

**UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA METALURGICA Y DE MATERIALES  
VALPARAISO – CHILE**



**ANÁLISIS DE DESVIACIÓN DE  $P_{80}$  EN ETAPA DE  
CLASIFICACIÓN EN PLANTA DE MOLIENDA**

JAVIERA ANDREA MEDINA GODOY

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL METALÚRGICO

PROFESOR GUÍA:

WALDO VALDERRAMA REYES

AGOSTO 2019

**UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA METALURGICA Y DE MATERIALES**

**VALPARAISO – CHILE**



**ANÁLISIS DE DESVIACIÓN DE  $P_{80}$  EN ETAPA DE  
CLASIFICACIÓN EN PLANTA DE MOLIENDA**

JAVIERA ANDREA MEDINA GODOY

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL METALÚRGICO

PROFESOR GUÍA:

WALDO VALDERRAMA REYES

Material de referencia, su uso no involucra responsabilidad del autor o de la institución.

AGOSTO 2019

## AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en primer lugar a mi familia, mi padre Rodrigo, mi madre Ana y mis hermanos Rodrigo y Agustín, quienes han estado presente durante todo este proceso apoyando y ayudando a lograr mis metas. En especial a mi madre Ana por ser el apoyo fundamental en todos mis momentos de dificultad y logros, por su preocupación, paciencia y gran dedicación en que realicemos los que nos gusta.

A mis amigos gracias por su compañía y por ser la familia en Valparaíso, hicieron que estos años fuera de la casa valieran la pena. Acompañándonos en las tardes y noches de estudio, en las tardes de once y salidas recreativas. En especial a Paola quién fue mi primera amiga en la universidad, a Silvia y Francisca con quienes nos acompañamos en momentos de alegría y estrés.

Gracias a Daggo quien ha sido mi gran apoyo estos últimos años de carrera, eres parte de este logro motivándome a cumplir mis metas y diciéndome que puedo lograr lo que quiero, gracias por creer en mí.

A mis amigas de Rugby, fueron una familia dentro y fuera de la cancha, sobre todo fuera de esta.

También quiero agradecer a mi profesor guía Waldo Valderrama, por su dedicación y completa disposición en todo momento, guiándome cuando era necesario.

Muchas gracias a mi tutor en Codelco Andina, Luis Salinas, quién me dio la oportunidad de realizar esta memoria junto a él, creyendo en mis capacidades y desempeño.

Un final agradecimiento especial a mis amigos y compañeros de memoria en Codelco Andina, Daniela, Mirko y Alejandra, gracias a ustedes las subidas a faena se disfrutaban, se reía, pasaba bien, y nos ayudábamos mutuamente para llegar a esta etapa final.

Análisis de desviación de  $P_{80}$  en etapa de clasificación en planta de molienda

DEDICATORIA

Dedicada a mi padre, Rodrigo.

## RESUMEN

La constante necesidad de mantener y mejorar la productividad en la industria minera mediante cambios en los procesos se debe a alta competitividad del mercado actual chileno y a las características mineralógicas en las que se encuentran hoy en día los yacimientos mineros. Debido a esto, se trabaja continuamente en la búsqueda de mejoras operacionales y de diseño que optimicen los procesos de la minería con el fin de obtener el mayor beneficio económico.

En la Planta Concentradora de Codelco División Andina se encuentra, por una parte, la etapa de Molienda Unitaria I, y por otra la Molienda Convencional, la cual se compone de tres secciones A, B y C, cada una con un molino de barras, tres molinos de bolas y clasificación de tamaño mediante hidrociclones; el producto de estas etapas es llevado a una flotación colectiva para obtener el concentrado de cobre. De acuerdo con el diseño de la molienda convencional y molienda unitaria se debe obtener un producto de mineral con un tamaño de partícula igual o menor a los 240 [ $\mu\text{m}$ ], sin embargo, el problema actual se encuentra en una desviación en el  $P_{80}$  de estas plantas superando los 240 [ $\mu\text{m}$ ].

Analizando la problemática mencionada en la planta concentradora, se propone en este trabajo de memoria como objetivo principal analizar la desviación del  $P_{80}$  en las plantas afectadas y entregar propuestas de trabajo que permitan llegar a tener un tamaño de producto por debajo de los 240 [ $\mu\text{m}$ ]. Para cumplir con el objetivo se plantea una metodología a seguir que considera el estudio del circuito y equipos de la planta, un análisis de la desviación del  $P_{80}$ , planteamiento de un árbol de hipótesis al problema, y finalmente un análisis estadístico de las variables, junto a muestreos en planta para la generación del plan de trabajo y recomendaciones.

En base al análisis de la desviación del  $P_{80}$  se encuentra que el problema se presenta en el tamaño del producto de la sección B de la molienda convencional y MUNI, específicamente en el producto de las baterías BHC5, BHC6 y MUNI con una media de 243, 268 y 258 [ $\mu\text{m}$ ], respectivamente. Una vez estudiadas las posibles causas, se llega a que en la sección B existe un problema en la etapa de

## Análisis de desviación de $P_{80}$ en etapa de clasificación en planta de molienda

clasificación debido a falta de manejo del agua en el proceso y al estado estructural de los hidrociclones; mientras que en el MUNI existe un problema en la etapa de clasificación debido a una desviación en el control operacional en la presión de la batería y en la configuración actual de diseño del hidrociclón.

El plan de trabajo propuesto para la sección B considera una revisión del estándar operacional para el porcentaje de sólido en el rebalse de la batería y la evaluación de dos modelos de hidrociclones distintos a los actualmente instalados. En la batería 6 del molino de bola 6 actualmente se tienen hidrociclones Eral 400, por lo que se lleva a cabo la evaluación del hidrociclón gMAX15 de FLSmidth con el fin de aumentar la calidad y mantener o mejorar el producto de la batería. La prueba se llevó a cabo realizando el cambio de un hidrociclón, en el cual se realizaron muestreos; los resultados mostraron que el tamaño del producto disminuyó de un 24,7% a un 17,8% de +65#, lo que representa un  $P_{80}$  de 255 a 204 [ $\mu\text{m}$ ]. Es por esto que se propone una segunda evaluación esta vez en la batería 5 con hidrociclones Vulco 400 con revestimiento mejorado para realizar una posterior comparación y generar el cambio de los hidrociclones Eral 400.

Para la batería del MUNI, el plan de trabajo se enfoca en la modificación de la configuración de apex/vortex al realizar el cambio de vortex de 130 a 120 [mm], se propone un cambio progresivo en los hidrociclones y un set de muestreos para su evaluación. Los resultados se muestran en función de controles de eficiencia a la batería para el cambio de 0, 4 y 6 vortex de 120 [mm], con operación de 7 hidrociclones, estos entregaron un tamaño de producto de la batería de 270, 257 y 233 [ $\mu\text{m}$ ], respectivamente. Finalmente, se puede concluir que el cambio resulta exitoso en términos de disminuir el  $P_{80}$  para cumplir con el estándar operacional de 240 [ $\mu\text{m}$ ] por lo que se recomienda el cambio completo de la batería.

Se recomienda la revisión de los sensores de flujo de agua en las plantas de molienda debido a las diferencias encontradas entre balance de masa y datos del sistema, esto permite tener un mayor control operacional en los circuitos de molienda y clasificación.

## ABSTRACT

The constant need to maintain and improve productivity in the mining industry through changes in processes is due to the high competitiveness of the current Chilean market and the mineralogical characteristics in which mining deposits are nowadays. Due to this, we are continually working on the search for operational and design improvements that optimize the mining processes in order to obtain the greatest economic benefit.

In the Concentrating Plant of Codelco Andina Division is on the one hand the Unit Grinding I stage, and the Conventional Grinding, on the other, which is composed of three sections A, B and C, each with a bar mill, three balls mills and size classification by hydrocyclones; the product of these stages is taken to a collective flotation to obtain the copper concentrate. According to the design of conventional grinding and unit milling, a mineral product with a particle size below 240 [ $\mu\text{m}$ ] must be obtained, however, the problem that currently arises is a deviation in the  $P_{80}$  of these plants exceeding 240 [ $\mu\text{m}$ ].

Analyzing the problems mentioned in the concentrating plant, it is proposed in this memory work as the main objective to analyze the deviation of the  $P_{80}$  in the affected plants and to bring work proposals that allows a product size below 240 [ $\mu\text{m}$ ]. To achieve the objective, a methodology to be followed is subjected, which considers the study of the circuits and equipment of the plant, an analysis of the deviation of the  $P_{80}$ , a hypothesis tree approach to the problem, and finally a statistical analysis of the variables, also plant samplings for the generation of the work plan and recommendations.

Based on the analysis of the deviation of the  $P_{80}$ , it is found that the problem occurs in the product size of section B of conventional grinding and MUNI, specifically in the product of the BHC5, BHC6 and MUNI batteries with an average of 243, 268 and 258 [ $\mu\text{m}$ ], each. Once the possible causes have been studied, in section B there is a problem in the classification stage due to the lack of water management in the process and the structural condition of the hydrocyclones; while in the MUNI there is a problem in the classification stage due to a deviation in

## Análisis de desviación de $P_{80}$ en etapa de clasificación en planta de molienda

the operational control in the battery pressure and in the current design configuration of the hydrocyclone.

The proposed work plan for section B considers a revision of the operational standard for the percentage of solid in the overflow of the battery and the evaluation of two models of hydrocyclones different from those currently installed. In the battery number 6 of the 6 ball mill, Eral 400 hydrocyclones are currently present, so the evaluation of the FLSmidth gMAX15 hydrocyclone is carried out in order to enhance the quality and maintain or improve the battery product. The test was carried out by changing a hydrocyclone, in which samples were taken; the results shows that the size of the product decreased from 24.7% to 17.8% of + 65 #, which represents a  $P_{80}$  of 255 to 204 [ $\mu\text{m}$ ]. Therefore, a second evaluation is proposed this time in battery 5 with Vulco 400 hydrocyclones with improved coating to make a later comparison and generate the change of the Eral 400 hydrocyclones.

For the MUNI battery the work plan focuses on the modification of the apex / vortex configuration, performing a vortex change from 130 to 120 [mm], a progressive change in the hydrocyclones and a sampling set is proposed for its evaluation. The results were shown in function of efficiency controls to the battery for the change of 0, 4 and 6 vortex of 120 [mm], with operation of 7 hydrocyclones, these delivered a size of product of the battery of 270, 257 and 233 [ $\mu\text{m}$ ], each. Finally, it can be concluded that the change is successful in terms of decreasing the  $P_{80}$  to achieve the operational standard of 240 [ $\mu\text{m}$ ] so the complete change of the battery is recommended.

The revision of the water flow sensors in the grinding plants is recommended due to the differences found between mass balance and system data, this allows to have a greater operational control in the grinding and classification circuits.

## Análisis de desviación de P<sub>80</sub> en etapa de clasificación en planta de molienda

### GLOSARIO

<b>Abreviación</b>	<b>Significado</b>
<b>DAND</b>	División Andina
<b>SA</b>	Sección A
<b>SB</b>	Sección B
<b>SC</b>	Sección C
<b>MUNI</b>	Molino Unitario I
<b>MUNII</b>	Molino Unitario II
<b>MSAG</b>	Molienda SAG
<b>MOBA</b>	Molino de barras
<b>MOBO</b>	Molino de bolas
<b>BHC</b>	Batería de Hidrociclones
<b>P<sub>80</sub></b>	Tamaño en [μm] correspondiente al 80% en peso pasante en el producto
<b>F<sub>80</sub></b>	Tamaño en [μm] correspondiente al 80% en peso pasante en la alimentación
<b>%+65#</b>	Porcentaje de partículas con tamaño mayor a 65 malla Tyler
<b>%-200#</b>	Porcentaje de partículas con tamaño menor a 200 malla Tyler
<b>%+1/2”#</b>	Porcentaje de partículas con tamaño mayor a 1/2” malla Tyler
<b>%CC</b>	Porcentaje de carga circulante
<b>Apex</b>	Zona inferior de descarga de gruesos en un hidrociclón
<b>Vortex</b>	Zona superior de descarga de finos en un hidrociclón

## INDICE GENERAL

CAPITULO 1. INTRODUCCION GENERAL .....	15
1.1 Introducción.....	15
1.2 Definición del problema.....	15
1.3 Planteamiento trabajo de memoria .....	17
1.4 Objetivos .....	17
1.4.1 Objetivo general.....	17
1.4.2 Objetivos específicos.....	18
CAPITULO 2. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS .....	19
2.1 La minería del cobre.....	19
2.2 Nociones básicas .....	19
2.3 Procesos de reducción de tamaño.....	20
2.4 Circuitos de molienda convencional .....	21
2.5 Hidrociclones.....	21
2.6 Software Moly-Cop Tools.....	23
CAPITULO 3. ANTECEDENTES DE LA EMPRESA .....	25
3.1 Aspectos Generales.....	25
3.1.1 Producción.....	25
3.1.2 Sistema de información .....	26
3.2 Proceso productivo.....	26
3.2.1 Descripción del mineral .....	27
3.2.2 Tipos de reactivos.....	28
CAPITULO 4. METODOLOGÍA .....	29
4.1 Estudio de planta concentradora División Andina .....	29
4.1.1 Descripción técnica de equipos .....	31
4.2 Análisis estadístico del problema planteado .....	32
4.3 Árbol de hipótesis.....	35
4.4 Análisis estadístico y estudio de probables causas .....	35
4.4.1 Granulometría de entrada $F_{80}$ .....	35
4.4.2 Nivel de llenado de molinos de bolas .....	38
4.4.3 Problema operacional en etapa de clasificación.....	41

## Análisis de desviación de $P_{80}$ en etapa de clasificación en planta de molienda

4.4.4	Configuración apex/vortex .....	50
4.5	Plan de trabajo .....	51
4.5.1	Sección B: Batería Hidrociclones 6 BHC6 y Batería Hidrociclones 5 BHC5 .....	51
4.5.2	Molino Unitario I MUNI.....	53
4.6	Herramientas de trabajo.....	53
4.6.1	Moly-Cop Tools.....	53
CAPITULO 5. Resultados obtenidos.....		55
5.1	Sección B planta de molienda convencional .....	55
5.1.1	Muestreo sección B .....	55
5.1.2	Balance de masa sección B .....	58
5.1.3	Falta de agua en operación .....	59
5.1.4	Protocolo de prueba FLSmidth: Batería Hidrociclones 6 .....	61
5.2	Molienda unitaria I.....	65
5.2.1	Modificación vortex .....	65
5.2.2	Balance de masa MUNI.....	67
5.2.3	Control de eficiencia y resultados .....	68
CAPITULO 6. Conclusiones y recomendaciones.....		70
CAPITULO 7. Referencias .....		73
CAPITULO 8. Anexos .....		75
8.1	Estándares operacionales SIPP.....	75
8.2	Planos hidrociclones .....	76
8.3	Balance de masa .....	79

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Diagrama general Codelco División Andina. ....	16
Figura 2.1: Funcionamiento general interior hidrociclón. Fuente: Simulation of multiphase Flow in hydrocyclone.....	21
Figura 2.2: Flowsheet de simulación circuito de molienda en Moly-Cop Tools. ....	23
Figura 3.1: Diagrama planta de flotación colectiva rougher, Codelco División Andina. ....	27
Figura 4.1: Diagrama etapas de la metodología de trabajo.....	29
Figura 4.2: Diagrama de flujo planta de molienda convencional, Codelco División Andina. ....	30
Figura 4.3: Baterías hidrociclones en planta concentradora, izquierda modelo Eral400 y derecha Cavex400. ....	32
Figura 4.4: Gráfica producto plantas de molienda 2017-2018.....	33
Figura 4.5: Gráfica de intervalos para producto planta de molienda convencional y MUNI 2018. ....	34
Figura 4.6: Gráfica de producto por batería en planta molienda convencional y MUNI 2018. ....	34
Figura 4.7: Árbol de hipótesis.....	35
Figura 4.8: Diagrama de flujo planta chancado fino y planta de molienda, Codelco División Andina.....	36
Figura 4.9: Perfil granulométrico correa 10A. ....	37
Figura 4.10: Perfil granulométrico correa 10B. ....	37
Figura 4.11: tipos de nivel de carga en molino de bolas. ....	39
Figura 4.12: Gráfica de nivel de llenado molinos de bolas sección B planta concentradora. ....	39
Figura 4.13: Gráfica nivel de llenado MUNI planta concentradora. ....	40
Figura 4.14: Gráfica de caja potencia molinos de bolas sección B 2018. ....	40
Figura 4.15: Gráfica de caja potencia MUNI 2018.....	41
Figura 4.16: Gráfica de caja presión de baterías sección B 2018. ....	43
Figura 4.17: Gráfica de caja presión batería MUNI 2018. ....	44
Figura 4.18: Gráficas % $+65\#$ en función de %sólido para BHC4, BHC5, y BHC6.	46

## Análisis de desviación de $P_{80}$ en etapa de clasificación en planta de molienda

Figura 4.19: Gráfica % $+65\#$ en función de %sólido para MUNI. ....	47
Figura 4.20: Hidrociclones Eral 400, figura (a) hidrociclón en funcionamiento, figura (b) hidrociclón sin fondo plano.....	49
Figura 4.21: Diagrama resumen de posibles causas al problema planteado. ....	51
Figura 4.22: Planilla CycloBal_Single de Moly-Cop Tools.....	54
Figura 5.1: Puntos de muestreo sección B molienda convencional. ....	55
Figura 5.2: Diagrama balance de masa BHC6 muestreo sección B.....	59
Figura 5.3: Gráfica de probabilidad %sólido rebalse BHC5. ....	60
Figura 5.4: Gráfica de probabilidad %sólido rebalse BHC6. ....	60
Figura 5.5: Gráfica % $+65\#$ en muestreos ciclón por ciclón para hidrociclón #2 BHC6.....	64
Figura 5.6: Gráfica %sólido en muestreos ciclón por ciclón para hidrociclón #2 BHC6.....	64
Figura 5.7: Simulación Moly-Cop Tools para MUNI con vortex 130 [mm]. ....	66
Figura 5.8: Simulación Moly-Cop Tools para MUNI con vortex 120 [mm]. ....	66
Figura 5.9: Balance de masa ideal MUNI. ....	68
Figura 8.1: Parámetros recomendados en planta molienda convencional DAND. ....	75
Figura 8.2: Parámetros recomendados en planta MUNI, DAND. ....	75
Figura 8.3: Plano Hidrociclón Cavex 400 FP Vulco 90/120 [mm]. ....	76
Figura 8.4: Plano hidrociclón Eral 400 93/117 [mm]. ....	77
Figura 8.5: Plano hidrociclón Cavex 400 SE Vulco 90/130 [mm]. ....	77
Figura 8.6: Plano hidrociclón gMAX15 FLSmidth. ....	78
Figura 8.7: Balance de masa ideal sección B molienda convencional DAND. ....	79
Figura 8.8: Balance de masa sección B para muestreo general 15/01/19 DAND. ....	80

## INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Relación efecto-respuesta en equipos hidrociclones. Fuente: Weir Minerals.....	22
Tabla 4.1: Especificaciones de diseño baterías de hidrociclones planta de molienda convencional y MUNI. ....	31
Tabla 4.2: Análisis granulometría correa 10A, 10B y 10C.....	38
Tabla 4.3: Estándares operaciones Sección B planta concentradora. ....	42
Tabla 4.4: Estándares operacionales MUNI planta concentradora. ....	43
Tabla 4.5: Coeficiente de correlación de Pearson para baterías sección B y MUNI. ....	47
Tabla 4.6: Tolerancia permitida para apex y vortex baterías molienda convencional y MUNI. ....	48
Tabla 4.7: Duración componentes hidrociclones molienda convencional y MUNI. ....	48
Tabla 5.1: Puntos de muestreo sección B. ....	55
Tabla 5.2: Resultado muestreo sección B correa 10B. ....	56
Tabla 5.3: Resultado muestreo sección B MOBA2. ....	56
Tabla 5.4: Resultado muestreo sección B batería hidrociclones. ....	57
Tabla 5.5: Resultado muestreo sección B carga circulante y agua a cuba. ....	57
Tabla 5.6: Coeficiente de correlación de Pearson y %sólido máximo molienda convencional. ....	61
Tabla 5.7: Resultados %+65# y %sólido muestreos ciclón por ciclón BHC6. ....	63
Tabla 5.8: Presión y Tratamiento muestreos ciclón por ciclón BHC6 sección B. ...	65
Tabla 5.9: Tiempo de operación y desgaste hidrociclones MUNI con vortex 120 [mm]. ....	67
Tabla 5.10: Resultados control de eficiencia MUNI.....	68

## **CAPITULO 1. INTRODUCCION GENERAL**

### **1.1 Introducción**

La evolución tecnológica en la industria minera forma parte del nuevo ciclo minero que se está viviendo en la actualidad, esto ha generado la necesidad de contar con nuevos avances tanto en los métodos de procesamiento de los minerales a extraer como en las operaciones manuales. Las investigaciones apuntan a que entre un corto y mediano plazo se realicen implementaciones de teleoperación en la extracción de minerales y automatización en etapas de procesamiento.

