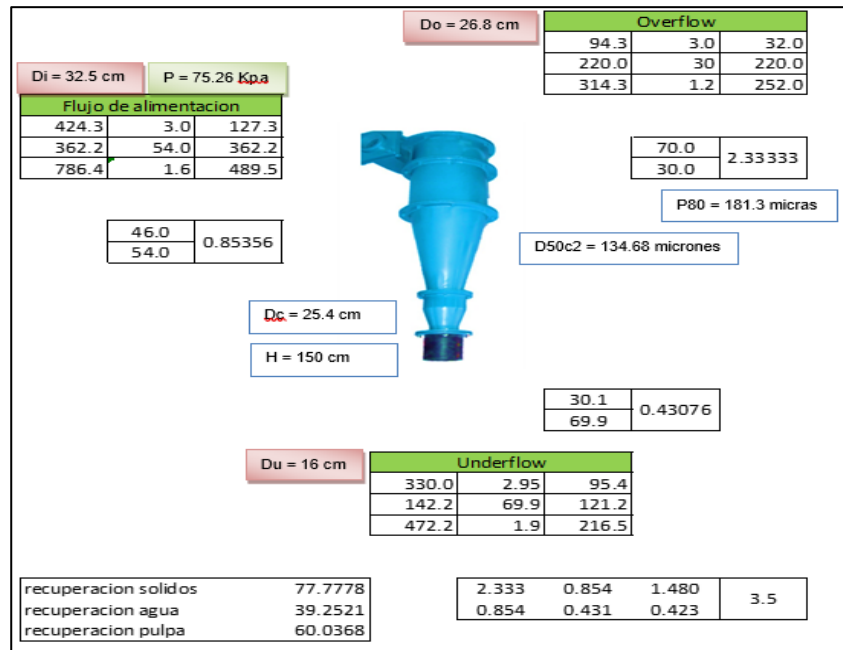


Figura 36 – Balance masico modificado a 350% de carga circulante.

Por lo tanto, al variar la carga circulante del flujo de las corrientes de flujo existentes, se tiene como resultado que el tonelaje de alimentación al overflow permanece constante.

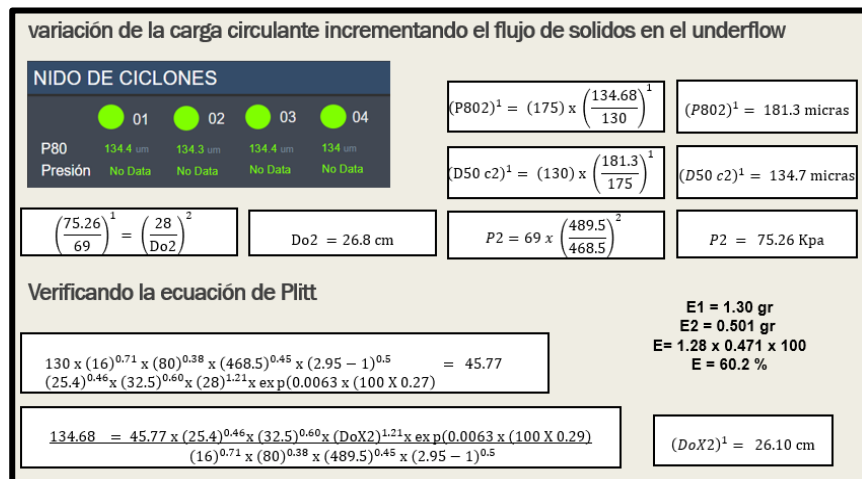


Figura 37 – Calculo de eficiencia y reducción de flujos.

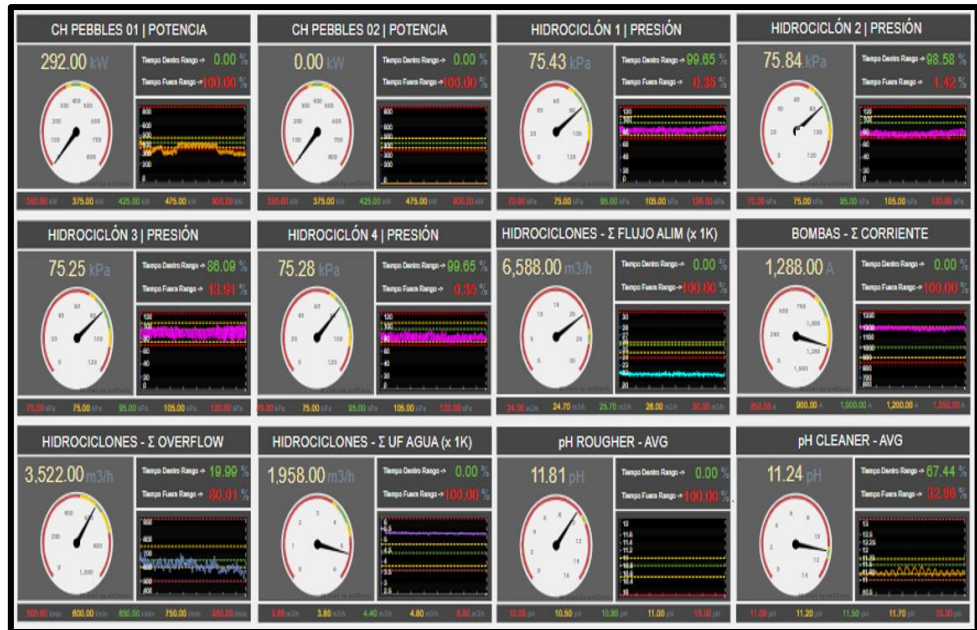


Figura 38 – Dashboard de procesos después del incremento de CC- Py system DCS.



Figura 39 – Dashboard de procesos después del incremento de CC- Py system.

#### 4.2.12. Incremento del flujo de agua

Se realizó la reducción en el porcentaje de sólidos en el overflow que alimentara a las celdas de flotación de un 30 a un 29%, a partir del incremento del flujo de agua en la alimentación de los hidrociclones, por lo tanto:

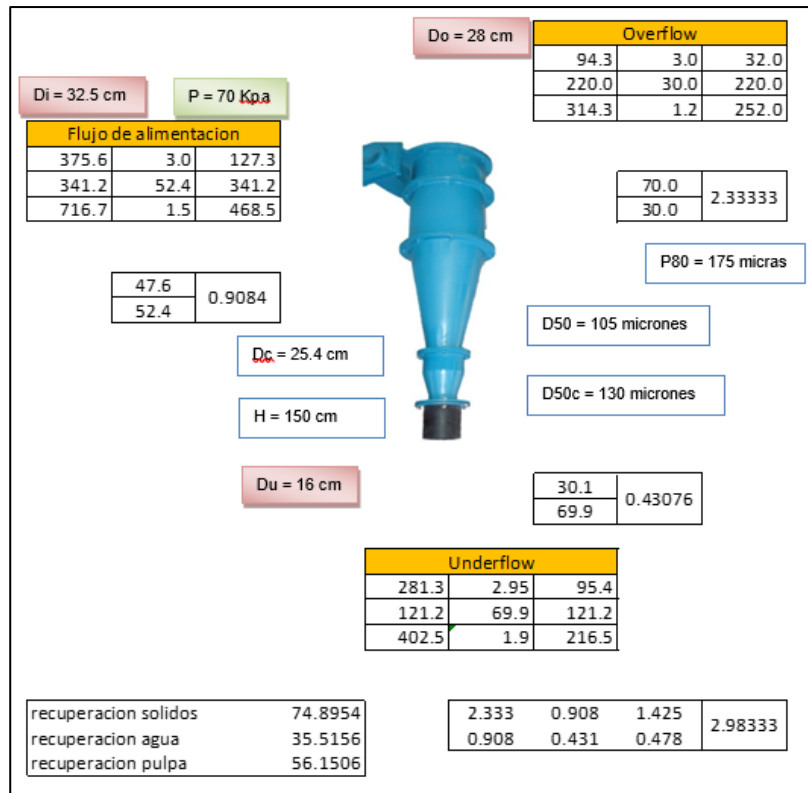


Figura 40 – Corrientes de flujo existentes.

