

2018

# EVALUACIÓN DE FACTIBILIDAD TÉCNICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA ETAPA DE CONCENTRACIÓN MAGNÉTICA EN EL PROCESO DE CLASIFICACIÓN Y MOLIENDA, EN LA COMPAÑÍA MINERA DEL PÁCIFICO PLANTA MAGNETIT

HARBOE RODRÍGUEZ, FERNANDA NICOL

---

<https://hdl.handle.net/11673/43786>

*Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA*

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
SEDE VIÑA DEL MAR – JOSE MIGUEL CARRERA**

**EVALUACIÓN DE FACTIBILIDAD TÉCNICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA  
ETAPA DE CONCENTRACIÓN MAGNÉTICA EN EL PROCESO DE  
CLASIFICACIÓN Y MOLIENDA, EN LA COMPAÑÍA MINERA DEL PÁCIFICO  
PLANTA MAGNETITA**

Trabajo de Titulación para optar al  
Título de Técnico Universitario en  
MINERÍA Y METALURGIA

Alumnos:

Fernanda Nicol Harboe Rodríguez

Cyntia Camila Urbano Olivares

Profesor Guía:

Ing. Luis Augusto Gutierrez Meneses

**2018**



## **RESUMEN**

Hoy en día, las empresas mineras buscan generar mayor eficiencia en sus procesos y disminuir los costos que estos mismos provocan, generalmente los mayores gastos que se generan en las grandes industrias son por el recurso hídrico utilizado para el procesamiento de los minerales, pero también, debemos señalar las grandes sumas de dinero invertidas en la energía que requieren los equipos para poder tratar y procesar los minerales. En el presente estudio se busca disminuir la carga circulante de los molinos, ya que si bien no se puede disminuir la energía que estos equipos requieren para funcionar, en teoría se estaría compensando el gasto con mayor eficiencia del proceso. Cabe mencionar que, el molino opera de manera constante y esto no se ve modificado en el presente estudio, no disminuye la carga que se alimenta a esta pieza trascendental, más bien, se aprovecha de mejor forma esta energía tratando mayor cantidad de alimentación fresca.

Debido a lo anterior, es que el objetivo principal es evaluar la factibilidad técnica-económica al incorporar un nuevo proceso en la etapa de molienda con la principal función de poder aumentar la ley de la magnetita que se está recuperando de los relaves llegados a la compañía CAP, y así también generar una disminución en la carga circulante de la molienda, generando una alimentación fresca al molino. Este proceso mencionado anteriormente se basa principalmente en incorporar una etapa de concentración magnética en la corriente de descarga del molino, por ello se debe analizar los estudios previos que realizó el equipo de Ingeniería de Procesos de la planta, a solicitud del equipo de Innovación de CAP Minería (liderado en planta magnetita por Adolph Moller<sup>1</sup>), se desarrolló un ensayo de concentración magnética el cual consistió en realizar un muestreo en la bomba N° 216, impulsión y alimentación de material mixto (fresco y descarga de molinos) hacia la etapa de clasificación secundaria. Posteriormente se elabora un análisis granulométrico y %Fe Total, luego se realizan pruebas de tubo Davis a 1000 y 3000 Gauss. Además, a los concentrados obtenidos se les efectúa un perfil granulométrico y análisis %Fe T.

En consecuencia, de los estudios previos se deben realizar distintas pruebas a nivel laboratorio para poder llegar a la finura que sea más eficaz para el proceso que deseamos implementar, teniendo en cuenta las cantidades de alimentación que utilizaremos y obtendremos, observando así cuanta cantidad de concentración magnética resulta.

Metodología que se propone para realizar el proyecto:

1. Batería de muestreo en molino 2, corriente de descarga. En total, se realizaron 5 muestreos. Circuito inverso de molienda (procesamiento 100% relave CCMC<sup>2</sup>).

---

<sup>1</sup> Ingeniero de Procesos y Operaciones de Planta Magnetita, CAP minería.

<sup>2</sup> Compañía Contractual Minera Candelaria.

2. Análisis físico-químico de las muestras descritas: filtrado / secado / roleo-cuarteo / perfil granulométrico por mallas / análisis químico por mallas mediante ensayo tubo Davis / análisis por mastersizer<sup>3</sup>.
3. Caracterización y análisis por malla de calidad en términos de Rmm y Rp (Fe total, Fe mag, Dtt, FeDtt).
4. Mediante resultados obtenidos, se sugerirán alternativas de procedimiento.

Utilizando las curvas granulométricas y los análisis químicos de las colas podremos comparar resultados de las distintas muestras que fueron seleccionadas para poder llevar el proyecto a cabo, generando así una conclusión de si es factible equilibradamente entre la cantidad de aumento de ley y los costos asociados a la incorporación de esta etapa de concentración magnética, como también darse cuenta si se pierde gran cantidad de concentración magnética llevadas por las colas.

---

<sup>3</sup> Equipo utilizado para realizar curvas granulométricas con aproximadamente 5 gr. de material.

## **INDICE**

<b>RESUMEN</b>	<b>3</b>
<b>SIGLAS Y SIMBOLOGIA</b>	<b>10</b>
<b>INTRODUCCION</b>	<b>1</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>3</b>
Objetivo General:	3
Objetivos específicos:	3
<b>CAPITULO 1:CLASIFICACION Y MOLIENDA SEGÚN CARACTERÍSTICAS FÍSICAS</b>	<b>4</b>
1.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL MINERAL DE HIERRO.	6
1.2. CLASIFICACIÓN DE MINERALES	7
1.2.1. Tipos de clasificadores	8
1.2.2. Hidrociclones	8
1.3. MOLIENDA	11
1.3.1. Tipos de Molienda	11
1.4. FUNDAMENTOS DEL PROCESO	13
1.5. FACTORES QUE AFECTAN LA EFICIENCIA DE LA MOLIENDA.	16
1.6. TIPOS DE MOLINOS	17
1.6.1. Molino de barras	17
1.6.2. Molino de bolas	17
1.6.3. Molino SAG	18
<b>CAPITULO 2:CONCENTRACION MAGNETICA EN EL PROCESO PRODUCTIVO DE CAP</b>	<b>22</b>
2.1. CONCENTRACIÓN DE MINERALES	25
2.1.1. Métodos que emplean propiedades físicas o volumétricas de las sustancias de minerales	25
2.1.2. Métodos que usan propiedades físico químicas de superficie	26
2.2. IMPORTANCIA DE LA CONCENTRACIÓN DE MINERALES	26
2.3. CONCENTRACIÓN MAGNÉTICA	27
2.3.1. Principales usos de separación magnética	29
2.3.2. Separadores magnéticos que operan como concentradores y purificadores	29
<b>CAPÍTULO 3:EVALUACIÓN DE LA FACTIBILIDAD TÉCNICA</b>	<b>37</b>
3.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO DE PLANTA MAGNETITA	39
3.2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	40
3.2.1. Procedimiento del proyecto	42

**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

**54**

**BIBLIOGRAFÍA**

**57**

## **ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1-1.	Partes de un Hidrociclón	8
Figura 1-2.	Tipos de Molienda	10
Figura 1-3.	Abrasión e Impacto	13
Figura 1-4.	Esquema de los molinos	14
Figura 1-5.	Molino de Barras en su interior	16
Figura 1-6.	Molino de Bolas en su interior	17
Figura 1-7.	Movimiento de la carga al interior del molino SAG, para diferentes niveles de llenado	18
Figura 1-8.	Molino SAG	19
Figura 2-1.	Diagrama de flujos del proceso productivo de planta magnetita, CAP	23
Figura 2-2.	Material diamagnético	26
Figura 2-3.	Partículas de material paramagnético	27
Figura 2-4.	Separadores de tambor con imanes permanentes	29
Figura 2-5.	Modo de llenar el tubo Davis	30
Figura 2-6.	Tubo Davis con tampón y flujo de agua libre	31
Figura 2-7.	Equipo tubo Davis Eriez Magnetics 19061, 20061	31
Figura 2-8.	Trasvasije del concentrado magnético a un vaso precipitado	32
Figura 2-9.	Cinta transportadora	34
Figura 3-1.	Flow sheet de Planta Magnetita, Cap	39
Figura 3-2.	Diagrama de flujos, circuito de molienda con etapa de concentración	41

## **ÍNDICE DE GRÁFICOS**

Gráfico 3-1.	Perfil Granulométrico general, muestra uno	44
Gráfico 3-2.	Perfil granulométrico general, muestreo dos	45
Gráfico 3-3.	Perfil granulométrico general, muestreo tres	45
Gráfico 3-4.	Perfil granulométrico general, muestreo cuatro	46
Gráfico 3-5.	Perfil granulométrico general, muestreo cinco	47
Gráfico 3-6.	Comparación de perfiles granulométricos de los muestreos realizados	47
Gráfico 3-7.	Comparación de perfiles granulométricos de las colas	51

## **ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 2-1.	Peso de acuerdo con el porcentaje de Hierro	30
Tabla 3-1.	Análisis granulométrico general, muestra uno	43
Tabla 3-2.	Análisis granulométrico general, muestra dos	44
Tabla 3-3.	Análisis granulométrico general, muestra tres	45
Tabla 3-4.	Análisis granulométrico general, muestra cuatro	46
Tabla 3-5.	Análisis granulométrico general, muestra cinco	46
Tabla 3-6.	Resultados del porcentaje máximo de concentración magnética	48
Tabla 3-7.	Resultados del análisis químico, de la muestra uno	49
Tabla 3-8.	Resultados del análisis químico, de la muestra dos	49
Tabla 3-9.	Resultados del análisis químico, de la muestra tres	49
Tabla 3-10.	Resultados del análisis químico, de la muestra cuatro	50
Tabla 3-11.	Resultados del análisis químico, de la muestra cinco	50
Tabla 3-12.	Resultados del análisis granulométrico de las colas, muestra tres, cuatro y cinco	51
Tabla 3-13.	Resultados del análisis químico de las colas, muestra tres, cuatro y cinco	52



## **SIGLAS Y SIMBOLOGIA**

### **A. SIGLAS**

CAP	: Compañía minera del pacifico.
GAUSS	: Unidad de campo magnético.
DTT	: David Tuve Test
FeDTT	: Hierro Davis Tuve Test
SAG	: Molienda no convencional semi-autonoma.
AG	: Molienda no convencional autónoma.
Fe	: Hierro.
Mg	: Magnesio.
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	: Magnetita.
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: Hematita.
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> H <sub>2</sub> O	: Limonita
FeCO <sub>3</sub>	: Siderita.
%	: Porcentaje.
COCHILCO	: Comisión Chilena del Cobre.

### **B. SIMBOLOGIA**

N°	: Numero.
Kg	: Kilogramo.
L	: Litro.
Cm	: Centímetro.
m	: Metro





## **INTRODUCCION**

En Chile las mineras de Hierro son muy poco mencionadas a nivel nacional e internacional debido a la poca importancia que se le da a este mineral, entre las minas más conocidas que explotan este mineral esta la mina Los Colorados ubicada al interior de la comuna de Huasco, se encuentra también la mina Algarrobo ubicada en la tercera región y la mina El Romeral ubicada en la cuarta región, todas estas explotadas por la compañía minera del pacifico, filial de la empresa privatizada CAP en la cual se está presentando el proyecto.

La producción chilena del mineral de Hierro en 1998 alcanzo a producir 9.112.055 toneladas del mineral, pero este gran tonelaje se tradujo en 163,3 millones de US\$, lo que representa solo un 2,7% del total del valor de las exportaciones mineras chilenas. La escasa participación porcentual del hierro en el mercado chileno refleja el bajo precio del hierro del mercado internacional.

Según el informe "mercado internacional del hierro y el acero" elaborado el año 2008 por la comisión chilena de cobre(COCHILCO), el sector minero en los últimos años ha experimentado un gran crecimiento, esto se debe principalmente al aumento de la demanda y con esto el alza de los precios. Específicamente en el caso del hierro, la demanda mundial no es medida directamente debido a a los variados y complejos procesos de elaboración, pero si existen iniciadores alternativos para medirla.

Dentro de todos los minerales de hierros se encuentra la magnetita, la cual es la que tiene el mayor porcentaje de hierro contenido en ella, su principal característica es que posee un gran magnetismo el cual da nombre al fenómeno ferromagnético, por esta razón la magnetita se clasifica como un imán sumamente poderoso.

La magnetita también tiene propiedades para ser utilizada de varias maneras, como es a nivel industrial se emplea como un compuesto sumamente estable a altas temperaturas, se puede implementar a nivel de construcción la magnetita es especial para aplicaciones con el hormigón por su alta densidad, ayudando a proteger contra la radiación.

Es por esto, que se propone implementar un proceso en la etapa de concentración magnética en el proceso de clasificación y molienda, con el fin de poder aumentar el porcentaje de ley del mineral y asimismo la cantidad de magnetita captada, de tal manera que la empresa y los proveedores se vean beneficiadas satisfactoriamente con el uso de esta, verificando si la factibilidad técnica de esta esté aprobada.

Por ello debemos tener en cuenta algunos aspectos:

- Conocer los tipos de concentración magnética para poder aplicar la concentración del mineral de hierro.
  
- Los tipos de clasificación y molienda existentes, para optar a utilizar equipos que optimicen el trabajo de recuperación del hierro.

- Por último, establecer la factibilidad de intervenir en el proceso de la compañía de recuperación de hierro para obtener mejoras técnicas y económicas.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL:**

- Evaluar la factibilidad técnica de etapa de concentración magnética en el proceso de clasificación y molienda.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

- Reconocer los tipos de clasificación y molienda según características físicas del mineral.
- Diferenciar los tipos de concentración magnética de acuerdo al proceso productivo de la compañía.
- Establecer la factibilidad de la intervención del proceso de clasificación y molienda de acuerdo con la concentración de magnetita.

**CAPITULO 1: CLASIFICACIÓN Y MOLIENDA SEGÚN CARACTERÍSTICAS**  
**FÍSICAS**



## **1. CLASIFICACIÓN Y MOLIENDA SEGÚN CARACTERÍSTICAS FÍSICAS**

### **1.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL MINERAL DE HIERRO.**

El hierro es el metal más usado, con el 95 % en peso de la producción mundial de metal. El hierro puro (pureza a partir de 99,5 %) no tiene demasiadas aplicaciones, salvo excepciones para utilizar su potencial magnético. El hierro tiene su gran aplicación para formar los productos siderúrgicos, utilizando éste como elemento matriz para alojar otros elementos aleantes tanto metálicos como no metálicos, que confieren distintas propiedades al material. Se considera que una aleación de hierro es acero si contiene menos de un 2,1 % de carbono; si el porcentaje es mayor, recibe el nombre de fundición.

Para la explotación de los yacimientos mineros es necesario contar con parámetros técnicos en todas las etapas del proceso, desde la definición de recurso hasta la obtención de los productos, que aseguren la sustentabilidad del negocio minero. Para cualquier yacimiento, es necesario que las unidades geológicas identificadas traten de incorporar alguna característica relativa al comportamiento metalúrgico esperando a fin de lograr un óptimo beneficio de los minerales.

Algunos elementos distintivos de los modelos geo metalúrgicos dicen relación con la composición mineralógica del mineral y ganga, índices de dureza, grado de liberación de partícula, trituración, entre otros parámetros.

- Composición mineralógica del hierro: El hierro es uno de los minerales más duros usados teniendo una dureza en la escala de Mohs equivalente a un 4,0 se encuentra en un estado sólido y de color negro, tiene una densidad de 7.874 kg/m<sup>3</sup> y teniendo un punto de fusión de 1.535 °C con un punto de ebullición de un 2.750 °C, su peso específico se encuentra entre los 56 gramos.
- Liberación de partículas: se refiere a la liberación de cantidad de mineral de interés que puede quedar del material estéril cuando se realice la reducción del tamaño del mineral, en las pruebas y análisis realizados en la compañía se obtiene que el mineral se debe encontrar entre las mallas #270 y #325 teniendo pocos porcentajes de diferencias.
- Trituración: Aquí se deben tener en cuenta que equipos son capaz de triturar el mineral dependiendo de sus condiciones como los son la dureza y al tamaño de partícula que se desea llegar.

