

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Profesor Patrocinante
Dr. Leopoldo Gutiérrez

Ingeniero Supervisor
Galo Brito

**“Evaluación técnica de alternativas de adecuación de los
circuitos de molienda/clasificación y concentración
magnética para optimizar la capacidad de Planta de
Pellets Huasco CAP Minería”**



Adriela Estephania Esperanza Osses Tapia

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

Mayo 2019

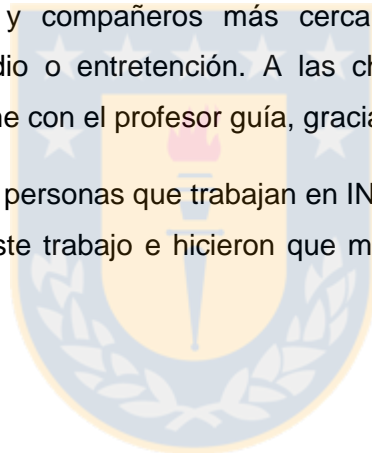
Agradecimientos

Primero que todo quiero agradecer a mis padres Graciela y Ricardo por haber confiado y creído siempre en mí, por enseñarme a ser perseverante, a pesar de que las cosas se vean difíciles, por el sacrificio que significo para ellos el que yo estudiara en otra ciudad, por su cariño, amor y por siempre recordarme que lo más importante que ellos me pueden dejar son los estudios. A mi hermano Richar que fue un gran apoyo en mis primeros años de estudio y que me enseñó que a pesar de la distancia siempre puedo contar con él. A mi familia abuelos, tíos, tías, primos, primas que de alguna forma u otra me acompañaron durante este camino.

Agradecer a las amistades formadas en todos estos años de estudio en especial a mi amiga Fran, gracias por escucharme, aconsejarme, darme alojamiento y por compartir intereses de vida similares. Espero que la vida nos siga juntando

Agradecer a mis compañeras y compañeros más cercanos por todos los momentos que compartimos, ya sean de estudio o entretenimiento. A las chiquillas que me dieron alojamiento cuando tenía que viajar a reunirme con el profesor guía, gracias por atenderme tan bien.

Por ultimo agradezco a todas las personas que trabajan en INMET, que de alguna forma u otra me ayudaron en la realización de este trabajo e hicieron que mi paso por la planta de Pellets fuera más ameno.



Resumen

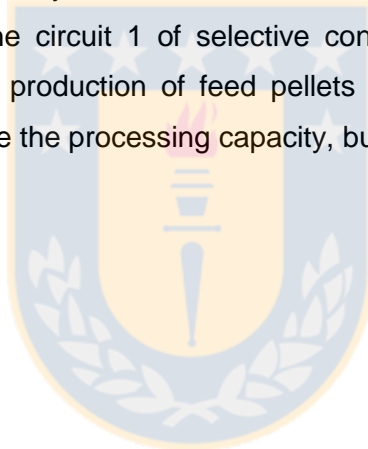
El objetivo de este trabajo fue realizar una evaluación técnica de alternativas de adecuación de los circuitos de molienda clasificación y concentración magnética de la planta de Pellets Huasco, con el fin de aumentar la capacidad de procesamiento. Para llevar a cabo dicha evaluación se plantearon dos alternativas de circuitos; el primero de ellos comprende una etapa de molienda seguido por una concentración magnética primaria y luego una etapa de clasificación. El segundo comprende una etapa de molienda abierta, concentración magnética primaria y una etapa de molienda y clasificación inversa.

Se realizaron pruebas de concentración magnética a distintos porcentajes de sólidos y velocidades de giro del tambor, con el fin de determinar las condiciones operacionales de la etapa de concentración magnética primaria. Para conocer el comportamiento de los circuitos propuestos se realizaron pruebas de molienda, concentración magnética y clasificación a nivel laboratorio y piloto, estas dieron como resultado: primero que la etapa de concentración magnética primaria debe ser recuperadora y que se debe trabajar a 1000 Gauss, 25 rpm y 40% de sólido en la alimentación, además que el circuito 1 de concentración selectiva permite aumentar la capacidad de procesamiento en un 5.4% y en un 6.6% la producción de pellets feed y que el circuito 2 de concentración selectiva no permite aumentar la capacidad de procesamiento, sino que la disminuye.

Abstract

The objective of this work was to carry out a technical evaluation of alternatives for the adaptation of the grinding classification and magnetic concentration circuits of the Pellets Huasco plant, in order to increase the processing capacity. Two circuits were proposed, the first of which comprises a grinding stage followed by a primary magnetic concentration and then a classification stage. The second comprises an open grinding stage, primary magnetic concentration and a reverse classification grinding stage.

Magnetic concentration tests were performed at different percentages of solids and drum rotational, in order to determine the operational conditions of the primary magnetic concentration stage and to know the behavior of the proposed circuits were performed grinding tests, magnetic concentration and classification at laboratory and pilot scale. Results showed that: primary magnetic concentration stage must be recovery and that it must work at 1000 Gauss, 25 rpm and 40% of solids in the feed, in addition the circuit 1 of selective concentration increased the processing capacity by 5.4% and 6.6% the production of feed pellets and that the selective concentration circuit 2 does not allow to increase the processing capacity, but decreases it.



Índice

1	Introducción	1
1.1	Motivación de la investigación.....	1
1.2	Objetivo general.....	2
1.3	Objetivos específicos	2
2	Antecedentes de la empresa	3
2.1	CAP Minería	3
2.2	Planta de Pellets Huasco	3
2.2.1	Productos Planta de Pellets Huasco	3
2.3	Descripción proceso productivo	4
3	Antecedentes teóricos.....	8
3.1	Molienda y clasificación	8
3.2	Separación magnética	10
3.2.1	Clasificación de los equipos utilizados para la separación magnética.....	12
3.2.2	Tambores magnéticos en húmedo.....	13
3.3	Indicadores de propiedades magnéticas del mineral y parámetros metalúrgicos	19
4	Desarrollo experimental.....	21
4.1	Diseño experimental	21
4.2	Muestras	24
4.3	Equipos y Procedimiento.....	26
4.3.1	Determinación de la intensidad del campo magnético	26
4.3.2	Pruebas de molienda nivel laboratorio	27
4.3.3	Pruebas de concentración magnética escala laboratorio.....	29
4.3.4	Pruebas de clasificación en húmedo escala laboratorio	31
4.3.5	Prueba de molienda abierta nivel piloto	32
4.3.6	Prueba de concentración magnética escala piloto	33
4.3.7	Prueba de molienda y clasificación escala piloto	35