Se incrementará el flujo de agua en el flujo de alimentación en un 16 m<sup>3</sup>/hr, lo cual originará un cambio en el porcentaje de solidos como se muestra a continuación en la figura N° 40.

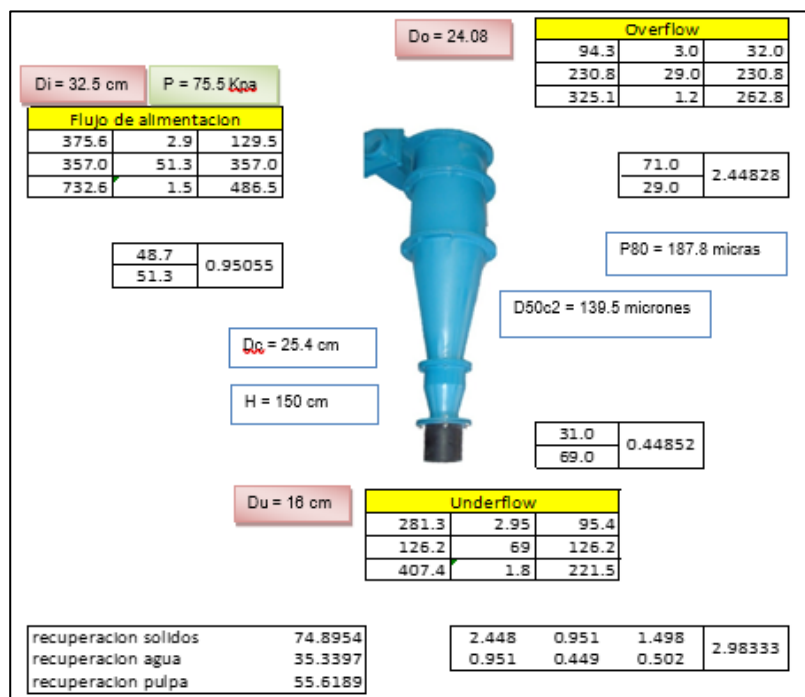


Figura 41 – Corrientes de flujo variando el flujo de agua.

Malla #	Tamaño de	Tamaño del tamaño	ALIMENTO			UNDERFLOW		
	apertura del tamiz (micrones)	de partícula d (micrones)	% en peso	retenido +	pasante -	% en peso	retenido +	pasante -
3/8	9500							
3	6700							
4	4750							
6	3350							
8	2360							
10	1700	1865	0.45	0.45	99.53	0.58	0.58	99.45
14	1180	1440	2.47	2.92	97.06	2.95	3.53	96.50
20	850	1015	5.48	8.40	91.58	11.20	14.73	85.30
28	600	725	7.8	16.20	83.78	11.36	26.09	73.94
35	425	512.5	8.8	25.00	74.98	14.40	40.49	59.54
48	300	362.5	16.4	41.40	58.58	12.15	52.64	47.39
65	212	256	13.45	54.85	45.13	18.6	71.24	28.79
100	150	181	11.43	66.28	33.70	13.97	85.21	14.82
150	106	128	9.6	75.88	24.10	6.3	91.51	8.52
200	75	90.5	6.2	82.08	17.90	3.36	94.87	5.16
270	53	64	2	84.08	15.90	1.02	95.89	4.14
400	38	45.5	2.4	86.48	13.50	0.78	96.67	3.36
pan	0	15	13.5	100.0	0.00	3.36	100.0	0.00
			100			100.0		

Tabla 9 – Análisis granulométrico producto del incremento de agua. La eficiencia de clasificación se mantiene en un 65.1%.

La adición de agua hace que incremente el flujo de agua en el overflow, sin embargo, el flujo de solidos se mantiene constante.

### PRESENTACION DE RESULTADOS

#### Incremento del flujo de agua

#### NIDO DE CICLONES

	<span style="color: green;">●</span> 01	<span style="color: green;">●</span> 02	<span style="color: green;">●</span> 03	<span style="color: green;">●</span> 04
P80	140.1 um	140.3 um	140.4 um	140.3 um
Presión	No Data	No Data	No Data	No Data

$(P802)^1 = (175) \times \left(\frac{139.5}{130}\right)^1$

$(P802)^1 = 187.8 \text{ micras}$

$(D50 c2)^1 = (130) \times \left(\frac{187.8}{175}\right)^1$

$(D50 c2)^1 = 139.5 \text{ micras}$

$\left(\frac{75.5}{70}\right)^1 = \left(\frac{28}{Do2}\right)^2$

$Do2 = 24.08 \text{ cm}$

$P2 = 70 \times \left(\frac{486.5}{468.5}\right)^2$

$P2 = 75.5 \text{ Kpa}$

#### Verificando la ecuación de Plitt

$$130 \times (16)^{0.71} \times (80)^{0.38} \times (468.5)^{0.45} \times (2.95 - 1)^{0.5} = 45.77$$

$$(25.4)^{0.46} \times (32.5)^{0.60} \times (28)^{1.21} \times \exp(0.0063 \times (100 \times 0.27))$$

$$\frac{139.5}{(16)^{0.71} \times (80)^{0.38} \times (468.5)^{0.45} \times (2.95 - 1)^{0.5}} = \frac{45.77 \times (25.4)^{0.46} \times (32.5)^{0.60} \times (DoX2)^{1.21} \times \exp(0.0063 \times (100 \times 0.26))}{(16)^{0.71} \times (80)^{0.38} \times (468.5)^{0.45} \times (2.95 - 1)^{0.5}}$$

$(DoX2)^1 = 24.10 \text{ cm}$

E1 = 1.30 gr  
E2 = 0.501 gr  
E = 1.28 x 0.471 x 100  
E = 60.2 %

Figura 42 – Calculo de eficiencia y reducción de flujos

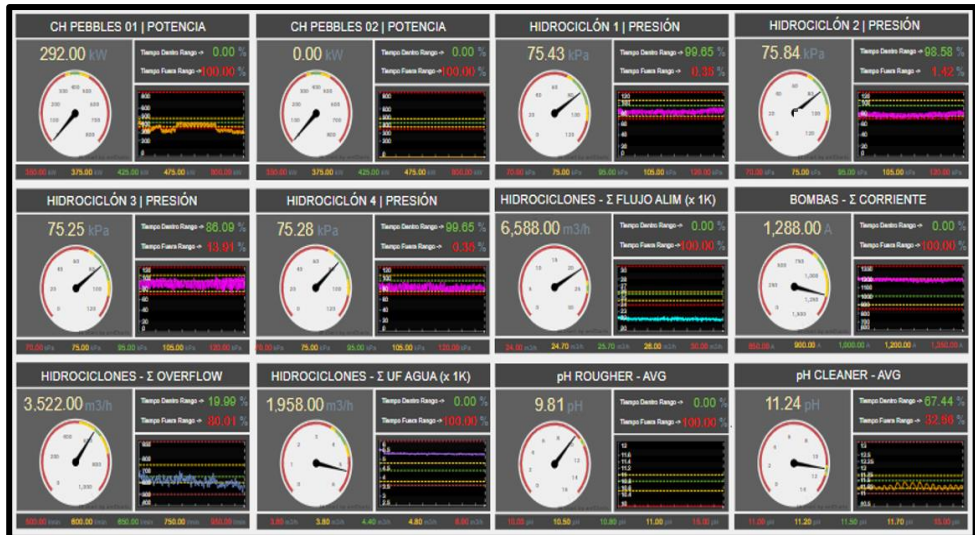


Figura 43 – Dashboard de procesos después del incremento de agua - Py system DCS.