En el caso de los yacimientos de hierro, la variable textural es normalmente parte del modelo geo metalúrgico y se relaciona fundamentalmente con el tamaño, forma proporción y ordenamiento de la partícula en la matriz que la contiene. En

general se distinguen tres tipos de textura fundamentales que son maciza, brechosa y diseminada las cuales la veremos a continuación.

- Textura Maciza: Es aquella en la cual el mineral de hierro se encuentra prácticamente puro, sin contenido significativo de ganga. Se presenta como magnetita o hematita en forma de cristales, debido a ello las leyes de hierro normales en esta textura superan el 58%.
- Textura Brechosa: Es la cual el mineral de hierro se encuentra con entre crecimientos significativos de ganga, se presenta como nácelos, venillas o diseminaciones gruesas irregulares. La ley de hierro que se encuentra aquí está entre el 43 y 58 %.
- Textura diseminada: Es aquella en que la mena se compone fundamentalmente por una masa o matriz de ganga en la cual se encuentran distribuidos irregularmente pequeños núcleos, podemos encontrar un porcentaje de ley entre un 8 y 45%.

Como el mineral que la compañía procesa proviene de relaves de cobre y como el hierro tiene alto contenido de magnetita, en la textura que se encuentra el hierro es una textura diseminada, teniendo las características del mineral por la dureza que contiene el mineral de hierro, el molino de bolas se puede aplicar para casi todos los materiales de todos los grados de dureza, como también es el coste de instalación, por el mismo motivo no se utiliza un chancador ya que como viene de relaves ya viene en partículas pequeñas, el cual molino puedo seguir disminuyendo el tamaño de sus partículas.

En la etapa de concentración se utiliza el hidrociclón ya que este puede separar minerales ya sea de forma solido a líquido, liquido- liquido. Por la densidad que contiene el hierro sería el más rentable a utilizar, como este funciona con la fuerza de gravedad es fácil para la concentración de hierro ya que este tiene un peso específico alto lo cual las partículas de menor peso se irán por las colas.

## **1.2. CLASIFICACIÓN DE MINERALES**

La clasificación en la etapa de molienda consiste en la separación de un conjunto de partículas de tamaños heterogéneos en dos porciones, cada una conteniendo partículas de granulometría u otra propiedad más específica que el conjunto original. La clasificación se realiza por diferencias de tamaño y gravedad específica que origina diferentes velocidades de sedimentación entre las partículas y el fluido (agua y aire).

El objetivo de la esta etapa es separar las partículas por tamaños, la densidad de las partículas y otros factores tienen también un efecto significativo, y la operación puede concebirse con más realismo como una operación de selección más que de clasificación por tamaños.

#### 1.2.1. Tipos de clasificadores

En las plantas concentradoras se emplea la clasificación hidráulica con diferentes propósitos, y el tipo de máquina que se adopta está ligado al tipo de servicio que se desea obtener. En general, los clasificadores hidráulicos se emplean para dividir una pulpa de mineral molido en dos tipos con el objetivo de ser tratadas separadamente. Se llaman hidráulicos porque se emplea como fluido el agua, para producir la corriente ascendente, a través de la cual se efectúa la sedimentación que separa en grupos las partículas sólidas.

Existe gran variedad de aparatos de cada clase. Se usan aparatos de arena y lamas, para las diferentes clases de concentración sub siguiente o tratamientos metalúrgicos simples.

Se pueden encontrar dos tipos principales:

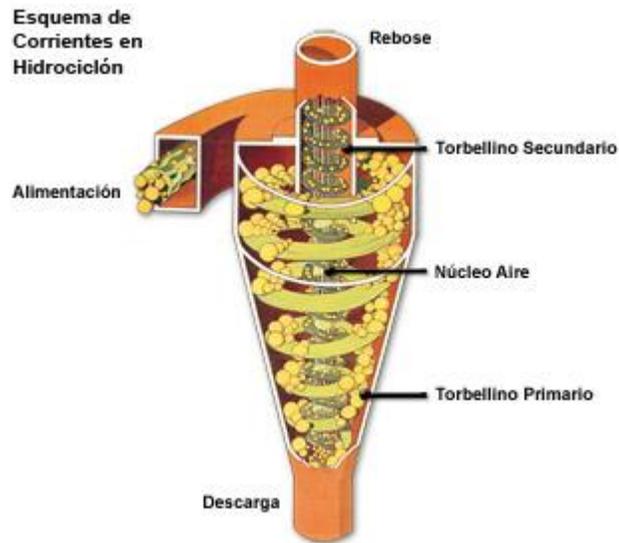
- Clasificadores mecánicos: Helicoidal y de rastrillos.
- Conos clasificadores (Hidrociclones), son de mayor uso.

#### 1.2.2. Hidrociclones

Estos equipos también son conocidos como ciclones, son aparatos estáticos que separan por tamaños los sólidos de una pulpa utilizando fuerzas centrífugas a una determinada presión ya sea bombeada o por gravedad. Las principales ventajas que ofrece son su fácil fabricación, su gran capacidad respecto al espacio que ocupa y su bajo costo de fabricación y mantenimiento comparados con los clasificadores mecánicos. Un ciclón, se especifica por el diámetro de la cámara en forma cilíndrica por la cual se alimenta la pulpa, siendo las otras dimensiones funciones de esta magnitud.

Flujos que originan la separación de partículas en el hidrociclón:

- Flujo Inferior (Torbellino Primario): la alimentación de este equipo hace que un flujo pegado a la pared interna de la sección cilíndrica y cónica se dirija hacia el vértice inferior (ápex) para salir arrastrando las partículas gruesas.
- Flujo Superior (Torbellino Secundario): Se origina debido a la gran cantidad de líquido que asciende por el núcleo central y que es forzado a salir del ciclón por el vórtex arrastrando las partículas de menor tamaño. El núcleo central es formado por el torbellino primario.



Fuente: Manual de molienda y clasificación de minerales, clasificación de minerales, [www.google.com](http://www.google.com).

Figura 1-1. Partes de un Hidrociclón

#### Partes de un Hidrociclón:

- Cámara de alimentación: Es la sección cilíndrica que recibe la pulpa a presión. La pulpa ingresa por una abertura estrecha llamada feed inlet. En la parte superior tiene acoplado un diafragma llamado vórtex Finder que se prolonga a través de una tubería por donde sale al exterior las partículas finas.
- Sección cilíndrica: Es la parte central y da la dimensión del hidrociclón.
- Sección cónica: Es la parte inferior del hidrociclón que termina en un orificio llamado ápex por donde salen las partículas gruesas al exterior del equipo. Estos dos últimos están internamente revestidos para evitar que se desgasten rápidamente, debido a la gran cantidad de arena que tiene la carga.

#### Efectos del tamaño del ápex en el flujo de descarga:

- Ápex de tamaño correcto: Da un flujo de ángulo de cono entre 20 a 30 grados, permite el ingreso de aire que saldrá por el vórtex, los gruesos descargan libremente con un porcentaje de sólidos mayor al 50 por ciento en peso y, los finos salen libremente por el vórtex.
- Ápex de tamaño muy pequeño: Permite un flujo de salida denso en forma de espiral, no permite el ingreso de aire y, obliga la salida de partículas gruesas.

- **Ápex de tamaño muy grande:** Permite un flujo de pulpa de cono muy abierto, permite la salida de mayor cantidad de agua (pulpa menos densa) y por último, genera la salida de mayor cantidad de finos.

VARIABLES RELACIONADAS CON LA PULPA ALIMENTADA:

- 1 **Porcentaje de sólidos:** Para que el proceso de clasificación sea eficaz, no debería tener un porcentaje de sólidos mayor al 40%. Pese a ello, en circuitos cerrados de molienda se utiliza un porcentaje entre el 55 y el 70 % con presiones de 12 a 16 PSI.
- 2 **Densidad:** La densidad depende de una buena clasificación. Además, para que haya una buena clasificación, la descarga del hidrociclón debe ser en forma de soga continua por un momento y en forma de ducha en otro. Cuando la densidad es baja; la pulpa que entra al hidrociclón es muy aguada, puede causar atoros en la descarga, puede sobrecargar los molinos y crear gran cantidad de carga circulante. Por otro lado, cuando la densidad es considerablemente mayor, la pulpa que entra es espesa, por lo que es necesario aumentar la cantidad de agua y se debe tener precaución con la descarga.

Cuando hay un atoro en los hidrociclones, el operador se da cuenta cuando la densidad de los molinos está muy baja, cuando además se rebalsan las bombas y se plantan las máquinas de flotación. Esto ocurre debido a; la presencia de sustancias extrañas dentro del ciclón, en ocasiones el jebe protector se levanta o se desprende del ciclón impidiendo una buena operación y su libre descarga, alimentación de carga gruesa y/o exceso de agua en la alimentación.

El atoro puede traer graves consecuencias a los equipos como; la carga se asiente en las tuberías produciendo grandes atoros, debido a la carga gruesa que se plantan las bombas produciendo derrames, paradas de molinos, pérdidas de tonelaje e ingreso de carga gruesa al circuito de flotación y, además, que la pulpa se asiente en las celdas de flotación paralizando los motores eléctricos. En caso de que un hidrociclón se atore, debe cambiarse la carga al hidrociclón de repuesto lo más rápido posible, ya sea cambiando de bomba o descargando el cajón; esto se hace después de regular la densidad, luego de desatorar cuanto antes el hidrociclón.

- 3 **Caudal de pulpa:** La capacidad o caudal de pulpa que se alimenta al hidrociclón, depende fundamentalmente del diámetro del vórtex, de la caída de presión y del porcentaje de sólidos.
- 4 **Presión de alimentación:** La caída de presión o simplemente presión, constituye la diferencia de presión entre el ingreso al hidrociclón y el rebose

que generalmente se encuentra a la presión atmosférica. Su valor está condicionado por el sistema de la bomba que alimenta al equipo.

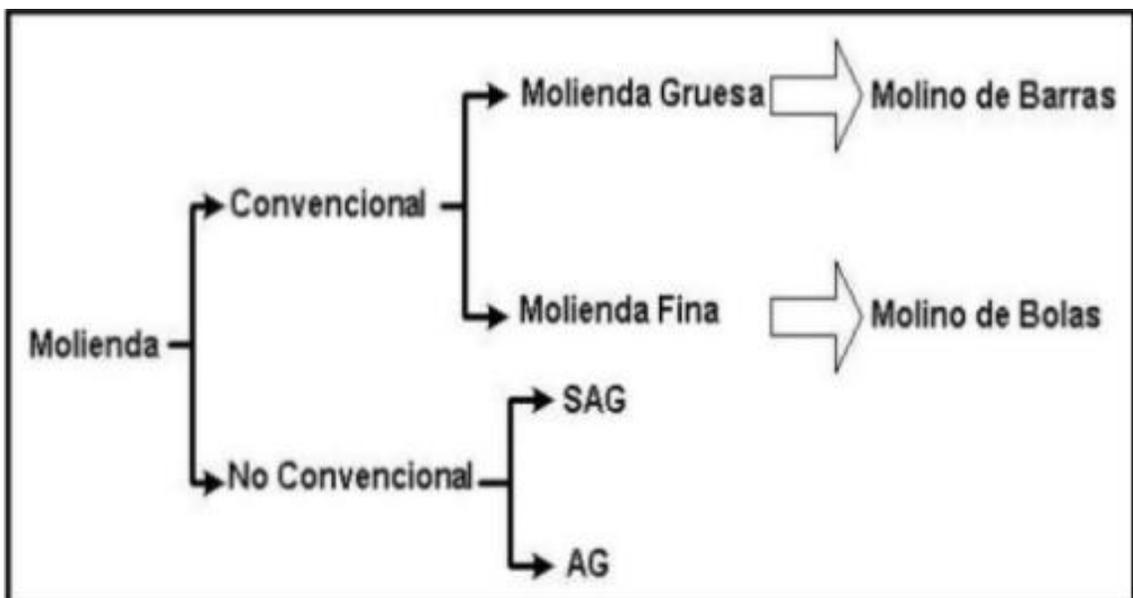
### 1.3. **MOLIENDA**

El proceso de molienda consiste en reducir el tamaño del material mineralizado a menos de 0,2 milímetros, con el fin de que éste sea adecuado para los procesos productivos posteriores como es el caso de la flotación. Los objetivos principales de esta etapa son; producir una medida que permita la liberación de la especie de interés en partículas individuales, las cuales se puedan recuperar eficientemente en el proceso posterior y, además, incrementar el área superficial con el fin de acelerar los fenómenos físicos-químicos que se deban producir posteriormente.

Generalmente, el material proviene de una planta de chancado, y posterior a ello se le adiciona agua y en ocasiones algunos reactivos, y se lleva a los molinos. Los cuales giran y las barras o bolas muelen el mineral.

#### 1.3.1. Tipos de Molienda

A continuación, se aprecia la figura 1-2, en la cual se evidencian los tipos de molienda que podemos encontrar hoy en día.



Fuente: Curso de molienda, tipos de molienda, [www..slideshare.net](http://www..slideshare.net).

Figura 1-2. Tipos de Molienda

De la imagen presentada anteriormente, podemos determinar que existen dos tipos de molienda, por un lado, contamos con la molienda convencional la cual utiliza o barras las cuales proporcionan un producto relativamente más grueso, o bolas, generalmente de aleaciones de acero las cuales reducen en mayor medida el tamaño del material. Por otro lado, podemos encontrar la molienda de tipo no convencional, la cual se subdivide en dos tipos; molienda no convencional semi-autógena (SAG) en este caso el material es reducido gracias a la acción del mismo material mineralizado presente en partículas de variados tamaños (de ahí su nombre de molienda semi autógena) y por la acción de numerosas bolas de acero, que ocupan el 12% de su capacidad. Y molienda no convencional autógena (AG) el mineral en este caso es el que hace que este mismo reduzca su tamaño ya que al chocar las partículas se fracturan disminuyendo volumen.

Siguiendo la clasificación mostrada en la figura incorporada previamente, cabe destacar que la molienda convencional y SAG, son las mejores desarrolladas en la industria, en desmedro de la molienda AG. Siendo la molienda SAG la cual posee mayores ventajas a cerca de la molienda más desarrollada y utilizada.

Además de los tipos de molienda que se mencionan anteriormente, podemos encontrar otro dos:

- Molienda Seca: Este tipo se caracteriza por generar más finos, también, produce menos desgaste de los revestimientos y medios de molienda y es adecuada cuando no se quiere alterar el mineral a moler.
- Molienda Húmeda: Generalmente se utiliza este tipo de molienda debido a que tiene un menor consumo de energía por tonelada de mineral tratado, logra una mayor capacidad del equipo, elimina problema de polvo y ruido, hace posible el uso de ciclones, espirales y harneros para una clasificación por tamaño y obtener un control del proceso, también hace posible el uso de técnicas simples de manejo y transporte de la corriente de interés en equipos como bombas, cañerías, canaletas, etc.

En este mecanismo la pulpa contiene un porcentaje de sólidos que varía entre un 60 a un 70% y su velocidad entre el 80 y 90% de la velocidad crítica (es la velocidad mínima a la cual los medios de molienda y la carga centrífuga, es decir, no tienen un movimiento relativo entre sí).

En ciclos de molienda, se pueden utilizar molinos en secuencia, generalmente se utilizan equipos para la clasificación de las partículas y que el proceso sea más efectivo. Para esto se ocupan hidrociclones en donde el "overflow" o el flujo de rebose avanza en la línea de beneficio representando la alimentación al proceso siguiente (flotación), por otro lado, el "underflow" o flujo de descarga se dirige hacia la segunda etapa de molienda la cual frecuentemente es un molino de bolas. La descarga de esta molienda se conoce como "molienda fina", esta se envía a cajones de descarga los cuales son conectados con la descarga del molino anterior (molino de barras), el producto de estos dos molinos es bombeado nuevamente

hacia los hidrociclones los cuales vuelven a hacer el trabajo de separar por tamaño el material particulado, como se menciona anteriormente el sobre tamaño recircula a la etapa de molienda, por otro lado, el fino es enviado a la etapa de flotación.