5	Resultados y discusiones	37
5.1	Determinación de la intensidad del campo magnético	37
5.2	Determinación de la velocidad de giro del tambor magnético y porcentaje de sólidos en la alimentación	38
5.3	Pruebas de concentración magnética a distintas granulometrías de alimentación	41
5.4	Circuito actual molienda y clasificación a escala laboratorio.....	43
5.5	Circuito 1 concentración selectiva escala laboratorio.....	45
5.6	Circuito 2 concentración selectiva a escala piloto.....	48
5.7	Comparación capacidad de producción de los circuitos estudiados.....	52
6	Conclusiones	54
7	Recomendaciones	55
	Bibliografía.....	56
	Anexos	57
Anexo 1:	Contenido de hierro por fracción de tamaño para diferentes texturas.....	57
Anexo 2:	Curvas granulométricas pruebas de concentración magnética a distintas granulometrías de alimentación.....	58
Anexo 3:	Cargas circulantes	61
Anexo 4:	Contenido de hierro en el relave.....	61
Anexo 5:	Balance de masa de los circuitos estudiados.....	62

Índice de figuras

<i>Figura 1: Flowsheet Panta de Pellets Huasco (Uso interno CAP)</i>	7
<i>Figura 2: Circuito de molienda cerrado directo (Elaboración propia)</i>	9
<i>Figura 3: Circuito de molienda cerrado inverso (Elaboración propia)</i>	9
<i>Figura 4: Clasificación según tamaño de partícula en los sólidos de alimentación (Svoboda, 2004)</i>	12
<i>Figura 5: Tambor magnético, configuración concurrente (Outotec, 2010)</i>	14
<i>Figura 6: Tambor magnético, configuración contra-rotación (Outotec, 2010)</i>	15
<i>Figura 7: Tambor magnético, configuración contra- corriente (Outotec, 2010)</i>	16
<i>Figura 8: Circuito actual de molienda y clasificación (Uso interno CAP)</i>	22
<i>Figura 9: Circuito 1 concentración selectiva (Elaboración propia)</i>	23
<i>Figura 10: Circuito 2 concentración selectiva (Elaboración propia)</i>	23
<i>Figura 11: Contenido de hierro por fracción de tamaño, en los dos minerales utilizados en este estudio</i>	25
<i>Figura 12: Difractograma realizado a la muestra de preconcentrado básico (Guzmán, 2019)</i>	25
<i>Figura 13: Difractograma realizado a la muestra de sinter (Guzmán, 2019)</i>	26
<i>Figura 14: Equipo utilizado para la realización del Davis tube tester</i>	27
<i>Figura 15: Molino Torque, utilizado en las pruebas de molienda nivel laboratorio, que opera bajo condiciones batch</i>	28
<i>Figura 16: Interior molino Torque, cargado con bolas y mineral</i>	28
<i>Figura 17: Concentrador magnético L8, utilizado en las pruebas de concentración magnética a nivel laboratorio</i>	30
<i>Figura 18: Funcionamiento concentrador magnético L8. a) mineral de hierro adherido al tambor magnético y b) salida del concentrado</i>	30
<i>Figura 19: Clasificación en húmedo, en Equipo Ro-Tap</i>	31
<i>Figura 20: Productos obtenidos de la clasificación en húmedo: a) partículas de mineral superior a la malla 200 y b) partículas de mineral inferiores a la malla 325</i>	32
<i>Figura 21: Circuito molienda abierta a nivel piloto</i>	33
<i>Figura 22: a) Alimentación circuito molienda abierta y b) Descarga circuito molienda abierta</i>	33
<i>Figura 23: Concentrador magnético de baja intensidad de 48 pulgadas de diámetro</i>	34
<i>Figura 24: Productos obtenidos en la prueba de concentración magnética escala piloto: a) concentrado y b) relave</i>	35

<i>Figura 25: Equipos utilizados en la prueba de molienda y clasificación escala piloto. a) molino Hardinger y b) hidrociclón.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 26: Resultados obtenidos del ensayo Dtt a distintas intensidades de campo magnético.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 27: Contenido de hierro por fracción de tamaño para los distintos concentrados obtenidos en el ensayo Dtt.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 28: Variación de la velocidad de giro del tambor para porcentajes de sólidos de: a) 25 % y b) 50 %.</i>	<i>39</i>
<i>Figura 29: Variación del porcentaje de sólidos en la alimentación a una velocidad de giro de tambor magnético de 25 rpm.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 30: Resultados pruebas de concentración magnética a distintas granulometrías de alimentación.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 31: Comportamiento granulométrico, prueba de concentración magnética con un 20% bajo los 44 μm en la alimentación.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 32: Circuito actual de molienda y clasificación.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 33: Circuito 1 de concentración selectiva.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 34: Comportamiento granulométrico, prueba de concentración magnética, realiza en equipo L8.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 35: Circuito 2 de concentración selectiva.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 36: Curvas granulométricas correspondientes a la prueba de molienda abierta.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 37: Comportamiento granulométrico, prueba de concentración magnética.</i>	<i>51</i>
<i>Figura 38: Contenido de hierro por fracción de tamaño, prueba de concentración magnética.</i>	<i>51</i>
<i>Figura 39: Contenido de hierro por fracción de tamaño para distintas texturas de mineral obtenidas en mina Los Colorados.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 40: Curvas granulométricas, prueba de concentración magnética con una granulometría de alimentación de 25 % bajo los 44 μm.</i>	<i>58</i>
<i>Figura 41: Curvas granulométricas, prueba de concentración magnética con una granulometría de alimentación de 37 % bajo los 44 μm.</i>	<i>59</i>
<i>Figura 42: Curvas granulométricas, prueba de concentración magnética con una granulometría de alimentación de 43 % bajo los 44 μm.</i>	<i>59</i>
<i>Figura 43: Curvas granulométricas, prueba de concentración magnética con una granulometría de alimentación de 54% bajo los 44 μm.</i>	<i>60</i>
<i>Figura 44: Curvas granulométricas, prueba de concentración magnética con una granulometría de alimentación de 61% bajo los 44 μm.</i>	<i>60</i>