Figura 44 – Dashboard de procesos después del incremento de agua - Py system.

### 4.3. Prueba de Hipótesis

La aplicación de la ecuación de Plitts influye directamente en el rendimiento del hidrociclón, a través del cálculo de una nueva serie de solidos recuperados en el underflow, teniendo en cuenta el d50 y la pendiente “m”, hallados en el circuito de clasificación – molienda de la planta de procesos de Minera Chinalco Perú S.A.

Los ajustes en el hidrociclón influyen en la modificación de parámetros de flujo como cambios en el diseño del equipo con la finalidad de obtener un mejor proceso

de clasificación de partículas minerales en el overflow para la etapa de flotación en Minera Chinalco Perú S.A.

#### 4.4. Discusión del Resultado

- Cuando se realiza el cálculo del d50 normal a partir de los porcentajes de peso tanto del alimento como del underflow, se obtiene una serie de recuperaciones de sólidos que actualmente están pasando al underflow por el fenómeno del cortocircuito el cual debe ser corregido.
- Al calcular el índice de selectividad a partir del D50c corregido, ubicando el D25 y D75, que son 80 micrones y 185 micrones respectivamente, se obtiene como resultado 0.424, que dentro del estándar de eficiencia del hidrociclón se encuentra en un rango promedio.
- Para formular la ecuación de Plitts se tuvo que realizar el cálculo de la pendiente “m” a partir de los datos granulométricos de alimentación y del underflow, y empleando métodos de regresión lineal
- Al relacionar el flujo de pulpa actual en la alimentación de un hidrociclón, con el número de Ápex operativos, en función de la gravedad específica y de la estandarización de la fracción en volumen de sólidos que viene a ser el 50%, se obtiene un flujo de pulpa volumétrico que es interpolado en la gráfica, donde nos da el diámetro del ápex con el que debe trabajar dicha cantidad de pulpa que oscila entre los 15 y 16 cm
- Para realizar cálculos en la ecuación de Plitts, se halló la constante “k” a partir del d50c que equivale a 130 micrones, además se reemplazaron las variables que están sujetas a esta ecuación, una vez realizado el cálculo se obtuvo una constante  $k = 45.77$ .
- Se redujo la alimentación de sólidos y agua en el flujo de alimentación de 5258

tn/hr a 5058 tn/hr, por lo cual se genera un cambio en el P80 inicial de 175 micrones a un P80 final de 158 micrones. Al realizar la variación del flujo masico se ve que las propiedades de corriente de flujo se modifican, sin embargo, las propiedades del flujo de la corriente del underflow se mantienen constantes sin alterarse.

- En el caso del overflow solo ha variado el flujo de solidos de 94.3 tn/hr a 80tn/hr, al reducir el P80 a 158 micrones, se confirma que un porcentaje de solios grueso ya no se están dirigiendo hacia el proceso de flotación, sino que retornan para una remolienda.
- Se calcula la relación de d50 y P80, empleando el D50c corregido inicial que equivale a 130 micrones, y considerando que P80 inicial es de 175 micras, y el P80 final al reducir el flujo de masa equivale a 158 micras, aplicando la relación de equivalencia se obtiene un D50c2 corregido que es igual a 117 micrones, por lo tanto al reducir los sólidos en la alimentación, se reduce el P80 y a la vez el nuevo D50C2 corregido disminuye a 117 micrones.
- Utilizando el nuevo d50c2 corregido que es 117 micrones, se reemplaza en la ecuación de Plitts manteniendo todas las variables anteriores con la finalidad de calcular un nuevo diámetro del vortex  $d_{ox2} = 27.02$  cm, por lo tanto, al reducir el tonelaje requiere que se modifique o reduzca el diámetro del vortex de 28 cm a 27 cm.
- Aplicando la relación de presiones, presión  $P1 = 69$  kpa, el flujo de pulpa volumétrica  $F1 = 468.5$  y  $F2 = 463.6$ , y los diámetros del vortex  $DO1X = 28$  cm y  $Dox2 = 27.02$  cm, se calcula y se obtiene como resultado una nueva Presión  $P2 = 72.2$  Kpa, por lo tanto al reducir el tonelaje se origina una mayor presión dentro del rango permisible, a la vez se observa que la nueva presión es mayor a



la presión inicial, a pesar de que el flujo volumétrico de la pulpa a disminuido, por lo tanto, se concluye que diámetro del vortex influye lo que lo hace un proceso inversamente proporcional al disminuir el flujo y el diámetro del vortex, siempre se requerirá un aumento de presión.

- Al realizar la variación de la relación de carga circulante, y relacionarlo con los factores del d50c, de 299% del flujo de masa existente a un 350 %, se obtiene un D50c2 corregido igual a 117 micrones, valor semejante al anteriormente calculado por lo tanto al realizar el cambio en la relación de carga circulante entre el overflow y el underflow, se tiene que todas las propiedades de la corriente de alimentación han variado, en el caso del underflow solo se mantiene constante el porcentaje de sólidos, y en la corriente de flujo del overflow se mantienen todas sus propiedades constantes, Por lo tanto, al variar la carga circulante, se tiene como resultado que las propiedades de flujo del overflow permanecen constantes.
- Se realizó la reducción en el porcentaje de sólidos en el overflow que alimentará a las celdas de flotación de un 30 a un 29%, a partir del incremento del flujo de agua en la alimentación de los hidrociclones, por lo tanto: Se incrementará el flujo de agua en el flujo de alimentación en un 16 m<sup>3</sup>/hr, lo cual originará un cambio en el porcentaje de sólidos.

## CONCLUSIONES

- Para poder calcular los sólidos recuperados corregidos a partir de una d50 normal, es necesario emplear la recuperación de sólidos en el bajo flujo como relación del tonelaje de alimentación y tonelaje del underflow, además de cortocircuito o by pass.
- Realizando la ecuación de Plitts con los datos hallados para su formulación, nos permitirá calcular distintos porcentajes de sólidos recuperados de acuerdo al tamaño promedio de malla que se desea saber.
- Para realizar los ajustes del hidrociclón variando o modificando las propiedades de estos, se llega a conocer que por ser un circuito cerrado cada elemento que lo compone está directamente ligado con otro, desde la alimentación hasta el overflow y underflow, esto quiere decir que, si se aumenta el flujo de sólidos, agua o pulpa influye directamente en la modificación de propiedades de sus dos salidas, así como también varía el P80 por cambio de flujo.
- Manteniendo la eficiencia y el diseño de los equipos al variar flujos para obtener una mayor recuperación de material adecuado, es necesario realizar cambios en el equipo como la modificación del diámetro de alimentación, ápex o vortex.
- Al reducir el flujo de masa, teniendo en cuenta el P80 inicial que es más grueso y el P80 final que es más fino, se calculó un nuevo D50c2 corregido, el cual presenta una distribución de partícula menor al existente.