Por otra parte, constantemente se requiere de cambios y mejoras en plantas concentradoras debido a la necesidad de mantener o mejorar la cadena de valor de la mina. Considerando el escenario de hoy en día en la minería, leyes más bajas con rocas de mayor dureza, junto a las exigencias del mercado de aumentar la productividad utilizando de forma óptima los recursos disponibles, es que se vuelve parte del trabajo de los ingenieros buscar métodos u opciones para aumentar el beneficio económico en cada etapa de los procesos de las plantas concentradoras.

Uno de los desafíos en la industria minera es poder tener un consumo de energía en forma eficiente y a la vez mejorar la productividad, esto resulta complicado en el sector de la molienda ya que, a medida que la partícula de mineral se va reduciendo cada vez más de tamaño, el consumo de energía para reducirla va en incremento durante esta etapa.

Luego de la etapa de molienda viene la concentración de los minerales, el proceso de flotación es el método más utilizado en las plantas concentradoras del país. Debido a su importancia, es que se busca constantemente alimentar a este proceso con un tamaño de partícula de mineral deseado para tener la mayor recuperación posible del mineral.

### **1.2 Definición del problema**

De acuerdo con lo planteado, para llegar a tener el tamaño de partícula deseado en el proceso de concentración de minerales de cobre mediante flotación, es que

## Análisis de desviación de $P_{80}$ en etapa de clasificación en planta de molienda

se debe analizar y, en caso de ser necesario, llevar a cabo cambios en las etapas previas. La importancia en el tamaño de partícula que alimenta a la flotación reside en que este afecta directamente a los fenómenos de probabilidad de impacto, adhesión y no desprendimiento entre la partícula y la burbuja.

En la planta concentradora de Codelco División Andina el proceso de molienda se divide en las líneas de molienda convencional, molienda SAG y molienda unitaria I y II; el producto de esta es llevado a la etapa de flotación colectiva donde el  $F_{80}$  de alimentación varía de acuerdo con la planta de molienda de donde proviene la pulpa de mineral obtenida. En la Figura 1.1 se puede observar el flujograma general de División Andina, el cual se divide en las dos líneas de extracción; por un lado, se encuentra la mina subterránea con el chancado primario oeste, norte y sur, y por otro la mina rajo con el chancado primario Don Luis.

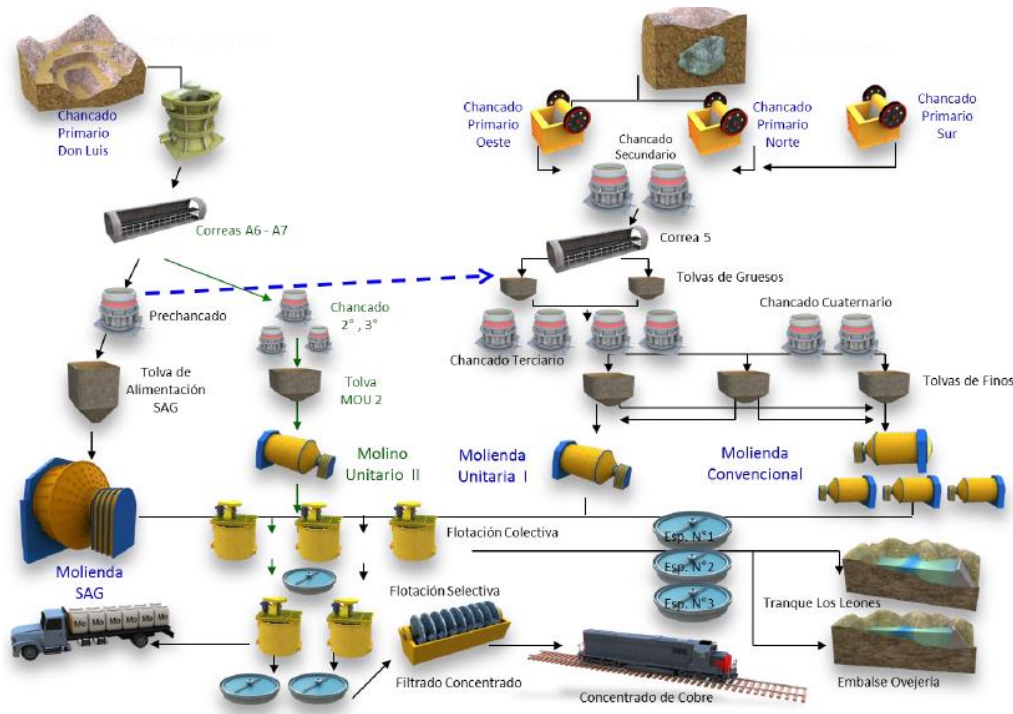


Figura 1.1: Diagrama general Codelco División Andina.

Por el lado de la mina subterránea se encuentra la etapa de la molienda convencional donde el mineral es tratado en 3 secciones paralelas, A, B y C, cada una con un molino de bolas y tres molinos de barras, paralela a esta se encuentra la molienda unitaria I; el producto o  $P_{80}$  esperado como estándar operacional para

## Análisis de desviación de $P_{80}$ en etapa de clasificación en planta de molienda

ser enviado a flotación colectiva Rougher es de máximo 240 [ $\mu\text{m}$ ], sin embargo, actualmente este se encuentra por sobre los 250 [ $\mu\text{m}$ ]. Realizando una comparación con el  $P_{80}$  establecido en el diseño de las otras plantas, ver Tabla 1.1, es que se observa la necesidad de analizar la operación de la molienda convencional para poder establecer posibles causas de dicha desviación y así, proponer posibles cambios o modificaciones para llevar el  $P_{80}$  al esperado por diseño.

Tabla 1.1 Tamaño  $p_{80}$  alimentado a flotación colectiva Rougher DAND (*Andina*).

<i>Planta</i>	<i><math>P_{80}</math></i>	<i>Unidades</i>
<b>MUI</b>	240	$\mu\text{m}$
<b>Molienda Convencional</b>	240	$\mu\text{m}$
<b>Molienda SAG</b>	190	$\mu\text{m}$
<b>MUII</b>	180	$\mu\text{m}$

### 1.3 Planteamiento trabajo de memoria

En búsqueda de asegurar el producto bajo el estándar operacional de la etapa de molienda, es que se hace necesario realizar un estudio de la etapa molienda y clasificación de este circuito, con el propósito de validar la configuración existente en las baterías de ciclones y su operación.

Considerando la problemática, y entendiendo que el  $P_{80}$  es un indicador granulométrico que permite conocer la eficiencia del proceso, es que se plantea como trabajo de memoria para la planta concentradora de División Andina realizar un estudio del proceso, análisis de variables y operación para llegar a plantear posibles cambios y/o mejoras con la finalidad de que se cumpla con el estándar operacional.

### 1.4 Objetivos

#### 1.4.1 Objetivo general

El objetivo principal propuesto es analizar la desviación del  $P_{80}$  en la etapa de clasificación de la planta de molienda convencional y MUI, entregando propuestas para asegurar un producto bajo los 240 [ $\mu\text{m}$ ].

#### **1.4.2 Objetivos específicos**

Como objetivos específicos se plantea,

- Analizar variables que pueden modificar el  $P_{80}$  del producto de la molienda y evaluar mediante análisis histórico si su comportamiento pudiese ser causal de la desviación de dicho  $P_{80}$ .
- Determinar si el origen de la desviación se encuentra en la operación de las etapas de molienda.
- Determinar si el origen de la desviación se encuentra en la etapa de clasificación.

## **CAPITULO 2. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS**

Para una mejor comprensión del trabajo de memoria es que se debe realizar un estudio que permita tener un dominio de los conceptos básicos y comprender el funcionamiento de los procesos y equipos involucrados en la etapa de molienda en una planta concentradora.

### **2.1 La minería del cobre**

Se entiende como minería el conjunto de procesos y técnicas que se utilizan con el objetivo de explorar y explotar yacimientos mineralógicos. Las principales etapas de la industria minera se componen en la exploración de yacimientos, evaluación técnica, económica y estudios de factibilidad, y operación minera mediante explotación y procesamiento de los minerales.

La explotación se puede llevar a cabo mediante distintos métodos, siendo dos las formas más utilizadas, extracción a cielo abierto o rajo y extracción subterránea; mediante tronadura y perforación se extraen toneladas de mineral el cuál mediante transporte es llevado a plantas de reducción de tamaño y posterior concentración de minerales.

### **2.2 Nociones básicas**

Un mineral metálico es aquel que se forma por la deformación de calor y por actividad química entre rocas, encontrándose dentro de estos los minerales metálicos no ferrosos con metal base el cobre. Estos minerales se pueden encontrar concentrados en zonas de la tierra, cuando las concentraciones son suficientemente grandes como para obtener un beneficio económico de la explotación se utiliza el término de yacimiento de minerales. (METSU Minerals, Conocimientos básicos en el procesamiento de minerales, 2008).

Existen ciertas características principales de los yacimientos que son importantes para la forma de explotación de estos, tales como el porcentaje de mineral valioso que se traduce en términos de ley del mineral, composición mineralógica, proporción de mena y ganga, y dureza del mineral la cual depende de la composición química y mineralógica presente. La estimación de la dureza del

mineral es importante ya que esta determina los métodos de los procesos a utilizar en el procesamiento y reducción de tamaño, ayudando a establecer las operaciones necesarias para llegar al tamaño deseado para su tratamiento.

### **2.3 Procesos de reducción de tamaño**

El objetivo de los procesos de reducción de tamaño es la liberación del mineral para llegar a obtener un tamaño de partícula tal que entregue el máximo valor económico esperado y aumentar el área superficial para reacciones químicas. La reducción de tamaño puede comenzar con rocas de hasta 1 metro de largo llegando a tener como producto final partículas en micrones, es por esto que es necesario contar con varias etapas y equipos específicos para poder llevar a cabo la reducción de la roca.

Normalmente las etapas de reducción se pueden dividir en función del tamaño de partícula de entrada y salida; los procesos de chancado se utilizan para partículas gruesas provenientes directamente de la mina con diámetros mayores a 2"; luego, los procesos de molienda son alimentados con partículas de diámetro menores a 1/2" para la molienda convencional, y menores a 8" para la molienda semiautógena (SAG).

La etapa de chancado del mineral suele dividirse de acuerdo con el tamaño que procesan, encontrándose chancado primario (1 a 2 [m]), chancado secundario (menores a 8"), y chancado terciario (menores a 3"). El tamaño del producto que va a molienda va a depender del tipo de molienda de la planta.

La etapa de molienda se realiza en equipos cilíndricos que giran alrededor de su eje horizontal y se utiliza algún medio de molienda como bolas o barras de acero. Existen dos tipos comunes de molienda, por un lado, se encuentra la molienda convencional la cual cuenta con molinos de bolas y/o barras, y por otro está la molienda autógena o semiautógena. La principal diferencia entre estas está en que la molienda AG utiliza como medio de molienda el mineral, mientras que la molienda SAG utiliza como medio el mineral con un cierto porcentaje de bolas.

## 2.4 Circuitos de molienda convencional

La molienda convencional se caracteriza por utilizar molinos de barras o bolas, donde el medio de molienda va a depender del tamaño de partícula que se quiere obtener y la configuración del circuito. Existen circuitos que se componen por un molino de barras seguido de un molino de bolas, o bien, únicamente de un molino de bolas con las dimensiones suficientes para obtener el tamaño deseado. Los medios de molienda suelen ser de acero y generalmente ocupan menos de la mitad del volumen del equipo, encontrándose entre un 30 a 40%.

## 2.5 Hidrociclones

Para la etapa de clasificación de tamaño en húmedo el equipo comúnmente utilizado es el hidrociclón, en este equipo las partículas gruesas y finas son separadas por acción de la fuerza centrífuga, de la gravedad y del arrastre. Dentro del hidrociclón se crea un vórtice de baja presión debido a la trayectoria helicoidal de las partículas y la masa de agua, por lo que los finos salen por el rebose llamado vortex. Por otro lado, las partículas gruesas giran cercanas a la pared y debido a su mayor masa forman una pulpa espesa que desciende por la zona inferior de descarga llamada ápex. Este fenómeno se produce debido a que la alimentación entra tangencialmente a una presión determinada formándose un torbellino primario y secundario. (Gutierrez, Dimensionamiento y Optimización de Plantas Concentradoras Mediante Técnicas de Modelación Matemática, 1986)

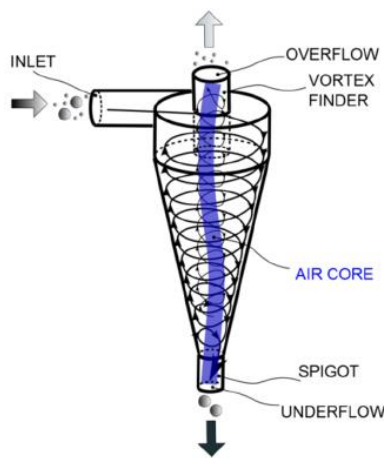


Figura 2.1: Funcionamiento general interior hidrociclón. Fuente: Simulation of multiphase Flow in hydrocyclone.

## Análisis de desviación de $P_{80}$ en etapa de clasificación en planta de molienda

Los parámetros en los hidrociclones que pueden ser controlados son la densidad de pulpa alimentada, la caída de presión en la alimentación a este, el diámetro del vortex y diámetro del apex, estas condiciones de operación se diseñan con el fin de obtener un tamaño de corte y una eficiencia de separación dada, para cargas circulantes establecidas. En función de la geometría se usan mayores diámetros para separaciones más gruesas y menores para separaciones finas, también se pueden encontrar modelos con cono extendido o sin cono extendido. (Ruiz, Reducción de tamaño y clasificación, Concepción, 2004)

Los hidrociclones pueden ser instalados en forma vertical o de manera horizontal con cierto grado de inclinación, este ángulo suele ser entre  $10^\circ$  a  $30^\circ$ . La instalación con un ángulo de inclinación trae como consecuencia una disminución de la carga circulante, un aumento en el tamaño de corte del overflow y un underflow más fino.

Existen distintos tipos de hidrociclones, entre los más utilizados se encuentran los de cilindro fondo plano y los con fondo cónico. Los hidrociclones de fondo plano permiten aumentar la capacidad del circuito, pero con separaciones más gruesas, mientras que los hidrociclones cónicos entregan un corte más fino al underflow con menor capacidad del circuito debido a su geometría.

Dentro de las variables operacionales y parámetros de estos equipos existe la relación de efecto-respuesta, éstas se muestran en la Tabla 2.1. Conocer estas relaciones permiten tener cierto grado de control en la operación.

Tabla 2.1: Relación efecto-respuesta en equipos hidrociclones. Fuente: Weir Minerals.

Efecto / Respuesta	$\Delta$ Presión	By-pass fino	%Sólido underflow	%Sólido overflow
↑ Flujo alimentación	↑	↓	↑	↓
↑ $\rho$ alimentación	↓	↑	↑	↑
↑ Diámetro vortex	↓	↓	↑	↑
↑ Diámetro apex	↓	↑	↓	↓
↑ Diámetro inlet	↓	↑	↓	↑

## Análisis de desviación de $P_{80}$ en etapa de clasificación en planta de molienda

Por lo tanto, para poder reducir el tamaño de corte en un hidrociclón se puede disminuir el diámetro del ciclón, disminuir el diámetro del inlet, disminuir el diámetro del vortex o aumentar el largo del ciclón.

### 2.6 Software Moly-Cop Tools

El software Moly-Cop Tools es una herramienta para la simulación de procesos de molienda convencional y semiautógena, clasificación y modelos metalúrgicos, el cual permite realizar caracterizaciones de los circuitos o procesos de molienda, realizar balances de masa, evaluar la eficiencia de los procesos o equipos de molienda y clasificación y estimar parámetros en los circuitos.

Esta herramienta se compone de planillas Excel con simulaciones de circuitos de molienda con clasificación, modelamiento de molinos de bolas y semiautógenos, chancadores, rodillos de molienda de alta presión (HPGR), simulación de hidrociclones, harneros y vertimill, entre otros.

La utilización de este software en plantas concentradoras contribuye a la evaluación de los parámetros y variables en los procesos metalúrgicos, además de ayudar en la optimización de las operaciones, en el consumo energético y el mejoramiento continuo de la planta.

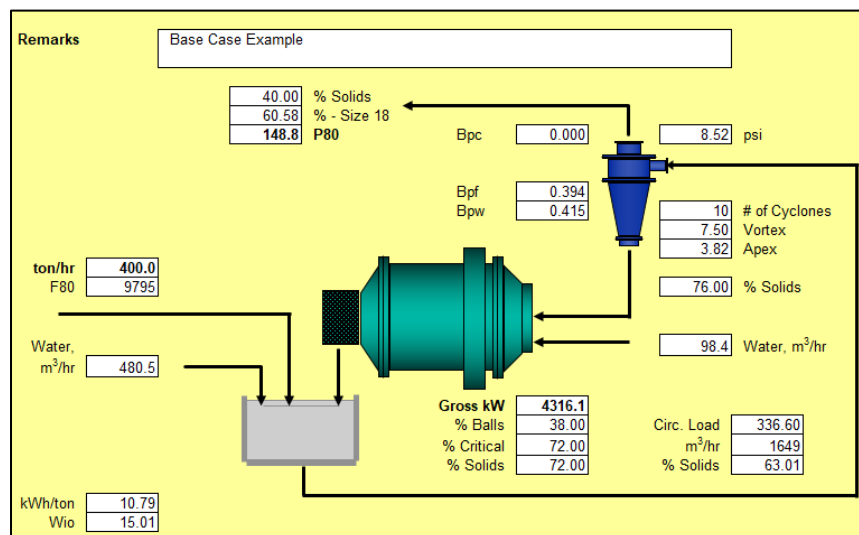


Figura 2.2: Flowsheet de simulación circuito de molienda en Moly-Cop Tools.

## Análisis de desviación de $P_{80}$ en etapa de clasificación en planta de molienda

En la Figura 2.2 se puede observar el flowsheet de una simulación de un circuito de molienda inverso en Moly-Cop Tools, el cual está diseñado para realizar un balance de masa por malla operando bajo condiciones dadas. El modelo de molienda utilizado para este caso se basa en la Teoría Moderna de Conminución.

## **CAPITULO 3. ANTECEDENTES DE LA EMPRESA**

### **3.1 Aspectos Generales**

La Corporación Nacional del Cobre de Chile, Codelco, es una empresa autónoma perteneciente al Estado de Chile dedicada a explorar, desarrollar y explotar los recursos mineros del territorio chileno hasta su comercialización.

Codelco División Andina, DAND, se encuentra ubicada en la V Región de Valparaíso. Esta se divide en dos sectores, el Edificio Institucional de Los Andes (EILA) y la zona industrial. La zona industrial se divide en tres sectores, la Planta de Filtrado y Secado de Concentrado (PFSC) ubicada en la comuna de Saladillo a 34 km de la ciudad de Los Andes; la Planta Concentradora, Mina Subterránea y Mina Rajo ubicadas en la comuna de Río Blanco a más de 50 km de Los Andes. La Planta Concentradora se encuentra a 3.000 m.s.n.m., la Mina Subterránea a 3.700 a 4.000 m.s.n.m., y la mina a rajo abierto Sur Sur por sobre los 4.500 m.s.n.m.

#### **3.1.1 Producción**

Codelco a nivel nacional representa el 20% de las exportaciones chilenas llegando a un aporte de US\$ 116 mil millones desde sus inicios hasta el 2018 y con una producción de 1.806 mil toneladas métricas de cobre fino en el 2018.

Dentro de sus productos a nivel nacional se encuentran cátodos de cobre grado A, concentrado de cobre, calcina de cobre, molibdeno, plata, barros anódicos, ácido sulfúrico y alambrón.

División Andina tiene como productos el concentrado de cobre y concentrado de molibdeno. Dentro de la producción dos tercios de esta es transportada a División Ventanas, donde es procesada para la obtención de cátodos de cobre y/o luego exportados vía marítima. El tercio restante es enviado a otras divisiones para su procesamiento a siguientes etapas de purificación o refinación. División Andina cuenta con una producción durante del 2018 de 195.531 toneladas métricas de cobre fino y una dotación propia de 1.671 personas.

### **3.1.2 Sistema de información**

Para la recopilación y procesamiento de datos en línea de los procesos productivos División Andina utiliza un mismo software con el fin de mantener un sistema fijo que permita obtener información actualizada desde cualquier punto de la planta. El software utilizado es el PI System en el cual se almacenan los datos de los procesos tales como tonelajes, flujos, corrientes, voltajes, potencias, presiones, leyes, entre otros; el almacenamiento se realiza con intervalo de 9 segundos. El almacenamiento de estos datos se encuentra vinculado en complementos del programa Excel, con el propósito de su fácil obtención.

### **3.2 Proceso productivo**

El proceso productivo de División Andina parte desde la Mina Subterránea y Mina Rajo, donde luego de diversas etapas de producción se llega a la obtención de concentrado de cobre y su transporte hasta División Ventanas.

El proceso comienza con la extracción del mineral desde dos líneas de flujo distintas, la Mina Rajo (Sur Sur) y la Mina Subterránea.