Índice de tablas

<i>Tabla 1: Susceptibilidad magnética de algunos minerales (Espinoza, 2006)</i>	11
<i>Tabla 2: Resumen diseño experimental</i>	21
<i>Tabla 3: Caracterización minerales utilizados en el estudio</i>	24
<i>Tabla 4: Balance de masa circuito molienda y clasificación</i>	45
<i>Tabla 5: Balance de masa circuito 1 concentración selectiva</i>	47
<i>Tabla 6: Balance de masa circuito 2 concentración selectiva</i>	49
<i>Tabla 7: Capacidad de producción de los circuitos estudiados, considerando el funcionamiento de 3 molinos</i>	53
<i>Tabla 8: Capacidad de producción de los molinos 1 y 4</i>	53
<i>Tabla 9: Promedio mensual carga circulante molino 4 año 2018</i>	61
<i>Tabla 10: Promedio anual carga circulante molino 4</i>	61
<i>Tabla 11: Promedio mensual contenido de hierro en el relave de la concentración primaria</i>	62
<i>Tabla 12: Balance de masa circuito actual molienda y clasificación, con tasa de alimentación del molino 4</i>	62
<i>Tabla 13: Balance de masa circuito 1 concentración selectiva, con tasa de alimentación del molino 4</i>	63
<i>Tabla 14: Balance de masa circuito 2 concentración selectiva</i>	63
<i>Tabla 15: Balance de masa circuito actual molienda y clasificación, con tasa de alimentación del molino 1</i>	64
<i>Tabla 16: Balance de masa circuito 1 concentración selectiva, con tasa de alimentación del molino 1</i>	64

Nomenclatura y abreviaturas

CAP: Compañía de Acero del Pacífico

tph: toneladas por hora

μm: micrones

mm: milímetro

rpm: revoluciones por minuto

Dtt: Davis tuve test

L/s: litros por segundo

min: minutos

kg: kilogramos

C.Dtt: concentrado Dtt

Fe: contenido de hierro

Fe mag: contenido de hierro magnético

Rp: recuperación en peso

R: recuperación

%Cp: porcentaje de sólido en peso

L: litros

CC: carga circulante

LIMS: concentrador magnético de baja intensidad

HIMS: concentrador magnético de alta intensidad

HGMS: concentrador magnético de alto gradiente

L8: concentrador magnético de baja intensidad utilizado en el laboratorio

Dwt: tonelaje de porte bruto



GER: gravedad específica



1 Introducción

1.1 Motivación de la investigación

Dentro de las áreas de trabajo de CAP Minería se encuentra la innovación estratégica. Esta tiene como desafío lograr que la organización, dentro de sus diferentes gerencias, adopte metodologías de innovación que mejore el desempeño de sus proyectos, aportando sustantivamente valor a la empresa. Bajo este objetivo, surge la necesidad de optimizar la capacidad de procesamiento de los actuales circuitos de molienda, ya que el mineral que alimenta a esta etapa no pasa por un proceso de selección previa en función de la distribución del hierro por fracción de tamaño, sino que ingresa tal y como viene del proceso anterior. Por esta razón, se toma la decisión de estudiar la aplicación de diferentes alternativas de concentración selectiva.

En primera instancia, se evaluó la incorporación de una etapa de concentración magnética en el circuito de molienda y clasificación, específicamente, en la descarga del molino. Luego de esto, se estudió la realización de un circuito de molienda abierta que, seguido de una concentración magnética y un circuito de molienda cerrado, lograra el tamaño requerido para la producción de pellets. Ambas alternativas proponen una reubicación de los equipos ya dispuestos por los sistemas de molienda y clasificación y concentración magnética.

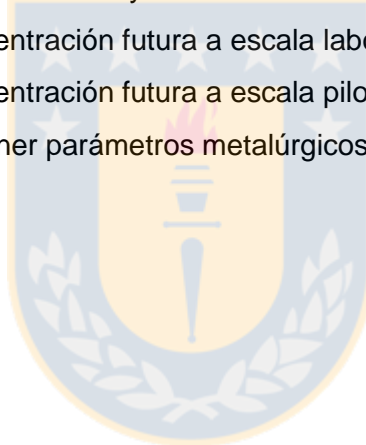
Cabe mencionar que otro de los motivos de la investigación es poder eliminar material de no interés (ganga) en las etapas iniciales del proceso, y así, no llegar con ellas a etapas posteriores.

1.2 Objetivo general

Evaluar técnicamente, dos alternativas de reubicación de circuitos de molienda clasificación y concentración magnética con el fin de optimizar la capacidad de procesamiento de los sistemas de molienda actuales.

1.3 Objetivos específicos

- Definir las variables operacionales (intensidad de campo magnético, velocidad de giro del tambor y porcentaje de sólidos de alimentación) de la etapa de concentración magnética a incorporar en las alternativas propuestas.
- Estudiar el efecto de la granulometría de alimentación en la etapa de concentración magnética a incorporar.
- Replicar circuito actual de molienda y clasificación a escala laboratorio.
- Simular circuito 1 de concentración futura a escala laboratorio.
- Simular circuito 2 de concentración futura a escala piloto.
- Analizar resultados y obtener parámetros metalúrgicos de los circuitos estudiados.



2 Antecedentes de la empresa

2.1 CAP Minería

CAP Minería es una empresa del grupo CAP, principal productor de minerales de hierro en la costa americana del Pacífico. Sus principales operaciones se encuentran en las regiones de Atacama y Coquimbo, distribuidas en el Valle de Huasco, Valle de Copiapó y Valle del Elqui.

CAP Minería elabora diferentes productos como pellets autofundentes, pellet feed, pellets chips, pellets reducción directa, finos y sinter feed. De todos ellos, pellets feed es su principal producto de venta, que en conjunto con el pellets autofundente y sinter feed, constituye el 97% de los despachos totales. [1]

2.2 Planta de Pellets Huasco

Esta planta se encuentra ubicada en la localidad de Huasco, a 5 kilómetros del puerto de dicha comuna y a 700 kilómetros al norte de Santiago. Opera desde fines del año 1978, con una capacidad inicial nominal de producción de 3.5 millones de toneladas anuales de pellets producto.