## RECOMENDACIONES

- Para realizar las pruebas de identificación de propiedades de flujo, considerar la presión de alimentación al momento de tomar las muestras.
- Es recomendable que al tener la muestra de pulpa se realice el cálculo de la gravedad específica, densidad de pulpa y el porcentaje de sólidos.
- Tener en cuenta que las pruebas realizadas son efectivas en un circuito cerrado entre molinos e hidrociclones, ya que se aplican modificaciones en varios parámetros hasta el dimensionamiento del equipo.
- Realizar el cálculo del P80 inicial en el overflow de los hidrociclones, para realizar el cálculo del P80 final en función del D50 corregido
- Tener en cuenta el cálculo del D50 inicial, ya que a partir de este dato podremos establecer el modelo de Plitts y las modificaciones tanto en la presión y el diámetro del vortex al disminuir el flujo de pulpa.
- Para determinar el ajuste al equipo de clasificación es necesarios tener presente los valores que han sido tomados inicialmente y los valores que se han obtenido con la modificación, para poder realizar en casos excepcionales el rediseño del equipo.

## BIBLIOGRAFÍA

- J.A. Deiber, Introducción a las Ecuaciones de los Fenómenos de Transporte., Cuaderno de Enseñanza Nro. 1, CAMAT, (1985).
- Diagrama de flujos Molino de bolas y Ciclones, Ref. 560-210-FS-T-103
- S. Altmeyer, V. Mathieu, S. Jullemier, P. Contal, N. Midoux, S. Rode, , Comparison of different models of cyclone, Chem. Eng. Process. (2004)
- M. Bohnet, Influence of the gas temperature on the separation efficiency of erocyclones, Chem. Eng. Process. (1995).
- J. Casal, A better way to calculate cyclone pressure drop, Eng. (1983).
- A.K. Coker, Understand cyclone design, Chem. Eng. Progr. (1993)
- J. Dirgo, Relationships between cyclone dimensions and performance. Doctoral Thesis, USA, 1988.
- C. Fredriksson, Exploratory experimental and theoretical studies of cyclone gasification of wood powder, Lulea University, Sweden, 2003.
- 8. W.D. Griffiths, F. Boysan, Empirical modeling of the performance of a number of cyclone samplers, J. Aerosol Sci. (1996).
- 11. C.B. Shepher, Air pollution control: a design approach. In: C.D Cooper, F.C. Alley, Cyclones, second, Waveland Press, Illinois, 1939.
- Manual de operación y mantenimiento nido de ciclones FX660-GX\*18, Ref. R05323-M-078-X009-102 Rev. 3
- Plano hidrociclón CAVEX CVX-650, Ref. 650CVX Rev. C

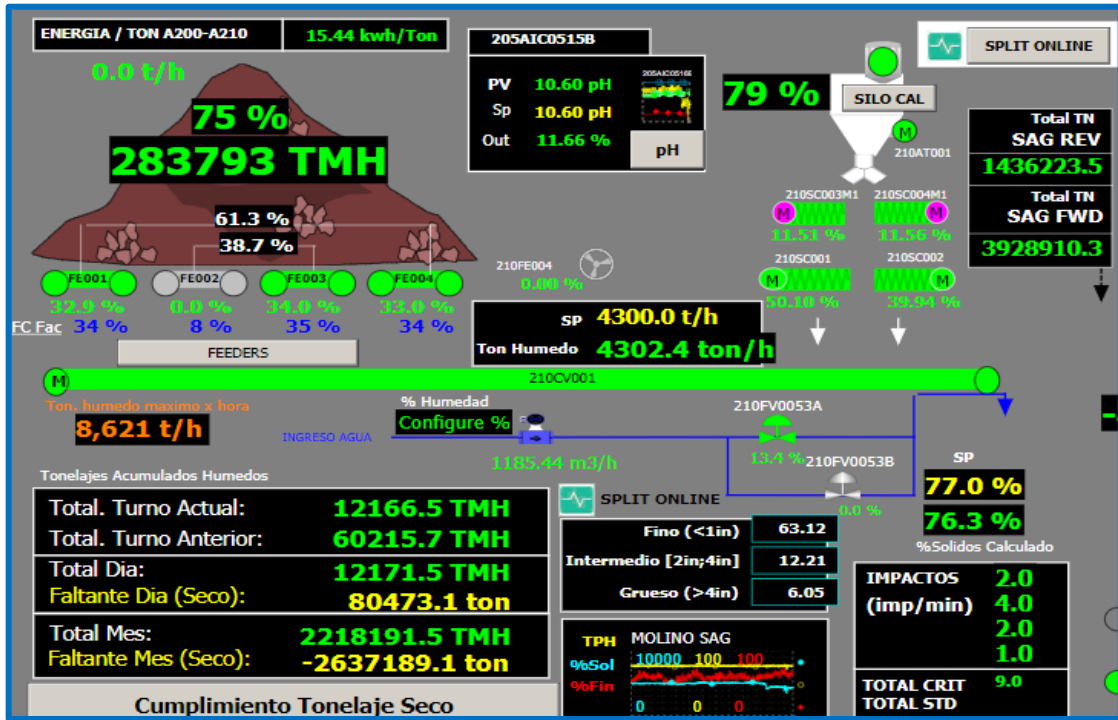
# **ANEXOS**

**MATRIZ DE CONSISTENCIA**

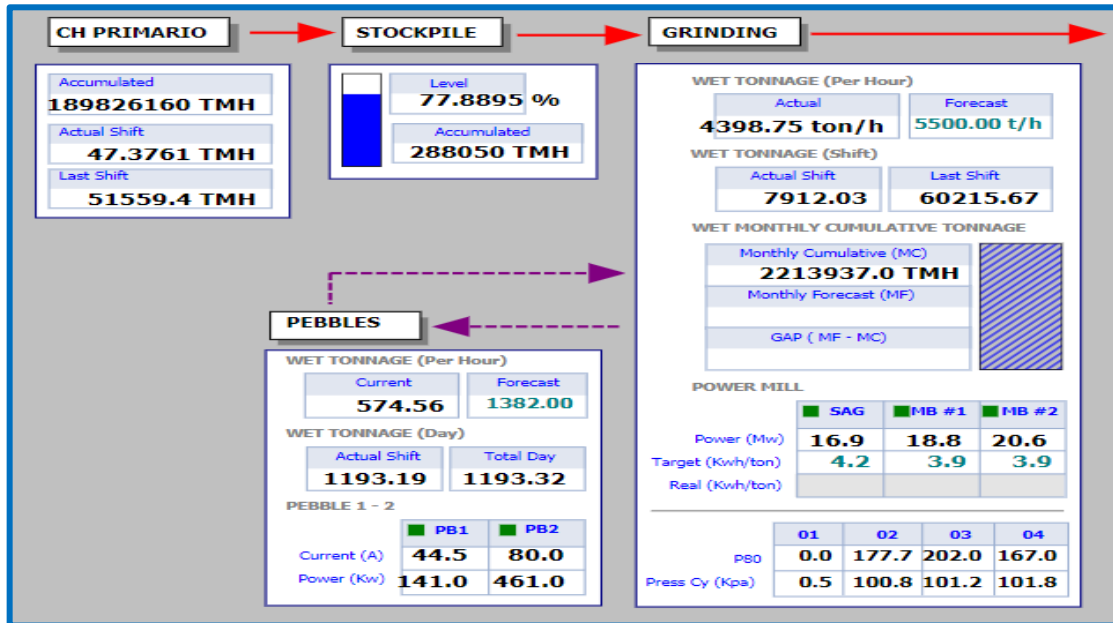
**CÁLCULO DEL RENDIMIENTO Y AJUSTES DEL HIDROCICLÓN EN EL CIRCUITO DE MOLIENDA EN MINERA CHINALCO PERÚ S.A.**