Al igual que como se ha mencionado antes, la liberación del mineral de interés, previo a la concentración, es definitivamente el proceso de mayor relevancia práctica en todo circuito, por ende, se requiere una gran inversión de capital, y por ello se refleja en los costos unitarios y determina la rentabilidad de la operación.

La molienda se realiza en molinos de forma cilíndrica que giran alrededor de su eje horizontal y que contienen una carga de cuerpos sueltos de molienda conocidos como "medios de molienda" que en definitiva son los cuales están libres para moverse a medida que este equipo gira produciendo conminución de las partículas de mena.

En este proceso, partículas de 5 a 250 milímetros son reducidas en tamaño a 10- 300 micrones, aproximadamente, dependiendo del tipo de operación que se realice.

El propósito de la operación es ejercer control en las dimensiones del producto y, por ello frecuentemente se dice que una correcta molienda es la clave de una buena recuperación del mineral de interés. Es importante recalcar que una buena molienda es trascendental para el desarrollo eficiente de la etapa de flotación y que, además, es la operación más intensiva en energía del procesamiento del mineral, por lo que se deben mencionar los tipos de circuitos que se presentan en este proceso.

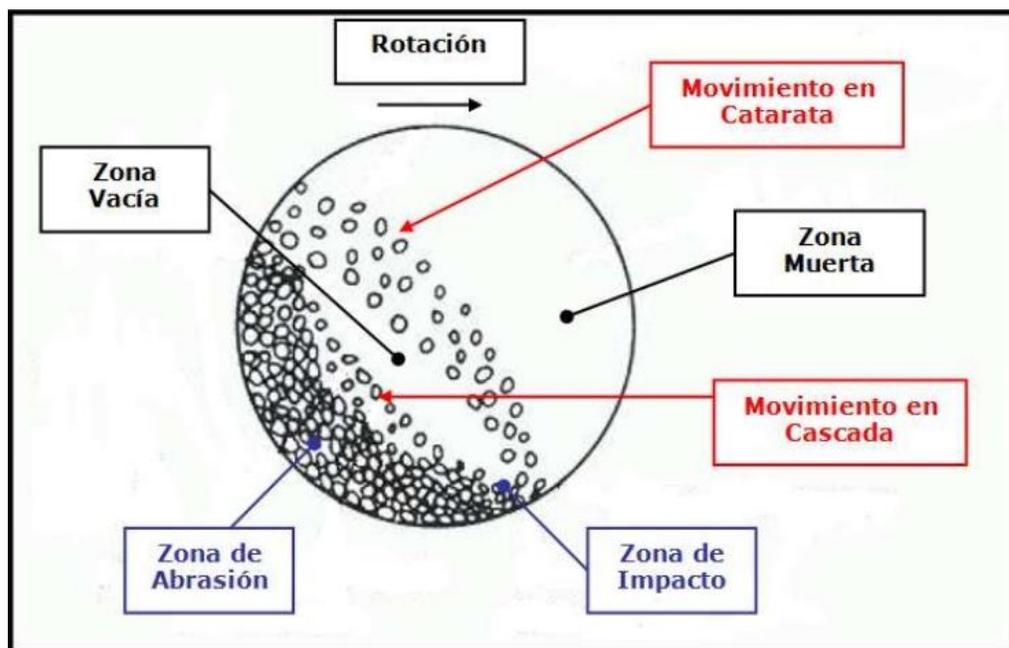
- Submolienda: Esta se produce cuando el producto de este proceso es demasiado grueso, con un grado de liberación demasiado bajo obteniéndose una recuperación y razón de enriquecimiento bajo en la etapa de concentración.
- Sobremolienda: Es cuando se reduce el tamaño de la partícula del constituyente mayoritario (generalmente la ganga) y puede reducir el tamaño del componente minoritario (comúnmente el mineral de interés) bajo el tamaño requerido para una separación más eficiente. Además, se pierde mucha energía, lo que genera un gasto innecesario para la empresa.

#### **1.4. FUNDAMENTOS DEL PROCESO**

En el proceso mencionado, las partículas disminuyen su tamaño debido a la acción del impacto y la abrasión entre ellas y las bolas o barras de los equipos.

- Impacto: Este fenómeno se evidencia cuando la energía del molino esta sobre-excedida de aquella necesaria para reducir el tamaño de la partícula. Como resultado podemos obtener muchas partículas con amplio rango de tamaños.
- Abrasión: Ocurre cuando la energía que se le aplica a la partícula es insuficiente para causar la fractura significativa en la partícula. En este caso, ocurren tensiones localizadas resultando fracturas en áreas superficiales pequeñas, dando como resultado una distribución de partículas.

En la imagen que se incorpora a continuación, se observa claramente los fenómenos mencionados anteriormente.



Fuente: Curso de molienda, movimiento de la carga en los molinos, [www.slideshare.net](http://www.slideshare.net).

Figura 1-3. Abrasión e Impacto

En la figura 1-3 Se aprecia como en las zonas inferior izquierda y derecha se encuentran las áreas de abrasión e impacto respectivamente, la primera de ellas producidas por el choque de las partículas tanto con los medios de molienda como con el mismo material, por otro lado, el impacto se produce cuando las partículas y medios de molienda caen por efecto de la rotación y se genera el golpe con la parte inferior del molino.

Se pueden distinguir claramente tres tipos de movimiento de los medios de molienda en un molino rotatorio:

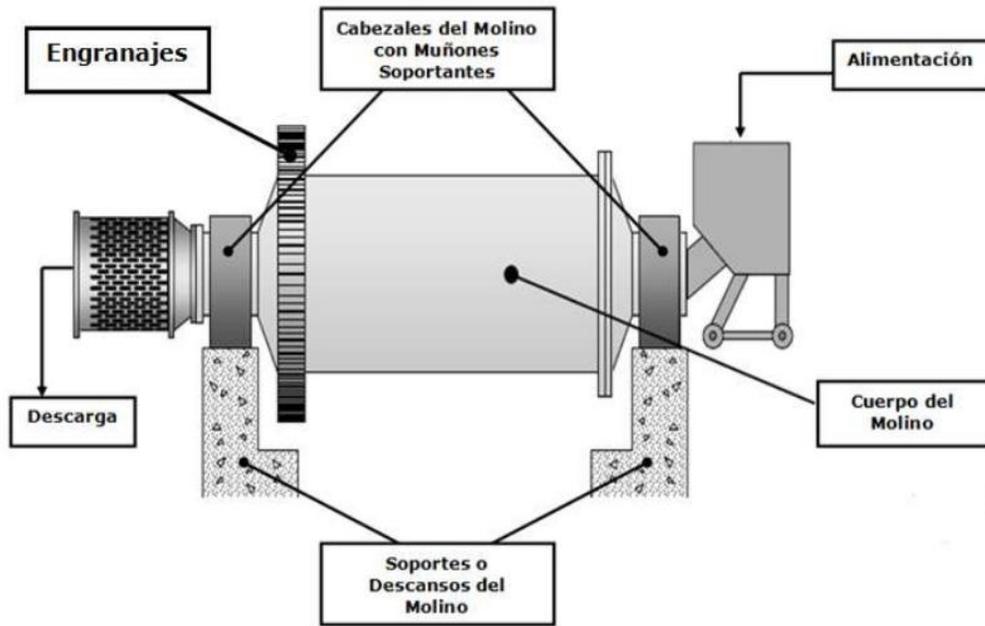
- I. Rotación alrededor de su propio eje.

- II. Caída en cascada, donde los medios bajan rodando por la superficie de los otros cuerpos.
- III. Caída en catarata que corresponde a la caída libre de los medios de molienda sobre el "pie" de la carga.

La magnitud del elevamiento que sufren los medios de molienda depende de la velocidad de rotación del equipo y del tipo de revestimiento de este mismo. A velocidades bajas, los medios de molienda tienden a rodar hacia el pie del molino y la conminución que ocurre es principalmente abrasiva. Esta caída en cascada produce molienda más fina, con gran producción de polvo y aumento del desgaste del revestimiento. Por el contrario, a velocidades mayores, los cuerpos de molienda son proyectados sobre la carga para describir una serie de parábolas antes de llegar al "pie" de la carga. Esta caída en catarata produce conminución por impacto obteniéndose un producto más grueso con menos desgaste en el revestimiento.

La velocidad crítica del molino es la velocidad mínima a la cual la capa exterior de los medios de molienda se adhiere a la superficie interior del cilindro debido a la fuerza centrífuga. A esta velocidad la fuerza centrífuga es junto balanceada por el peso de los medios de molienda. Normalmente el rango de trabajo es entre 70-80 % de la velocidad crítica. En otras palabras, la velocidad crítica es la velocidad del molino a la que la fuerza centrífuga mantiene todo el material en las paredes del molino y evita la acción de la caída en catarata y cascada que se requiere para la molienda.

Estructuralmente cada tipo de molino consiste en un casco cilíndrico, con revestimientos renovables y una carga de medios de molienda. El tambor es soportado en muñones huecos fijos a las paredes laterales de modo que puede girar en torno a su eje. El diámetro del molino determina la presión que puede ejercer el medio en las partículas de mena y, en general, mientras mayor es el tamaño de la alimentación mayor debe ser el diámetro. La longitud del molino, junto con el diámetro, determina el volumen y por consiguiente la capacidad del equipo.



Fuente: Curso de molienda, molino de bolas, [www.slideshare.net](http://www.slideshare.net).

Figura 1-4. Esquema de los molinos

### 1.5. FACTORES QUE AFECTAN LA EFICIENCIA DE LA MOLIENDA.

- La densidad de la pulpa alimentada debería ser lo más alta posible, pero con un flujo fácil garantizado a través del molino. Es esencial que las bolas estén cubiertas con una capa de mena para minimizar el contacto metal-metal; una pulpa demasiado diluida aumenta este tipo de contacto aumentando el consumo de acero y disminuyendo la eficiencia. El rango de operación normal de los molinos es entre un 65-80% de sólidos en peso, dependiendo de la mena. La viscosidad de la pulpa aumenta con la fineza de las partículas, por ende, los circuitos de molienda fina requieren densidad de pulpa menor.
- La eficiencia de la molienda depende del área superficial del medio de molienda. En el caso de las bolas como medio de molienda, estas deberían ser lo más pequeñas posible y la carga debería ser distribuida de modo que las bolas más grandes sean justo lo suficientemente pesadas para moler la partícula más grande y dura de la alimentación. Una carga balanceada consistirá en un amplio rango de tamaños de bolas y las nuevas agregadas al molino generalmente son del tamaño más grande requerido. Las bolas muy pequeñas dejan el molino junto con la mena molida y pueden separarse haciendo pasar la descarga por harneros.

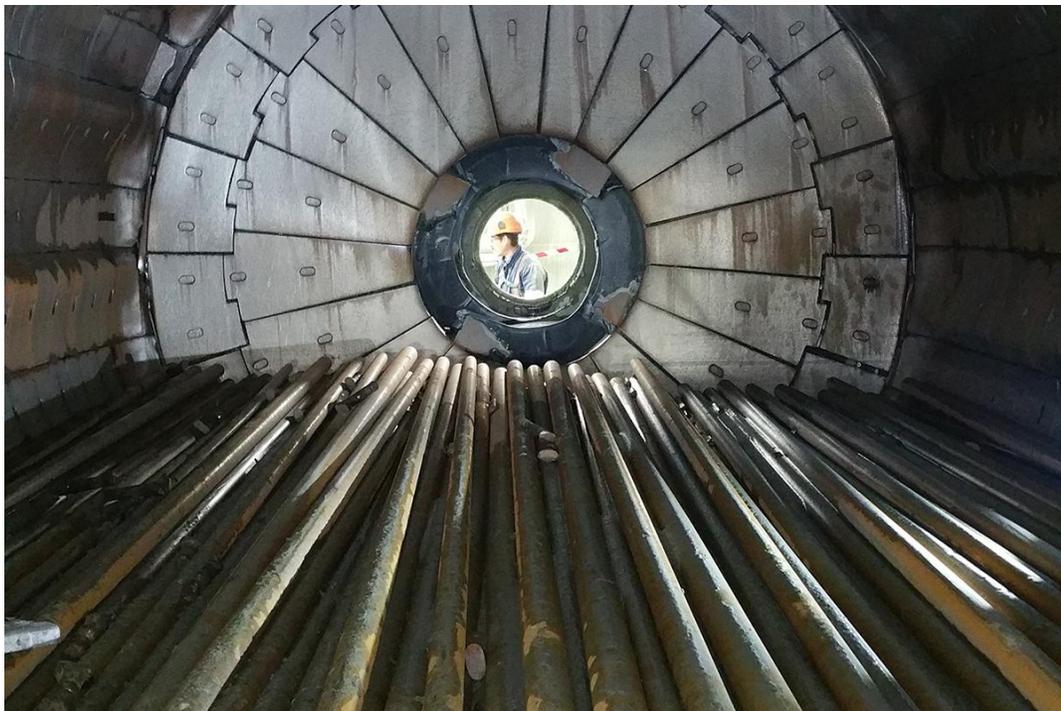
## 1.6. TIPOS DE MOLINOS

### 1.6.1. Molino de barras

equipo tiene en su interior barras de acero que son los elementos de molienda. El molino gira con el material proveniente del chancador terciario, que llega continuamente por una correa transportadora. El material se va moliendo por la acción del movimiento de las barras que se encuentran libres y que caen sobre el mineral. El mineral molido continua el proceso, pasando en línea al molino de bolas.

Cabe destacar que la molienda convencional ha ido paulatinamente perdiendo camino con relación a la molienda SAG debido a la imposibilidad que presentan los molinos de barras de crecer a dimensiones mayores, y por consiguiente aumentar su capacidad de tratamiento.

Esta imposibilidad se debe a los problemas operacionales que genera la necesidad de utilizar barras de longitudes mayores, las cuales se doblan y se enredan.



Fuente: Industria minera, emplacado molino de barras, [www.mimese.es](http://www.mimese.es).

Figura 1-5. Molino de Barras en su interior

### 1.6.2. Molino de bolas

Considerada como la molienda fina, en esta etapa el mineral es reducido de tamaño por la acción de bolas de acero, estas bolas deben ser lo suficientemente grandes para moler partículas más grandes y duras de mineral. Los medios de molienda ocupan aproximadamente el 35% de la capacidad del molino. La descarga de este molino se junta con la descarga del molino de barras y constituyen la alimentación de la clasificación por medio de ciclones.



Fuente: Mastranza y metalurgica bafer, molino de bolas, [www.pictureicon.com](http://www.pictureicon.com).

Figura 1-6. Molino de Bolas en su interior

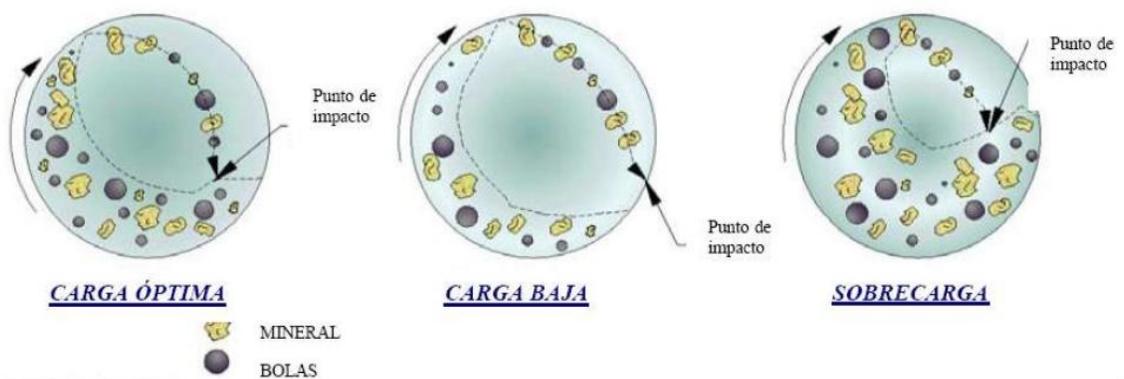
### 1.6.3. Molino SAG

La instalación de la molienda SAG constituye una innovación reciente de algunas plantas. Los molinos SAG (Semi autógenos) son equipos de mayores dimensiones (40 x 22 pies y siguen aumentando) y más eficientes que los molinos de barras. Gracias a su gran capacidad, acortan el proceso de chancado y molienda.