La primera línea comienza con la extracción de la roca desde la Mina Rajo Abierto, mineral con ley 1%, mediante tronaduras por bancos. Este mineral es transportado al Chancado Primario "Don Luis" donde es procesado en un equipo Chancador Primario Fuller; el producto reducido de tamaño ( $P_{80}$  de 1 [m]) es dividido en dos líneas, un flujo es enviado a la planta de Prechancado y otro a la planta de Chancado 2°3°, el producto del Prechancado pasa hacia el Molino SAG mientras que el producto del Chancado 2°3° pasa por el Molino Unitario II.

La segunda línea de producción comienza con la extracción del mineral en la Mina Subterránea, esta mineral cuenta con una ley de 0,6%, el mineral es transportado a la planta de Chancado Convencional y luego pasa a la planta de Chancado 3°4° o Chancado Fino; el producto obtenido de chancado se divide en dos flujos, uno es alimentado a Molino Unitario I y el otro a la Molienda Convencional.

El producto final de la molienda es enviado a la planta de Flotación Colectiva de cobre y molibdeno.



## Análisis de desviación de $P_{80}$ en etapa de clasificación en planta de molienda

mineral varía tanto para la Mina Subterránea como para la Mina Rajo siendo de 15,5 a 16 [kWh/tc] y 14,7 [kWh/tc], respectivamente.

Las leyes varían entre 0,8 a 1% para minerales de cobre y 0,02% para el molibdeno. El porcentaje de humedad del mineral es de 3 a 6%, y la densidad aparente es de 1,8 [ton/m<sup>3</sup>].

### **3.2.2 Tipos de reactivos**

El colector utilizado para la flotación de cobre es Tionocarbamato X-23 con un consumo de 22 [g/ton mineral], el reactivo espumante utilizado es el MIBC con un consumo de 13 [g/ton mineral], el colector de molibdeno usado es el diesel con un consumo de 10 [g/ton mineral].

## CAPITULO 4. METODOLOGÍA

Con el propósito de llegar a cumplir con los objetivos propuestos para el problema planteado, se deben definir etapas de trabajo dentro de la metodología que consideren todos los análisis necesarios de la planta. En la Figura 4.1 se muestra un diagrama general de las etapas de la metodología.

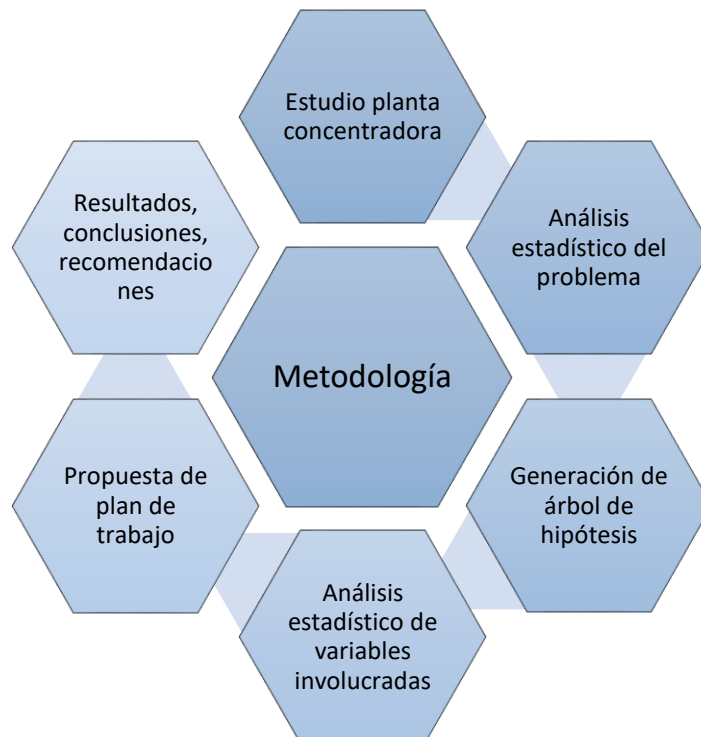


Figura 4.1: Diagrama etapas de la metodología de trabajo.

### 4.1 Estudio de planta concentradora División Andina

La primera etapa consiste en realizar un estudio del diagrama de flujo de la planta en general y de la planta concentradora de la división, junto con el estudio del diseño de los equipos involucrados en cada planta de la molienda y los tipos de circuitos. En la Figura 1.1 se puede observar el diagrama de flujo general del proceso productivo de División Andina, desde la extracción del mineral hasta el envío del concentrado de cobre.

El problema se centra en la planta de molienda convencional, específicamente sección B-C, la cual alimenta mediante el cajón B-C a la flotación Rougher E, y en

## Análisis de desviación de $P_{80}$ en etapa de clasificación en planta de molienda

la molienda unitaria I la cuál alimenta a la flotación A-B. En la Figura 4.2 se observa el diagrama de flujo de la planta de molienda convencional.

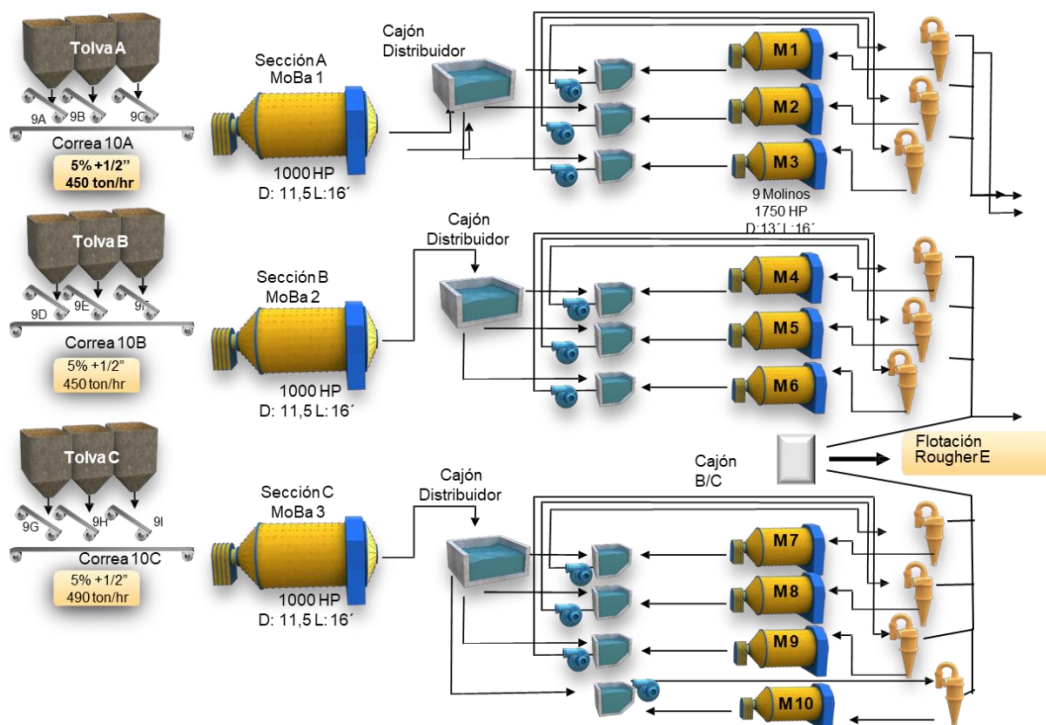


Figura 4.2: Diagrama de flujo planta de molienda convencional, Codelco División Andina.

La planta de molienda convencional se compone por las secciones A, B y C, y por la molienda unitaria I (MUNI); cada sección se compone de un molino de barras de 11,5' de diámetro por 16' de largo y una potencia de 1000 HP, las secciones cuentan con tres molinos de bolas de 12,5' de diámetro por 16' de largo y una potencia de 1750 HP, cada una junto con una batería de 6 hidrociclones por cada molino de bolas, la sección C se diferencia de estas al contar con un cuarto molino de bolas. Cada sección tiene un tratamiento estimado de 450 tph, mientras que cada molino debiese tratar 150 tph. Para los molinos de barras el circuito es abierto, mientras que en los molinos de bolas la configuración es un circuito inverso cerrado, donde primero se clasifica la pulpa proveniente del cajón distribuidor mediante hidrociclones, luego el flujo del underflow es llevado al molino de bolas y el overflow se envía a flotación.

## Análisis de desviación de $P_{80}$ en etapa de clasificación en planta de molienda

La MUNI se compone de un solo molino de bolas de 16' de diámetro por 24' de largo con una potencia de 3400 HP, junto con una batería de 10 hidrociclones Cavex 400 CVX, de los cuales 7 se mantienen operativos.

### 4.1.1 Descripción técnica de equipos

#### 4.1.1.1 Equipos de clasificación: hidrociclones

El equipo utilizado en la planta para la clasificación de tamaño de pulpa de mineral son los hidrociclones, el modelo, la configuración y dimensiones de estos varía según la planta y sección donde se encuentren. En la Tabla 4.1 se observan las dimensiones de corte de cada hidrociclón y su modelo por batería de la planta de molienda convencional.

Tabla 4.1: Especificaciones de diseño baterías de hidrociclones planta de molienda convencional y MUNI.

Batería	Apex [mm]	Vortex [mm]	N° ciclones	Modelo
<b>MOBO1</b>	90	120	6	CAVEX 400 FP
<b>MOBO2</b>	90	120	6	CAVEX 400 FP
<b>MOBO3</b>	90	120	6	CAVEX 400 FP
<b>MOBO4</b>	93	117	6	ERAL 400 FP
<b>MOBO5</b>	93	117	6	ERAL 400 FP
<b>MOBO6</b>	93	117	6	ERAL 400 FP
<b>MOBO7</b>	90	130	6	CAVEX 400 SE
<b>MOBO8</b>	90	130	6	CAVEX 400 SE
<b>MOBO9</b>	90	130	6	CAVEX 400 SE
<b>MOBO10</b>	90	130	6	CAVEX 400 SE
<b>MUN1</b>	90	130	10	CAVEX 400

Para las secciones A, B y C se mantienen 4 ciclones operativos y 2 en stand by, mientras que para la MUNI se mantienen en operación 7 de los 10 ciclones. Las secciones A, B y C operan con 1 hidrociclón cada una, de la totalidad de sus baterías, para la recirculación del flujo de fino hacia el molino de barras. Por lo tanto, esta recirculación de fino corresponde al flujo de alimentación de un hidrociclón que es recirculado hacia la alimentación del molino de barras de cada sección.

## Análisis de desviación de $P_{80}$ en etapa de clasificación en planta de molienda

En la Figura 4.3 se pueden observar las baterías en planta, a la izquierda la batería 4 modelo Eral 400 y a la izquierda la batería 2 modelo Cavex 400.



Figura 4.3: Baterías hidrociclones en planta concentradora, izquierda modelo Eral400 y derecha Cavex400.

La mantención de las baterías se realiza mediante programación previa semanal, al momento de la mantención se mide apex y vortex evaluando si se encuentra dentro de la tolerancia admitida, generalmente máximo de 10 [mm], si está es mayor al máximo se realiza cambio de la pieza o hidrociclón completo.

### 4.2 Análisis estadístico del problema planteado

Se realiza un análisis del comportamiento del producto de las plantas de molienda durante el 2017 a 2018 para poder demostrar el problema planteado y encontrar dónde se centra.

Mediante el informe mensual RespMet se obtienen los datos de  $P_{80}$  para las plantas SAG+UN2, SA+UN1 y SB+SC, y a través de este se genera la gráfica mostrada en la Figura 4.4. En la gráfica mencionada se gráfica el  $P_{80}$  en función de cada mes desde el 2017 al 2018, junto con el estándar operacional para cada una de estas. Se tiene como estándar operacional para las plantas SAG+UN2 un  $P_{80}$  de 210 [ $\mu\text{m}$ ], mientras que para las plantas SA+UN1 y SB+SC un  $P_{80}$  de 240 [ $\mu\text{m}$ ].

## Análisis de desviación de $P_{80}$ en etapa de clasificación en planta de molienda

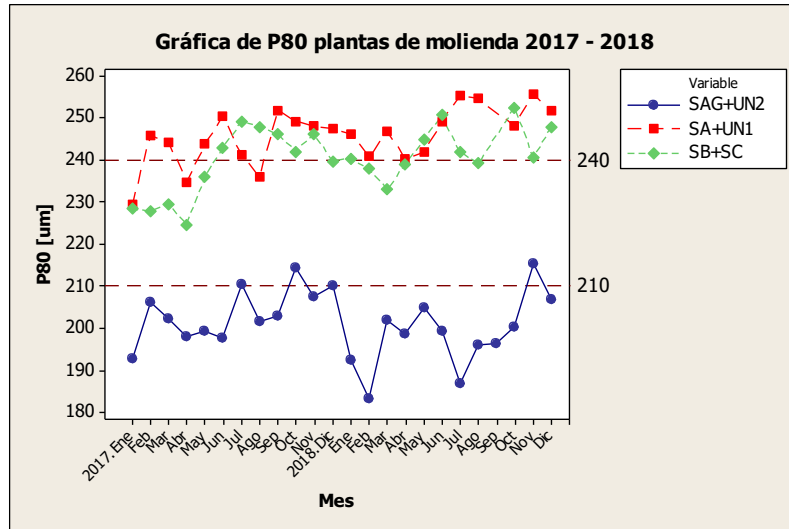


Figura 4.4: Gráfica producto plantas de molienda 2017-2018.

De la gráfica de la Figura 4.4 se puede ver que el problema se centra en las secciones SA+UN1 y SB+SC, ya que se tiene un  $P_{80}$  sobre el estándar en forma constante desde julio del 2017 en adelante para las secciones SA+UN1 y desde mayo del 2018 en las secciones SB+SC.

Luego, se realiza un análisis del  $P_{80}$  centrado en la molienda convencional debido a los resultados obtenidos del análisis de las plantas de molienda en general. En la Figura 4.5 se observa la gráfica de intervalos con 95% de confianza para el  $P_{80}$  de cada sección durante el 2018, esta se realiza con los siguientes filtros:

- Tratamiento sección A, B, y C: > 400 [tph]
- Tratamiento MUNI: > 240 [tph]
- Presión baterías secciones A, B y C: 9 - 12 [psi]
- Presión batería MUNI: 10 - 13 [psi]

Los datos fueron recolectados de muestreos diarios que se realizan en el laboratorio metalúrgico, el muestreo realizado se entrega mediante %+65# Ty en el cajón del overflow de cada batería, junto con el porcentaje de sólido.

## Análisis de desviación de $P_{80}$ en etapa de clasificación en planta de molienda

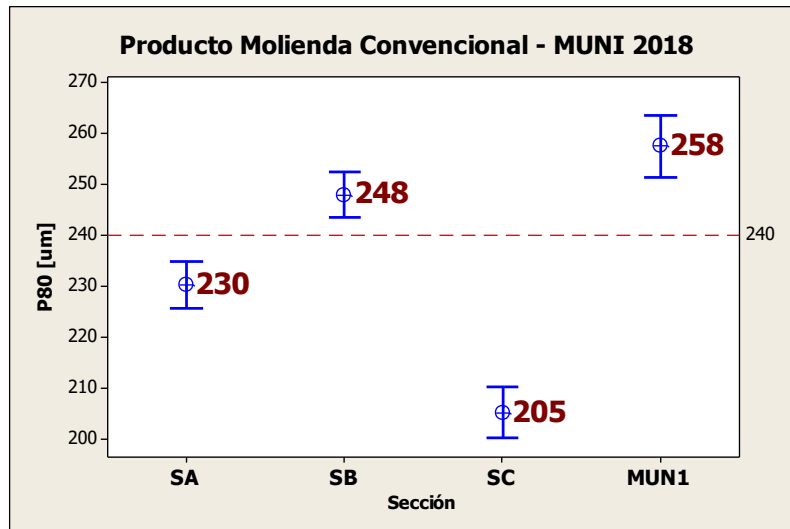


Figura 4.5: Gráfica de intervalos para producto planta de molienda convencional y MUNI 2018.

De acuerdo con la gráfica, el  $P_{80}$  que sobrepasa el estándar operacional corresponde a la sección B y MUNI con una media de 248 y 258 [µm], respectivamente.

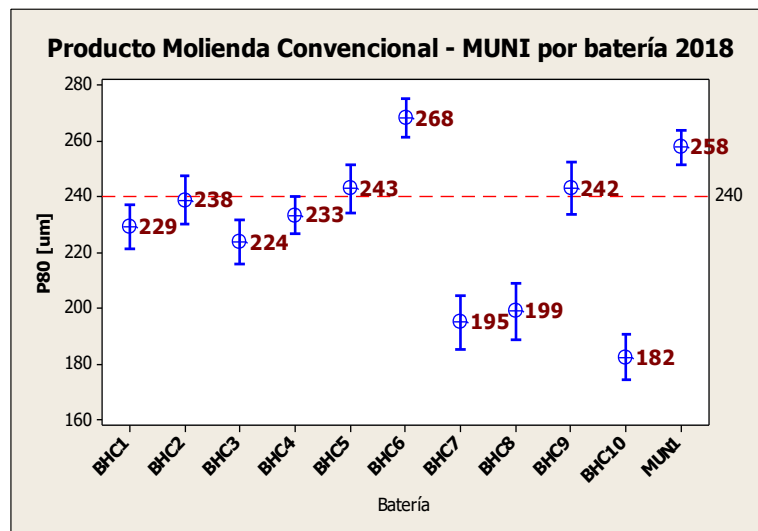


Figura 4.6: Gráfica de producto por batería en planta molienda convencional y MUNI 2018.

Para determinar exactamente cuáles son los molinos y baterías que entregan un producto mayor al esperado se realiza la gráfica de la Figura 4.6. Se puede apreciar que los mayores  $P_{80}$  corresponden a la BHC6, BHC5 y MUNI con una media de 268, 243 y 258 [µm] respectivamente.

## Análisis de desviación de $P_{80}$ en etapa de clasificación en planta de molienda

Debido al análisis presentado del comportamiento del producto durante el último tiempo es que se debe priorizar el problema en la sección B de la molienda convencional y en la molienda unitaria I.

### 4.3 Árbol de hipótesis

El problema planteado es la desviación en el producto de la molienda convencional por sobre el estándar operacional, a partir de esto se deben buscar las posibles causales del aumento en el  $P_{80}$  dentro de una planta de molienda y clasificación. A partir de esta problemática se genera un árbol de hipótesis con las distintas probables causas, ver Figura 4.7.

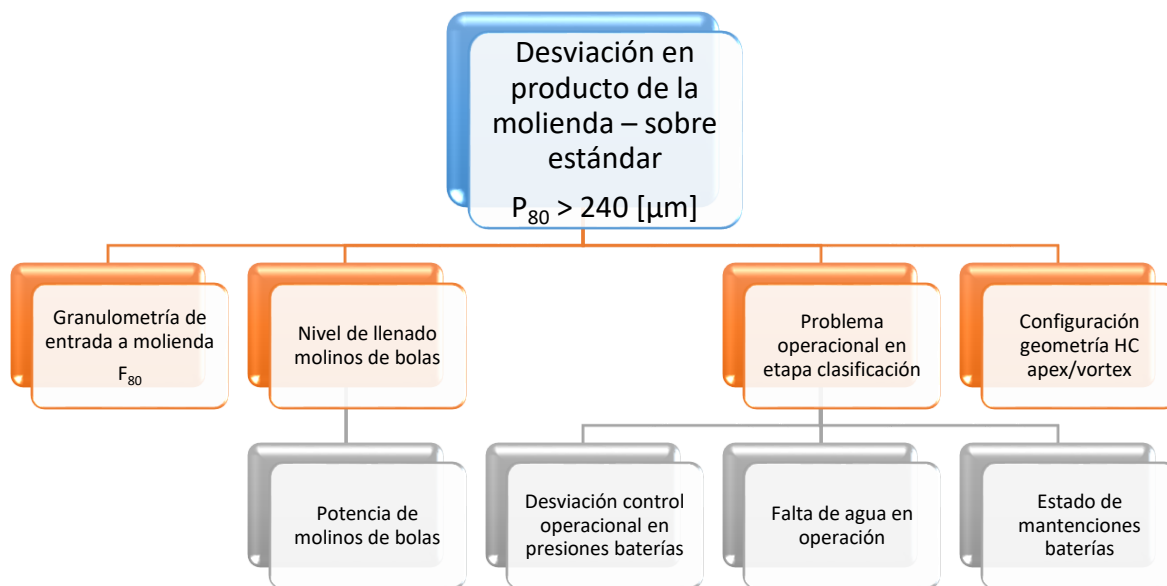


Figura 4.7: Árbol de hipótesis

### 4.4 Análisis estadístico y estudio de probables causas

A partir del árbol de hipótesis se debe realizar un análisis de las probables causales para poder determinar cuáles de estas son candidatas para explicar el problema de la desviación del  $P_{80}$ . A continuación, se detalla un estudio a nivel de planta de cada causal planteada.

#### 4.4.1 Granulometría de entrada $F_{80}$

La molienda convencional y molienda unitaria I se alimentan de la planta de chancado 3°4°, por lo que ambas procesan mineral de la mina subterránea. Cada

## Análisis de desviación de $P_{80}$ en etapa de clasificación en planta de molienda

sección cuenta con correas y una tolva de mineral, siendo teóricamente el mismo mineral con similar granulometría el que ingresa a los molinos de barra y MUNI.