El año 2018 la producción global de la planta fue de 5.866.000 toneladas métricas, las cuales se desglosan en: 2.968.000 toneladas métricas de pellet autofundente, 2.292.000 toneladas métricas de pellet feed, 207.000 toneladas métricas de pellet chips, 204.000 toneladas métricas de pellet para reducción directa Mydrex, 114.000 toneladas métricas de finos Huasco y 81.000 toneladas métricas de pellet para reducción directa Hyl. Adicionalmente, se registró una producción de sinter feed de 1.055.000 toneladas métricas. [2]

2.2.1 Productos Planta de Pellets Huasco

Dentro de los productos obtenidos la planta se encuentran:

- Pellet básico o autofundente: corresponde a finos de mineral de hierro aglomerados en forma de nódulos, los cuales son manufacturados con un aditivo especial de álcali como caliza o dolomita. Su uso principal es como carga directa en hornos, para la producción de arrabio. Poseen un contenido mínimo de hierro de 65% y máximo 3.5% de sílice, además poseen un tamaño entre 9 y 16 mm.
- Pellet reducción directa: corresponde a mineral de hierro aglomerado en forma de pellets. Se utiliza en procesos siderúrgicos de reducción directa, cuyo producto sea el hierro esponja. El contenido mínimo de hierro que poseen es de 66.4% y un máximo de 1.8% de sílice, con un tamaño entre los 9 y 16 mm.

- Pellet chips: corresponde a aquellos pellets que se han quebrado durante el proceso de producción. Generalmente se utilizan en procesos de sinterización, lavado de carbones y formación de lodos usados en perforaciones de pozos petroleros. Poseen un contenido mínimo de hierro de 65.0% y un tamaño menor a 8 mm.
- Pellet feed: corresponde a mineral de hierro de bajo tamaño, el cual debe ser aglomerado para poder ser utilizado como insumo en altos hornos. Se utiliza principalmente como materia prima para la producción de pellets. El contenido mínimo de hierro es de 68.0% y máximo un 2.3% de sílice, además debe tener un contenido de humedad máximo de 8.75%. El tamaño debe ser inferior a los 45 μm .
- Sinter feed: corresponde a mineral de hierro producido en mina Los Colorados, pero comercializado y almacenado en Planta de Pellets. Se utiliza en procesos de sinterización para producir sinter, el cual sirve como carga directa al alto horno, para la producción de arrabio. El contenido de hierro debe ser como mínimo 62.0-63.0%, debe contener como máximo entre 5.0-6.0% de sílice y 0.10-0.15% de fósforo. Debe tener un máximo de 5.0% de partículas sobre los 6.3 mm y un 35% máximo sobre los 150 μm .

2.3 Descripción proceso productivo

El mineral procesado por Planta de Pellets Huasco proviene desde mina Los Colorados, en donde es sometido a diversas etapas de chancado y concentración magnética seca hasta obtener el mineral denominado preconcentrado. Este último es subdividido en tres tipos de minerales: preconcentrado básico; preconcentrado RD; y sinter, con una ley de hierro de 58%, 61% y 63% respectivamente. Luego es transportado vía tren hasta planta de pellets en donde inicia el siguiente proceso:

- Transporte de preconcentrado: traslado desde mina los colorados hasta planta de pellets. Se realiza mediante vía férrea por una distancia de 109 kilómetros.
- Almacenamiento de preconcentrado: el preconcentrado es almacenado en canchas de acopio cuya capacidad es de 500.000 toneladas. El mineral es clasificado en pilas según su calidad y destino.
- Molienda y clasificación húmeda: el preconcentrado que se encuentra en las pilas es enviado mediante correas transportadoras a los 4 silos de 4.000 toneladas de capacidad que posee la planta, los cuales se encargan de alimentar el proceso de molienda, este se lleva a cabo en 4 molinos de bolas, en circuito cerrado con hidrociclones con el fin de obtener el tamaño de partícula requerido por las etapas posteriores. Los primeros 3 molinos poseen una dimensión de 16.5 pies de diámetro y 37.5 pies de longitud, mientras que el cuarto posee un diámetro de 20 pies

y una longitud de 38 pies La tasa de alimentación es de 300 Tph y la granulometría alcanzada es de 80% bajo 44 μm .

- Hidroseparación y concentración magnética: el concentrado obtenido en la etapa de molienda clasificación, es derivado a una etapa de hidroseparación en hidroseparadores con el fin de quitar las partículas finas de ganga que se encuentran en el líquido sobrenadante. El sobre flujo o liquido sobrenadante es enviado al espesador de relave, mientras que el bajo flujo sigue a la etapa de concentración magnética, la cual cuenta con dos tipos de baterías magnéticas: baterías de 48 pulgadas de diámetro y 1000 gauss que son utilizadas en la concentración primaria; y baterías de 36 pulgadas de diámetro y 750 gauss que son utilizadas en etapas de repaso. La cantidad de etapas de concentración magnética va a depender del mineral que se esté procesando. El concentrado final es enviado a la etapa de filtrado, mientras que las colas son enviadas a un espesador de relave en donde se recupera el agua y el bajo flujo es dispuesto finalmente en un emisario submarino.
- Filtrado: el concentrado obtenido en la etapa anterior es dispuesto en espesadores de concentrado. El bajo flujo es derivado a estanques agitadores donde es homogenizado y luego enviado a la etapa de filtración, la cual se realiza en filtros de discos donde se obtiene el producto denominado pellets feed, este puede ser comercializado de esta forma o bien seguir en el proceso para la obtención de pellets producto.
- Balling: esta etapa cuenta con 6 líneas de producción idénticas que reciben el concentrado filtrado, mezclándolo con aditivos cuya cantidad depende del tipo de pellets que se quiere producir. Esta mezcla es alimentada a los discos pelletizadores, para ser convertida en pellets verdes, los cuales son descargados en harneros de rodillos para ser clasificados de acuerdo a su tamaño. Los pellets sobre 16 mm y bajo 9 mm son recirculados al proceso previa desintegración, mientras que aquellos que se encuentran dentro del rango de tamaño son enviados mediante correas transportadoras a la siguiente etapa de endurecimiento térmico.
- Endurecimiento térmico: esta etapa consta de tres equipos principales: horno parrilla, horno rotatorio y enfriador anular. Los pellets verdes obtenidos en la etapa anterior son secados y calentados en el horno parrilla hasta una temperatura de 1.100° C., luego son llevados al horno rotatorio, en donde son endurecidos a una temperatura aproximada de 1.300° C., finalmente, son enfriados mediante un flujo de aire a temperatura ambiente en un enfriador anular, el aire caliente obtenido de la transferencia de calor es recirculado hacia el horno rotatorio y el horno parrilla.
- Almacenamiento de pellets: los pellets que han sido enfriados y clasificados según su tamaño, son enviados a las canchas de acopio, donde son acopiados de acuerdo a su calidad.