El término SAG es acrónimo para "semiautogenous grinding mil" que significa molino semiautógeno de molienda. El término "autógeno" se refiere a que toda la acción de molienda es realizada por la frotación de mineral en sí, en este caso al ser semi autógeno, requiere de una cantidad mínima de bolas (12% de la capacidad del molino).

El tamaño de reducción se logra por la trituración del mineral y molienda de otras partículas de mineral. En los molinos completamente autógenos no existen bolas de molienda elaboradas en base a acero.

En este tipo de molinos, el mineral se recibe directamente desde el chancador primario (no del terciario como en la molienda convencional) con un tamaño cercano a las 8 pulgadas (20 cm. aproximadamente), y se mezcla con agua y cal. Dados el tamaño y forma del molino, estas bolas son lanzadas en caída libre cuando el molino gira, logrando un efecto conjunto de chancado y molienda más efectivo y con menor consumo de energía por lo que, al utilizar este equipo, no se requieren las etapas de chancado secundario ni terciario. Este molino, está diseñado como un sistema de circuito cerrado de molienda. Esto significa que las partículas de mineral no pueden abandonar el equipo hasta que su tamaño haya sido reducido lo suficiente para permitirles atravesar las parrillas de descarga y los harneros ubicados en el extremo de la descarga del molino.



Fuente: Curso molienda, movimiento de carga SAG, [www.slideshare.net](http://www.slideshare.net).

Figura 1-7. Movimiento de la carga al interior del molino SAG, para diferentes niveles de llenado

Mantener el nivel adecuado de carga en el molino es uno de los elementos más relevantes para una correcta molienda. La modificación en la velocidad de un molino es una importante variable de control de la operación de este proceso. El operador debe asegurarse de que los revestimientos estén protegidos del impacto directo de las bolas. Esto se consigue manteniendo una cama de mineral en la que las bolas caen durante la acción de caída en catarata. Mientras más blando el mineral, más rápido se triturará.

Bajo condiciones de mineral blando y a velocidades normales, es difícil mantener una cama de mineral y evitar que los circuitos de descenso reciban demasiado flujo de pulpa. En este caso, el operador puede hacer más lento el molino. De esta forma, se reducen las tasas de molienda y se mantiene la cama de mineral en el molino. Por otro lado, si el mineral es más duro, el operador puede

aumentar la velocidad del molino. Esto aumenta la acción de catarata que a su vez aumenta la tasa a la que el mineral es triturado. Por lo tanto, utilizando la velocidad del molino, el operador puede modificar la tasa de trituración y proteger los revestimientos del equipo.



Fuente: Informe molino SAG de universidad católica de chile, [www.7.uc.cl](http://www.7.uc.cl),

Figura 1-8. Molino SAG



**CAPITULO 2: CONCENTRACIÓN MAGNÉTICA EN EL PROCESO**  
**PRODUCTIVO DE CAP**



## 2. CONCENTRACIÓN MAGNÉTICA EN EL PROCESO PRODUCTIVO DE CAP

Si bien en el presente estudio se enfoca en la etapa de clasificación y molienda, es trascendental para el estudio recalcar los procesos de concentración magnética, debido a que este proceso de ser factible la implementación, será parte de la etapa de molienda, por ende, se requiere de la explicación e identificación de los procesos productivos relevantes de la planta magnetita, ya que, sin ellos no se obtendrá el producto esperados por los compradores. Por lo anterior, las fases descritas previamente se presentan en la fotografía que se muestra a continuación.

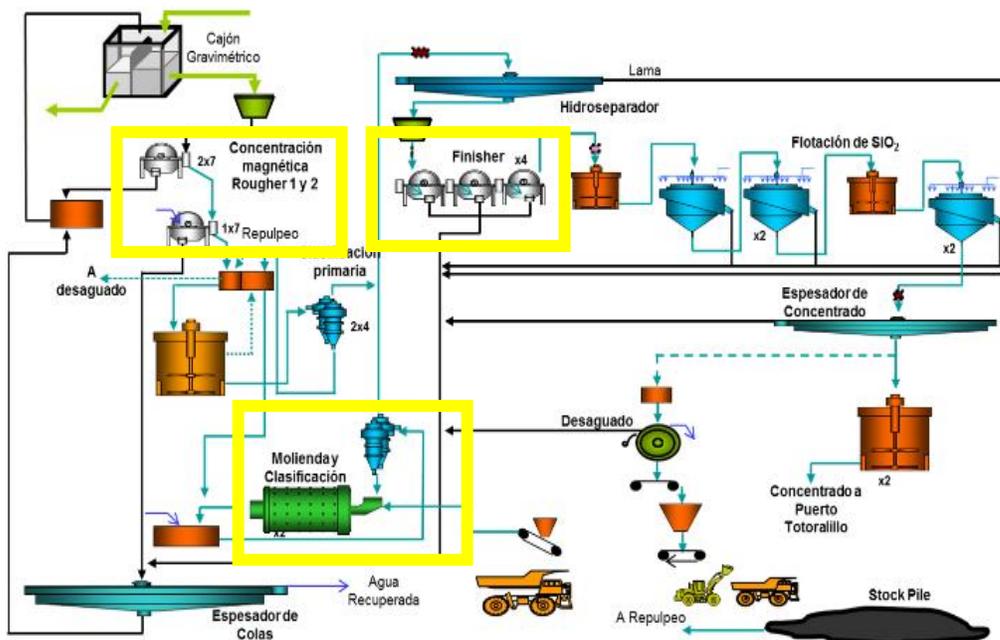


Figura x. Diagrama de flujos, Planta Magnetita.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-1. Diagrama de flujos del proceso productivo de planta magnetita, CAP

En la figura 2-1, se destacan en rectángulos amarillos las etapas trascendentales de evaluación en el proceso productivo. En primera instancia se encuentra el proceso de concentración magnética Rougher, en ella al igual que en el proceso de concentración de flotación el formato rougher busca concentrar la mayor cantidad de mineral magnético no se propone concentrar teniendo como parámetro la calidad sino la cantidad de material que se obtiene, por ello el gausaje involucrado es mayor, vale destacar que a mayor grado de campo magnético se concentrará con mayor facilidad el mineral útil, teniendo un problema, que al poseer

menor selectividad es probable que parte de la ganga se arrastre por las grandes cantidades de mineral que se adhieren a las zonas imantadas. Por otro lado, se hace mención a la etapa de clasificación y molienda, en la cual es la más importante en este estudio ya que será la cual se busca modificar con el fin de mejorar la eficiencia. Finalmente, se hace énfasis en la etapa concentración magnética Finisher, nuevamente al igual que en flotación es una etapa de repaso a la pulpa que circula en el proceso productivo. Esta se realiza previo a la flotación inversa, la cual se enfoca en la flotación de las impurezas siendo el concentrado lo que queda del vaciado de la espuma.

## **2.1. CONCENTRACIÓN DE MINERALES**

La concentración de minerales se expresa básicamente en la operación en la cual se eleva la concentración en porcentaje de una mena o mineral determinado en este caso sería el de mineral de hierro, esto se hace mediante el uso de equipos de separación produciéndose así la segregación de dos o más especies mineralógicas y generar una corriente enriquecida en un mineral de interés.

Se pueden implementar mediante dos métodos de separación:

### **2.1.1. Métodos que emplean propiedades físicas o volumétricas de las sustancias de minerales**

La tecnología que asocia a estos métodos se caracteriza por ser fundamentalmente dependientes por el tamaño de partículas y las propiedades diferenciales que generan la separación.

- Diferencia de velocidad de sedimentación, a través de la diferencia de densidad de los sólidos, la cual se refiere a la concentración gravimétrica se puede utilizar mediante aparatos llamados sedimentador, hidrociclones, mesa vibratoria entre otros.
- Quedarse adherido o saltar de una placa metálica, por diferencias en la conductividad eléctrica cuando las partículas están dentro de un campo eléctrico, se realiza a través de concentración eléctrica, como se deduce, la propiedad que se emplea para separar mineral en este caso es la conductividad eléctrica y el principal aparato utilizado es el separador eléctrico de alta densidad.
- Diferencia de movimiento en un campo magnético de intensidad variable a través de la diferencia de la susceptibilidad magnética de los minerales, la

cual llamamos concentración magnética y es en el que se basa el actual trabajo de investigación, la propiedad que se utiliza para esta concentración es la atracción o no frente a un magneto u imán.

### 2.1.2. Métodos que usan propiedades físico químicas de superficie

- La adsorción o no de agua en la superficie del sólido, por lo tanto, los que adsorban agua se humectan y otros que no se humectan los que no adsorben agua como lo es el azufre serán rechazados por el medio acuoso y si se les coloca cerca una burbuja de aire saldrían embebidos en esta y flotarían.
- Adsorción selectiva se un tenso activo de tal manera que se produzca una aglomeración selectiva un mineral o varios minerales y mantener dispersos a los demás minerales acompañantes, lo cual es muy útil cuando se procesan minerales de tamaños de granos ultra finos y coloidales, en cada uno de los casos, si el tensoactivo es un polímero se conoce el proceso como floculación selectiva y si es un ion formando un complejo inorgánico se conoce como coagulación selectiva.

## 2.2. **IMPORTANCIA DE LA CONCENTRACIÓN DE MINERALES**

La concentración de minerales es una etapa intermedia en el contexto de la metalurgia extractiva y algunas veces la etapa final de algunas plantas, la etapa de concentración recibe un material que haya alcanzado un buen grado de liberación, elevando su tenor y lo pasara a etapas siguientes bien sea, de procesos pirometalúrgicos o hidrometalúrgicos. La importancia de la concentración de los minerales radica en varios aspectos:

- Elimina del circuito planta, minerales que no poseen riqueza alguna y que generan costos de manejo y tratamientos para la empresa, como las gangas o minerales acompañantes.
- Eliminan del circuito, minerales cuya presencia pueda presentar consecuencias negativas en el proceso de extracción metalúrgica siguiente como piritas y materia orgánica.
- En algunas ocasiones el producto obtenido de la concentración ya es un material con valor industrial y comercial.

### 2.3. CONCENTRACIÓN MAGNÉTICA

La separación magnética de menas de hierro ha sido utilizada por casi 200 años, empleando para ello, una amplia variedad de equipos. Los separadores magnéticos aprovechan la diferencia en las propiedades magnéticas de los minerales componentes de las menas. Todos los materiales se alteran en alguna forma al colocarlos en un campo magnético, aunque en la mayor parte de las sustancias, el efecto es demasiado.

Los materiales se clasifican en dos amplios grupos, según los atraiga o los repele un magneto:

- **Diamagnéticos:** Propiedad de los materiales por la cual se magnetizan débilmente en sentido opuesto a un campo magnético aplicado. Los materiales diamagnéticos son repelidos débilmente por los imanes. El magnetismo inducido desaparece si lo hace el campo aplicado. Todos los materiales poseen diamagnetismo, pero el término diamagnético sólo se utiliza para aquéllos en los que esta propiedad no está enmascarada por otro tipo de efecto magnético.



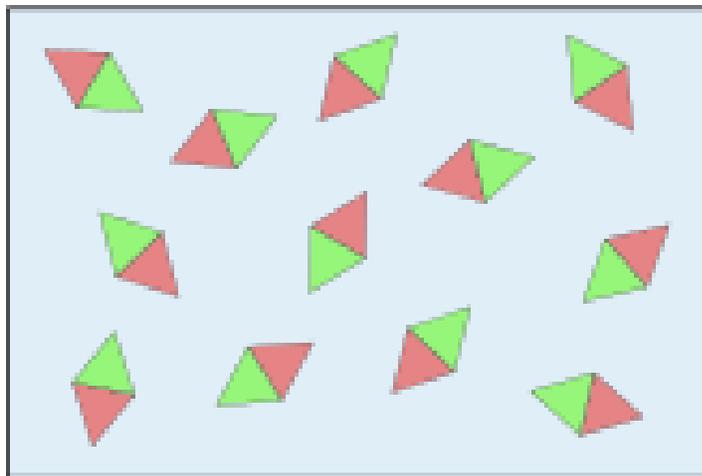
Fuente: Diamagnetismo, materiales diamagnéticos, [www.ecured.cu](http://www.ecured.cu).

Figura 2-2. Material diamagnético

En la figura 2-2 se puede observar el fenómeno producido por el cual se magnetizan débilmente en el sentido opuesto a un campo magnético aplicado, es por ello que el material se repele al momento de acercarlo a un campo magnético.

- Paramagnéticos: es la tendencia de los momentos magnéticos libres a alinearse paralelamente a un campo magnético. Si estos momentos magnéticos están fuertemente acoplados entre sí, el fenómeno será ferromagnetismo o ferrimagnetismo. Cuando no existe ningún campo magnético externo, estos momentos magnéticos están orientados al azar. En presencia de un campo magnético externo tienden a alinearse paralelamente al campo, pero esta alineación está contrarrestada por la tendencia que tienen los momentos a orientarse aleatoriamente debido al movimiento térmico. Se denomina materiales paramagnéticos a los materiales o medios cuya permeabilidad magnética es similar a la del vacío.

Los materiales paramagnéticos sufren el mismo tipo de atracción y repulsión que los imanes normales, cuando están sujetos a un campo magnético. Sin embargo, al retirar el campo magnético, la entropía destruye el alineamiento magnético, que ya no está favorecido energéticamente. Es decir, los materiales paramagnéticos son materiales atraídos por imanes, pero no se convierten en materiales permanentemente magnetizados.



Fuente: Paramagnetismo, prueba magnética, [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org).

Figura 2-3. Partículas de material paramagnético

En la figura 2-3 se pueden observar las partículas de los minerales paramagnéticos en donde los campos magnéticos se alinean, en este caso estas partículas como están ordenadas quieren decir que no hay un campo magnético lo cual no hay atracción ni repulsión, pero al momento de agregar un campo magnético estas se ordenaran produciendo los efectos de esta que es el magnetismo con las mismas propiedades de un imán.

El ferromagnetismo se considera como un caso especial de paramagnetismo. Los minerales ferromagnéticos tienen muy alta susceptibilidad magnética para las fuerzas magnéticas y retienen algún magnetismo cuando se alejan del campo (remanencia). Estos materiales se pueden concentrar en los separadores magnéticos de baja intensidad.

### 2.3.1. Principales usos de separación magnética

En la separación magnética la unidad más comúnmente usada es el Gauss (G). La fuerza magnetizadora que induce las líneas de fuerza a través de un material se llama intensidad de campo.

La capacidad de un magneto para elevar un mineral particular depende no solamente del valor de la intensidad de campo, sino también del gradiente de campo, es decir, de la velocidad a la cual aumenta la intensidad de campo hacia la superficie magnética.

Los imanes permanentes no requieren de energía exterior, las aleaciones especiales de estos imanes continúan produciendo un campo magnético a un nivel constante en forma indefinida después de su carga inicial, a menos que sean expuestos a influencias desmagnetizadoras.

Los separadores magnéticos pueden ser del tipo electroimanes o imanes permanentes. Los electroimanes utilizan vueltas de alambre de cobre o de aluminio alrededor de un núcleo de hierro dotado de energía con corriente directa.

En el separador se deben incorporar las medidas necesarias para regular la intensidad del campo magnético y así permitir el tratamiento de varios tipos de materiales. Esto se logra fácilmente en los separadores electromagnéticos variando la corriente, mientras que en los separadores que utilizan magnetos permanentes, se puede variar la distancia interpolar.