La correa 10A alimenta al molino de barras 1, la correa 10B alimenta al molino de barras 2 y la correa 10C alimenta al molino de barras 3, mientras que la correa 10F alimenta a MUNI. El diagrama de flujo de la alimentación a los molinos se puede ver en la Figura 4.8.

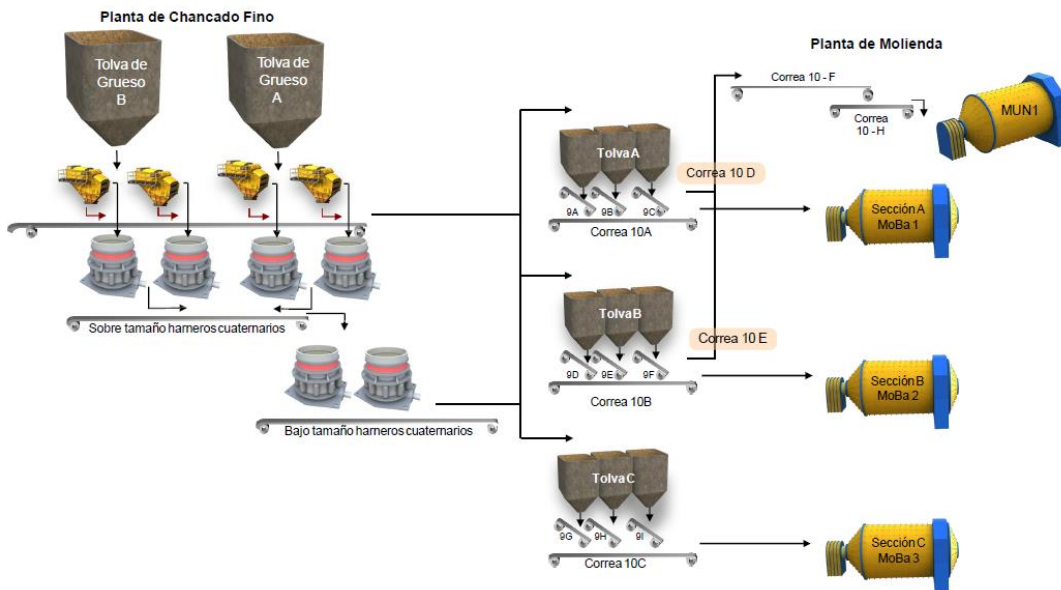


Figura 4.8: Diagrama de flujo planta chancado fino y planta de molienda, Codelco División Andina.

Mediante un set de muestreos de correas transportadoras desde el año 2017 a la fecha es posible generar los perfiles granulométricos de la alimentación a las plantas de molienda. En las Figuras 4.9 y 4.10 se pueden observar los perfiles granulométricos de las correas 10A y 10B.

## Análisis de desviación de $P_{80}$ en etapa de clasificación en planta de molienda

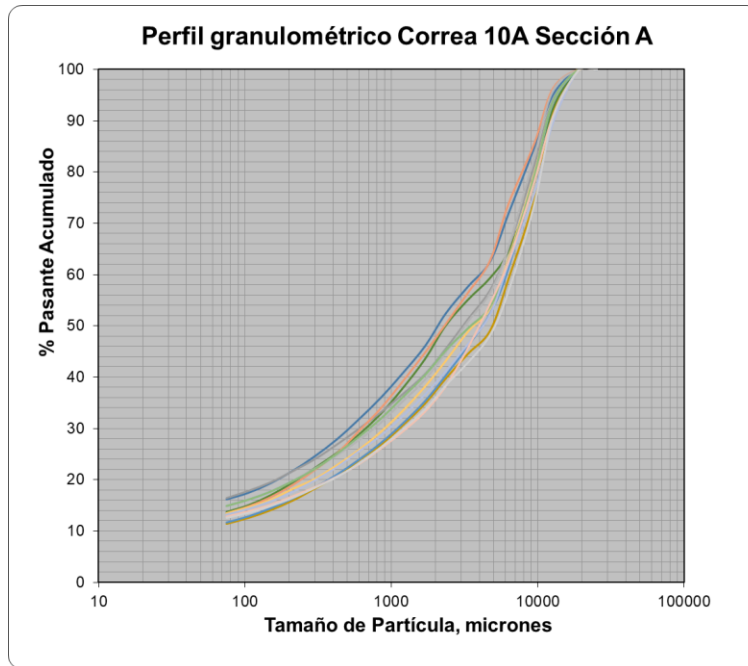


Figura 4.9: Perfil granulométrico correa 10A.

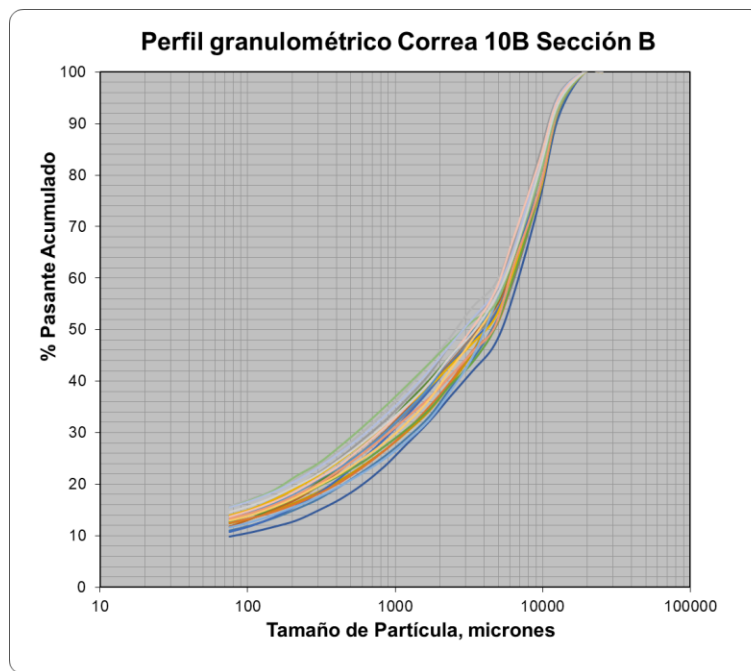


Figura 4.10: Perfil granulométrico correa 10B.

En la Tabla 4.2 se muestran los valores mínimos y máximos de granulometría bajo malla 200#, sobre malla 1/2" # y  $F_{80}$  para cada correa, junto con la media de estos. Al observar la media del producto de alimentación a las correas, este se encuentra

## Análisis de desviación de $P_{80}$ en etapa de clasificación en planta de molienda

entre los 9.000 a 10.000 [ $\mu\text{m}$ ], lo cual no significa una mayor diferencia entre ellas. La diferencia se puede explicar por segregación entre las tolvas A, B y C.

Para la malla -200# se espera que esta se encuentre con mínimo de 12% mientras que la malla +1/2"# un máximo de 5%; se puede ver que las correas 10A y 10B se encuentran con valores medios cercanos a estos, sin embargo, la correa 10C tiene una media de 9,3% +1/2"# siendo levemente mayor a la esperada.

Tabla 4.2: Análisis granulometría correa 10A, 10B y 10C.

	Correa 10A			Correa 10B			Correa 10C		
	% # -200	% # +1/2	$F_{80}$ [ $\mu\text{m}$ ]	% # -200	% # +1/2	$F_{80}$ [ $\mu\text{m}$ ]	% # -200	% # +1/2	$F_{80}$ [ $\mu\text{m}$ ]
<b>Mín.</b>	11,5	3,7	7890	9,9	4,6	8732	8,6	5,4	9043
<b>Máx.</b>	16,5	10,5	10661	15,7	8,9	10468	18,5	18,0	12410
<b>Media</b>	13,8	6,6	9496	13,1	6,5	9588	16,6	9,3	10293

Como el problema se enfoca en la sección B y MUN1, los valores de la correa 10C correspondiente a la sección C no tiene mayor influencia. Por lo tanto, se puede decir la granulometría de alimentación a la molienda no es una variable influyente en el problema planteado, encontrándose dentro de valores normales de la planta.

### 4.4.2 Nivel de llenado de molinos de bolas

El nivel de llenado de un molino influye en el tamaño del producto final de tal forma que a mayor nivel el molino se va a encontrar sobrecargado mientras que con un bajo nivel no se va a producir un impacto entre bolas y mineral, obteniéndose en ambos casos un producto final de mayor tamaño; es por esto que se debe trabajar con un rango de nivel de llenado que maximice la molienda del mineral. Los estándares operacionales de la planta para el nivel de llenado de los molinos corresponden a:

- Molino de bolas sección B: 40%
- Molino unitario I: 28 – 30%

## Análisis de desviación de $P_{80}$ en etapa de clasificación en planta de molienda

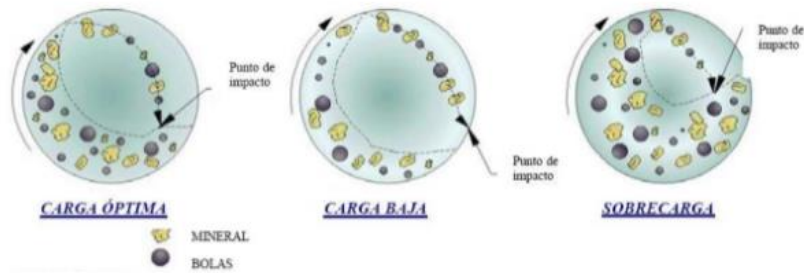


Figura 4.11: tipos de nivel de carga en molino de bolas.

Se realiza una recopilación de mediciones de nivel de llenado para los molinos de bolas 4, 5, y 6 de la sección B y MUNI con el fin de observar el comportamiento de este durante el último tiempo. Dichas mediciones son tomadas al momento de detenciones de los molinos, por lo que la cantidad de datos es limitada.

En la Figura 4.12 se grafica el nivel de llenado de los molinos de la sección B desde el 2017 a la fecha; observándose que estos se encuentran con una media de 40,4% y una desviación estándar de 2,3%, siendo un rango aceptable para la planta considerando la variación que puede tener esta. En la Figura 4.13 se grafica el nivel de llenado del MUNI desde junio del 2017 a la fecha, donde los datos se encuentran entre el 28 a 32% con una media de 30,4% y una desviación de 1,7%. Por lo tanto, se considera que el nivel de llenado se encuentra dentro o cercano al rango permitido como estándar sin mayores variaciones.

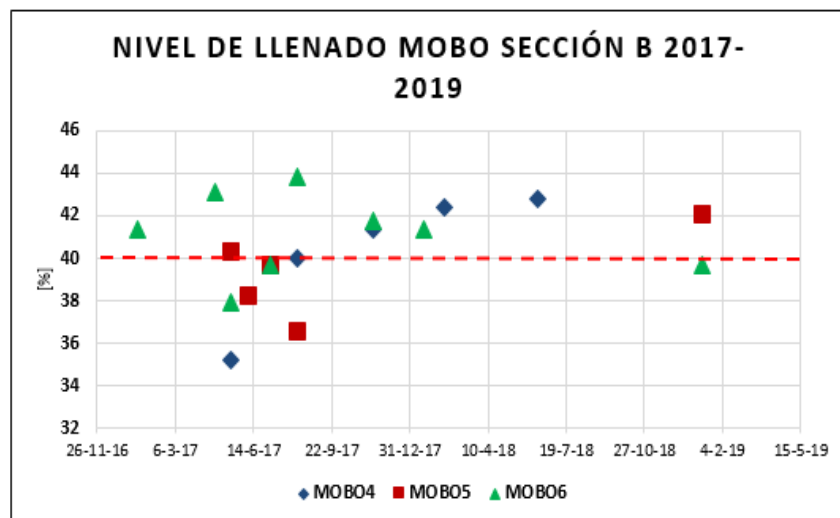


Figura 4.12: Gráfica de nivel de llenado molinos de bolas sección B planta concentradora.

## Análisis de desviación de $P_{80}$ en etapa de clasificación en planta de molienda

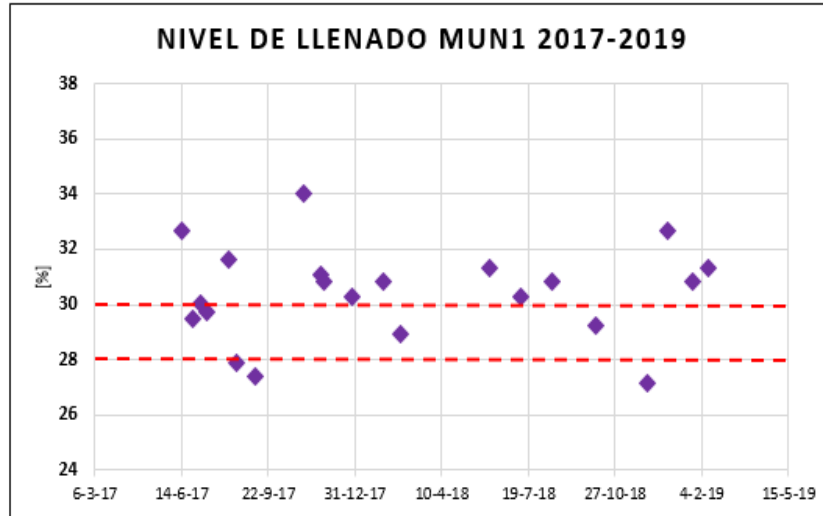


Figura 4.13: Gráfica nivel de llenado MUNI planta concentradora.

Otra forma de ver si el nivel de llenado de un molino se está operando dentro del rango óptimo es mediante la potencia de este, el nivel de llenado se relaciona con el flujo de alimentación al molino y la carga de acero de este. A medida que el flujo de alimentación aumenta por sobre el estándar, se produce una sobrecarga en el molino y la potencia comienza a disminuir, reduciendo la acción de la molienda. Para esto, se grafican las potencias [kW] de los molinos de bolas 4, 5 y 6, y MUNI durante el 2018 en condiciones normales de operación (filtros en el tratamiento y presión de las baterías de hidrociclones en base a estándares operacionales).

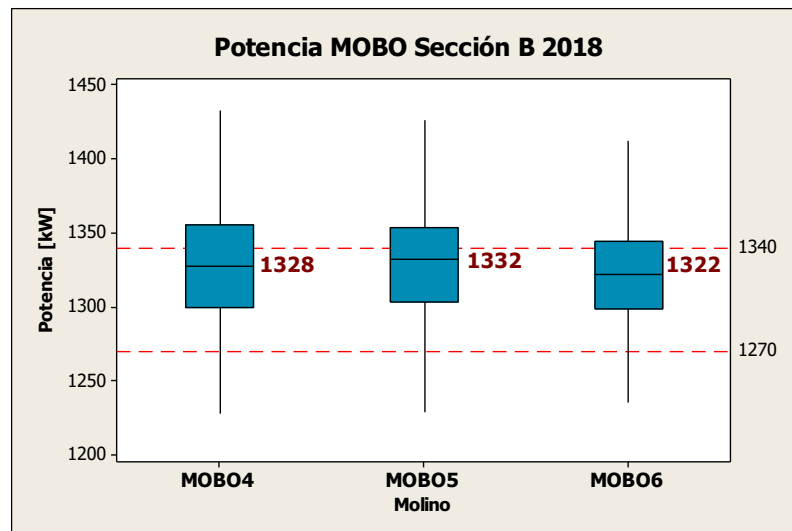


Figura 4.14: Gráfica de caja potencia molinos de bolas sección B 2018.

## Análisis de desviación de $P_{80}$ en etapa de clasificación en planta de molienda

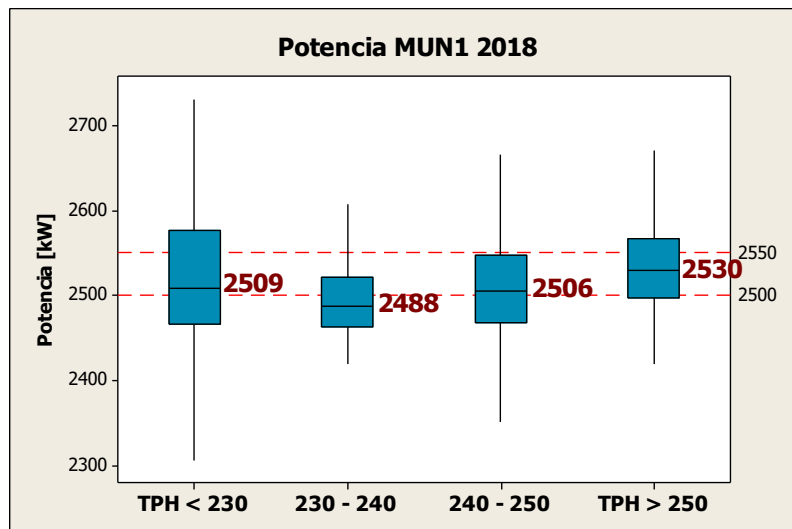


Figura 4.15: Gráfica de caja potencia MUNI 2018.

En las Figura 4.14 se puede ver la gráfica de caja para la potencia de los molinos de la sección B, donde se define el estándar operacional entre 1270 y 1340 [kW]. Se puede decir que el comportamiento de la potencia para esta sección se encuentra dentro del estándar con una media de 1328, 1332 y 1322 [kW] para los molinos de bolas 4, 5 y 6, respectivamente. En la Figura 4.15 se observa la gráfica de cajas para la potencia del MUNI en función de rangos de tratamiento, esta se mantiene dentro del estándar a tratamientos mayores a 240 [tph], lo cual corresponde al tratamiento mínimo de trabajo del molino.

De acuerdo con este análisis, se puede decir que mientras se trabaje con un molino operando a un tratamiento dado la potencia se encuentra dentro del estándar operacional.

### 4.4.3 Problema operacional en etapa de clasificación

La etapa de clasificación se efectúa mediante baterías de hidrociclones para cada molino de bolas en circuito cerrado inverso, la operación de estos la realiza el operador desde la sala de control, dónde se tiene como variable operacional la presión de la batería y el flujo alimentado a esta.

En la planta concentradora la SIPP recomienda parámetros y estándares operacionales de trabajo para la planta de molienda convencional, para la sección

## Análisis de desviación de P<sub>80</sub> en etapa de clasificación en planta de molienda

B estas se definen en la Tabla 4.3, en Anexos 8.1 se encuentra la Figura 8.1 con los estándares de la molienda convencional completa.

Tabla 4.3: Estándares operaciones Sección B planta concentradora.

SECCIÓN B							
MOBA2	Potencia trabajo mín.		Nivel llenado barras		% Sólidos MoBa	Geometría HC	
	[kwh]		[%]		[%]	[mm]	
	700 – 800		35		81	<b>Apex:</b> 93 – 103	<b>Vortex:</b> 117 – 127
	Potencia trabajo mín.	Rango potencia trabajo	Nivel llenado bolas	Presión batería cy	% Sólido rebalse cy	Granulometría producto %+65#	Potencia en vacío
	[kwh]		[%]	[psi]	[%]	[%]	[kw]
MOBO4	1270	1270 - 1340	40	9 – 12	38 – 42	< 23	1420
MOBO5							
MOBO6							

Como se observa en la Tabla 4.3 la presión de las baterías de hidrociclones debiese encontrarse entre los 9 y 12 [psi], para poder conocer si se está cumpliendo con el rango de operación y no resulta ser una variable que afecta al tamaño del producto final se realiza una recopilación de data de presiones durante el 2018. Esta data es filtrada para tratamientos de molino de bolas sobre los 400 [tph] y se genera una gráfica de cajas para cada batería se la sección B, ver Figura 4.16. Se puede ver en dicha gráfica que la operación de las baterías en función de la presión se encuentra dentro del estándar operacional.

Análisis de desviación de P<sub>80</sub> en etapa de clasificación en planta de molienda

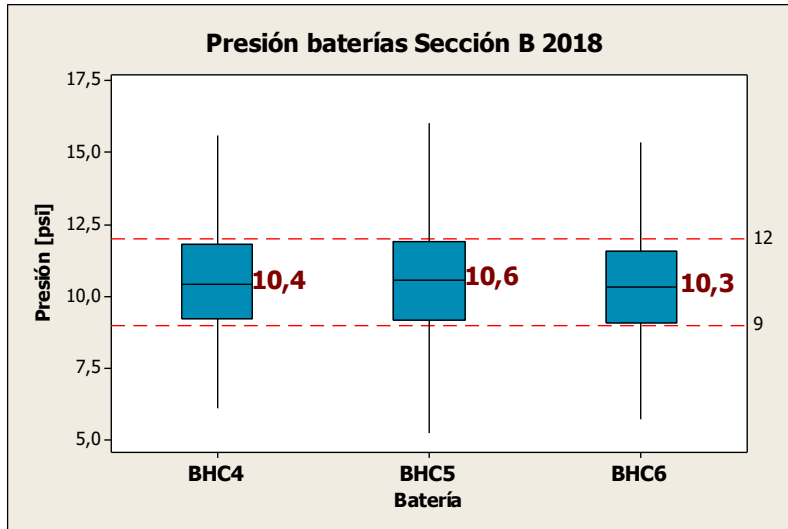


Figura 4.16: Gráfica de caja presión de baterías sección B 2018.