- Embarque: la recuperación de los pellets desde las canchas se realiza a través de “Capacho” y son transferidos mediante correas a la pluma del embarque. Las instalaciones del puerto Guacolda II, permiten atender naves de hasta 300 mil dwt, con una capacidad de carguío de 60 mil toneladas diarias de producto.

El proceso productivo de la planta es mostrado en la figura 1, la cual es dividida en dos grandes etapas: molienda y concentración, de la cual se obtiene el pellet feed y balling y endurecimiento térmico donde se logra la formación de pellet producto.



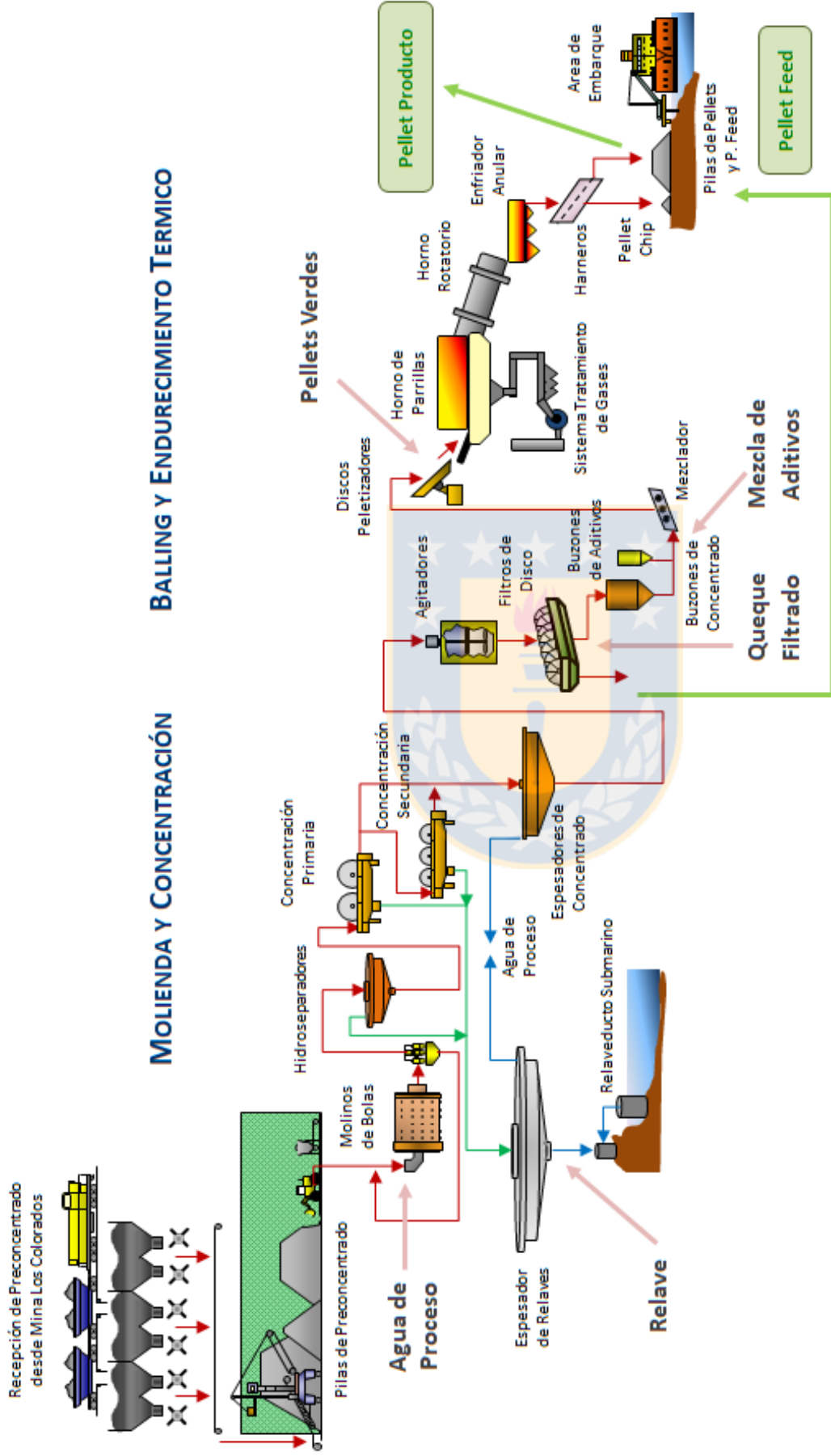


Figura 1: Flowsheet Panta de Pellets Huasco (Uso interno CAP)

3 Antecedentes teóricos

3.1 Molienda y clasificación

La etapa de molienda y clasificación consiste en reducir de tamaño el mineral con el fin de obtener un tamaño de partícula que permita la liberación de la especie de interés en partículas individuales, las cuales puedan ser recuperadas en etapas posteriores.

La etapa de molienda y clasificación está compuesta principalmente por molinos, los encargados de reducir el tamaño del mineral, y por hidrociclones, cuyo objetivo es asegurar que el producto tenga el tamaño deseado, para la siguiente etapa del proceso. Su funcionamiento consiste principalmente en separar la pulpa alimentada en dos corrientes; el overflow correspondiente al flujo que contiene al mineral con el tamaño de partícula requerido y el underflow que contiene al mineral con un tamaño de partícula superior al requerido. [3]

Los circuitos cerrados de molienda clasificación pueden ser configurados principalmente de dos formas: como circuito directo e inverso. En el circuito directo (figura 2), el material fresco más la descarga del hidrociclón alimentan al molino, luego la descarga de este es alimentada a la batería de hidrociclones para su clasificación. Por otra parte, en el circuito inverso (figura 3) la alimentación fresca y la descarga del molino son los que alimentan las baterías de hidrociclones y la descarga de estos es la encargada de alimentar al molino.