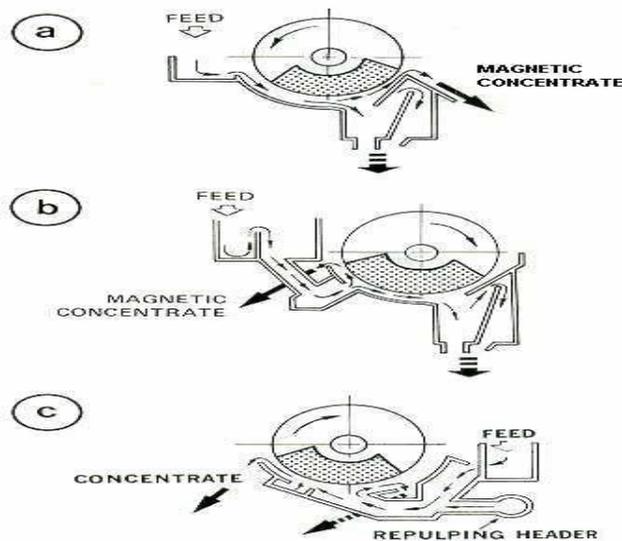
La introducción de nuevas aleaciones magnéticas, normalmente incorporando uno o más elementos tierras raras, ha permitido a los separadores magnéticos operar con campos magnéticos mucho mayores que los normales, posibilitando la aplicación a menas que contienen minerales levemente magnéticos.

### 2.3.2. Separadores magnéticos que operan como concentradores y purificadores

Existen tres separadores magnéticos por vía húmeda más frecuentemente usados:

- Separadores de tambor con magnetos permanentes y electromagnéticos: estos separadores se pueden utilizar magnetos permanentes o electro magnetos, sin embargo, la tendencia actual es la sustitución de estos últimos por magnetos permanentes debido a los avances y desarrollos que se han alcanzado con nuevos materiales, por ejemplo, los magnetos de

tierras raras, estos pueden ser del tipo concurrente, contra-rotación y contracorriente.



Fuente: Concentración magnética, separador magnético, [www.slideshare.net](http://www.slideshare.net).

Figura 2-4. Separadores de tambor con magnetos permanentes

En la figura 2-4 se encuentran los tres tipos de separadores de tambor en los cuales se encuentra de tipo concurrente, contra rotación y contracorriente.

- **Filtros magnéticos:** Los filtros magnéticos incorporan un elemento filtrante inductivamente magnetizado por un electroimán externo o fuente permanente. El material por limpiar se hace pasar a través de este elemento, en el que son recogidas las partes magnéticas. Periódicamente, el elemento filtrante tiene que ser desmontado y limpiado, para sacar las partículas magnéticas acumuladas
- **Separadores magnéticos de alta intensidad:** El desarrollo de los separadores magnéticos de alta intensidad en húmedo fue uno de los hechos más importantes del punto de vista económico, en la historia de la tecnología de la separación de minerales. La posibilidad de beneficiar grandes masas de menas débilmente magnéticas, principalmente menas de hierro, con alta recuperación, inclusive en las fracciones ultra-finas (menores que 200 mallas), solo fue alcanzada con el desarrollo de estos separadores magnéticos continuos en húmedo.

Si bien dentro de ellos no se ha mencionado, en grandes industrias mineras son requeridos para sus procesos. Es el caso del Tubo Davis, un equipo que utiliza grandes magnetos para poder concentrar minerales.

La técnica aplicada para utilizar el equipo mencionado consiste en;

1. Pesar la muestra problema de acuerdo a la tabla que se incorpora a continuación y adicionarlo al vaso precipitado de 250 ml.

Tabla 2-1. Peso de acuerdo con el porcentaje de Hierro

Muestra	Peso inicial (gramos)
Alimentación	20.00
Concentrado	10.00
Cola	20.00

Fuente: Elaboración propia.

2. Llenar el tubo Davis con agua hasta la altura de los imanes, estrangulando la salida inferior del tubo utilizando las pinzas y así evitar el vaciado de este.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-5. Modo de llenar el tubo Davis

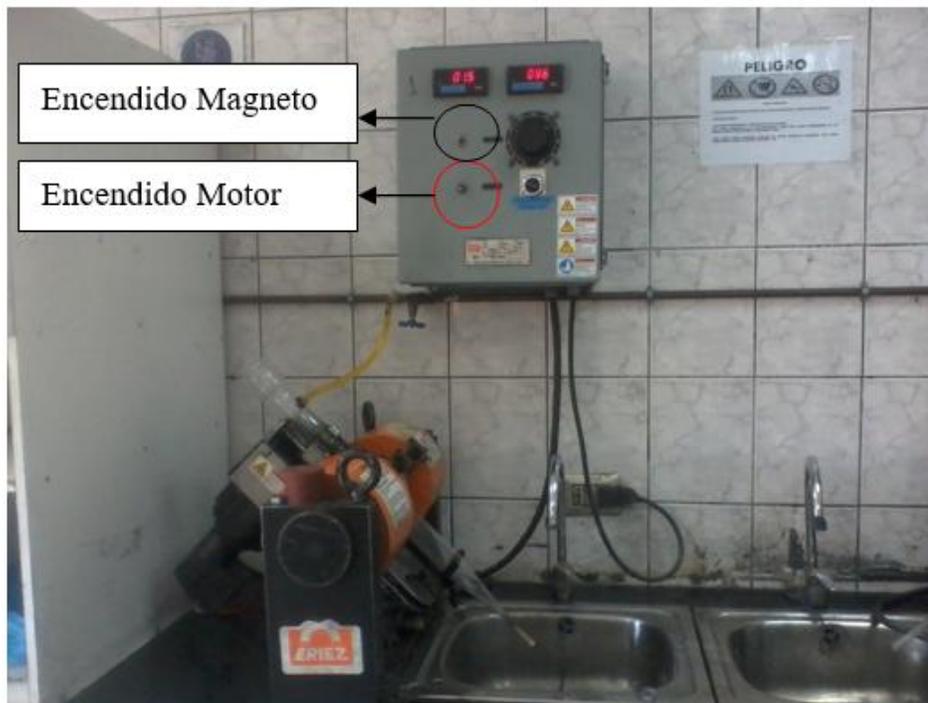
3. Hacer una pulpa agregando agua hasta  $\frac{1}{4}$  de vaso precipitado utilizando la muestra problema
4. Trasvaciar la pulpa a tubo Davis utilizando embudo y ayudando con piseta.
5. Continuar llenando con agua el tubo Davis hasta la altura de entrada de agua y colocar tapón, siempre manteniendo el flujo del agua.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-6. Tubo Davis con tampón y flujo de agua libre

6. Una vez regulado el nivel de agua en el tubo, se activa el motor para comenzar el movimiento



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-7. Equipo tubo Davis Eriez Magnetics 19061, 20061

7. El ensayo tiene una duración de diez minutos, con un flujo de agua de  $600 \pm 100$  ml/seg y  $110 \pm 10$  golpes/min, de tolerancia.
8. Una vez transcurrido este tiempo, se detiene el motor (sin desconectar el magneto debido a que si llegaran a desactivarse el tubo no retendría la fracción de muestra magnética), se procede a levantar el tubo acercando un vaso precipitado a la parte inferior del tubo para que la muestra no se desperdicie y se vierte el contenido de este en un vaso posicionado sobre un imán adaptado para esta actividad.



Posición de vaso sobre imán

Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-8. Trasvasije del concentrado magnético a un vaso precipitado

9. El material magnético decapcionado en el vaso precipitado se lleva a la placa calefactora para secar la muestra.
10. Una vez seco, se deja enfriar a temperatura ambiente, luego de ello se masa el material magnético retenido, sobre un vidrio reloj, en balanza analítica.
11. Por último, calcular el %Dtt de acuerdo a la ecuación que se incorpora a continuación.

Donde:

% Dtt: porcentaje de material magnético en la muestra

Pr : peso retenido en el magneto del equipo

Pi : peso inicial de muestra problema

En el presente proyecto este equipo es sumamente requerido, debido a que gracias a él se pueden realizar pruebas permitiendo conocer como funcionarían los proyectos, es el caso puntual de esta investigación este ensayo permite determinar la cantidad de Hierro magnético que es posible concentrar de las muestras provenientes de la descarga del molino. Cabe mencionar, que para poder comprobar de forma práctica las teorías se deben realizar una serie de investigaciones ya que es arriesgado poner en marcha un proyecto invirtiendo tiempo y dinero en un proceso que no se sabe si realmente darán los resultados esperados. Por ende, el ensayo de tubo Davis reemplaza lo que serían los concentradores magnéticos utilizados para concentrar la descarga de los molinos en la etapa de clasificación y molienda.

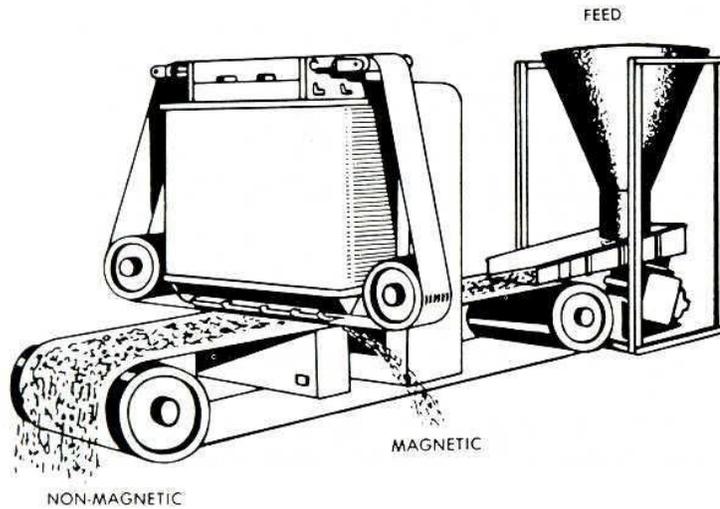
Las aplicaciones principales de los separadores magnéticos de alta intensidad en húmedo son las siguientes:

- Producción de un concentrado magnético cuando el mineral magnético es el producto requerido.
- Mejoramiento de las leyes por la remoción de impurezas cuando el mineral no magnético es el producto requerido.
- Preconcentración para un tratamiento adicional por un proceso diferente.

También podemos encontrar separador magnético vía seca como lo es, el separador magnético de banda transversal de alta densidad.

Este coge los materiales magnéticos y la quita de la cinta de alimentación descargándolos en un lado. La concentración es por elevación directa, y el producto magnético es limpio y libre de materiales no magnéticos atrapados. La banda transversal ha sido utilizada para concentrar wolframita, monacita, y otros productos minerales de valor. Son equipos de baja capacidad. Sus principales aplicaciones se encuentran:

- Recuperación de minerales finos no magnéticos (rutilo) desde relaves magnéticos molidos.
- Concentración de minerales no magnéticos (casiterita) desde minerales magnéticos.
- Producción de wolframita, tantalita y otros minerales magnéticos de alto valor unitario.



Fuente: Concentración magnética, cintas transportadoras, [www.slideshare.net](http://www.slideshare.net).

Figura 2-9. Cinta transportadora

En la Figura 2-9 se muestra las cintas en donde separa los minerales magnéticos por una parte y por otra los no magnéticos.

Esta tecnología de concentración magnética se busca incorporar con el fin de aprovechar otros minerales presentes en relaves de mineral de cobre. Específicamente se propone evaluar técnicamente la potencialidad de recuperación de hierro en relaves de cobre. Estos residuos líquidos industriales del proceso de concentración metalúrgico son considerados un costo de producción y es el mayor pasivo industrial en las compañías mineras. Por tanto, todo gasto asociado al relave corresponde a una pérdida en las utilidades del negocio.

El relave de la industria del cobre de Chile tiene presente un conjunto de subproductos que generalmente no son explotados comercialmente. La minería del cobre produce más de 500 millones de toneladas de relave que se traduce en un pasivo ambiental. Uno de ellos es el Hierro. Evidencias Geológicas indican que la concentración de Hierro Magnético en estas minas no es despreciable y la aplicación del proceso adecuado a la Geometalurgia de estos depósitos podría ayudar a disminuir las toneladas de relaves y como consecuencia reducir los costos operacionales de estos.

La idea de recuperar Hierro desde tranques de relave de mineral de cobre no es nueva sin embargo los resultados no han sido los esperados. Las causas pueden deber; desconocimiento del mineral presente en el relave por falta de estudios geometalurgicos, diseño inapropiado de sistemas de recuperación del mineral de hierro en relaves (Baja ley, partículas muy finas, baja alimentación de materia magnética, baja susceptibilidad magnética, entre otras,), Tecnología que no es adecuada para las propiedades magnéticas del mineral presente en el relave.

Codelco reporto que el 55% de sus costos provenían del gasto por extracción, concentración y disposición de relaves. Se podría decir entonces, que Codelco produjo más de 150 millones de toneladas de relave a un costo aproximado

de 8 Us\$/tm. Si se supone que el Hierro magnético presente en estos depósitos corresponde solo al 5% del total del material, entonces 25 millones de toneladas de Hierro magnético pudieron ser tratados, más de tres veces la producción nacional de Hierro en el año 2011.

Por lo mencionado anteriormente, se quiere recalcar la importancia de este proceso no tan solo por el beneficio económico que genera para las industrias, sino también por la disminución de impactos ambientales que ha generado debate.

El presente trabajo no busca plasmar ideas sobre el tratamiento de relaves de hierro puesto que la empresa CAP ya incorporó estas técnicas en su proceso productivo. Se quiere dar a conocer los beneficios que conlleva los proyectos que obtienen sustentabilidad económica a partir de un residuo industrial tan dañino para el medio ambiente como lo son los depósitos de relaves industriales.

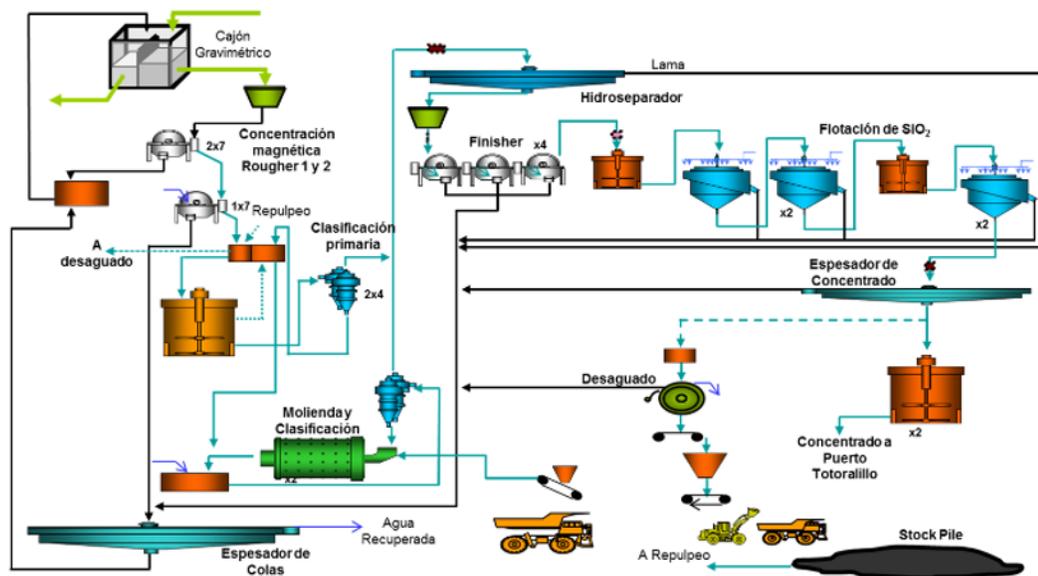
**CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN DE LA FACTIBILIDAD TÉCNICA**



### 3. EVALUACIÓN DE LA FACTIBILIDAD TÉCNICA

#### 3.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO DE PLANTA MAGNETITA

Hoy en día, la empresa Minera Hierro Atacama (MHA), más conocida como CAP minería, cuenta con un proceso productivo el cual se enfoca en la producción de mineral de hierro, el producto final posee una concentración del 66% de Hierro teniendo un diámetro de partículas bajo la malla 325 Tyler. El mineral tratado es la magnetita, es por ello por lo que la división ubicada en Tierra Amarilla recibe el nombre de Planta Magnetita. Esta empresa produce alrededor de tres millones de toneladas de concentrado de Hierro anualmente.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-1. Flow sheet de Planta Magnetita, Cap

En la figura 3-1, se puede observar como se distribuyen las distintas etapas. Sin embargo, es relevante complementar dicha imagen con la descripción del proceso productivo. La compañía cuenta con una serie de etapas consecutivas; en primera instancia lo que se requiere es el transporte del relave desde el depósito de la Compañía Contractual Minera Candelaria (CCMC), esta pulpa alimenta un estanque gravimétrico, por medio de gravedad alimenta a dos líneas paralelas de concentración magnética rougher, el relave se bombea al estanque de relaves de CCMC (candelaria). Por otro lado, el concentrado es repasado a una segunda etapa de concentración magnética rougher donde alcanza una concentración aproximada

del 25% Fe. El concentrado de la segunda etapa en conjunto con el concentrado de repulpeo, pasan al cajón 180 enviados posteriormente a estanque agitador. Este último alimenta dos baterías de clasificación primaria, underflow (bajo malla) depositado en el cajón "275", se disminuye su porcentaje de sólidos para enviarlo a molienda.