Los estándares operacionales definidos por la SIPP para la molienda unitaria I se muestran en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4: Estándares operacionales MUNI planta concentradora.

MOLINO UNITARIO 1			
MUI	Potencia de trabajo	Nivel de llenado bolas	Potencia en vacío
	[kwh]	[%]	[kw]
	<b>2450 – 2550</b>	<b>28 – 30</b>	<b>2700</b>
	Presión batería cy	% Sólido rebalse batería	Granulometría producto % +65#
	<b>10 – 13</b>	<b>38 – 42</b>	<b>&lt; 24</b>

La presión de la batería del MUNI debe operar en un rango entre 10 a 13 [psi], graficando la data recopilada durante el 2018 de la batería y aplicando rangos de tratamiento para el molino se obtiene el gráfico de cajas de la Figura 4.17. Se puede observar que para todos los casos la operación de la presión se encuentra por debajo del límite del estándar operacional con medias menores a los 10 [psi], esto puede deberse a que existe un problema en la definición del estándar o que la operación de la batería se está realizando con una cantidad de hidrociclones abiertos mayor a la que se debiese operar.

## Análisis de desviación de P<sub>80</sub> en etapa de clasificación en planta de molienda

En dicha batería actualmente se opera con 7 hidrociclones abiertos y 3 stand by, por lo que al cerrar hidrociclones la presión va a aumentar o bien, se puede operar con distinto porcentaje de abertura de la bomba que impulsa el flujo a los hidrociclones y de igual manera la presión se va a modificar.

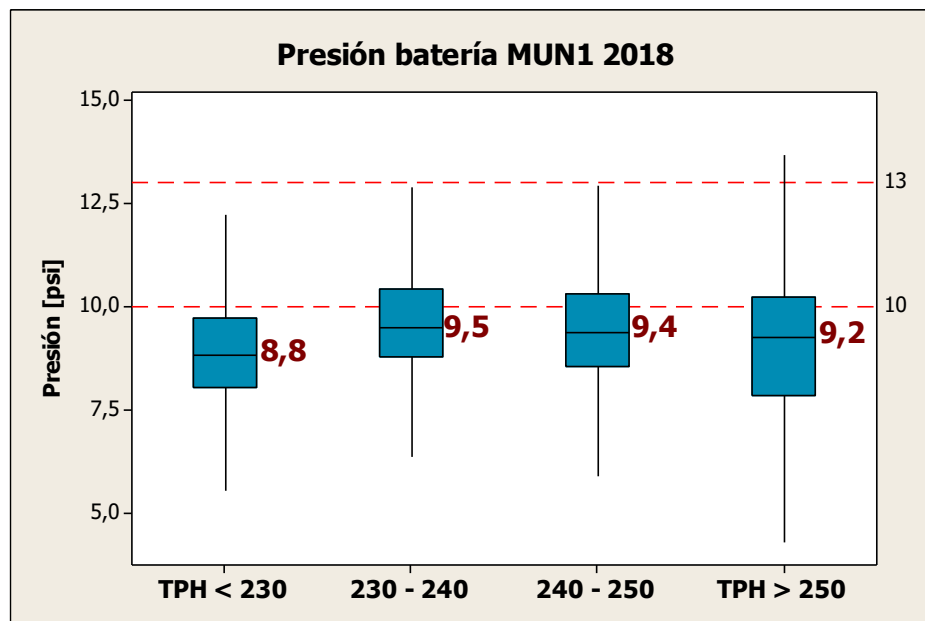


Figura 4.17: Gráfica de caja presión batería MUNI 2018.

La presión de trabajo y la capacidad de un hidrociclón se definen bajo la curva de capacidad, al operar con cierto flujo volumétrico en la batería se define el rango de operación para la presión en base a la curva entregada por el proveedor. Es por esto que, un aumento en la presión de la batería significaría un corte de tamaño distinto, por lo que puede existir la posibilidad de una desviación en el control operacional en la presión de la batería siendo una posible causa del problema de P<sub>80</sub> en el MUNI.

Por otra parte, se realiza un análisis a la relación entre el porcentaje de sólido del hidrociclón y la granulometría del producto de la batería en función del porcentaje de +65#.

El método utilizado en la planta para caracterizar la granulometría del producto de la molienda es mediante muestreo en el rebalse de la batería, a la muestra recolectada se le realiza un mallaje rápido para medir el % +65#Ty y el porcentaje

## Análisis de desviación de $P_{80}$ en etapa de clasificación en planta de molienda

de sólido de dicha muestra. Como se observa en las Tablas 4.4 y 4.3 existe un rango aceptable para el % de sólido en el rebalse de las baterías (overflow) el cuál debe encontrarse entre los 38 y 42%, según parámetros revisados por la SIPP. Mientras que para la granulometría del producto este no debe sobrepasar un 23% en % $+65\#$ . De acuerdo con una relación encontrada previamente por la SIPP se establece que un 23% de  $+65\#$  equivale a 242 [ $\mu\text{m}$ ].

Con esta información se realizan gráficas poder observar el comportamiento actual del rebalse del hidrociclón, y para comprobar la relación que existe entre el porcentaje de sólido y el tamaño del producto que se obtiene del rebalse.

La data utilizada es recopilada mediante los muestreos diarios al rebalse de cada batería durante 4 a 5 meses, donde se especifica el tratamiento de la sección, la presión de operación de la batería, el porcentaje de sólido y el % $+65\#$  del rebalse. Los filtros utilizados son un tratamiento mayor a 400 [tph] y una presión de operación dentro del estándar operacional; con la data filtrada se gráfica el % $+65\#$  en función del porcentaje de sólido para cada batería analizada. Luego, al observar los gráficos de la Figura 4.18 y 4.19 se busca el coeficiente de correlación de Pearson entre las variables, con el fin de comprobar el grado de relación entre ellas, ver Tabla 4.5.

En la Figura 4.18 se muestran las gráficas de las variables mencionadas para las baterías BHC4, BHC5 y BHC6 de la sección B, es posible observar que existe una dependencia entre ellas con un coeficiente de Pearson de 0,74, 0,79 y 0,71 respectivamente. Con el coeficiente obtenido se realiza una regresión lineal para cada gráfica, con dicha regresión es posible determinar el porcentaje de sólido máximo para un 23% de  $+65\#$ ; este porcentaje de sólido representa un aproximado del máximo con el cuál debiese operar cada batería en su rebalse, al ser un aproximado y sabiendo que pueden existir errores de muestreo se puede decir que el máximo corresponde a un 40% en la sección B.

Observando los gráficos se puede apreciar que gran parte de los datos se encuentran con un porcentaje de sólido por sobre los 40%, siendo más de la mitad para el caso de la batería 6, lo que resulta en una granulometría de producto

## Análisis de desviación de $P_{80}$ en etapa de clasificación en planta de molienda

mayor a la esperada. Esto evidencia que existe un problema operacional en las baterías de la sección B, ya sea por falta de agua en la sección B para la adición en la cuba de alimentación o bien, falta de agua por parte de la operación en los hidrociclones.

Es necesario mencionar que el porcentaje de sólido en el rebalse de la batería es una consecuencia de la operación en la alimentación del hidrociclón, una forma de manejar operacionalmente esta variable es mediante el flujo de agua a la cuba de alimentación a la batería. El porcentaje de sólido de alimentación en un hidrociclón debiese ser el máximo hasta antes que se acordone para obtener un mejor resultado, sin embargo, trabajar en este punto resulta peligroso; según el proveedor FLSmith para sus hidrociclones este porcentaje corresponde a un 75%.

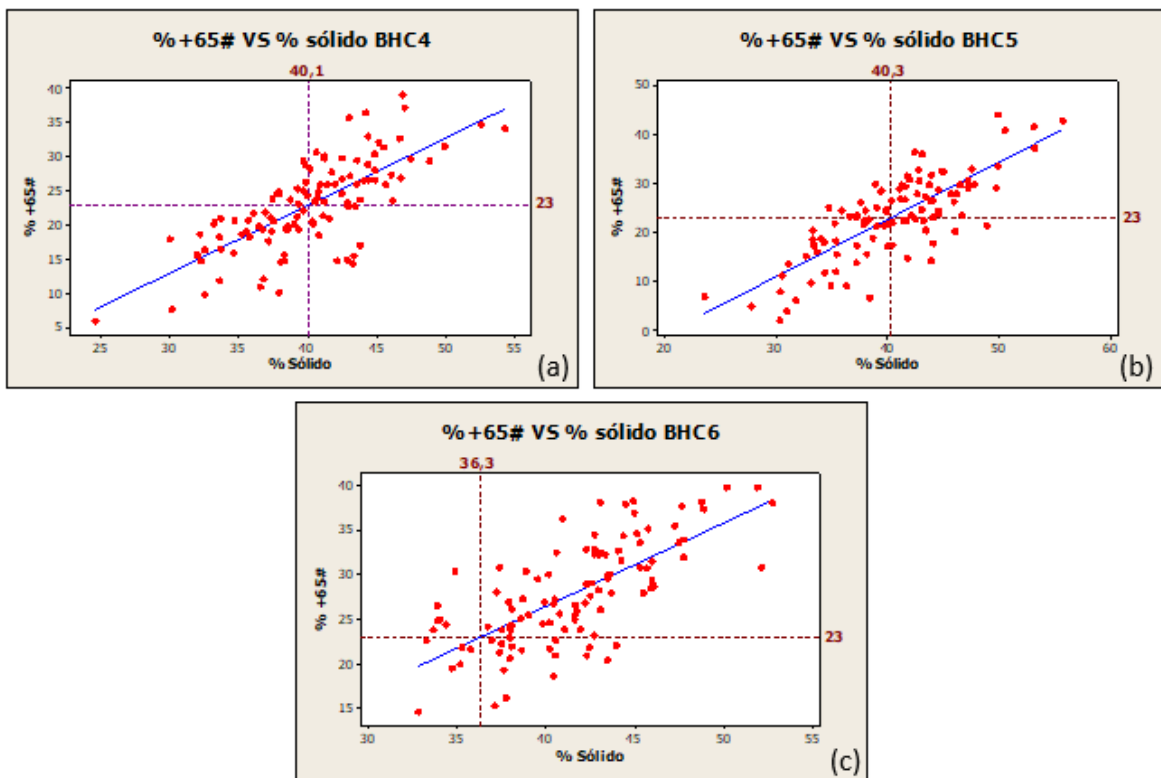


Figura 4.18: Gráficas % +65# en función de % sólido para BHC4, BHC5, y BHC6.

En cuanto al MUNI, la gráfica de relación entre variables se muestra en la Figura 4.19; se puede observar que la relación resulta ser menor al tener un coeficiente

## Análisis de desviación de P<sub>80</sub> en etapa de clasificación en planta de molienda

de correlación de Pearson de 0,65. Es por esto, que no se puede establecer certeramente que existe un problema en la falta de agua u operación de esta en la batería.

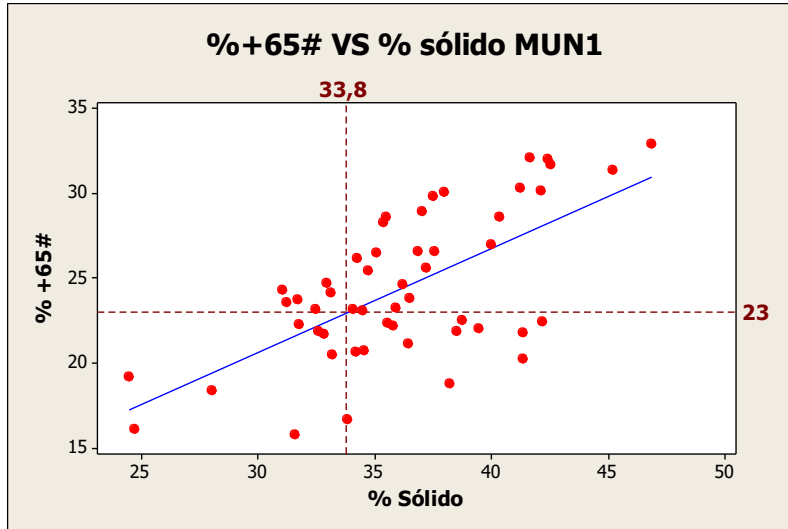


Figura 4.19: Gráfica %+65# en función de %sólido para MUNI.

Tabla 4.5: Coeficiente de correlación de Pearson para baterías sección B y MUNI.

Batería	Correlación de Pearson	N° de datos
<b>BHC4</b>	0,74	110
<b>BHC5</b>	0,79	109
<b>BHC6</b>	0,71	105
<b>MUNI</b>	0,65	90

Finalmente, la última variable operacional en la etapa de clasificación es el estado en las mantenciones de las baterías. Como ya se especificó previamente, los modelos de hidrociclones varían según la sección donde se encuentren; para la sección A, C y MUNI se tienen hidrociclones Vulco modelo Cavex 400, mientras que en la sección B se tienen hidrociclones Eral 400.

Las mantenciones en las baterías consisten en revisar ciclón por ciclón registrando la medida en [mm] del apex y vortex, si estas se encuentran en su máxima tolerancia o pasadas se debe cambiar el componente o el hidrociclón completo. La

## Análisis de desviación de $P_{80}$ en etapa de clasificación en planta de molienda

tolerancia se encuentra ya definida para cada batería, esta se puede observar en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6: Tolerancia permitida para apex y vortex baterías molienda convencional y MUNI.

Batería	Apex [mm]		Vortex [mm]	
	Inicial	Final	Inicial	Final
<b>MOBO1</b>	90	120	100	130
<b>MOBO2</b>	90	120	100	130
<b>MOBO3</b>	90	120	100	130
<b>MOBO4</b>	93	117	103	127
<b>MOBO5</b>	93	117	103	127
<b>MOBO6</b>	93	117	103	127
<b>MOBO7</b>	90	130	100	140
<b>MOBO8</b>	90	130	100	140
<b>MOBO9</b>	90	130	100	140
<b>MOBO10</b>	90	130	100	140
<b>MUN1</b>	90	130	100	140

Los encargados de las mantenciones registran en una planilla las fechas de revisión de la batería, las medidas de apex y vortex, y los cambios de componentes que se realizaron; en base a esta planilla del 2018 se realiza una estimación de duración de los componentes y el tiempo entre mantenciones para cada sección de la molienda convencional y MUNI.

Tabla 4.7: Duración componentes hidrociclones molienda convencional y MUNI.

Sección	Componente	Duración [mes]
<b>Sección A – Vulco</b>	Apex	7
	Vortex	6
	Fondo Plano	-
<b>Sección B – Eral</b>	Apex	1,5
	Vortex	2,8
	Fondo Plano	1,6
<b>Sección C + MUNI</b>	Apex	2

## Análisis de desviación de $P_{80}$ en etapa de clasificación en planta de molienda

-	Vortex	4
<b>Vulco</b>	Fondo Plano	-

Al observar la Tabla 4.7 de duración de los componentes el problema estructural se encuentra en la baja duración del fondo plano en los hidrociclones Eral 400 de la sección B, estos se desprenden cada 1,6 a 2 meses lo que implica un aumento en la cantidad de mantenciones de estas baterías; en cambio, en la sección A, C y MUNI no se evidencia este problema de desprendimiento. El aumento de mantenciones significa mayor cantidad de detenciones en los equipos, mayores recursos en horas hombre, y un aumento en la cantidad de piezas al año; por otra parte, al tener una menor duración en el fondo plano es necesario disponer en mayor cantidad de esta pieza y al no contar con esta se debe seguir operando por lo que la clasificación del hidrociclón se ve afectada.

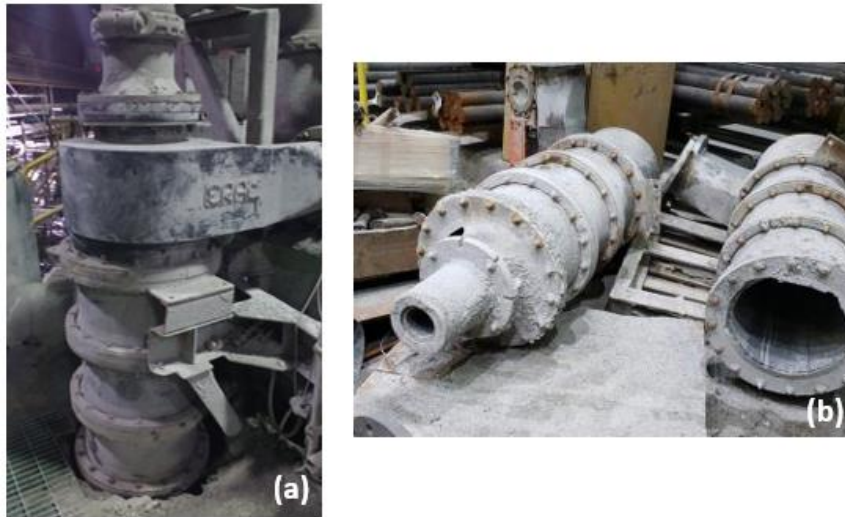


Figura 4.20: Hidrociclones Eral 400, figura (a) hidrociclón en funcionamiento, figura (b) hidrociclón sin fondo plano.

En la Figura 4.20 se muestran hidrociclones Eral 400 de la sección B, en la imagen (a) se puede ver el hidrociclón instalado y en la imagen (b) se puede ver la comparación de un hidrociclón con y sin el fondo plano.

Finalmente, se debe mencionar que la mantención de las baterías no cumple con el estándar debido a que existen 18 baterías en la planta y una cantidad de

## Análisis de desviación de $P_{80}$ en etapa de clasificación en planta de molienda

personal limitado (una cuadrilla de 4 personas con 4 días laborales a la semana), por otro lado, la calidad de los hidrociclones Eral se ha visto disminuida debido a los desprendimientos.

### 4.4.4 Configuración apex/vortex

El tamaño del producto en la molienda convencional y MUNI debe ser igual o menor a 240 [ $\mu\text{m}$ ], este tamaño está determinado en su parte por el diseño del equipo de clasificación en la molienda. Sin embargo, es posible ver que el diseño de cada batería difiere de acuerdo con la sección donde se encuentre. Existe una variación en el modelo y en la configuración apex/vortex entre las secciones A, B, C y MUNI, como se observa en la Tabla 4.1.

Para poder determinar si la configuración es una variable que podría causar una desviación en el tamaño del producto se debe comparar el  $P_{80}$  de las distintas baterías; en la Figura 4.6 se muestra el comportamiento del  $P_{80}$  para cada batería, dónde se observa que la BHC4 se encuentra con un producto dentro del estándar operacional a diferencia de la BHC6 que no cumple con dicho estándar, estas dos baterías cuentan con el mismo diseño y configuración de apex/vortex por lo que se descarta como posible causa al problema en la sección B.

Por otro lado, para la MUNI no es posible realizar una comparación en base al diseño con otra sección debido a que las condiciones operacionales son distintas, ya sea en tratamiento procesado, flujo de alimentación a la batería y presión en la batería, por lo que la variable de relación apex/vortex no se puede descartar como posible causa al problema planteado.

Dentro de los hitos de la planta de encuentra,

- Sección A y MUNI: noviembre de 2015 se instala hidrociclones con apex 90 [mm] y vortex 130 [mm].
- Sección A: noviembre de 2016 se cambia vortex 130 a 120 [mm].

En Anexos 8.2 Planos hidrociclones, se adjuntan los planos de diseño actuales de cada modelo de hidrociclones en la planta de molienda convencional y MUNI.

#### 4.5 Plan de trabajo

Con el árbol de hipótesis planteado y el análisis estadístico realizado para cada posible causa al problema es posible definir un plan de trabajo que considere propuestas de cambios para las posibles causas. En la Figura 4.21 se muestra un resumen del resultado de dicho análisis con las causas encontradas.

En base al análisis obtenido el plan de trabajo se enfoca en la etapa de clasificación de la molienda, específicamente en las secciones con mayor desviación del  $P_{80}$  en base al estándar operacional, estas son la BHC6, BHC5 y MUNI con  $P_{80}$  de 268, 243 y 258 [ $\mu\text{m}$ ] respectivamente.

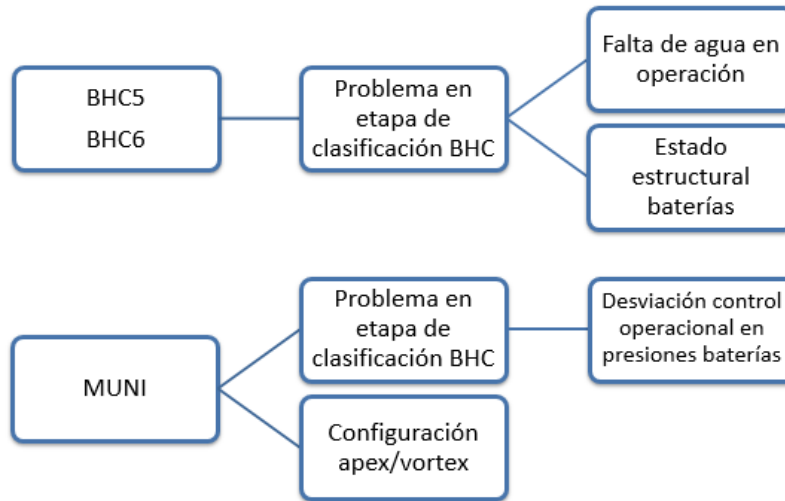


Figura 4.21: Diagrama resumen de posibles causas al problema planteado.