Dentro de los circuitos de molienda clasificación es relevante describir dos conceptos:

- Carga circulante: corresponde al cociente entre el flujo de alimentación total y el flujo de alimentación fresca al molino [4].

$$CC = \frac{Q+T}{Q} \quad (1)$$

Q: alimentación fresca

T: underflow

- Razón de recirculación: corresponde al cociente entre el flujo de material que retorna al molino desde el clasificador y el flujo de alimentación fresca al molino.[4]

$$C = \frac{T}{Q} \quad (2)$$

T: underflow

Q: alimentación fresca

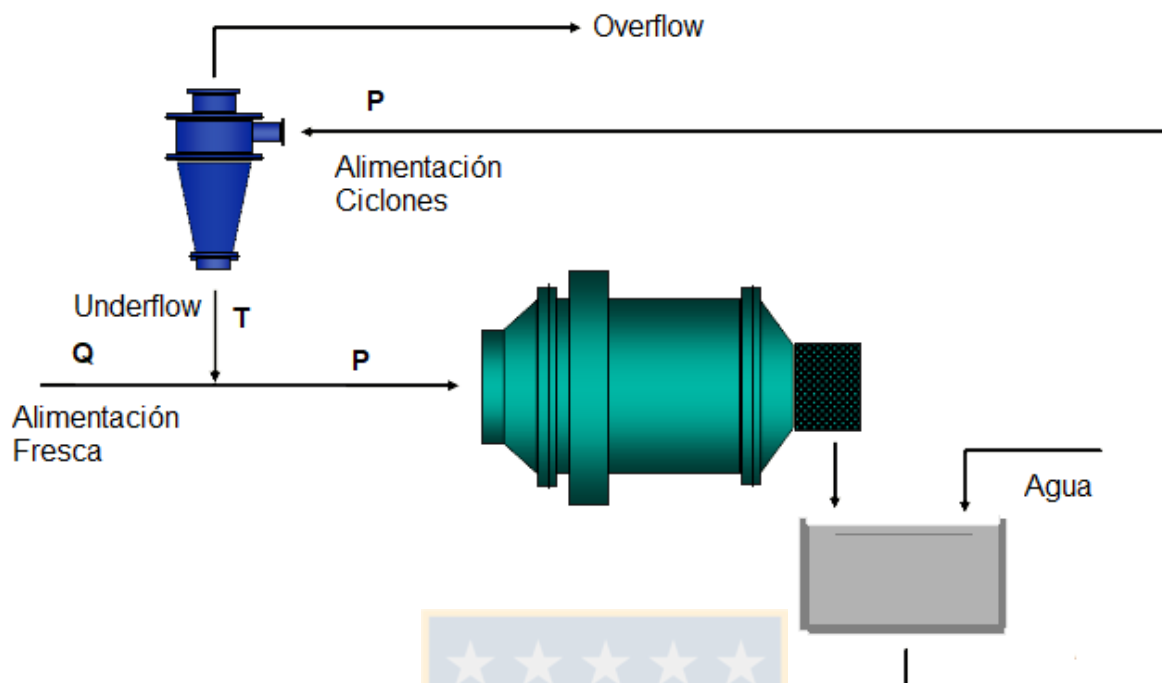


Figura 2: Circuito de molienda cerrado directo (Elaboración propia).

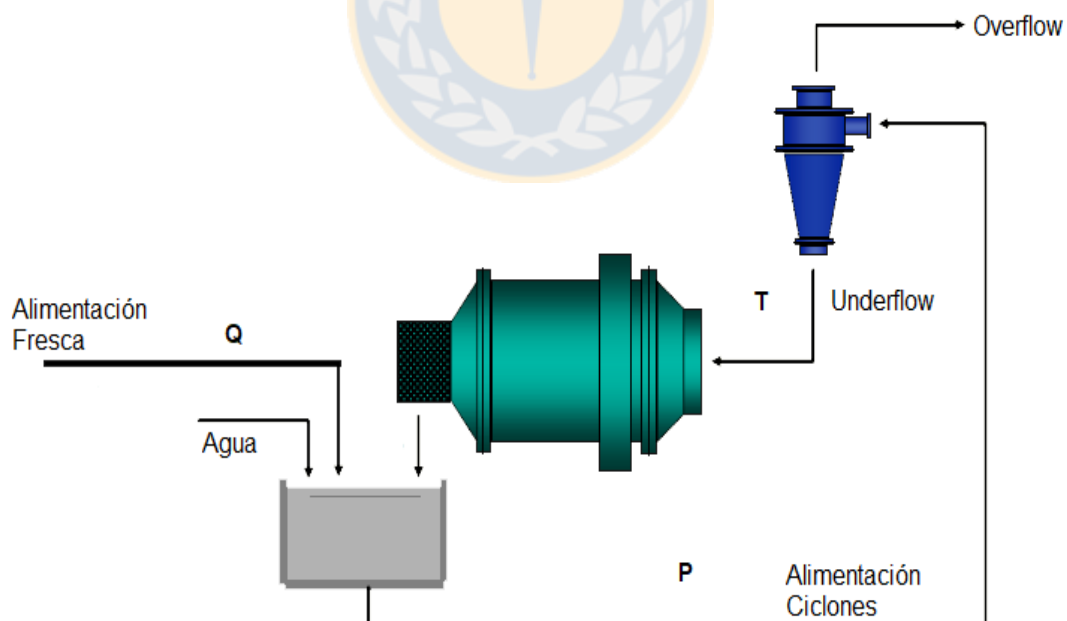


Figura 3: Circuito de molienda cerrado inverso (Elaboración propia).

3.2 Separación magnética

La separación magnética es utilizada para la concentración de materiales magnéticos y para remover las partículas magnéticas de corrientes fluidas, lo que se logra mediante el paso de las suspensiones por un campo magnético.

La fuerza externa de diferenciación en la separación magnética corresponde a la fuerza magnética, la separación de un material magnetizable de otro o la eliminación de partículas con propiedades magnéticas de corrientes, depende de su movimiento en respuesta a la fuerza magnética y a otras fuerzas externas como la gravitacional, inercial, hidrodinámicas y centrifugas [5].

Para la separación de partículas con propiedades magnéticas altas de aquellas con propiedades más bajas (ver tabla 1) en un campo magnético, es necesario, pero no suficiente, que se cumpla la condición de que la fuerza magnética que actúa sobre las partículas magnéticas debe ser mayor que la suma de todas las demás fuerzas presentes. Al mismo tiempo, la fuerza magnética que actúa sobre las partículas menos magnéticas, debe ser menor que la suma de las demás fuerzas competentes. Sin embargo, la magnitud de la fuerza magnética y competidora deben ser de magnitudes comparables, para así obtener una alta selectividad del proceso de separación, ya que si la fuerza magnética es muy superior a las demás componentes, se obtendrá una recuperación de hasta aquellas partículas que son débilmente magnéticas, perjudicando el rendimiento de la separación magnética. Es por esto que la selectividad del proceso estará determinada por los valores relativos de las fuerzas magnéticas y competidoras [5].