Este flujo y el flujo de salida de molienda son enviados a cajón "275", luego enviados a la batería de clasificación secundaria, el underflow alimenta al molino y el overflow en conjunto con el overflow de la clasificación primaria son enviados a un hidroseparador. Este equipo es el encargado de eliminar las impurezas deslamándolas, en este caso la sílice.

El concentrado es enviado a limpieza, en esta etapa el concentrado con contenido entre 59-60% Fe es sometido a flotación neumática inversa para posteriormente lograr un concentrado final con un 65% Fe.

Finalmente, el concentrado final es espesado y almacenado en agitadores, se adiciona cal para aumentar el Ph=10 con la finalidad de que el producto no dañe las cañerías por donde es transportado hasta el puerto. Las colas CRS, del hidroseparador, las colas de concentración magnética finisher y concentración de flotación son espesados para poder recuperar agua. La otra parte de la salida del espesador de colas es enviada a cajón de colas Rougher primaria en donde ambos flujos se juntan en el estanque gravimétrico y se bombea el relave al depósito de CCMC. Luego el concentrado es enviado por conducto y recibida en puerto donde pasa a un distribuidor que a su vez alimenta a dos filtros cerámicos, el producto filtrado se envía mediante correas transportadoras al área de almacenamiento para su posterior embarque.

### **3.2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO**

En la planta, constantemente se evalúan los procesos productivos tratando de determinar si en alguno de ellos existe algún parámetro que pueda ser modificado generando una eficiencia y por ende disminuya el costo de producción. Fue el caso de la etapa de molienda, la cual buscaba encontrar alguna forma de volver más eficaz el proceso.

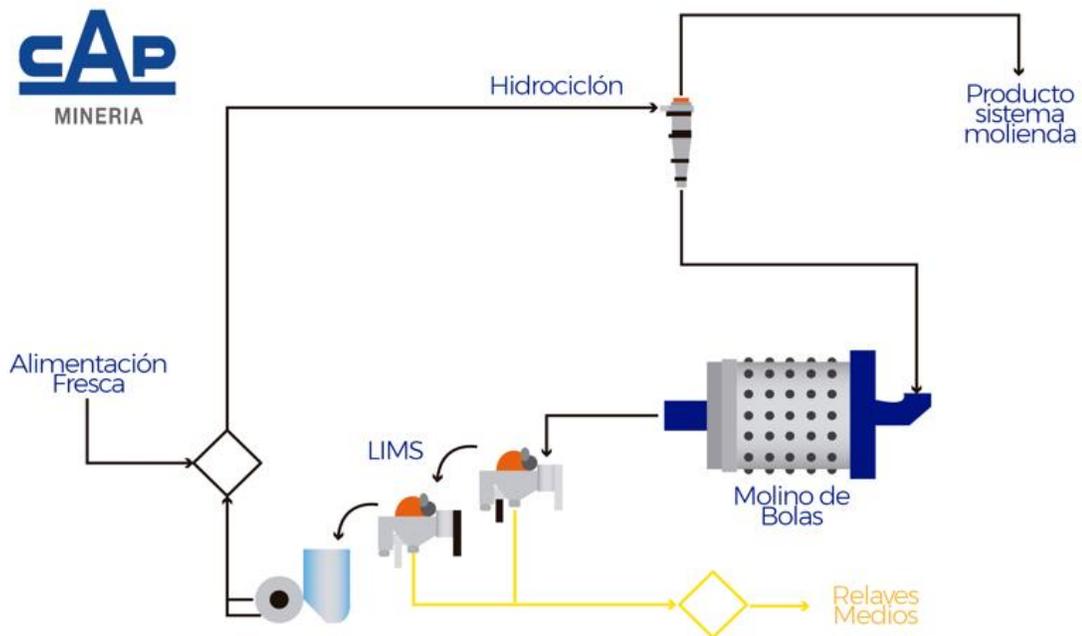
El equipo de Innovación determinó que incorporar una etapa de concentración magnética podría ser la clave para mejorar el rendimiento del proceso de molienda. Lo que se sugiere es incorporar uno o más concentradores magnéticos en la descarga de los molinos, cabe mencionar que en la planta se cuenta con dos molinos, la finalidad de ello es que el material que no sea concentrado "relave" se vaya por tuberías directamente al depósito de relaves de CCMC, por otro lado, el material concentrado será incorporado mediante bombas a un cajón el cual además recibe alimentación fresca, después de ello la pulpa se dirige a los hidrociclones en donde será separada por tamaño y consecutivamente enviada o a los molinos en el

caso de ser sobre tamaño, o continuara el curso del proceso productivo si es el caso de ser bajo tamaño.

La idea de incorporar este equipo se fundamenta ya que al eliminar parte del material como relave se disminuye la carga circulante en la etapa, permitiendo como consecuencia que se pueda incorporar mayor porcentaje de alimentación fresca a la etapa. Por ende, los equipos trabajarán al mismo ritmo, pero produciendo mayor efectividad en el proceso.

Como es el caso de los estudios se busca comprobar si realmente es técnicamente factible la implementación y puesta en marcha del proyecto. Para ello, se analizó como proceder a la investigación, lo que se hizo fue tratar de realizar el mismo procedimiento pero a menor escala, es importante recalcar que para que los resultados de un proyecto sean representativos se requiere que todos los procedimientos y sus resultados también lo sean, debido a esto todos los muestreos se realizaron bajo condiciones normales, cuando se habla de condiciones normales se refiere a que ambas líneas de producción se encuentren funcionando, que las toneladas de alimentación de pulpa proveniente de CCMC sean dentro de los parámetros normales ( alrededor de 1200 a 1600 ton de pulpa) que no se encuentren detenidos algún equipo, es decir, que la planta esté funcionando correctamente.

En la figura que se muestra a continuación se puede observar cómo se diseñó teóricamente lo que sería la etapa de molienda y clasificación de la planta.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-2. Diagrama de flujos, circuito de molienda con etapa de concentración

Como se ve en la figura 3-2, el diagrama parte con la alimentación fresca la cual viene del proceso anterior, esta llega a un cajón (donde se unen dos flujos y se direccionan en un sentido al salir de este) y junto con la descarga de los equipos de concentración magnética se direccionan a la etapa de clasificación compuesta por una serie de hidrociclones los cuales harán el trabajo de separar las partículas según su tamaño, por una parte, el grueso que sale por la parte inferior de los ciclones se envían nuevamente como alimentación a los molinos, por otra parte, el fino que lógicamente es expulsado de los equipos por la parte superior de estos, este continua el proceso productivo dirigiéndose a la otra etapa. Esta etapa sería pasar por el hidroseparador para posteriormente concentrarse magnéticamente en la etapa Finisher.

La descarga del molino estará ligada a los equipos de concentración que formarán parte de la etapa de molienda, los concentradores magnéticos son los encargados de recuperar el mineral de Hierro magnético contenido en la pulpa tratada, esta fracción magnética útil será dirigida por una bomba al cajón que se menciona anteriormente, donde junto con la alimentación fresca recirculará al sistema.

Cabe destacar que se ha comprobado que el material al pasar por un concentrador magnético disminuye su tamaño, por ende, se deduce que al recircular el sistema cuando se alimenta a los hidrociclones, saldrá como fino ya que el concentrador redujo el diámetro de sus partículas. Finalmente, la fracción de material que no haya sido recuperado por el concentrador será "las colas de concentración magnética" y ellas serían expulsadas del circuito de producción eliminándolas como desecho y enviándolas a los depósitos de relaves de CCMC.

### 3.2.1. Procedimiento del proyecto

En primera instancia lo que se hizo fue realizar cinco muestreos en días y horarios distintos, de la corriente de descarga del molino dos. Luego de ello lo que se hizo fue enviar las muestras a laboratorio para que se realizaran los procedimientos necesarios para acondicionar el material para análisis físicos y químicos.

Para ello las muestras fueron filtradas, esto se realiza para eliminar la mayor cantidad de agua que contiene la pulpa, lo que se hace es se instala una tela especial en el equipo de filtrado, sobre esta tela se instala un papel filtro, posteriormente se ajusta la cámara de filtro, procurando dejar bien posicionado el cilindro verificando que la ubicación de este esté ubicado acorde a la cámara, luego se deposita la pulpa dentro de la cámara de filtro y, se conecta la entrada de aire al equipo y se le da paso para que la presión de este produzca que el agua contenida empiece a eliminarse y las partículas de la pulpa queden atrapadas por el papel filtro y la tela. Luego de que escurre el agua se desconecta el aire y se procede a retirar el cilindro la muestra se retira con el papel filtro. Consecutivamente se lleva

a la etapa de secado, donde en equipos especiales la muestra filtrada se secará hasta perder la humedad contenida.

Cabe mencionar, que para que las investigaciones tengan resultados adecuados, las muestras deben ser representativas, por ende, las muestras deben ser roleadas y cuarteadas ya que no se realizarán análisis de toda la muestra recolectada de la descarga del molino.

El roleo y cuarteo se realizó en varias ocasiones, esto nos permite obtener distintos análisis granulométricos de la misma muestra.

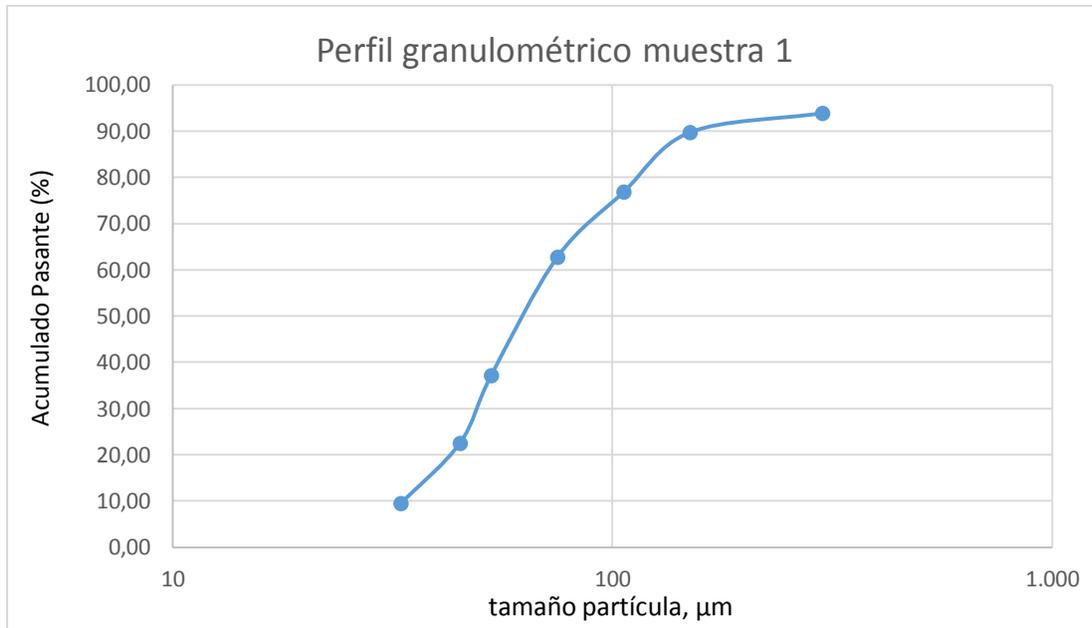
A continuación, se adjuntan las tablas que corresponden a los análisis granulométricos de las cinco muestras realizadas. Cabe destacar, que se realizaron seis análisis de perfiles granulométricos por cada muestra tomada, esto fue debido a que se necesitaban bastantes gramos de muestra por malla. Los análisis químicos que se realizaron se elaboraron considerando la malla #100 Tyler debido a que en la malla #50 se retenía muy poco material por ende no se evalúa como muestra representativa.

En conjunto con las tablas, estos se acompañan con los gráficos que indican los perfiles granulométricos generales, es decir, que las masas retenidas en los seis análisis se suman creando un muestreo general, se debe mencionar que las masas retenidas por malla no se mezclan entre sí, se hace énfasis en que es sumamente relevante que las muestras estén debidamente separadas ya que uno de los objetivos de los análisis químicos es determinar que granulometría favorece la concentración magnética de la muestra.

Tabla 3-1. Análisis granulométrico general, muestra uno

Malla	μm	PESO PARCIAL	PARCIAL (%)	PARCIAL RETENIDO	AC. PASANTE
#50	<b>300</b>	55,16	6,13	6,13	93,87
#100	<b>150</b>	37,64	4,18	10,31	89,69
#140	<b>106</b>	116,12	12,90	23,21	76,79
#200	<b>75</b>	126,17	14,02	37,23	62,77
#270	<b>53</b>	230,76	25,64	62,87	37,13
#325	<b>45</b>	131,51	14,61	77,48	22,52
#400	<b>33</b>	117,68	13,08	90,56	9,44
#-400	<b>-33</b>	84,96	9,44	100,00	0,00
	TOTAL	900			
	P80	116,96			

Fuente: Elaboración propia.



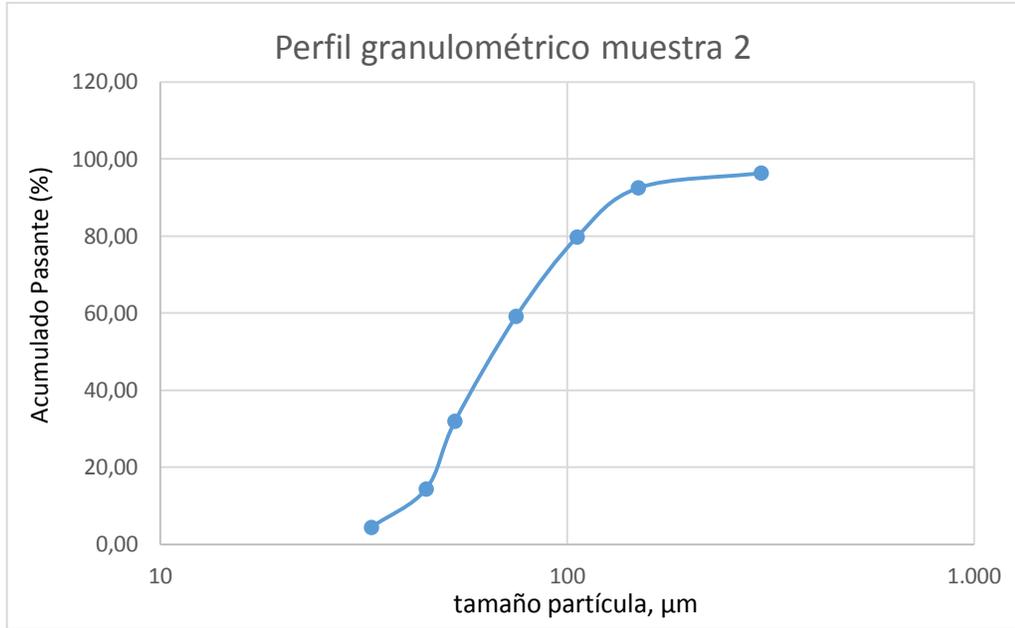
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3-1. Perfil Granulométrico general, muestra uno

Tabla 3-2. Análisis granulométrico general, muestra dos

MALLA	μm	PESO PARCIAL	PARCIAL (%)	PARCIAL RETENIDO	AC. PASANTE
#50	<b>300</b>	33,02	3,67	3,67	96,33
#100	<b>150</b>	34,45	3,83	7,50	92,50
#140	<b>106</b>	113,86	12,65	20,15	79,85
#200	<b>75</b>	185,5	20,61	40,75	59,25
#270	<b>53</b>	245,35	27,26	68,01	31,99
#325	<b>45</b>	158,49	17,61	85,62	14,38
#400	<b>33</b>	89,43	9,94	95,56	4,44
#-400	<b>-33</b>	40	4,44	100,00	0,00
TOTAL		900,1			
P80		106,51			

Fuente: Elaboración propia.