<b>PROBLEMA</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>HIPOTESIS</b>	<b>VARIABLES</b>	<b>JUSTIFICACION</b>
<p><b>GENERAL:</b> ¿De qué modo es posible realizar el ajuste del hidrociclón para optimizar la clasificación de partículas minerales en el circuito de molienda, en Minera Chinalco Perú?</p> <p><b>ESPECIFICOS:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. ¿Cuáles son las corrientes de pulpa en el circuito de clasificación?</li> <li>2. ¿Cuál es el motivo del incremento del cortocircuito?</li> <li>3. ¿Cuánto es el cortocircuito que se está dando actualmente en la planta?</li> <li>4. ¿Cuánta es la carga circulante generada?</li> <li>5. ¿Cuál es la eficiencia de los hidrociclones en el circuito de clasificación?</li> </ol>	<p><b>GENERAL:</b> Determinar el ajuste adecuado para incrementar la eficiencia de clasificación en el circuito de molienda a través de una serie de pruebas realizadas en el hidrociclón del circuito de molienda de Minera Chinalco Perú S.A.</p> <p><b>ESPECIFICOS:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Evaluar los flujos de corriente dentro del circuito de clasificación.</li> <li>2. Calcular el D50 inicial y D50c corregido.</li> <li>3. Obtener el análisis granulométrico al flujo de alimentación y al underflow</li> <li>4. Determinar y relacionar variables de la corriente de flujo de entrada y salida</li> <li>5. Hallar el porcentaje de distribución del análisis granulométrico actual</li> <li>6. Realizar modificaciones en los flujos de corriente de pulpa y equipo</li> </ol>	<p><b>GENERAL:</b> La disminución o incremento del flujo de solidos o agua en la alimentación involucra cambios en las propiedades de las corrientes de flujo del underflow y overflow, variando variables de diseño, tales como el dimensionamiento de los diámetros de las salidas y el porcentaje de recuperación.</p> <p><b>ESPECIFICA:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. La velocidad de alimentación de pulpa al hidrociclón está directamente relacionada con la presión diferencial, así como la velocidad de alimentación está directamente relacionada con el vortex index (diámetro) del equipo.</li> <li>2. Empleando la curva de separación D50 se obtiene una recuperación de solidos definida, sin embargo, no se tiene con exactitud cuántos finos son recuperados en una malla promedio determinada, debido al cortocircuito.</li> </ol>	<p><b>DEPENDIENTE:</b> Representación de la curva de separación a partir del D50 corregido.</p> <p><b>INDEPENDIENTE:</b> Ajuste de clasificación en el hidrociclón en el circuito de molienda.</p> <p><b>INTERVINIENTE:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Gravedad especifica del mineral</li> <li>2. Porcentaje de solidos %S</li> <li>3. Densidad de pulpa</li> <li>4. Velocidad de pulpa</li> <li>5. Tamaño de partículas en el overflow</li> <li>6. Tamaño de partículas en el underflow</li> </ol>	<p>Ajuste y optimización del proceso de clasificación en el circuito de molienda</p>

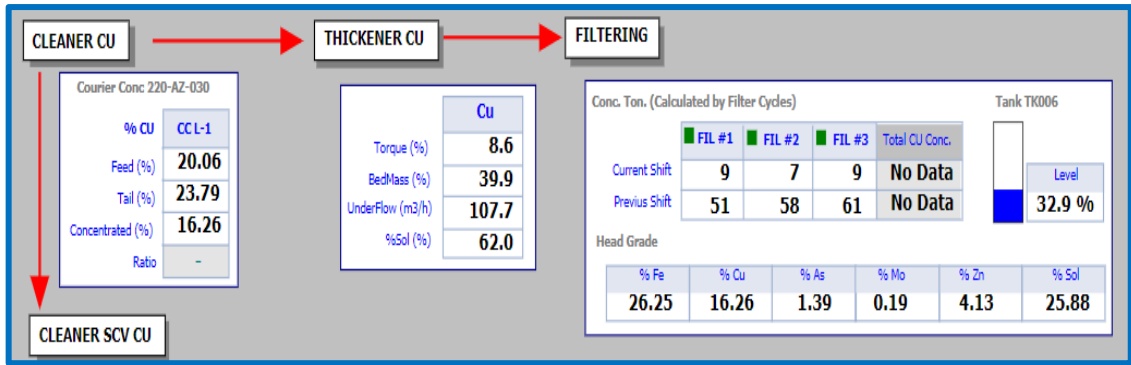
## RECOLECCION DE DATOS EN SALA DE CONTROL Y CAMPO



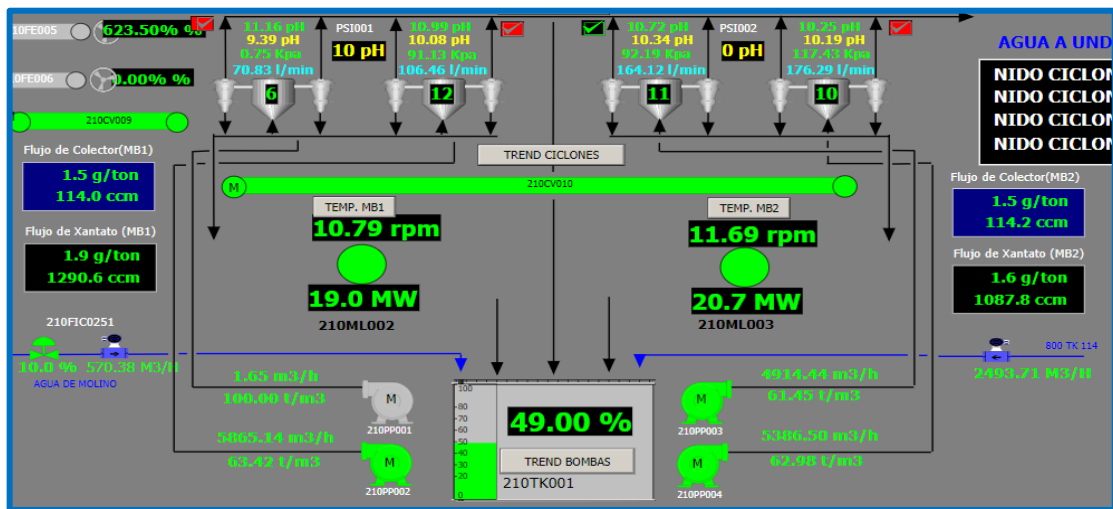
Anexo 01 – Flujo de alimentación al molino SAG -Py system.



Anexo 02 – P80 producto del overflow - Py system.



Anexo 03 – Ley de cobre en el producto final - Py system.



Anexo 04 – Ingreso de agua al tanque de alimentación - Py system.

Bomba Ciclonas	Temp. °C	Corriente Amp	Potencia KW	Torque Nm	Veloc. %	Flujo m3/h	% Sol	Carga Circul.	% Sol UF
210PP001	11.4	0.0	0.0	0.0	0.0	2	100.0	0	79.00
210PP002	48.4	263.0	1479.0	90.2	77.7	5621	62.5	293	81.00
210PP003	56.2	279.0	1349.0	85.3	77.0	4851	61.3	271	80.00
210PP004	65.0	324.0	1638.0	101.7	77.7	5777	63.9	296	78.50

Anexo 05 – Flujo volumétrico de alimentación - Py system.