La eficiencia del proceso de separación magnética, se mide generalmente en el grado de recuperación de aquellos minerales de interés y por la calidad (ley) del producto valioso ya sea magnético o no [5].

La separación magnética se puede realizar en diversos equipos, una clasificación para estos puede ser según su fuente generadora de del campo magnético, intensidad del campo, medio en el cual se realiza: húmedo o seco, etc.

Tabla 1: Susceptibilidad magnética de algunos minerales (Espinoza, 2006)

Intensidad Requerida Para Separación [gauss]	Mineral	Fuerza de Atracción
Fuertemente Magnético		
500 a 5.000	<i>Hierro</i>	100,00
	<i>Magnetita</i>	40,19
	<i>Franklinita</i>	33,49
	<i>Leucita</i>	17,50
	<i>Pirrotita</i>	15,43
Moderadamente Magnético		
5.000 a 10.000	<i>Ilmenita</i>	11,67
	<i>Biotita</i>	8,90
	<i>Granate</i>	6,68
	<i>Wolframita</i>	5,68
Débilmente Magnético		
10.000 a 18.000	<i>Hematita</i>	4,64
	<i>Columnita</i>	4,08
	<i>Limonita</i>	3,21
	<i>Cromo</i>	3,12
	<i>Pirolusita</i>	2,61
	<i>Rodocrosita</i>	1,93
	<i>Siderita</i>	1,82
	<i>Manganita</i>	1,36
Pobremente Magnético		
18.000 a 23.000	<i>Rutilo</i>	0,93
	<i>Rodonita</i>	0,76
	<i>Dolomita</i>	0,57
	<i>Calamina</i>	0,51
	<i>Tantalita</i>	0,40
	<i>Cerusita</i>	0,30
	<i>Epidota</i>	0,30
	<i>Monacita</i>	0,30
	<i>Fergusonita</i>	0,29
	<i>Zircón</i>	0,28
	<i>Ceragirita</i>	0,28
	<i>Argentita</i>	0,27
	<i>Oropimente</i>	0,24
	<i>Pirita</i>	0,23
	<i>Esfalerita</i>	0,23
	<i>Molibdenita</i>	0,23
	<i>Bornita</i>	0,22
	<i>Wilemita</i>	0,21
	<i>Tetraedrita</i>	0,21
	<i>Scheelita</i>	0,15

3.2.1 Clasificación de los equipos utilizados para la separación magnética

Existen diversas formas en las cuales se pueden clasificar los equipos de concentración magnética. Algunas de ellas son:

- Fuente generadora del campo magnético
 - Electroimanes
 - Imanes permanentes
 - Imanes superconductores
- Intensidad del campo magnético
 - Separadores magnéticos de baja intensidad (LIMS)
 - Separadores magnéticos de alta intensidad (HIMS)
 - Separadores magnéticos de alto gradiente (HGMS)

Como se ha mostrado, existen diversos tipos de separadores magnéticos. La elección de uno de estos depende de diversos factores como, el tamaño de partícula y las propiedades magnéticas del mineral a tratar, las cuales son unas de las variables más importantes que determinan la selección de la técnica de separación magnética. En la figura 4 se muestra una posible clasificación dependiendo de las variables antes mencionadas.

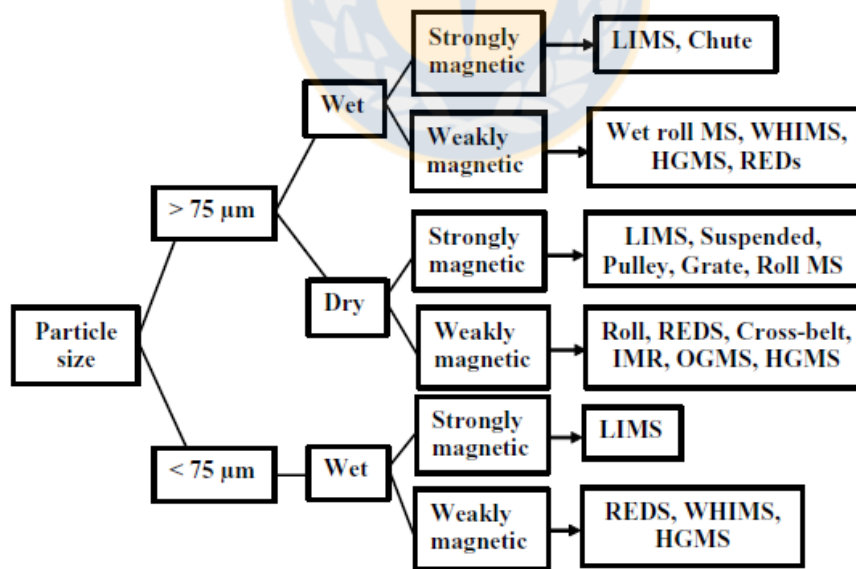


Figura 4: Clasificación según tamaño de partícula en los sólidos de alimentación (Svoboda, 2004).

Debido a las propiedades que posee el mineral a tratar en este estudio, nos enfocaremos en la separación magnética en húmedo, especialmente, en el funcionamiento de los tambores magnéticos.

3.2.2 Tambores magnéticos en húmedo

Los separadores magnéticos de tambor en húmedo juegan un rol fundamental en el proceso de concentración de magnetita, la concentración primaria de esta, siempre se logra con tambores magnéticos. El número de tambores o etapas de separación magnética dependerá del grado de pureza que se quiera alcanzar y de cuán liberado se encuentre el mineral.

La operación del separador magnético consiste en que, a medida que llega el material al tambor, el campo magnético atrae y retiene partículas ferrosas en la cubierta del tambor. A medida que el tambor gira, transporta el material a través del campo magnético. Aquellos minerales no magnéticos caen libremente del caparazón, mientras que las partículas ferrosas se mantienen firmemente hasta que se llevan fuera del campo magnético [6].

Según la configuración del tambor se pueden clasificar en tres tipos: concurrente, contra rotación y contracorriente.