A continuación, se detallan las propuestas para cada batería de hidrociclones.

##### 4.5.1 Sección B: Batería Hidrociclones 6 BHC6 y Batería Hidrociclones 5 BHC5

Se evidencia un problema en la etapa de clasificación debido a falta de agua en la operación de la batería y un problema en el estado estructural de los hidrociclones que disminuye la duración de estos y aumenta la cantidad de mantenciones.

El plan de trabajo considera,

- Falta de agua en operación
  1. Revisión del estándar operacional: en base al análisis de correlación de variables en el rebalse del hidrociclón se debe realizar una revisión del estándar operacional definido por la SIPP para el porcentaje de sólido, con el fin de redefinir los límites del estándar para no sobrepasar el 23% de +65#.
  2. Pruebas bajo condiciones estándar: con la revisión del estándar operacional y establecido los nuevos límites de porcentaje de sólido en el rebalse de la batería establecer un set de pruebas con la adición de agua a la cuba en base al estándar operacional propuesto, y evaluar en función del tamaño del producto.
- Estado estructural batería
  1. Realizar un protocolo de prueba con hidrociclones FLSmith: “Protocolo de prueba para evaluación de hidrociclones gMAX15 para batería Molino de bolas 6 en Planta Molienda Convencional”, se requiere probar un tipo de revestimiento distinto al actual mediante la instalación de revestimientos “Heavy Duty” con el objetivo de validar la duración de un mínimo de 6 meses sin mantenciones.
  2. Realizar un protocolo de prueba con hidrociclones Vulco: “Protocolo de prueba para evaluación de hidrociclones fondo plano Cavex para batería Molino de Bolas 5 en Planta Molienda Convencional”, se propone realizar una prueba con sus hidrociclones y un nuevo tipo de revestimiento distintos a los usados actualmente en las baterías de las secciones A y C, estos hidrociclones corresponden a los Cavex 400 CVXFB con un nuevo revestimiento mejorado de material cerámico. Los objetivos de la prueba son validar la duración de 8.000 horas de estos durante su operación sin mantenciones ni intervenciones y asegurar un producto de la batería BHC5 igual o menor a los 240  $[\mu\text{m}]$ . La evaluación se debe realizar cada 2 a 3

## Análisis de desviación de $P_{80}$ en etapa de clasificación en planta de molienda

semanas con mediciones de desgaste de apex y vortex durante la duración de la prueba y proyectando la tasa de desgaste a 6 meses.

### 4.5.2 Molino Unitario I MUNI

El problema se encuentra en la etapa de clasificación con una desviación en la operación de la presión de la batería y en la configuración actual de apex/vortex.

El plan de trabajo considera,

- Configuración apex/vortex
  1. Modificación vortex 130 a 120 [mm]: al momento de mantenciones realizar cambios en forma progresiva de vortex 130 [mm] a vortex de 120 [mm] en la batería; se debe ir evaluando mediante muestreos la operación con dicho cambio. En caso de ser exitoso, completar el cambio de vortex para toda la batería.
- Desviación control operacional en presión de la batería
  1. Cambio en número de hidrociclones en operación: actualmente la operación de la batería se realiza con 7 hidrociclones abiertos y 3 en estado stand by, por lo que se propone realizar pruebas en planta para 6 y 5 hidrociclones en operación bajo las mismas condiciones de tratamiento y potencia del molino.

## 4.6 Herramientas de trabajo

### 4.6.1 Moly-Cop Tools

El programa Moly-Cop Tools es una herramienta que permite obtener simulaciones y parámetros de una planta metalúrgica. Para poder caracterizar de forma óptima los muestreos de los circuitos de la molienda y clasificación se utilizan diversas planillas. En este caso se utiliza la planilla “CycloBal\_Single: HYDROCYLONE MASS BALANCE CLOSURE” para el cálculo de la carga circulante en una batería de hidrociclones en base a muestreos con perfiles granulométricos completos de la alimentación, underflow y overflow. En la Figura 4.22 se puede ver un ejemplo de la planilla, donde las casillas en blanco se deben completar con los muestreos de perfiles granulométricos.



## CAPITULO 5. Resultados obtenidos

Los resultados que se presentan en este capítulo se basan en el trabajo realizado de acuerdo con el plan de trabajo propuesto.

### 5.1 Sección B planta de molienda convencional

#### 5.1.1 Muestreo sección B

Se define realizar un muestreo completo a la sección B con el objetivo de mostrar el comportamiento actual de las baterías de hidrociclones, observar la operación de los flujos de agua y la carga circulante. Para esto se definen los puntos de muestreo y las condiciones generales de operación.

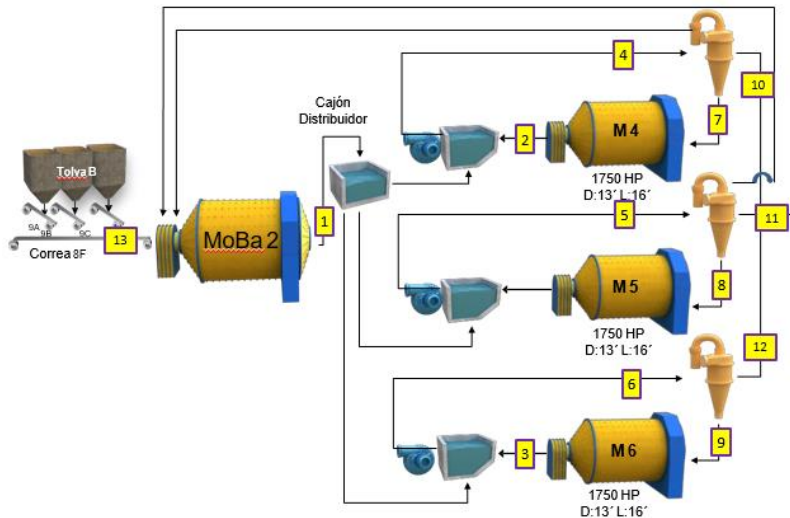


Figura 5.1: Puntos de muestreo sección B molienda convencional.

Tabla 5.1: Puntos de muestreo sección B.

Puntos de muestreo	
1	Descarga MOBA2
2 – 3	Descarga MOBO
4 – 5 – 6	Alimentación BHC
7 – 8 – 9	Underflow BHC
10 – 11 – 12	Overflow BHC
13	Alimentación MOBA2

## Análisis de desviación de $P_{80}$ en etapa de clasificación en planta de molienda

En la Figura 5.1 y Tabla 5.1 se especifican los 13 puntos del muestreo dentro de la sección realizado el día 15/01/2019. Dentro de las condiciones del muestreo se encuentran:

- Duración de 1 hora
- Cortes de muestra cada 15 minutos
- Al finalizar se muestrea la alimentación al molino de barras, correa 8B
- Condiciones estándar de operación
  - Porcentaje de sólido MOBA2: 80%
  - Porcentaje de sólido overflow: 38 – 42%
  - Presión batería: 9 – 12 [psi]
  - Hidrociclones operativos por batería: 4

Los resultados obtenidos para la correa 10B se pueden ver en la Tabla 5.2, para el molino de barras en la Tabla 5.3 y para las baterías de hidrociclones en las Tablas 5.4 y 5.5.

Tabla 5.2: Resultado muestreo sección B correa 10B.

Correa 10B	
<b>D80 [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	9204
<b>#-200</b>	15,9 %
<b>#+1/2"</b>	5,9 %

Tabla 5.3: Resultado muestreo sección B MOBA2.

Molino de barras 2	
<b>Tratamiento [tph]</b>	447
<b>Sólido [%]</b>	73,3
<b>RR80</b>	4,7
<b>F<sub>80</sub> [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	9204
<b>P<sub>80</sub> [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	1966

## Análisis de desviación de P<sub>80</sub> en etapa de clasificación en planta de molienda

Tabla 5.4: Resultado muestreo sección B batería hidrociclones.

Batería Hidrociclones			
	BHC4	BHC5	BHC6
<b>% Sólido</b>			
<b>Alimentación BHC [%]</b>	66,4	64,8	67,0
<b>Underflow [%]</b>	73,9	76,1	77,2
<b>Overflow [%]</b>	51,4	42,3	43,1
<b>F<sub>80</sub> [μm]</b>	1009	1085	1061
<b>P<sub>80</sub> [μm]</b>	321	214	260
<b>Presión [psi]</b>	11,0	11,4	7,8
<b>Abertura cuchillas [%]</b>	64	100	55
<b>Cy operando</b>	4	4	4

Tabla 5.5: Resultado muestreo sección B carga circulante y agua a cuba.

Batería Hidrociclones			
	BHC4	BHC5	BHC6
<b>CC [%] moly-cop</b>	291	359	418
<b>Agua cuba [m<sup>3</sup>/h] balance</b>	86	151,7	121,1
<b>Agua cuba [m<sup>3</sup>/h] PI</b>	99	35	183

La finalidad del muestreo es poder caracterizar la operación de la sección, debido a que los recursos utilizados en esto son limitados, ya sea tiempo, alta demanda del laboratorio metalúrgico y disposición de cortes en correas, no es posible una repetición de manera inmediata por lo que se debe realizar un análisis en base al muestreo obtenido.

En base a los resultados obtenidos se puede observar que,

1. En la correa 10B el porcentaje de -200# debe ser mínimo 12% y +1/2"# un máximo de 5%; como se muestra en la Tabla 5.2 estos corresponden a 15,9 y 5.9%, encontrándose dentro de lo aceptable.
2. La razón de reducción del molino de barras se encuentra dentro del rango aceptable, siendo incluso mayor a RR<sub>80</sub> obtenidas de la sección A

## Análisis de desviación de $P_{80}$ en etapa de clasificación en planta de molienda

previamente, por lo que se comprueba que el molino de barras cumple con el tamaño de producto esperado.

3. En cuanto a las baterías de hidrociclones se observa en la Tabla 5.4 que el porcentaje de sólido del overflow se encuentra fuera del estándar en la BHC4 con un 51,4% teniendo a la vez un  $P_{80}$  de 321 [ $\mu\text{m}$ ], esto demuestra la falta de agua en dicha batería. En la Tabla 5.5 se muestra el flujo de agua a la cuba de la batería, esta debiese encontrarse por sobre los 100 [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] sin embargo, por PI-System el agua a la cuba fue de 99 [ $\text{m}^3/\text{h}$ ].
4. En la BHC6 se observa que el  $P_{80}$  es de 260 [ $\mu\text{m}$ ] con un 43,1% de sólido en el overflow, esta desviación en el  $P_{80}$  esperado puede deberse a que la presión de la batería se encuentra por debajo de estándar siendo de 7,8 [psi] y/o a que dicha batería debiese operar con un porcentaje de sólido más bajo.
5. Las cargas circulantes no debiesen superar los 350%, como se muestra en la Tabla 5.5 esta se encuentra por sobre lo recomendado en la BHC6 llegando a los 418%.

### 5.1.2 Balance de masa sección B

El flujo de agua alimentado a la cuba de la batería es registrado mediante el programa PI-System, debido problemas existentes en la calibración de los sensores y en el registro de este es que se realiza un balance de masa en base a los porcentajes de sólidos y el tratamiento de la sección. Se realiza un balance de masa ideal de la sección B de la molienda convencional para un tratamiento de 450 [tph], un porcentaje de sólido de 40% en rebalse y una carga circulante de 409%, ver en Anexos 8.3, Figura 8.7. A partir del balance se estima que el flujo de agua alimentado al molino de barras 2 debe ser de 94 [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] para un porcentaje de sólido de 80% en dicho molino, mientras que el flujo de agua a la cuba de las baterías BHC4, BHC5 y BHC6 debe ser de 173, 202 y 173 [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] respectivamente.

En la Figura 5.2 se muestra el balance de masa para la BHC6 de la sección B con los flujos de agua, masa y pulpa en base al muestreo completo del 15/01/19. El

## Análisis de desviación de P<sub>80</sub> en etapa de clasificación en planta de molienda

balance de masa del muestreo completo de la sección B se encuentra en Anexos 8.3, Figura 8.8.

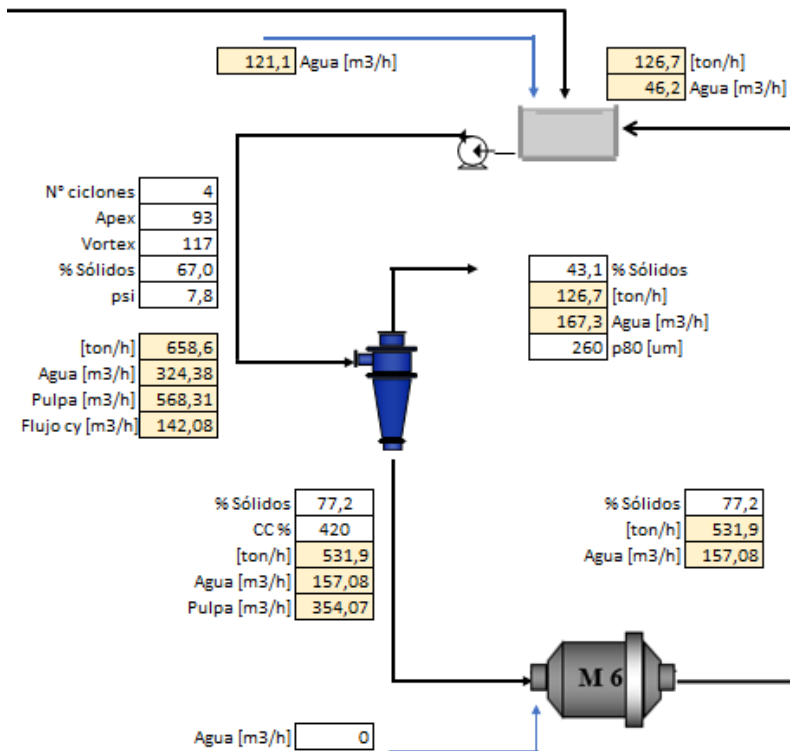


Figura 5.2: Diagrama balance de masa BHC6 muestreo sección B.

En la Tabla 5.5 se puede ver el flujo de agua a la cuba de la batería, entregado por PI-System a la hora del muestreo, y el flujo obtenido en el balance de masa realizado para la sección. Para las baterías BHC5 y BHC6 se tiene un error de 77 y 51% respectivamente.

### 5.1.3 Falta de agua en operación

Para evidenciar la falta de agua en la operación de las baterías se realizan gráficas de probabilidad con la herramienta de MiniTab, en base a muestreos diarios en el rebalse de las baterías BHC5 y BHC6 durante 4 meses. Se tiene un estándar definido para el porcentaje de sólido del rebalse de 38 a 42%;

Sin embargo, al observar las gráficas de las Figuras 5.3 y 5.4 se puede ver que el porcentaje de sólido se encuentra por sobre el 42% casi la mitad del tiempo. Es decir, existe una desviación en el control operacional al no cumplirse con el estándar ya que en la sala de control se encuentra por pantalla del porcentaje de

## Análisis de desviación de P<sub>80</sub> en etapa de clasificación en planta de molienda

sólido. Es trabajo del operador que se cumpla con dicho estándar, regulando el flujo de agua alimentado a la cuba de la batería, esto se ve dificultado ya que como se comprobó anteriormente en el muestreo los sensores de flujo de agua no se encuentran calibrados con errores mayores al 5%.

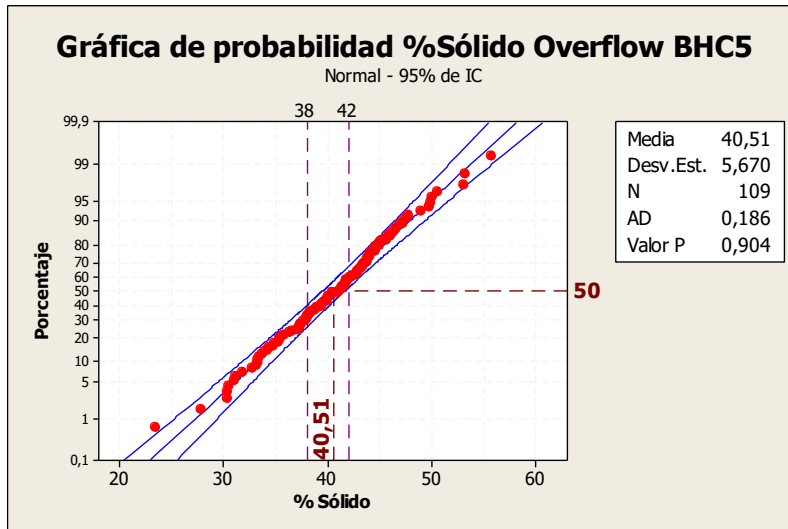


Figura 5.3: Gráfica de probabilidad %sólido rebalse BHC5.

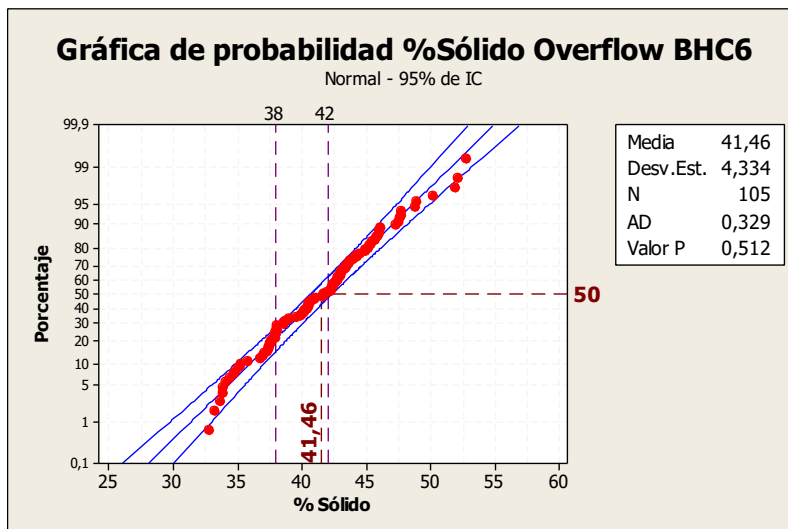


Figura 5.4: Gráfica de probabilidad %sólido rebalse BHC6.

En la Tabla 5.6 se tiene el coeficiente de correlación de Pearson entre el % $\# +65$  y %sólido del overflow de las baterías de la molienda convencional. De acuerdo con la relación lineal obtenida para cada batería se establecen los porcentajes de sólidos máximos de operación para obtener un  $\# +65$  de 23%.

## Análisis de desviación de P<sub>80</sub> en etapa de clasificación en planta de molienda

Tabla 5.6: Coeficiente de correlación de Pearson y %sólido máximo molienda convencional.

Batería	Coeficiente de Pearson	% Sólido máximo
<b>BHC1</b>	0,76	39,5
<b>BHC2</b>	0,70	40,0
<b>BHC3</b>	0,80	43,0
<b>BHC4</b>	0,74	40,0
<b>BHC5</b>	0,79	40,0
<b>BHC6</b>	0,71	36,0
<b>BHC7</b>	0,84	40,0
<b>BHC8</b>	0,84	41,5
<b>BHC9</b>	0,81	38
<b>BHC10</b>	0,86	42

A partir del análisis para la falta de agua en operación es necesario realizar un set de pruebas a distintos porcentajes de sólido para cada sección de la molienda convencional y así, redefinir el estándar operacional. Esto debe ser propuesto una vez que se finalicen los trabajos en las nuevas líneas de agua y verificando a la vez, el porcentaje de sólido en terreno durante los muestros con el fin de eliminar el error de los sensores de flujómetros.

### 5.1.4 Protocolo de prueba FLSmith: Batería Hidrociclones 6

Actualmente en la molienda convencional, es necesario revisar cada una de las baterías cada 2 meses o menos, debido al excesivo desgaste y desprendimientos de fondo plano. A causa de esto se requiere probar un nuevo tipo de revestimiento propuesto por el proveedor FLSmith, mediante la instalación de hidrociclones con revestimiento “Heavy Duty” modelo gMAX15.

La prueba de estos hidrociclones debe ser aprobada a través de un “Protocolo de prueba” que especifique las condiciones por parte de la empresa proveedora y Codelco Andina. Los objetivos de la prueba son,

## Análisis de desviación de $P_{80}$ en etapa de clasificación en planta de molienda

- Duración de los hidrociclones de la batería 6 de la planta de molienda convencional a un mínimo de 6 meses.
- Asegurar un producto de los hidrociclones de la batería 6, siendo igual o menor a los 270 [ $\mu\text{m}$ ].

Se establece para la prueba la prioridad de aumentar la durabilidad de los hidrociclones aumentando el tiempo entre mantenciones. En base al comportamiento de los últimos meses del producto de la batería se define como objetivo obtener un producto igual o menor a 270 [ $\mu\text{m}$ ] el cual representa la media de esta batería; así no es una condicional contar con un producto de 240 [ $\mu\text{m}$ ] y la prueba puede resultar exitosa solamente para el primer caso, entregando esto ya un beneficio económico para la planta.