Nido 1 : 6					Nido 2 : 12					Nido 3 : 11					Nido 4 : 10				
OPEN	Vortex	Apex	Media Est.	Desgasta	OPEN	Vortex	Apex	Media Est.	Desgasta	OPEN	Vortex	Apex	Media Est.	Desgasta	OPEN	Vortex	Apex	Media Est.	Desgasta
Cidón A	8910.14 h	8910.14 h	170.45	104.54	Cidón A	8530.39 h	9650.83 h	171.35	113.48	Cidón A	6888.16 h	13223.85 h	175.88	158.81	Cidón A	7105.60 h	9385.31 h	171.03	110.28
Cidón B	8044.34 h	8044.34 h	168.41	94.09	Cidón B	8611.68 h	10435.03 h	172.29	122.95	Cidón B	7131.21 h	16481.28 h	179.59	195.92	Cidón B	7437.07 h	16670.17 h	179.82	198.20
Cidón C	9170.63 h	9170.63 h	170.77	107.68	Cidón C	10128.93 h	10128.93 h	171.93	119.25	Cidón C	6421.13 h	9290.77 h	170.84	198.41	Cidón C	7314.44 h	12918.86 h	175.29	152.90
Cidón D	8951.98 h	8951.98 h	170.50	105.05	Cidón D	8301.16 h	8502.01 h	169.96	95.82	Cidón D	7312.42 h	11118.15 h	173.12	131.19	Cidón D	7396.80 h	9435.71 h	171.09	110.89
Cidón E	6367.66 h	6367.66 h	170.50	73.73	Cidón E	10099.08 h	10999.08 h	169.96	118.89	Cidón E	6488.14 h	10273.11 h	173.12	120.99	Cidón E	7206.86 h	12767.87 h	171.09	150.98
Cidón F	2973.10 h	2973.11 h	163.29	32.88	Cidón F	8202.48 h	10990.77 h	172.97	129.65	Cidón F	4879.82 h	8917.54 h	168.05	80.49	Cidón F	8620.43 h	8913.01 h	170.46	104.58
Cidón G	2686.45 h	6497.83 h	167.54	75.43	Cidón G	6809.48 h	8246.70 h	168.65	95.53	Cidón G	1815.82 h	7412.22 h	168.65	88.46	Cidón G	4047.45 h	5873.49 h	168.79	87.89
Cidón H	2298.61 h	857.03 h	160.73	7.34	Cidón H	3795.87 h	4890.86 h	165.80	58.03	Cidón H	237.50 h	1110.86 h	161.04	10.41	Cidón H	1819.92 h	1947.93 h	162.05	20.51
Cidón I	278.30 h	81.36 h	160.00	0.00	Cidón I	4555.92 h	1132.85 h	161.07	10.87	Cidón I	919.99 h	553.82 h	160.37	3.86	Cidón I	837.52 h	938.06 h	160.83	8.32
Cidón J	2354.16 h	599.12 h	160.41	4.11	Cidón J	847.88 h	77.12 h	160.00	0.00	Cidón J	1181.52 h	351.48 h	160.12	1.24	Cidón J	1272.38 h	345.98 h	160.12	1.18
Cidón K	7940.81 h	80.50 h	160.00	0.00	Cidón K	8216.39 h	22.36 h	160.00	0.00	Cidón K	0.48 h	0.49 h	160.00	0.00	Cidón K	1210.47 h	81.85 h	160.00	0.00
Cidón L	3699.17 h	3699.17 h	164.16	41.65	Cidón L	254.03 h	254.00 h	160.01	0.07	Cidón L	1588.18 h	3731.89 h	164.20	42.04	Cidón L	453.54 h	7479.13 h	168.73	87.27
Cidón M	4879.02 h	4879.02 h	165.71	57.09	Cidón M	817.37 h	817.37 h	160.09	6.87	Cidón M	4869.02 h	8012.43 h	168.37	93.71	Cidón M	708.78 h	8425.42 h	169.87	95.69
Cidón N	8777.70 h	8777.70 h	170.29	102.84	Cidón N	3709.69 h	3709.69 h	164.18	41.77	Cidón N	6282.10 h	10774.71 h	172.70	127.05	Cidón N	1087.28 h	4211.47 h	164.78	47.83
Cidón O	9282.97 h	9282.97 h	170.90	109.04	Cidón O	8212.56 h	8212.56 h	169.81	95.12	Cidón O	7080.02 h	11709.23 h	173.83	138.53	Cidón O	6892.19 h	13972.62 h	178.56	185.84
Cidón P	9309.79 h	9309.79 h	170.94	109.37	Cidón P	8861.95 h	8861.95 h	170.40	103.96	Cidón P	6477.51 h	11778.08 h	173.91	139.13	Cidón P	8831.96 h	14218.49 h	176.86	188.81
Cidón Q	9231.71 h	9231.71 h	170.84	108.42	Cidón Q	8718.34 h	8718.34 h	170.22	102.23	Cidón Q	6481.98 h	9734.80 h	171.45	114.49	Cidón Q	7199.25 h	17293.81 h	180.57	205.73
Cidón R	8090.85 h	8090.84 h	169.47	94.65	Cidón R	10340.30 h	9844.16 h	171.58	115.81	Cidón R	5243.11 h	10284.03 h	172.11	121.12	Cidón R	7627.59 h	11031.39 h	173.01	130.14

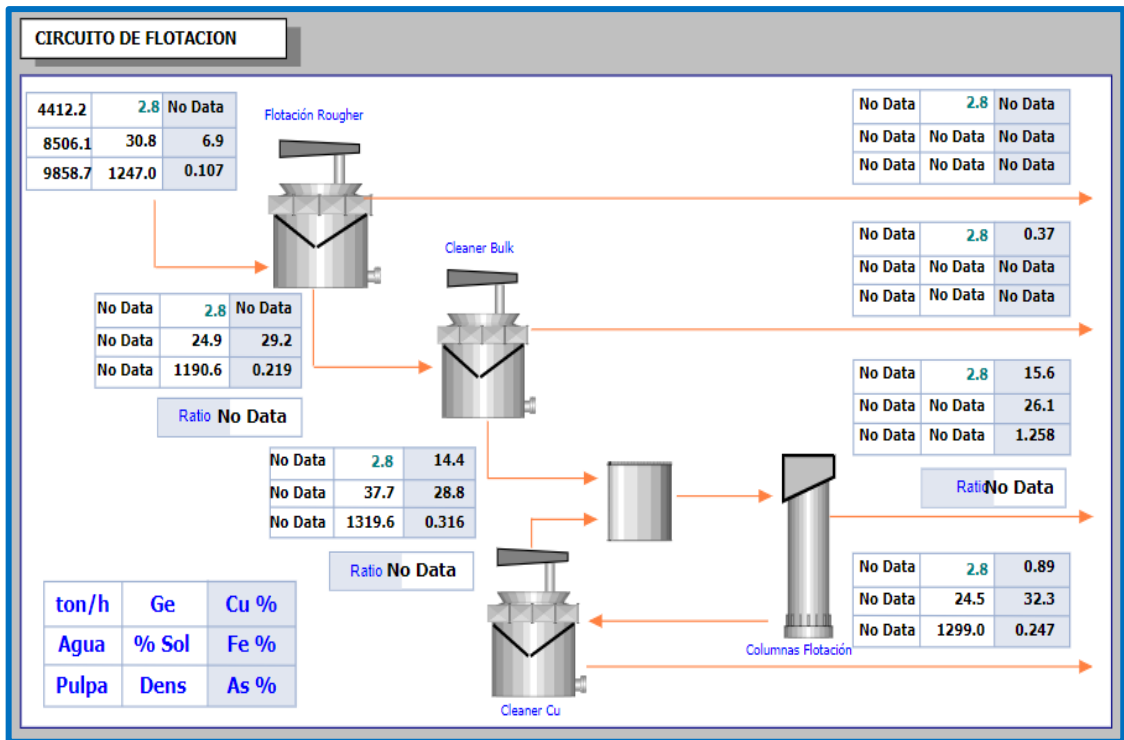
Anexo 06 – Operatividad de hidrociclones - Py System.