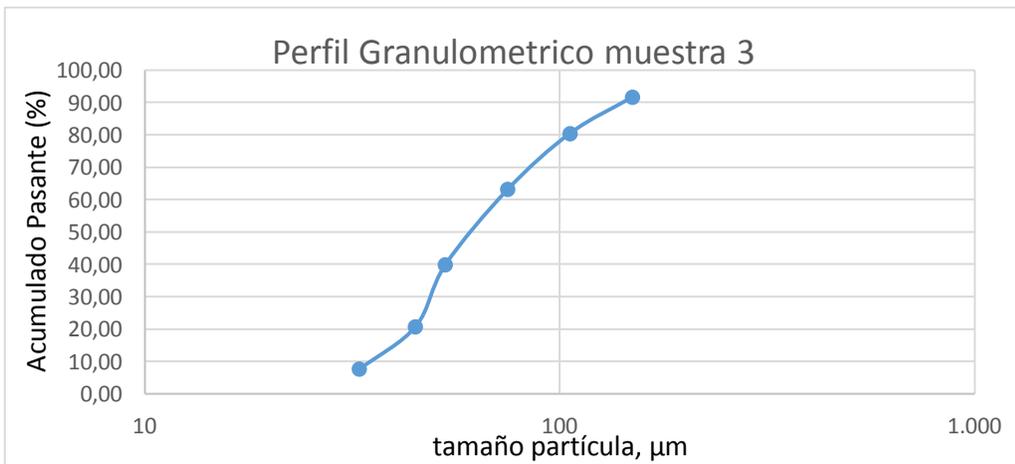
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3-2. Perfil granulométrico general, muestreo dos.

Tabla 3-3. Análisis granulométrico general, muestra tres.

Malla	$\mu\text{m}$	PESO PARCIAL	PARCIAL (%)	PARCIAL RETENIDO	AC. PASANTE
#100	150	74,7	8,31	8,31	91,69
#140	106	100,9	11,23	19,54	80,46
#200	75	155,5	17,31	36,85	63,15
#270	53	209,9	23,36	60,21	39,79
#325	45	170,61	18,99	79,19	20,81
#400	33	118,07	13,14	92,33	7,67
#-400	-33	68,9	7,67	100,00	0,00
TOTAL		898,58			
P80		105,18			

Fuente: Elaboración propia.



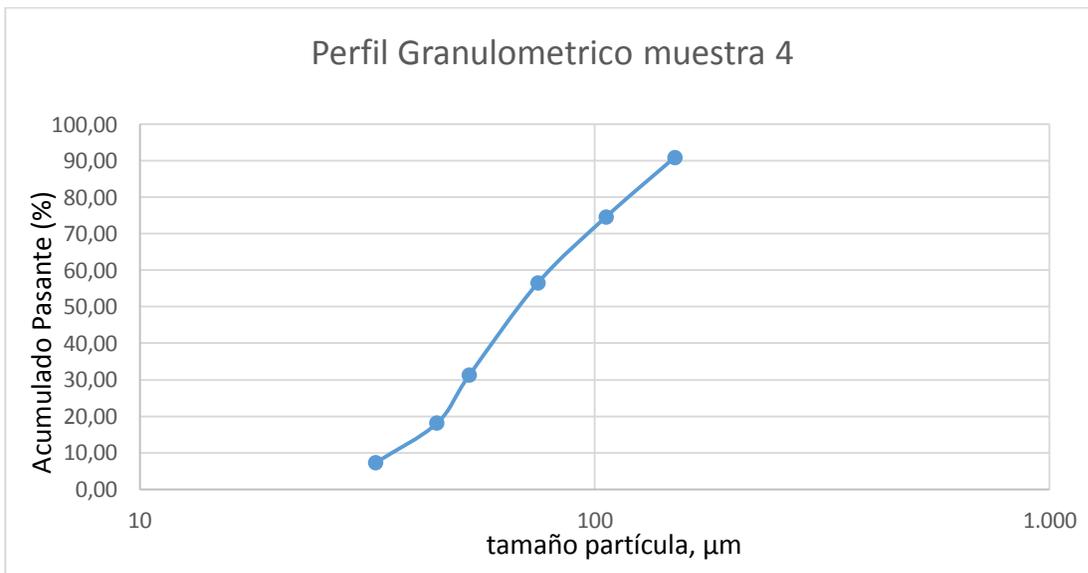
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3-3. Perfil granulométrico general, muestreo tres.

Tabla 3-4. Análisis granulométrico general, muestra cuatro.

Malla	μm	PESO PARCIAL	PARCIAL (%)	PARCIAL RETENIDO	AC. PASANTE
#100	<b>150</b>	81,49	9,05	9,05	90,95
#140	<b>106</b>	146,74	16,30	25,36	74,64
#200	<b>75</b>	163,23	18,14	43,50	56,50
#270	<b>53</b>	227,45	25,27	68,77	31,23
#325	<b>45</b>	118,3	13,14	81,91	18,09
#400	<b>33</b>	97,5	10,83	92,75	7,25
#-400	<b>-33</b>	65,29	7,25	100,00	0,00
TOTAL		900			
P80		120,46			

Fuente: Elaboración propia.



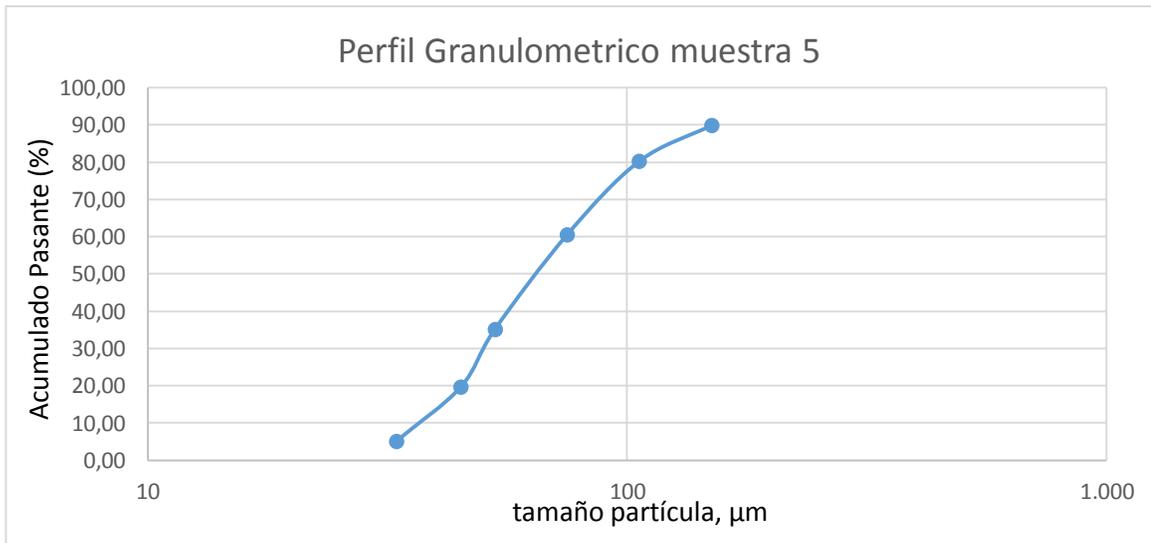
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3-4. Perfil granulométrico general, muestreo cuatro.

Tabla 3-5. Análisis granulométrico general, muestra cinco.

Malla	μm	PESO PARCIAL	PARCIAL (%)	PARCIAL RETENIDO	AC. PASANTE
#100	<b>150</b>	91,37	10,15	10,15	89,85
#140	<b>106</b>	86,78	9,64	19,79	80,21
#200	<b>75</b>	177,08	19,68	39,47	60,53
#270	<b>53</b>	228,68	25,41	64,88	35,12
#325	<b>45</b>	139,27	15,47	80,35	19,65
#400	<b>33</b>	131,19	14,58	94,93	5,07
#-400	<b>-33</b>	45,63	5,07	100,00	0,00
TOTAL		900			
P80		105,68			

Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3-5. Perfil granulométrico general, muestreo cinco.

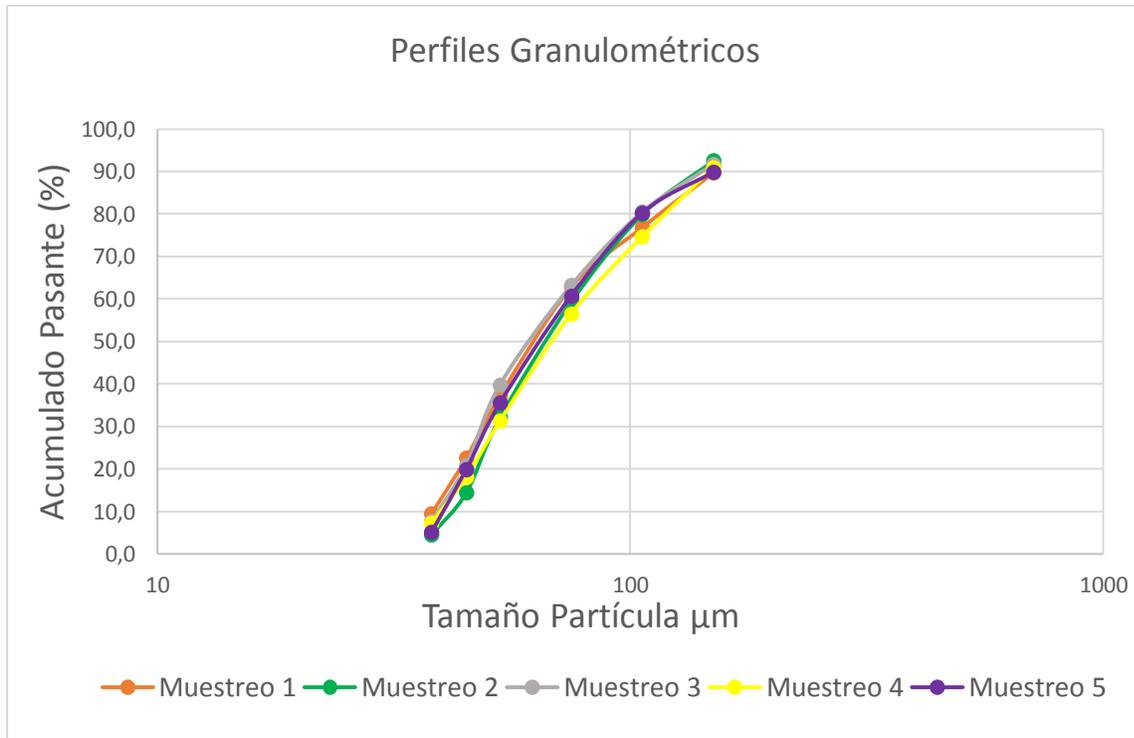


Gráfico 3-6. Comparación de perfiles granulométricos de los muestreos realizados.

Del gráfico 3-6, que se incorpora anteriormente se puede evidenciar que los resultados anteriores se comparan entre sí, los distintos muestreos realizados poseen curvas granulométricas similares, por lo tanto, se sabe que los datos evaluados coinciden entre ellos. Es evidente que los resultados químicos que se obtengan de los distintos muestreos serán comparables debido a que poseen concordancias entre ellos.

Luego de los análisis granulométricos realizados, se recopilaron 30 gramos de cada malla y de cada muestreo para poder realizar los análisis de tubo Davis para poder medir el porcentaje máximo de concentración de una determinada muestra. Si bien, se requieren solo 10 gramos para efectuar la prueba mencionada, es preferible tener muestra adicional en caso de derrames o imprevistos.

En el capítulo anterior se menciona como se efectúa el análisis DTT por medio de tubo Davis, por ende, a continuación, solo se incluyen los resultados obtenidos de dicho procedimiento.

Tabla 3-6. Resultados del porcentaje máximo de concentración magnética, con sus respectivas desviaciones estándar.

	%DTT						
	#100	#140	#200	#270	#325	#400	#400-
<b>Muestra 1</b>	72,40	67,30	67,20	81,20	77,00	58,40	52,00
<b>Muestra 2</b>	72,60	63,50	67,30	80,10	69,50	60,70	57,10
<b>Muestra 3</b>	73,40	72,60	69,20	80,90	76,30	66,30	66,30
<b>Muestra 4</b>	73,50	68,60	71,80	77,90	76,60	59,00	53,00
<b>Muestra 5</b>	55,40	65,50	68,10	81,90	78,80	62,40	55,00
<b>desv. Estandar</b>	7,87	3,44	1,90	1,54	3,57	3,17	5,72

Fuente: Elaboración propia.

De la tabla 3-6, podemos apreciar que los resultados de porcentaje de DTT son prácticamente similares, por lo que se sigue confirmando que los datos son aciertos de los procesos que se esperaban teóricamente. Estos datos no son suficientes para poder concluir si el proyecto es técnicamente viable, se debe realizar el siguiente paso para poder comprobar si la teoría es cierta.

Para lo anterior, se requiere del equipo de laboratorio de la planta, debido a que los procesos de análisis químicos requieren de cierta experiencia en los procedimientos para que el resultado sea el correcto. Se debe mencionar, que el procedimiento anterior (Ensayo Tubo Davis) tuvo una modificación, debido a que en el presente estudio se buscó comprobar cuanto es el porcentaje de hierro magnético que se perdería por las colas, por ende, en vez de dejar que los movimientos del tubo boten las colas, estas serán recolectadas con el fin de realizar análisis químico y determinar cuándo es el hierro magnético perdido.

El análisis realizado por el equipo de laboratorio de Planta Magnetita se llama "Análisis de Hierro soluble por dicromatometria", el cual entrega como resultado el dato del Hierro Soluble. De los análisis realizados se incorporan las tablas que muestran los resultados de las pruebas descritas anteriormente.