Dentro de las responsabilidades el proveedor propondrá un máximo de 3 cambios en la geometría del equipo (combinación apex/vortex) requerida para lograr el objetivo metalúrgico, y no se puede mantener una carga circulante no mayor a 350%.

La prueba se da como iniciada cuando se hayan instalado 4 de 6 hidrociclones, la evaluación del desgaste se realizará durante 2 meses con mediciones de apex y vortex cada 2 o 3 semanas, proyectando su duración a 6 meses y 1 año. En Anexos 8.2 Figura 8.6 se puede observar el plano del hidrociclón gMAX15 Heavy Duty FLSmidth.

El primer cambio se realiza el 2/01/2019 con la instalación de 1 hidrociclón gMAX15 con configuración 84/114 [mm]; luego, se evalúa el comportamiento en la batería previo a la instalación de la totalidad de los hidrociclones y el comienzo de la prueba. La evaluación se basa en un set de pruebas ciclón por ciclón a la BHC6, donde se toma una muestra puntual al rebalse de cada hidrociclón y se entrega el porcentaje de sólido y el % +65#, junto a la presión de la batería y tratamiento de la sección registrados por PI.

## Análisis de desviación de P<sub>80</sub> en etapa de clasificación en planta de molienda

En la Tabla 5.7 se observan los resultados de los muestreos ciclón por ciclón de la BHC6, se muestra el hidrociclón 2 en comparación al global de la batería ya que en este se realiza el cambio de modelo Eral a gMAX15.

Tabla 5.7: Resultados %+65# y %sólido muestreos ciclón por ciclón BHC6.

Fecha muestreo	Ciclón 2		Global	
	%+65#	%Sólido	%+65#	%Sólido
<b>23-03-18</b>	21,29	35,60	18,13	34,77
<b>04-06-18</b>	23,39	41,92	23,71	43,42
<b>28-08-18</b>	27,72	41,45	27,86	41,71
<b>30-08-18</b>	28,50	42,35	27,46	42,73
<b>30-09-18</b>	31,62	46,76	38,19	44,08
<b>07-11-18</b>	22,39	31,83	24,98	31,29
<b>11-11-18</b>	18,76	36,64	20,07	37,34
<b>30-12-18</b>	24,49	38,30	25,41	40,32
<b>Media</b>	24,77	39,89	25,73	39,46
<b>Cambio modelo hidrociclón</b>				
<b>04-01-19</b>	32,31	41,46	30,07	42,39
<b>03-02-19</b>	22,54	35,00	31,18	41,62
<b>11-02-19</b>	10,76	37,52	26,96	45,27
<b>12-02-19</b>	5,72	37,14	30,04	43,27
<b>Media</b>	17,83	37,78	29,56	43,14

En la Figura 5.5 y 5.6 se muestra la gráfica del comportamiento del %+65# y porcentaje de sólido para el set de muestreos en el ciclón 2 de la BHC6, el cambio de Eral 400 a gMAX15 se encuentra marcado por la línea vertical punteada; los muestreos indican que el hidrociclón 2 gMAX15 se comporta similar o mejor en comparación con los hidrociclones Eral en términos del corte metalúrgico, por lo que se puede proceder al cambio de la batería completa.

Análisis de desviación de P<sub>80</sub> en etapa de clasificación en planta de molienda

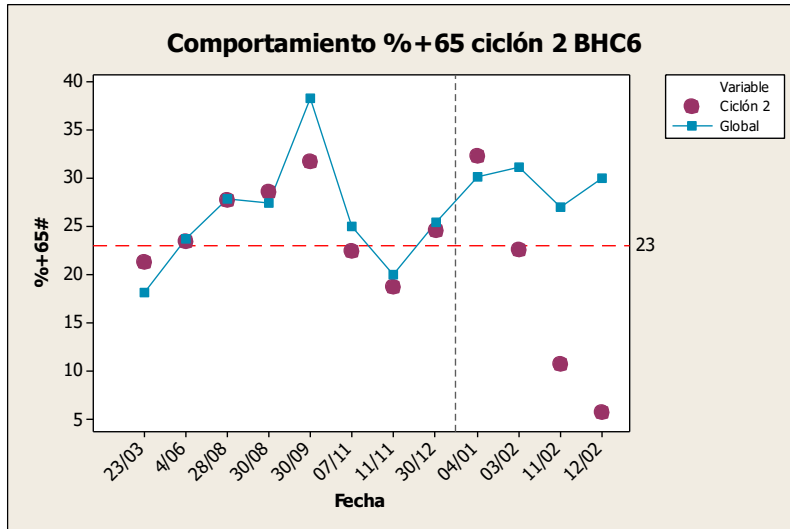


Figura 5.5: Gráfica %+65# en muestreos ciclón por ciclón para hidrociclón #2 BHC6.

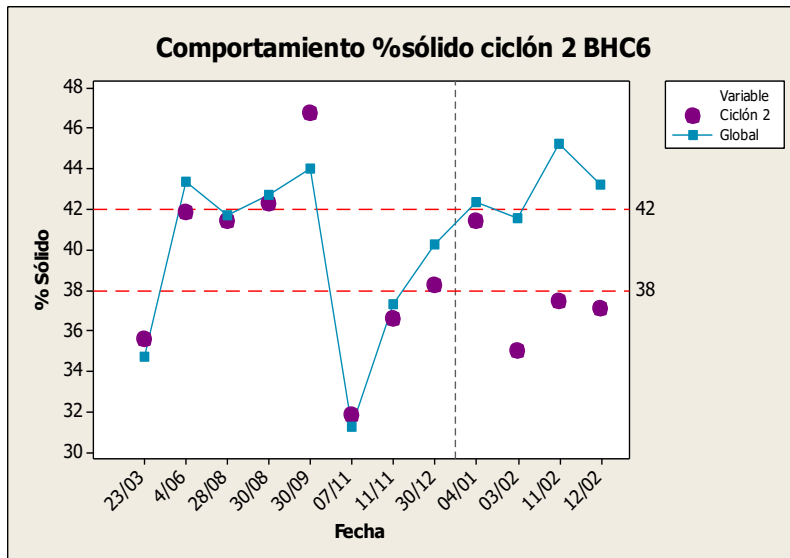


Figura 5.6: Gráfica %sólido en muestreos ciclón por ciclón para hidrociclón #2 BHC6.

En la Tabla 5.8 se encuentran las condiciones operacionales durante los muestreos ciclón por ciclón, los últimos 4 muestreos corresponden a los realizados después del cambio a gMAX15; es posible observar que las condiciones se mantuvieron con una presión alrededor de los 9 [psi] y un tratamiento mayor a 400 [tph]. Es por esto que se procede al cambio de 3 hidrociclones restantes para mantener una operación con 4 hidrociclones en la batería.

## Análisis de desviación de $P_{80}$ en etapa de clasificación en planta de molienda

Tabla 5.8: Presión y Tratamiento muestreos ciclón por ciclón BHC6 sección B.

Fecha	Presión [psi]	Tratamiento [tph]
23-03-18	10,6	458
04-06-18	9,1	444
28-08-18	9,3	422
30-08-18	9,8	380
30-09-18	9,9	407
07-11-18	10,5	455
11-11-18	7,1	459
30-12-18	12,8	437
04-01-19	9,0	411
03-02-19	9,3	432
11-02-19	9,0	401
12-02-19	8,7	462

Durante la primera semana de abril se realiza el cambio de 3 hidrociclones Eral 400 por gMAX15, una vez terminado se debe evaluar el funcionamiento de la batería para condiciones estándar de operación.

### 5.2 Molienda unitaria I

#### 5.2.1 Modificación vortex

En la MUNI se propone el cambio progresivo y evaluación de hidrociclones de vortex 130 a 120 [mm]. Mediante la planilla de Moly-Cop "BALLSIM: Conventional Closed Circuit Grinding Simulator" se simula el circuito de la MUNI para un hidrociclón con configuración 90/130 y 90/120 [mm]. Se ingresan las variables operacionales y parámetros de operación del molino de bolas y de la batería.

En la Figura 5.7 y 5.8 se observan las simulaciones para vortex de 130 y 120 [mm] respectivamente.

## Análisis de desviación de P<sub>80</sub> en etapa de clasificación en planta de molienda

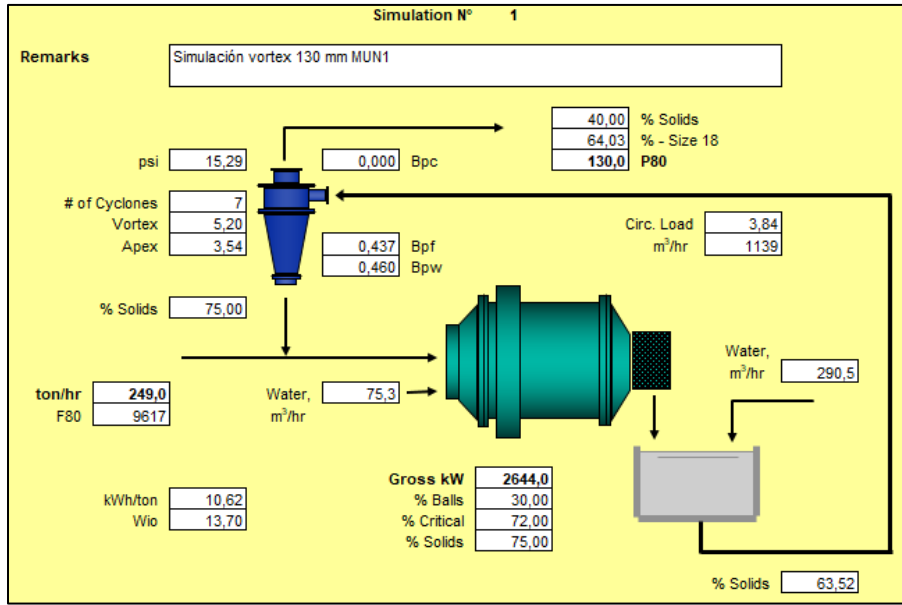


Figura 5.7: Simulación Moly-Cop Tools para MUNI con vortex 130 [mm].

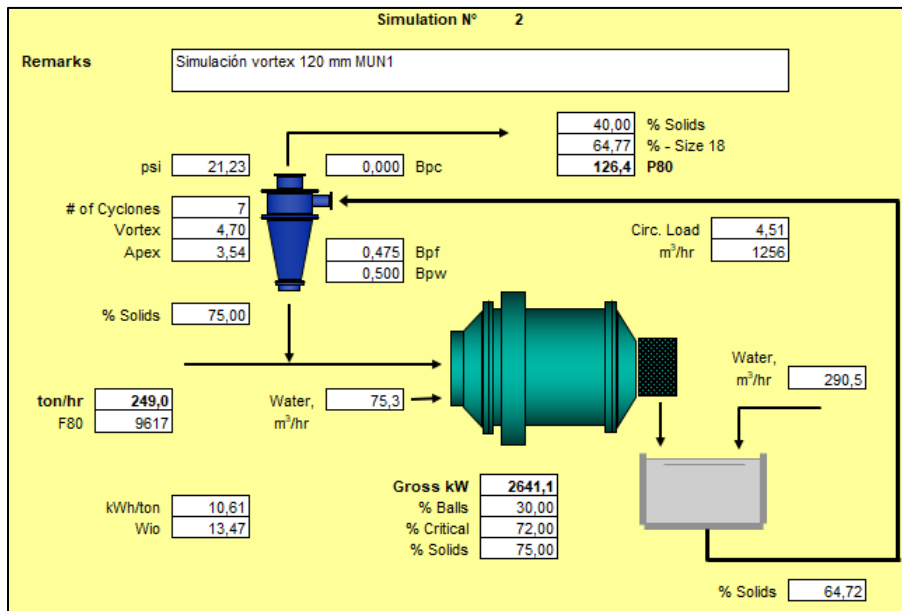


Figura 5.8: Simulación Moly-Cop Tools para MUNI con vortex 120 [mm].

El resultado de la simulación para las distintas configuraciones entrega un P<sub>80</sub> distinto, disminuyendo de 130 a 126,4 [µm]. Esto justifica el cambio propuesto para el hidrociclón en la batería del MUNI.

## Análisis de desviación de $P_{80}$ en etapa de clasificación en planta de molienda

El primer cambio se efectúa el día 04/12/18, en la Tabla 5.9 se observan los días de operación de los hidrociclones con vortex de 120 [mm] y la medición del desgaste registrado al día 08/03/19.

Tabla 5.9: Tiempo de operación y desgaste hidrociclones MUNI con vortex 120 [mm].

Hidrociclón	Días operación	Vortex [mm]	Fecha cambio
2	74	122	04/12/18
3	6,5	122	28/02/19
4	6	122	28/02/19
5	6,6	123	28/02/19
6	6,5	123	28/02/19
7	5,5	124	28/02/19

### 5.2.2 Balance de masa MUNI

En primer lugar, se realiza un balance de masa del circuito de la molienda unitaria para determinar el flujo de agua que debe ser alimentado al molino y a la cuba de la batería en base a las condiciones operacionales de tratamiento y porcentaje de sólido. Las condiciones operacionales son,

- Tratamiento de 250 [tph]
- Porcentaje de sólido overflow de 38 a 42%
- Carga circulante de 250 a 350%

Con estas condiciones y comprendiendo los flujos de entrada y salida en el circuito se muestra el balance de masa en la Figura 5.9. Por lo tanto, simulando un circuito ideal el flujo de agua alimentado al molino de bolas debiese ser 100 [m<sup>3</sup>/h] y el flujo de agua a la cuba de la batería debiese ser de 300 [m<sup>3</sup>] para un tratamiento de 250 [tph], un porcentaje de sólido de 38% en el rebalse y una carga circulante de 290%.

## Análisis de desviación de $P_{80}$ en etapa de clasificación en planta de molienda

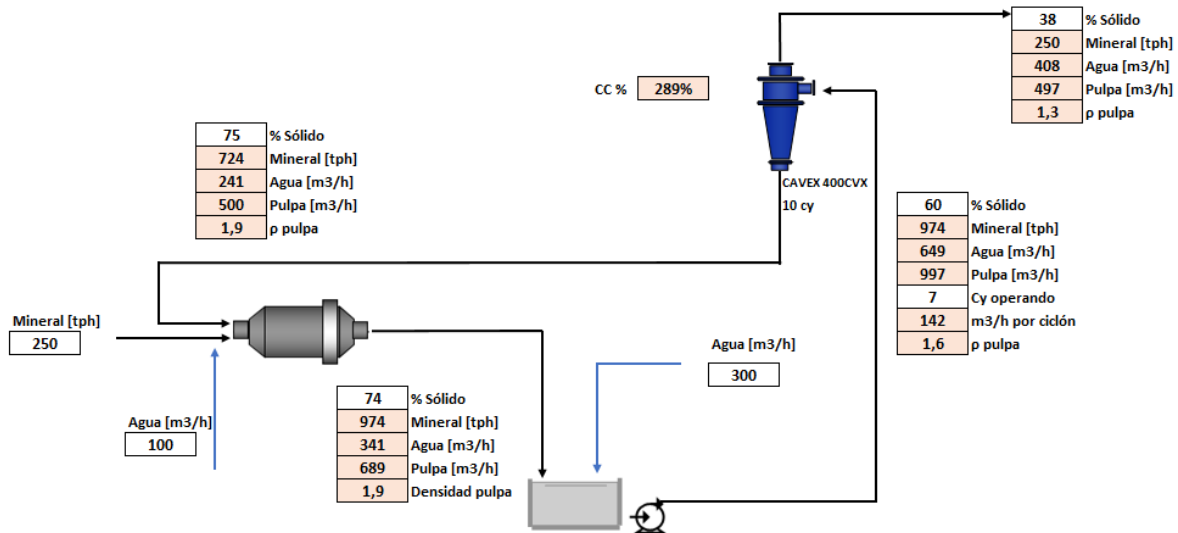


Figura 5.9: Balance de masa ideal MUNI.

### 5.2.3 Control de eficiencia y resultados

Para la evaluación metalúrgica del cambio de vortex se solicitan muestreos de control de eficiencia del MUNI, durante un control de eficiencia se toman muestras en la alimentación, underflow y overflow de la batería, entregando por parte del laboratorio metalúrgico los perfiles granulométricos de cada punto junto al porcentaje de sólido.

Para cada control de eficiencia se obtiene la carga circulante mediante la planilla de Moly-Cop descrita en el punto 4.6.1. En la Tabla 5.10 se puede ver un resumen de los resultados del set de controles de eficiencia, estos se programaron de acuerdo con el número de hidrociclones con vortex de 120 [mm].

Tabla 5.10: Resultados control de eficiencia MUNI.

Fecha	19/11/18	29/01/19	06/02/19	06/03/19
Control de eficiencia				
Tratamiento [tph]	250	240	249	250
Presión bat. [psi]	9,3	10,5	9,5	9,5
%Sólido overflow	33,9 %	41,5 %	40,5 %	34,8 %
$P_{80}$ [ $\mu$ m]	270	257	233	242
CC [%]	408	468	296	536
Agua molino [m <sup>3</sup> /h]	110	88	93	63

Análisis de desviación de P<sub>80</sub> en etapa de clasificación en planta de molienda

<b>Agua a cuba [m<sup>3</sup>/h]</b>	283	254	268	170
<b>Potencia molino [kW]</b>	2520	2480	2490	2500
<b>%Sólido alim. Molino</b>	68 %	77 %	70,7 %	66,1 %
<b>N°ciclones vortex 120 [mm]</b>	0	4	6	6
<b>N°ciclones vortex 130 [mm]</b>	7	3	1	1
<b>By-pass fino</b>	44 %	48 %	40 %	37 %

Como se puede observar en los resultados de la Tabla 5.9 se compara el producto del circuito de molienda con condiciones de tratamiento y presión similar, para la operación de 0, 4 y 6 hidrociclones con el cambio de vortex a 120 [mm]. Con estos resultados es posible determinar el grado de éxito de la prueba al verse disminuido el tamaño del producto.

## **CAPITULO 6. Conclusiones y recomendaciones**

Los resultados obtenidos del plan de trabajo propuesto y gracias al análisis realizado es posible entregar las siguientes conclusiones.

Para la sección B de la molienda convencional se tiene que,

- En base al muestreo completo de la sección B se puede comprobar que al operar un porcentaje de sólido más alto al máximo del estándar el producto se ve afectado aumentando considerablemente por sobre el 23% de +65#.
- De acuerdo con el análisis de la relación entre el tamaño de producto y el porcentaje de sólido en el rebalse de la batería y mediante el coeficiente de correlación se sugiere modificar el estándar operacional a un rango de 38 – 40% sólido en el rebalse, para tener un máximo de 23% sobre +65# en la planta de molienda convencional. Esto debe ser justificado con un set de pruebas a la molienda convencional una vez que las líneas de agua se encuentren operativas bajo el nuevo sistema y los sensores de flujo se estén calibrados.
- Se evidencia que existe una desviación notoria en la operación del porcentaje de sólido de alimentación a la batería que afecta al porcentaje de sólido en el rebalse basado en las gráficas de probabilidad de la Figura 5.3 y 5.4. Es por esto, que se deben tomar medidas a nivel de operación para cumplir con los estándares operacionales establecidos por la SIPP.
- A partir de los resultados obtenidos y el análisis de los muestreos durante el desarrollo del protocolo de prueba para la batería 6 del molino de bolas 6 es viable realizar el cambio de los hidrociclones Eral 400 Fondo Plano instalados en la sección B de la molienda convencional por los hidrociclones gMAX15 de FLSmidth. Las pruebas preliminares al hidrociclón 2 de FLSmidth instalado en la BHC6 resultaron exitosas mejorando o manteniendo el tamaño del producto, por lo que se debe proceder a la instalación de la batería completa para la evaluación del desgaste del ápex

## Análisis de desviación de $P_{80}$ en etapa de clasificación en planta de molienda

y vortex; como se muestra en la Tabla 5.7, previo al cambio se tiene un 24,77% de +65# mientras que luego a la instalación del hidrociclón se tiene un 17,83% de +65#, esto representa un  $P_{80}$  de 255 y 204 [ $\mu\text{m}$ ] respectivamente.

- El beneficio directo del cambio de modelo del hidrociclón Eral 400 a gMAX15 se encuentra en que ya no exista desprendimiento del fondo plano, lo que implica menores costos económicos asociados a mantenciones.

Para el caso de la planta de molienda unitaria I se puede concluir que,

- Los resultados de los muestreos y control de eficiencia indican que los vortex cambiados mantienen el % +65# dentro del estándar operacional, disminuyendo por ende el  $P_{80}$  previo al cambio. Como se observa en la Tabla 5.10 para la operación de la batería con 0, 4 y 6 hidrociclones con vortex 120 [mm] se tiene un  $P_{80}$  de 270, 257 y 233 [ $\mu\text{m}$ ] respectivamente, siendo efectiva la prueba con las modificaciones realizadas. Se recomienda operar con tratamiento entre 240 a 250 [tph], un flujo de alimentación de agua al molino de 100 [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] y 280 [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] a la cuba. Se recomienda a la planta el cambio de vortex faltantes 130 a 120 [mm] de la batería y evaluaciones final mediante control de eficiencia.