FLOTATION [ROUGHER]					
Courier Rougher Bulk 220AZ-010					
% CU	RL-1	RL-2	RL-3	RL-4	Current AVG
Feed (%)	0.0	0.7	0.7	0.8	
Tail (%)	0.12	0.11	0.15	0.11	
Concentrated (%)	0.0	7.1	12.9	10.4	
Ratio					
Recovery (%)	0.0	85.3	79.9	86.0	
pH	9.6	10.5	11.1	10.8	

CLEANER BULK			THICKENER BULK		
Courier Rougher Bulk 220AZ-010			Bulk		
% CU	CB L-1	CB L-2	Torque (%)	BedMass (%)	UnderFlow (m3/h)
Feed (%)			13.8	17.1	303.1
Tail (%)	0.65	0.59			25.4
Concentrated (%)	15.27	18.52			
Ratio					
Recovery (%)	97.72	97.27			
pH	11.31	11.37			

Anexo 07 – Recuperación de Cu en celdas RoBulk - Py system.



Anexo 08 – Ingreso de corrientes de flujo a celdas RoBulk - Py System.

**THICKENING**

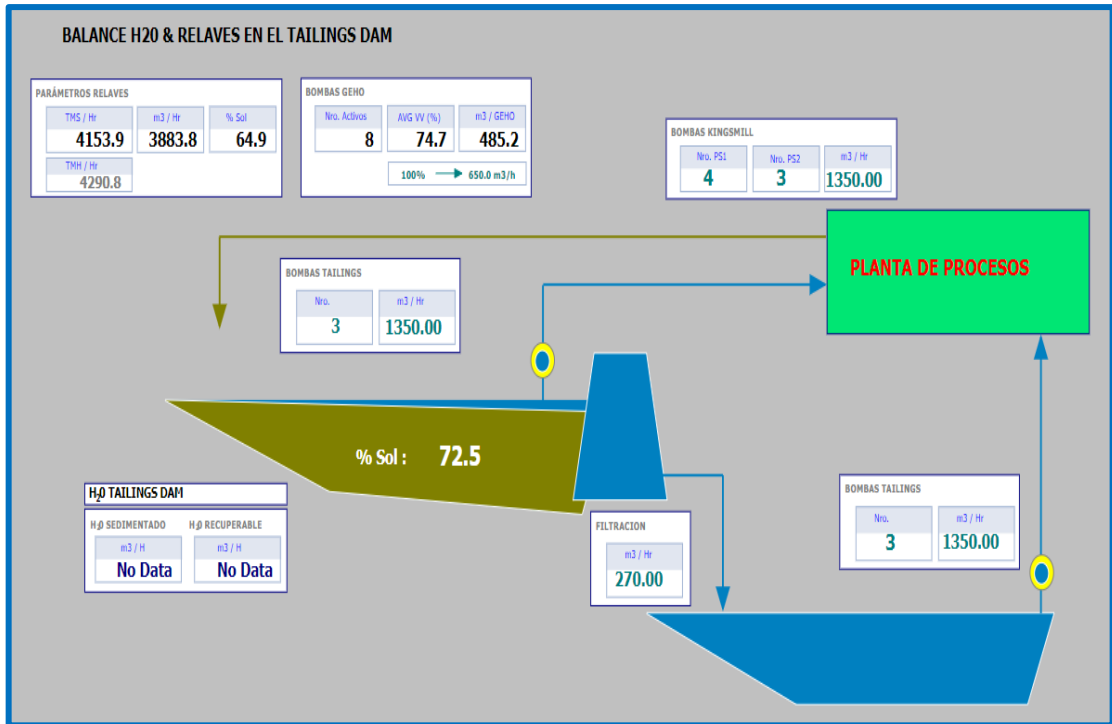
**TT1 (Tailings Thickener # 1)**

	TH #1	TH #2	TH #3	TH #4
BedMass 1 (%)	36.2	60.5	54.1	63.4
BedMass 2 (%)	-1.2	52.2	28.6	62.2
UnderFlow (m3/h)	1900.6	1373.1	1247.6	1169.5
%Sol (%)	1.6	1.6	1.6	1.6
Dosif. Floc (l/min)	0.0	110.6	80.8	108.9
Ratio Floc (g/t)	14.0	16.0	13.5	16.0

**GEHO**

					Press IN	Press OUT
MG #48	MG #49	MG #50	MG #51	MG #52	421.7	5811.6
MG #54	MG #55	MG #56	MG #57	MG #58	419.1	5812.6

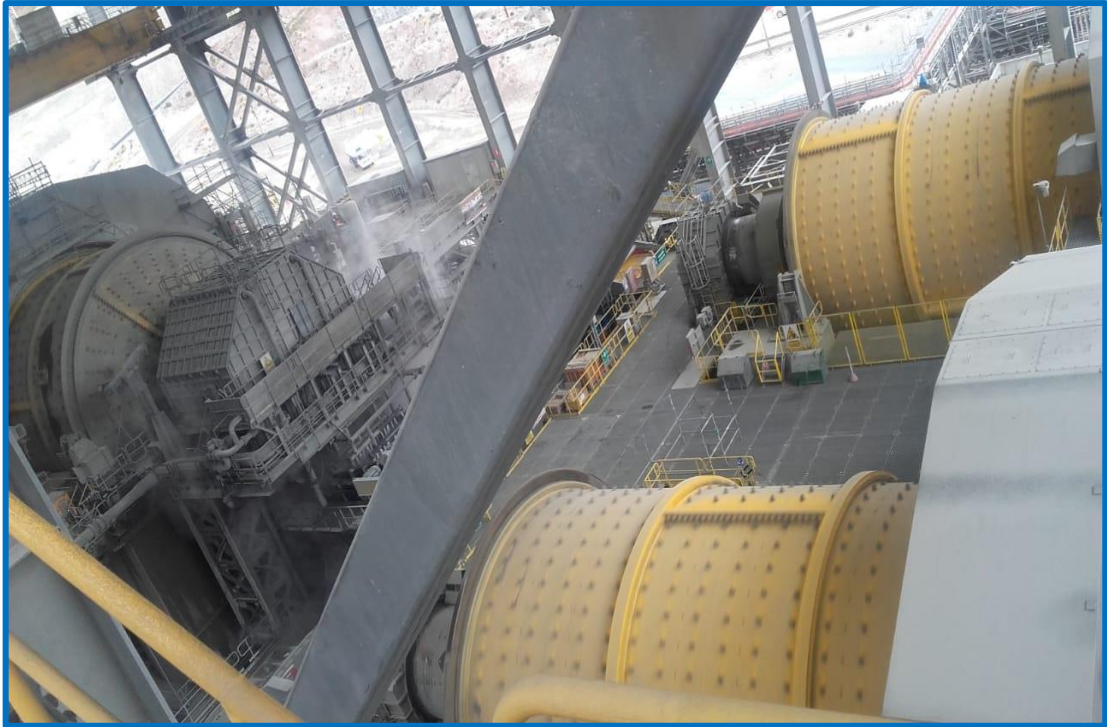
Anexo 09 – Parámetros operativos en espesadores de relaves - Py system.



Anexo 10 – Balance de agua presa de relaves - Py System.



Anexo 11 – Análisis granulométrico de polígonos y stocks - Py system.



Anexo 12 – Circuito de molienda, molino SAG y molinos de bolas.



Anexo 13 – Descarga del underflow a molinos de bolas.



Anexo 14 – Nidos de hidrociclones.



Anexo 15 – Cajón del overflow de alimentación a celdas Ro-Bulk.



Anexo 16 – Construcción del circuito de molienda N°2.



Anexo 17 – Tipos de minerales tratados en planta de procesos.