Tabla 3-7. Resultados del análisis químico, de la muestra uno

Muestra	%Fe T	%Fe mag	%Fe DTT	% DTT	GER
#100	28,94	27,98	38,65	72,4	3,30
#140	21,73	19,05	28,31	67,3	3,17
#200	33,43	31,66	47,12	67,2	3,56
#270	51,91	51,28	63,15	81,2	4,25
#325	52,43	52,03	67,57	77,0	4,11
#400	41,90	39,90	68,33	58,4	3,81
#400-	38,49	35,44	68,16	52,0	3,74

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-8. Resultados del análisis químico, de la muestra dos

Muestra	%Fe T	%Fe mag	%Fe DTT	% DTT	GER
#100	24,73	22,87	31,50	72,6	3,22
#140	22,33	16,89	26,60	63,5	3,21
#200	34,75	32,92	48,91	67,3	3,60
#270	52,69	52,07	65,01	80,1	4,29
#325	49,04	46,86	67,43	69,5	4,09
#400	42,64	41,68	68,66	60,7	3,85
#400-	39,96	39,11	68,50	57,1	3,77

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-9. Resultados del análisis químico, de la muestra tres

Muestra	%Fe T	%Fe mag	%Fe DTT	% DTT	GER
#100	34,55	33,62	45,81	73,4	3,44
#140	30,11	22,49	30,98	72,6	3,23
#200	32,50	31,52	45,55	69,2	3,51
#270	52,56	50,49	62,41	80,9	4,18
#325	53,84	52,32	68,57	76,3	4,22
#400	47,27	45,56	68,72	66,3	3,96
#-400	47,40	46,10	69,53	66,3	3,97

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-10. Resultados del análisis químico, de la muestra cuatro

Muestra	%Fe T	%Fe mag	%Fe DTT	% DTT	GER
#100	22,58	20,57	27,99	73,5	3,17
#140	24,47	21,51	31,35	68,6	3,29
#200	41,68	40,86	56,91	71,8	3,83
#270	55,36	51,28	65,83	77,9	4,41
#325	54,07	52,98	69,16	76,6	4,30
#400	42,49	41,01	69,51	59,0	3,80
#-400	38,36	36,77	69,37	53,0	3,70

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-11. Resultados del análisis químico, de la muestra cinco

Muestra	%Fe T	%Fe mag	%Fe DTT	% DTT	GER
#100	23,70	19,72	35,60	55,4	3,2
#140	25,17	22,26	33,98	65,5	3,27
#200	38,45	36,28	53,27	68,1	3,72
#270	54,66	53,35	65,14	81,9	4,33
#325	55,68	54,43	69,07	78,8	4,34
#400	44,93	42,99	68,90	62,4	3,87
#-400	40,33	38,16	69,39	55,0	3,74

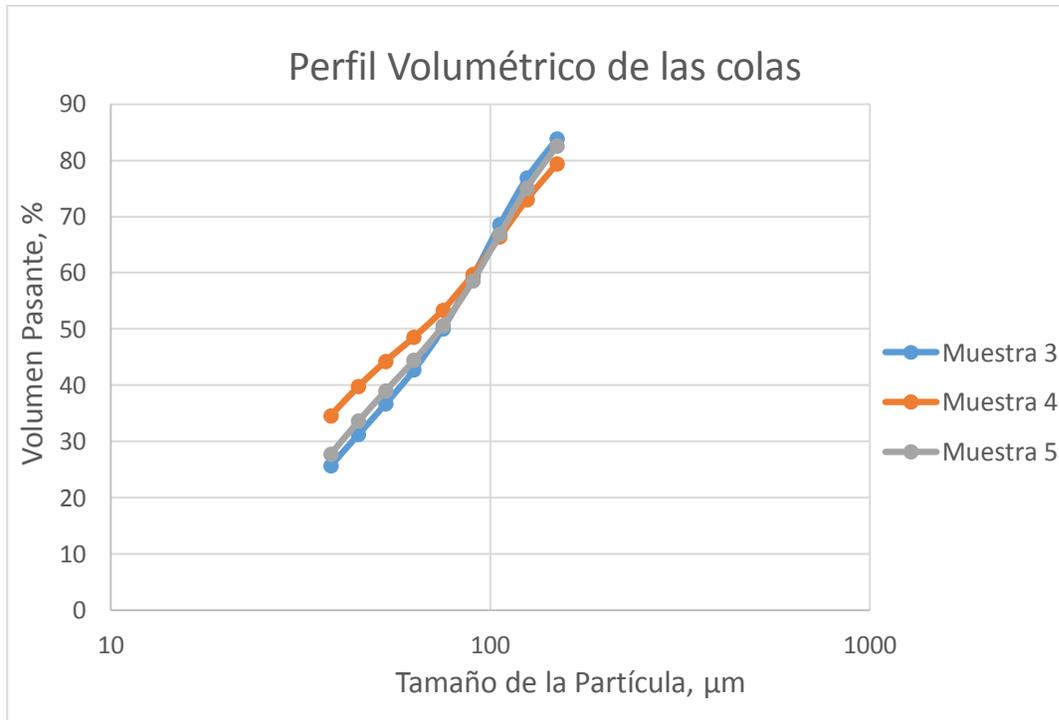
Fuente: Elaboración propia.

Cabe mencionar, que la decisión de analizar las colas del ensayo de tubo Davis se tomó cuando el proyecto estaba en marcha y ya se habían analizado por DTT las primeras dos muestras, por tanto, los resultados del análisis de las colas serán de las tres últimas muestras. Al obtener resultados granulométricos y de DTT similares entre todas las muestras, se asume que los resultados de las colas seguirán el mismo formato, de acuerdo con lo anterior se incorporan los datos de las colas de las pruebas. Sin embargo, para las conclusiones se consideran los datos obtenidos, no se consideran los supuestos resultados de las colas que no fueron recuperadas puesto que sería especular algo de lo cual no se puede comprobar.

Tabla 3-12. Resultados del análisis granulométrico de las colas, muestra tres, cuatro y cinco

Malla	Apertura $\mu\text{m}$	Volumen Pasante %		
		Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
100	150	83,84	79,41	82,62
120	125	76,85	73,07	75,11
140	106	68,53	66,41	66,9
170	90	59,41	59,74	58,57
200	75	50,06	53,4	50,58
230	63	42,77	48,6	44,46
270	53	36,72	44,29	39,01
325	45	31,32	39,84	33,65
400	38	25,69	34,63	27,78
-400	-38	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3-7. Comparación de perfiles granulométricos de las colas

De la imagen 3-7, podemos nuevamente evidenciar que las curvas coinciden entre sí. Cabe destacar, que los perfiles granulométricos que se incorporaron anteriormente no se realizaron con la serie de tamices, las colas de las muestras mencionadas se llevaron al laboratorio de la Universidad de Atacama (UDA), el cual posee un equipo llamado Mastersizer el cual ocupando app dos gramos de muestra puede diseñar el perfil volumétrico. Por tanto, se sabe que los resultados obtenidos poseen precisión.

Se procede a agregar la información de los resultados químicos de las colas en la tabla 3.14. Es importante mencionar que para el análisis mastersizer y químico de las colas, se hizo un composito de los muestreos, por ende, los resultados de los procedimientos destacados previamente serán en base a los muestreos en general, y no obteniendo resultados por malla.

Tabla 3-13. Resultados del análisis químico de las colas, muestra tres, cuatro y cinco

	%Fe Total	%Fe Magnético	%Fe Dtt	%DTT	GER
Muestra 3	3,7	0,46	5,27	8,8	2,86
Muestra 4	3,92	0,36	4,55	7,9	2,89
Muestra 5	3,24	0,61	10,58	5,8	2,93

Fuente: Elaboración propia.

De lo cual, cabe destacar que en procesos de evaluación con elementos magnéticos al analizar los resultados se deben considerar la información ya sea del Hierro Magnético o del Hierro DTT que es el Hierro máximo que se puede concentrar mediante concentración magnética. En el caso de la información de los resultados químicos de las colas, es insignificante el contenido de Hierro magnético que se perdería al realizar la modificación al proceso. Por otro lado, la cantidad de hierro que se puede concentrar esta entre el en promedio es del 6,8 % es decir, como máximo podemos obtener en promedio un 6,8 % de Hierro el cual no es magnético en su totalidad por ende es insignificante para otros estudios, recuperar las colas de este proceso.

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

En primera instancia se concluye que los equipos más adecuados para la etapa de molienda es el molino de bolas y para la etapa de clasificación son los hidrociclones. Debido a que la planta trata el material proveniente de un relave, que se genera como desecho de la producción de concentrado de cobre, es que en su proceso productivo no se requieren equipos como chancadores, ya que las partículas son finas y, además, es una pulpa por ende al contener agua hace que no se pueda triturar con aquellos equipos.

Por otra parte, los hidrociclones son adecuados para la utilización en este proceso productivo debido a que sus características concuerdan con las de la pulpa, ya que en esta planta se concentra un mineral el cual debe contener gran porcentaje de agua (la pulpa posee entre un 30 y un 65 % de sólido aproximadamente), además posee características que los hacen ser recomendables, como es el hecho de ser fácil de fabricarlos, poseen gran capacidad respecto al espacio que ocupa, poseen bajo costo de fabricación y mantenimiento comparados con clasificadores mecánicos.

Por otro lado, se logra identificar con claridad los distintos procesos de concentración magnética recalcando entre ellos los tambores magnéticos y tubo Davis ya que son los utilizados el primero de ellos en el proceso productivo de la planta y el tubo Davis debido a que fue utilizado para llevar a cabo la investigación.

En la planta se cuenta con 25 tambores, 14 de ellos utilizados para la etapa de concentración magnética Rougher primaria, 7 en la etapa de concentración magnética Rougher secundaria y los últimos 4 conforman la etapa de concentración magnética Finisher. Estos equipos poseen las mismas características en su ficha técnica; poseen 48 pulgadas de diámetro, 144 pulgadas de largo, requieren de una potencia de 7,5 [KW], su campo magnético es de 1000 [Gauss], el arco magnético posee 120°, poseen cinco polos e interpolos y su velocidad nominal es de 30 [RPM].

Con respecto a los análisis químicos realizados, se observa que en las mallas; #270, #325, #400 y #-400, el porcentaje de Fe Dtt se incrementa teniendo los valores promedios más altos en los finos (#400 y #-400) siendo estos de 68,82, 68,99 respectivamente. Sin embargo, si se requiere evaluar el Fe Mag, las mayores leyes se encuentran en las mallas; #270, #325 siendo los porcentajes promedios de 51,69 y 51,72 respectivamente.

De lo anterior, se puede inferir que las leyes de Fe Mag de las dos mallas más finas mencionadas anteriormente, son considerablemente menores, debido a que el % DTT que poseen también lo es, y como la ley magnética es el resultado de la operación de % DTT multiplicado por el Fe Dtt, se obtiene un resultado menor.

Por otro lado, con respecto a los perfiles granulométricos en el cual se comparan los datos de la alimentación del concentrador y las colas, podemos concluir que la fracción fina de la muestra es la que contiene en material útil, en este caso sería el concentrado de Hierro. Por otro lado, las colas son la fracción más

gruesa, debido a esto en las gráficas se evidencia una variación en las curvas, para poder corroborar de forma más efectiva se estima que sería adecuado realizar un perfil del concentrado de la muestra, éste debería ser el fino.

Además, se puede evidenciar con respecto a las colas globales de cada muestra (comparándolas con los resultados químicos de sus respectivos concentrados), que el porcentaje de Hierro que se pierde es insignificante ya que el promedio de % de Fe Magnético desechado por las colas es de un 0,48 %, por otro lado el porcentaje que se recupera en las muestras 3, 4 y 5 (recordando que fueron las muestras que se le realizaron análisis químico a las colas) es de un promedio de 37,82 %. Considerando las pérdidas del mineral en otras etapas productivas, lleva a pensar que es un proyecto el cual significaría recuperar gran cantidad del elemento de interés.

Por ello, posemos comprobar que técnicamente el estudio es factible debido a que se logra reducir la carga circulante al incorporar un concentrador magnético en el proceso productivo. Es posible concluirlo debido a que como promedio según las características de la planta que se mencionan anteriormente, sus condiciones de operación y según la investigación realizada en promedio se pueden concentrar 37,83% de Hierro Magnético, si al concentrador se alimentan 100 ton/H (suponiendo que es material seco) serían 37,83 toneladas que seguirían la línea productiva ya que corresponde al concentrado, conforme lo anterior 62,17 toneladas de material seco sería desecho.

Según lo que se menciona previamente, se puede comprobar que la carga circulante se aliviaría considerablemente lo que permitiría que esas 62,17 toneladas de material que anteriormente continuaba en el circuito podrían reemplazarse por alimentación fresca. Es importante recalcar que la problemática que se genera es la carga circulante que posee el circuito de molienda, lo que limita la alimentación de material fresco. Sin embargo se debe considerar la siguiente teoría, el molino de la planta tiene capacidad de 270 toneladas métricas por hora, si en promedio se concentra un 37,83% de Hierro Magnético tendríamos 102,141 toneladas métricas de Hierro Magnético como concentrado, por ende 167,859 toneladas métricas por hora son de colas, lo cual comprobaría que el último dato significaría la cantidad de toneladas que podrían recircular al sistema como alimentación fresca.

En conclusión, se puede afirmar que la evaluación de forma positiva la intervención del proceso ya que como se demuestra anteriormente es factible técnicamente incorporar un equipo de concentración magnética ya que como consecuencia se alivia la carga del proceso permitiendo tratar mayor cantidad de material fresco en el mismo tiempo. Al eliminar parte de la pulpa en forma de desecho podemos potenciar la eficiencia del molino.

Para finalizar, se recomienda realizar una investigación mas exhaustiva determinando la unidad de campo magnetico (Guassaje) apropiada (evaluando distintas unidades de campo magnético en el tubo Davis) y diversos grados en su arco magnético si se decide evaluar el proceso con tambores magnéticos de inferior escala. También se aconseja evaluar distintos periodos de la planta, es decir, en

momentos en que la planta reciba alto flujo de alimentación de relave y en aquellos que no se esté recibiendo, además, evaluar el circuito cuando el material a tratar sea el que se suministra cuando la compañía posee bajo flujo, adicionando al proceso el material que resulta del proceso de desaguado.

**BIBLIOGRAFÍA**

RESEARCH GATE. Concentración magnética aplicada a relave de cobre [en línea][consultado en Marzo 2018] Disponible en: <[https://www.researchgate.net/publication/276379876\\_CONCENTRACION\\_MAGNETICA\\_APLICADA\\_A\\_RELAVE\\_DE\\_COBRE](https://www.researchgate.net/publication/276379876_CONCENTRACION_MAGNETICA_APLICADA_A_RELAVE_DE_COBRE)>

UNIVERSIDAD DE CHILE. Información General de chancado [en línea][consultado en Marzo 2018] Disponible en: <[http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2009/checura\\_j/sources/checura\\_j.pdf](http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2009/checura_j/sources/checura_j.pdf)>

CODELCO EDUCA. Procesos productivos [en línea][consultado en Marzo 2018] Disponible en: <[https://www.codelcoeduca.cl/procesos\\_productivos/escolares\\_chancado\\_y\\_molienda.asp](https://www.codelcoeduca.cl/procesos_productivos/escolares_chancado_y_molienda.asp)>

MINISTERIO DE MINERÍA. Información general de Molienda [en línea][consultado en Marzo 2018] Disponible en: <<http://www.minmineria.gob.cl/glosario-minerom/molienda/>>

AMP MINERAL. Información general de hidrociclones [en línea][consultado en Marzo 2018] Disponible en: <<http://www.ampmineral.com/equipos/hidrociclones.php>>

OPERACIONES UNITARIAS EN PROCESOS QUÍMICOS. Tipos de chancadores y molinos. [en línea][consultado en Marzo 2018] Disponible en: <<https://1aaditiqgrupob.wordpress.com/2009/10/26/tipos-de-trituradoras-y-molinos/>>

BLOGSPOT. Etapas de molienda [en línea][consultado en Marzo 2018] Disponible en: <<https://procesaminerales.blogspot.cl/2012/09/molienda-etapas-y-tipos.html>>

UNIVERSIDAD DE CHILE. Concentración magnética [en línea][consultado en Marzo 2018] Disponible en: <[http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2009/checura\\_j/sources/checura\\_j.pdf](http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2009/checura_j/sources/checura_j.pdf)>

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO. Concentración magnética [en línea][consultado en Marzo 2018] Disponible en: <[http://ricabib.cab.cnea.gov.ar/244/1/1Castrill%C3%B3n\\_Fern%C3%A1ndez.pdf](http://ricabib.cab.cnea.gov.ar/244/1/1Castrill%C3%B3n_Fern%C3%A1ndez.pdf)>

ECURED. Características físicas del hierro [en línea][consultado en Marzo 2018] Disponible en: <<https://www.ecured.cu/Hierro>>

ECURED. Material diamagnético [en línea][consultado en Marzo 2018] Disponible en: <<https://www.ecured.cu/Diamagnetismo> >

LUZ IZT MÉXICO Material paramagnético [en línea][consultado en Marzo 2018] Disponible en: <<https://luz.izt.uam.mx/wiki/index.php/Paramagnetismo>>

ECURED. Separación magnética [en línea][consultado en Marzo 2018] Disponible en: <[https://www.ecured.cu/Separaci%C3%B3n\\_magn%C3%A9tica](https://www.ecured.cu/Separaci%C3%B3n_magn%C3%A9tica)>