Dentro de las principales recomendaciones para la planta de molienda convencional y MUNI se encuentra,

- A partir del balance de masa ideal realizado para la sección B se recomienda operar con un flujo de alimentación de agua al molino de barras de 95 [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] y un flujo de agua a la cuba de la batería de 160 a 170 [ $\text{m}^3/\text{h}$ ], en el caso de que se esté utilizando la batería como recirculación de fino el flujo de agua a la cuba debe ser de 200 [ $\text{m}^3/\text{h}$ ].
- Una vez comenzado oficialmente el protocolo de pruebas en la BHC6 se recomienda realizar un set de muestreos en base a control de eficiencia

## Análisis de desviación de $P_{80}$ en etapa de clasificación en planta de molienda

para ser comparado el funcionamiento del hidrociclón en función de perfiles granulométricos.

- Dar prioridad al inicio del protocolo de prueba con Vulco para la BHC5 de la molienda convencional, una vez realizado esto será posible comparar la operación, calidad del equipo y el corte del producto para 3 proveedores distintos y así, recomendar la mejor opción para la planta concentradora.
- Se recomienda una revisión de los sensores de flujo de agua en la planta de molienda convencional, molienda SAG, MUNI y MUN2; esto debido a los errores encontrados al momento de comparar los muestreos en planta con la data obtenida del PI-System. Una calibración permite contar con un mejor manejo operacional de las variables de operación disminuyendo la desviación del error en el tamaño del producto final.

Como última sugerencia para la planta se recomienda a los ingenieros metalurgistas evaluar la implementación del sensor Cidra Cyclonetrac el cuál es un sistema de rastreo de tamaño de partícula (PST) de Cidra Minerals Processing. Este sensor permite tener un control de tamaño de partícula en tiempo real optimizando el circuito de molienda, su instalación se realiza en cada overflow de cada ciclón en una batería lo que implica contar con información inmediata más detallada en la etapa de clasificación. El control en tiempo real de cada hidrociclón permite tener un mayor control de la operación al conocer cuáles son los hidrociclones que cuentan con un corte de tamaño más fino o grueso, esto ayuda a la toma de decisiones por parte del operador.

## **CAPITULO 7. Referencias**

- A. Gupta, D. Y. (2006). *Mineral Processing Design and Operations an Introduction*.
- A. Muler, R. B. (1982). *Diseño de plantas de proceso de minerales*. Madrid.
- A.F. Nowakowski, J. C. (2004). Application of CFD to modelling of the flow in hydrocyclones. *Minerals Engineering*, 661-669.
- Andina, C. D. (s.f.). *Flujograma Plantas Codelco Andina*.
- D.P. Obeng, S. M. (2003). The JK three-product cyclone—performance and potential applications. *International journal of mineral processing*, 129-142.
- Douglas D. Schlepp, P. A. (1990). Influence of circulating load and classification efficiency on mill throughput. *SME Annual Meeting*. Salt Lake City.
- Engineering, B. H. (s.f.). *Cyclone Separator*.
- F. McQuiston, R. S. (1978). *Primary Crushing Plant Design*. New York.
- Gutierrez, J. (1986). *Dimensionamiento y Optimización de Plantas Concentradoras mediante Técnicas de Modelación Matemática*. Santiago.
- J. Dueck, M. S. (2003). Numerical calculation of cyclone umbrella and roping. *Aufbereitungs Technik*.
- K. Nageswararao, D. W.-M. (2004). Two empirical hydrocyclone models revisited. *Minerals Engineering*, 671-687.
- L. Austin, F. C. (s.f.). *Diseño y simulación de circuitos de molienda y clasificación*. Concepción.
- Minerals, M. (2008). *Conocimientos básicos en el procesamiento de minerales*.
- Morris, K. (2004). Cyclone Design An Integrated Approach. *Filtration*.
- Napier-Munn, A. A. (1997). An empirical model of hydrocyclones, incorporating angle of cyclone inclination. *Minerals Engineering*, 339-347.
- Napier-Munn, S. M. (1996). *Mineral Comminution Clrcuits*. Australia.

## Análisis de desviación de $P_{80}$ en etapa de clasificación en planta de molienda

Newton, I. (2014). *Minitab Cook-book*.

P. Bruce, A. B. (2007). *Practical Statistics for data scientists*.

Quezada, J. T. (s.f.). *Preparación mecánica de minerales, Universidad Arturo Prat*. Iquique.

R. Honaker, F. B. (2007). Slurry viscosity effects on cyclone performance. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 341-348.

Ruiz, M. (2004). *Reducción de tamaño y clasificación*. Concepción.

T. Neesse, H. T. (2007). Volume split control of a hydrocyclone group. *Minerals Engineering*, 355-360.

Th. Neesse, V. G. (2004). Hydrocyclone control in grinding circuits. *Minerals Engineering*, 1237-1240.

Thomas Neesse, V. G. (2004). *Optimizing Hydrocyclone Separation in Closed-Circuit Grinding*.

Zhao, B. (2005). Development of a new method for evaluating cyclone efficiency. *Chemical Engineering and Processing*, 447-451.

**CAPITULO 8. Anexos**

**8.1 Estándares operacionales SIPP**

En las siguientes Tablas se muestran los estándares operacionales definidos por la Superintendencia de Procesos Plantas para las plantas de molienda en Codelco División Andina el 14 de septiembre de 2017.

SUPERINTENDENCIA INGENIERIA DE PROCESOS PLANTAS PARAMETROS RECOMENDADOS EN MOLIENDA CONVENCIONAL								Observaciones
M O L I E N D A  C O N V E N C I O N A L	SECCIÓN A							
	Potencia de trabajo Mínima (kwh)		Nivel llenado Barras (%)	% Sólidos MoBa (%)	Geometría de Hidrociclones		Granulometría producto (%+65#)	Potencia en Vacío (kw)
	700 - 800		35	81	Apex: 90-100 mm Vortex: 120-130 mm			
	Potencia Mínima Operación (kwh)	Rango Potencia de trabajo	Nivel llenado Bolas (%)	Presión Batería Cy (psi)	%Sólidos Rebalse Batería Cy (%)			
MOBO #1	1270	1270-1340	40	9 a 12	38-42	menor a 23%	1420	
MOBO #2	1270	1270-1340	40	9 a 12	38-42	menor a 23%	1420	
MOBO #3	1270	1270-1340	40	9 a 12	38-42	menor a 23%	1420	
SECCIÓN B								
M O L I E N D A  C O N V E N C I O N A L	Potencia de trabajo Mínima (kwh)		Nivel llenado Barras (%)	% Sólidos MoBa (%)	Geometría de Hidrociclones		Granulometría producto (%+65#)	Potencia en Vacío (kw)
	700 - 800		35	81	Apex: 93-103 mm Vortex: 117-127 mm			
	Potencia Mínima Operación (kwh)	Rango Potencia de trabajo	Nivel llenado Bolas (%)	Presión Batería Cy (psi)	%Sólidos Rebalse Batería Cy (%)			
	MOBO #4	1270	1270-1340	40	9 a 12	38-42	menor a 23%	1420
MOBO #5	1270	1270-1340	40	9 a 12	38-42	menor a 23%	1420	
MOBO #6	1270	1270-1340	40	9 a 12	38-42	menor a 23%	1420	
SECCIÓN C								
M O L I E N D A  C O N V E N C I O N A L	Potencia de trabajo Mínima (kwh)		Nivel llenado Barras (%)	% Sólidos MoBa (%)	Geometría de Hidrociclones		Granulometría producto (%+65#)	Potencia en Vacío (kw)
	700 - 800		35	81	Apex: 90-100 mm Vortex: 130-140 mm			
	Potencia Mínima Operación (kwh)	Rango Potencia de trabajo	Nivel llenado Bolas (%)	Presión Batería Cy (psi)	%Sólidos Rebalse Batería Cy (%)			
	MOBO #7	1270	1270-1340	40	6 a 9	38-42	menor a 23%	1420
MOBO #8	1270	1270-1340	40	6 a 9	38-42	menor a 23%	1420	
MOBO #9	1270	1270-1340	40	6 a 9	38-42	menor a 23%	1420	
MOBO #10	1270	1270-1340	40	6 a 9	38-42	menor a 23%	1420	

Figura 8.1: Parámetros recomendados en planta molienda convencional DAND.

SUPERINTENDENCIA INGENIERIA DE PROCESOS PLANTAS PARAMETROS RECOMENDADOS EN MOLIENDA UNITARIA 1			
M O L I E N D A  U N I T A R I A	MOLINO UNITARIO 1		
	Potencia de trabajo (kwh)	Nivel llenado Bolas (%)	Potencia en Vacío (kw)
	2450 a 2550	28 a 30	2700
	Presión Batería de ciclones (psi)	%sólidos Rebalse Batería Ciclonos (%)	Granulometría producto (%+65#)
	10 a 13	38-42	menor a 24
Observaciones:			
Por falla en trunnion se baja nivel de llenado de 35% a 30%			

Figura 8.2: Parámetros recomendados en planta MUNI, DAND.



# Análisis de desviación de P<sub>80</sub> en etapa de clasificación en planta de molienda

- Sección B: Eral 400 fondo plano

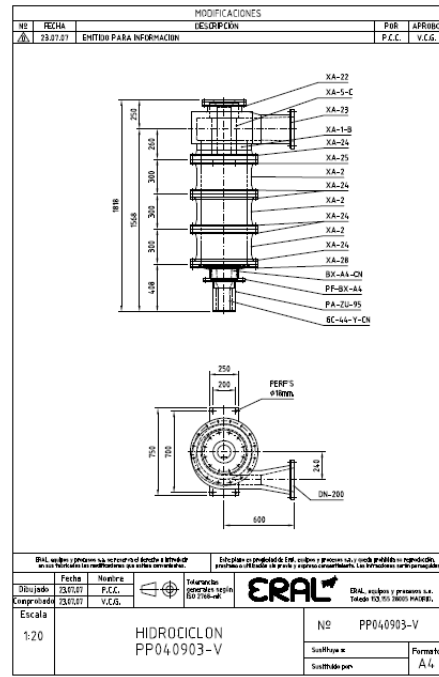


Figura 8.4: Plano hidrociclón Eral 400 93/117 [mm].

- Sección C + MUNI: Cavex 400 sin extensión Vulco

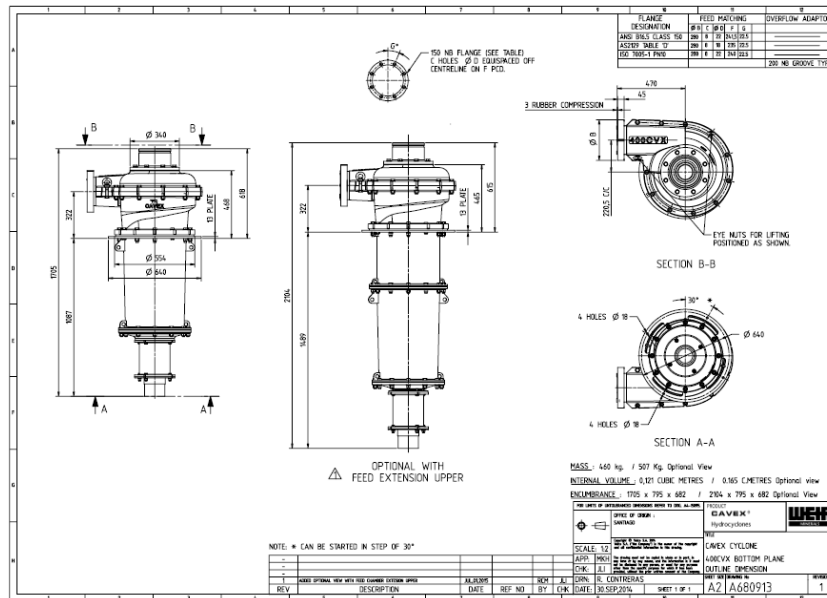


Figura 8.5: Plano hidrociclón Cavex 400 SE Vulco 90/130 [mm].

# Análisis de desviación de P<sub>80</sub> en etapa de clasificación en planta de molienda

- Sección B – BHC6: Hidrociclón para protocolo de prueba con FLSmidth

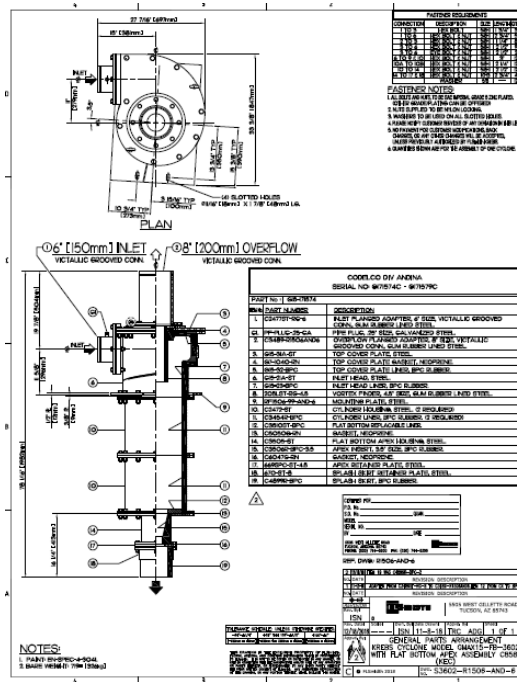


Figura 8.6: Plano hidrociclón gMAX15 FLSmidth.

8.3 Balance de masa

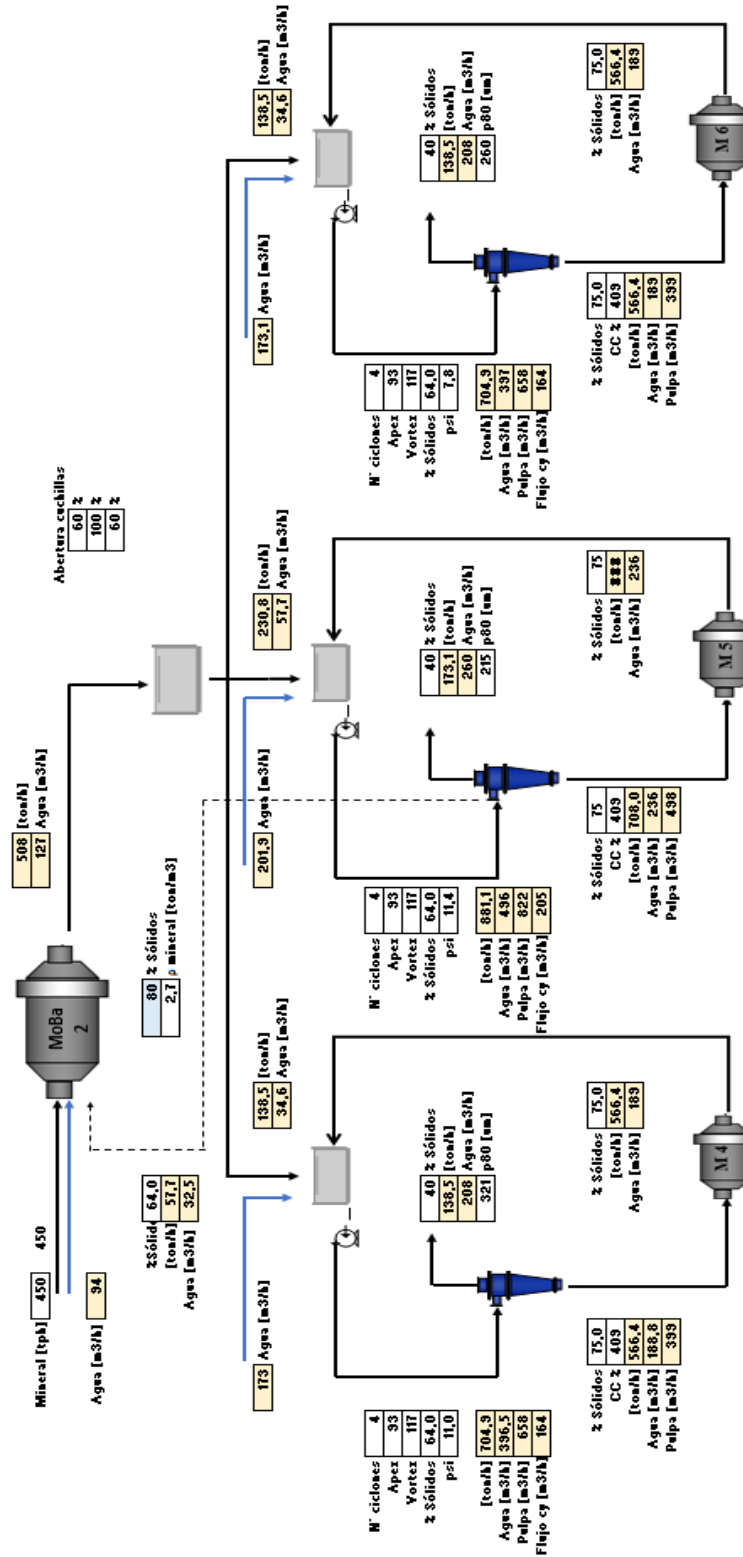


Figura 8.7: Balance de masa ideal sección B molienda convencional DAND.

# Análisis de desviación de P<sub>80</sub> en etapa de clasificación en planta de molienda

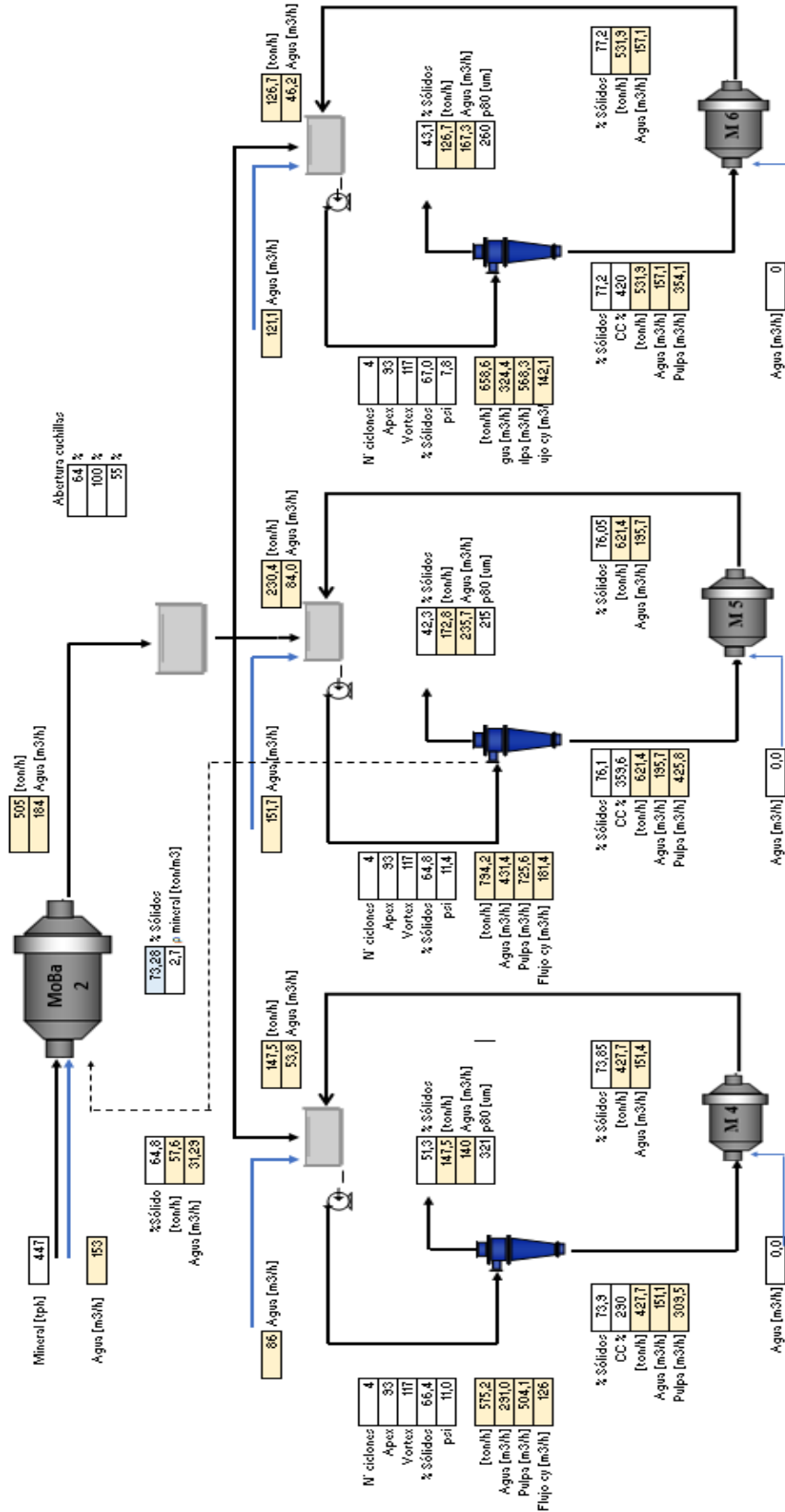


Figura 8.8: Balance de masa sección B para muestreo general 15/01/19 DAND.

## Análisis de desviación de $P_{80}$ en etapa de clasificación en planta de molienda