PLANT PRODUCTION FOR BUDGET 2019 VS.2

Description	Jan-19	Feb-19	Mar-19	Apr-19	May-19	Jun-19	Jul-19	Aug-19	Sep-19	Oct-19	Nov-19	Dec-19	2019
From	01-ene	16-ene	16-feb	16-mar	16-abr	16-may	01-jun	16-jun	16-ago	16-oct	16-nov	16-dic	01-ene
To	25-ene	25-feb	25-mar	25-abr	25-may	30-jun	25-jul	25-ago	25-sep	25-oct	25-nov	31-dic	31-dic
Days	25.00	31.00	28.00	31.00	30.00	36.00	25.00	31.00	31.00	30.00	31.00	36.00	365.00
Plant availability (%)	97.75%	97.88%	74.67%	98.15%	97.81%	99.40%	97.53%	81.96%	98.02%	97.67%	96.47%	98.06%	94.17%
Plant Operational Utilization (%)	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
Plant Capacity Day (tmt)	112,897	113,881	113,002	113,964	114,629	119,024	110,899	110,942	112,496	110,879	112,728	110,816	111,744
<b>Tonnes milled</b>	<b>2,754,036</b>	<b>3,455,577</b>	<b>2,962,446</b>	<b>3,406,793</b>	<b>3,275,603</b>	<b>3,699,701</b>	<b>2,698,544</b>	<b>2,818,429</b>	<b>3,418,247</b>	<b>3,243,134</b>	<b>3,371,280</b>	<b>3,912,049</b>	<b>38,416,000</b>
Dureza	3.08	2.98	3.02	3.18	3.18	3.34	3.26	3.25	3.10	3.24	3.03	3.24	3.162
Humedad Dióxido	12%	12%	11%	10%	7%	2%	3%	6%	6%	0%	6%	1%	6.16%
Intrusivo Potasio	59%	48%	56%	65%	69%	84%	75%	75%	61%	77%	58%	76%	67.2%
Seisica	7%	5%	3%	11%	6%	4%	8%	6%	10%	0%	2%	3%	5.8%
Endoskarn (silíceo + granates)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0.0%
Magnetita Masiva	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0.0%
Skarn-Actinolita Tremolita	18%	18%	25%	13%	9%	6%	10%	13%	17%	14%	26%	14%	14.9%
Skarn - Serpentina Magnetita Písta	4%	13%	6%	1%	11%	3%	3%	1%	7%	8%	8%	5%	5.9%
XRD Talco	5.0%	5.6%	5.6%	3.6%	4.5%	3.9%	5.0%	5.3%	4.3%	4.3%	4.6%	1.3%	4.3%
<b>Cu Recovery (%)</b>	<b>82.59</b>	<b>79.97</b>	<b>80.97</b>	<b>82.75</b>	<b>81.66</b>	<b>82.82</b>	<b>80.57</b>	<b>83.09</b>	<b>82.31</b>	<b>81.65</b>	<b>81.27</b>	<b>83.51</b>	<b>82.02</b>
Sulfide Cu (%)	0.517	0.521	0.566	0.571	0.615	0.611	0.551	0.565	0.655	0.703	0.722	0.734	0.6185
Sulfide Mo (%)	0.012	0.011	0.011	0.013	0.016	0.014	0.010	0.013	0.013	0.012	0.015	0.012	0.014
Sulfide Ag (g/t)	6.203	5.743	6.815	5.992	5.791	6.621	6.352	5.399	8.745	8.510	10.016	8.188	7.057
Sulfide As (%)	0.024	0.022	0.024	0.021	0.024	0.024	0.023	0.022	0.028	0.027	0.031	0.022	0.024
Sulfide Zn (%)	0.087	0.100	0.115	0.076	0.096	0.160	0.101	0.124	0.208	0.246	0.315	0.204	0.135
F (ppm)	2,165	2,077	2,334	1,840	1,999	1,821	1,813	1,778	1,926	2,043	1,983	2,004	1,973
MgO (%)	7.207	8.010	8.412	5.197	6.390	6.351	7.426	6.997	6.187	7.817	7.436	4.735	6.812
Ag Recovery (%)	72.00	72.00	72.00	72.00	72.00	72.00	72.00	72.00	72.00	72.00	72.00	72.00	72.00
<b>Concentrate Copper Produced (t)</b>	<b>53,499</b>	<b>65,459</b>	<b>49,198</b>	<b>73,203</b>	<b>74,822</b>	<b>85,142</b>	<b>54,475</b>	<b>59,746</b>	<b>83,759</b>	<b>84,618</b>	<b>89,942</b>	<b>109,056</b>	<b>882,919</b>
Ascon < 0.5% - Fluor < 1000 ppm	11,819	30,073	17,380	35,724	27,215	38,125	31,701	26,952	27,287	56,264	42,437	81,870	416,948
Ascon < 0.5% - Fluor > 1000 ppm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ascon > 0.5% < 1.0%	41,680	0	31,818	37,479	47,607	36,480	14,967	30,952	56,472	0	47,565	27,185	163,545
Ascon > 1.0%	0	35,386	0	0	0	20,536	6,468	1,842	0	28,354	0	0	92,526
<b>Cu grade (%)</b>	<b>22.0</b>	<b>22.0</b>	<b>22.0</b>	<b>22.0</b>	<b>22.0</b>	<b>22.0</b>	<b>22.0</b>	<b>22.0</b>	<b>22.0</b>	<b>22.0</b>	<b>22.0</b>	<b>22.0</b>	<b>22.0</b>
Mo grade (%)	0.30%	0.30%	0.30%	0.30%	0.30%	0.30%	0.30%	0.30%	0.30%	0.30%	0.30%	0.30%	0.30%
Ag grade (g/t)	222	218	236	201	181	176	227	180	357	235	295	211	221
As grade (%)	0.73	0.63	0.68	0.60	0.59	0.61	0.69	0.62	0.50	0.58	0.59	0.32	0.57
Zn grade (%)	2.82	3.22	3.42	2.19	2.00	2.40	5.11	6.22	5.59	6.78	3.09	3.78	3.78
F in conc (%)	517	552	518	446	509	591	525	520	598	526	519	392	498
MgO (%)	2.91	3.30	3.14	2.40	2.50	2.88	3.12	3.03	2.87	3.16	3.03	2.84	2.95
<b>Contained copper (tms)</b>	<b>11,770</b>	<b>14,401</b>	<b>10,823</b>	<b>16,105</b>	<b>16,451</b>	<b>18,731</b>	<b>11,985</b>	<b>13,144</b>	<b>18,427</b>	<b>18,616</b>	<b>19,787</b>	<b>23,992</b>	<b>194,242</b>
Ascon < 0.5% - Fluor < 1000 ppm	2,600	6,616	3,824	7,859	5,987	8,388	6,974	5,830	6,083	12,378	5,336	18,011	81,906
Ascon < 0.5% - Fluor > 1000 ppm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ascon > 0.5% < 1.0%	9,170	0	7,000	8,245	10,473	9,838	3,601	6,809	12,404	0	10,451	5,581	79,680
Ascon > 1.0%	0	7,785	0	0	0	4,518	1,410	405	0	6,238	0	0	20,356
Contained Ag (oz)	382,702	459,379	372,690	472,544	439,101	481,605	396,784	345,718	691,938	638,849	852,685	741,507	6,275,480
<b>Tons of Copper Fine Produced</b>	<b>194,242</b>												

Anexo 18 – Planificación de producción Planta de Procesos.



Anexo 19 – Cajón de alimentación a los molinos de bolas.



Anexo 20 – Bomba Warman de alimentación a nido de hidrociclones.



Anexo 21 – Cajón de descarga del molino de bolas.





Anexo 22 – Nido de hidrociclones Cavex.



Anexo 23 – Vista panorámica del circuito de flotación y espesadores de relaves