- **Concurrente:** En este tipo de configuración, la pulpa entra a la caja de alimentación y hace contacto con el tambor. Logrando así un acoplamiento concurrente entre ambos, con la finalidad de capturar y transportar las partículas magnéticas al otro lado del tanque para ser descargadas en forma de concentrado, mientras que el material no magnético es descargado en la parte inferior del tanque (ver figura 5). Este diseño se utiliza generalmente para tratar material más grueso en el rango de tamaño 5 mm, su alto rendimiento y alta calidad del concentrado magnético obtenido, hacen que se utilice en etapas de limpieza [6, 7, 8, 9].

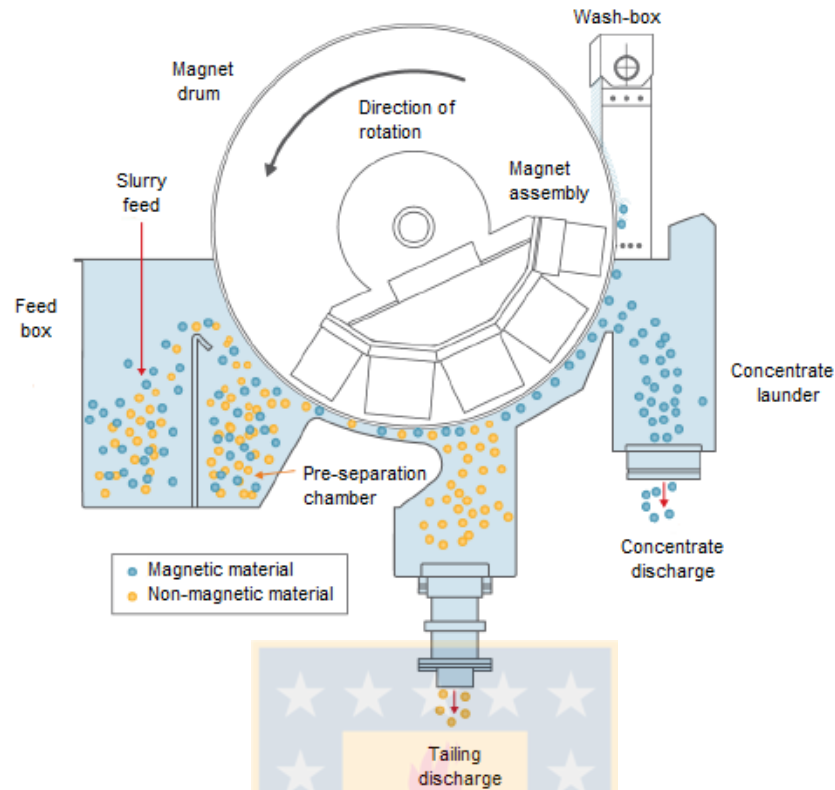


Figura 5: Tambor magnético, configuración concurrente (Outotec, 2010).

- Contra-rotación:** En este tipo de configuración, la pulpa entra al tanque y hace contacto con el tambor que se encuentra girando en dirección opuesta al flujo de pulpa, logrando acoplarse de forma contra-rotación (figura 6). La finalidad de esta configuración es capturar y transportar las partículas magnéticas cerca del lado de alimentación del tanque para descargarlas en forma de concentrado. El efecto que tiene esto es que se minimiza el tiempo de residencia del magnetismo capturado en el tanque, favoreciendo así la recuperación. Por lo tanto, son utilizados generalmente en etapas en donde se busca obtener una máxima recuperación y menor pérdida de material magnético en los relaves, que un concentrado más limpio. El tamaño de partícula puede ser de hasta 4 mm, pero es preferible que sea menor que 0,5 mm [6, 7, 8, 9].

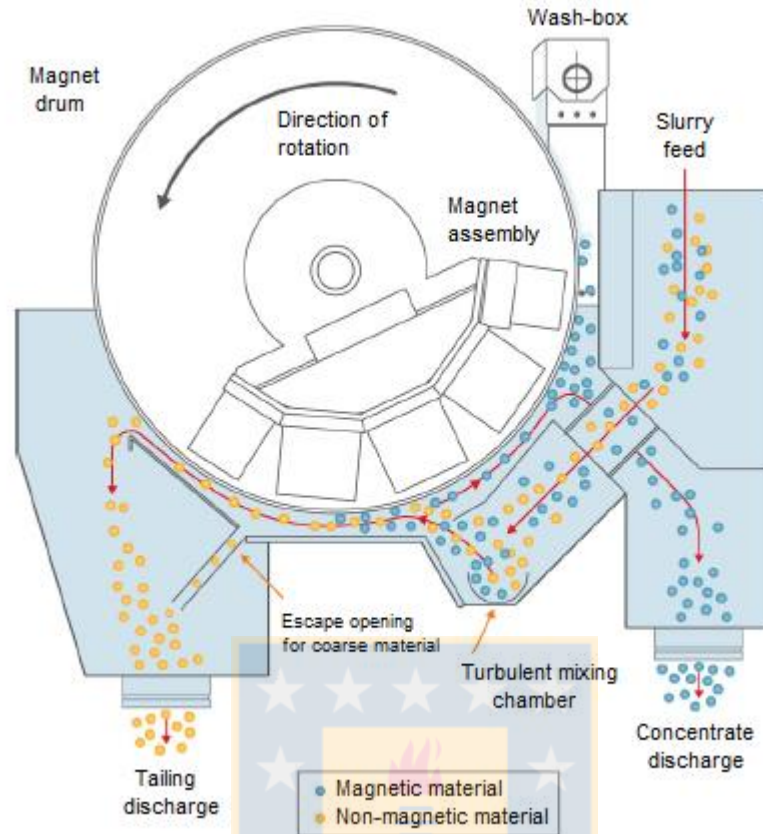


Figura 6: Tambor magnético, configuración contra-rotación (Outotec, 2010).

- Contra-corriente:** Este tipo de configuración se utiliza generalmente en la última etapa de un proceso de concentración magnética, en donde se requiere una limpieza muy cuidadosa del mineral. Su nombre se debe a que los relaves deben fluir en contra de la rotación del tambor cuando salen del separador, la alimentación es introducida cerca del fondo del tambor y se agita a través de chorros de agua de lavado (figura 7). Los relaves fluyen desde el extremo opuesto del tanque a través de un desbordamiento de descarga de relaves, que también actúa como control de nivel de pulpa, esto asegura una alta recuperación de material magnético y una alta calidad del concentrado. Este tipo de configuración se utiliza para partículas finamente molidas, inferiores a $100\ \mu\text{m}$ [6, 7, 8, 9].

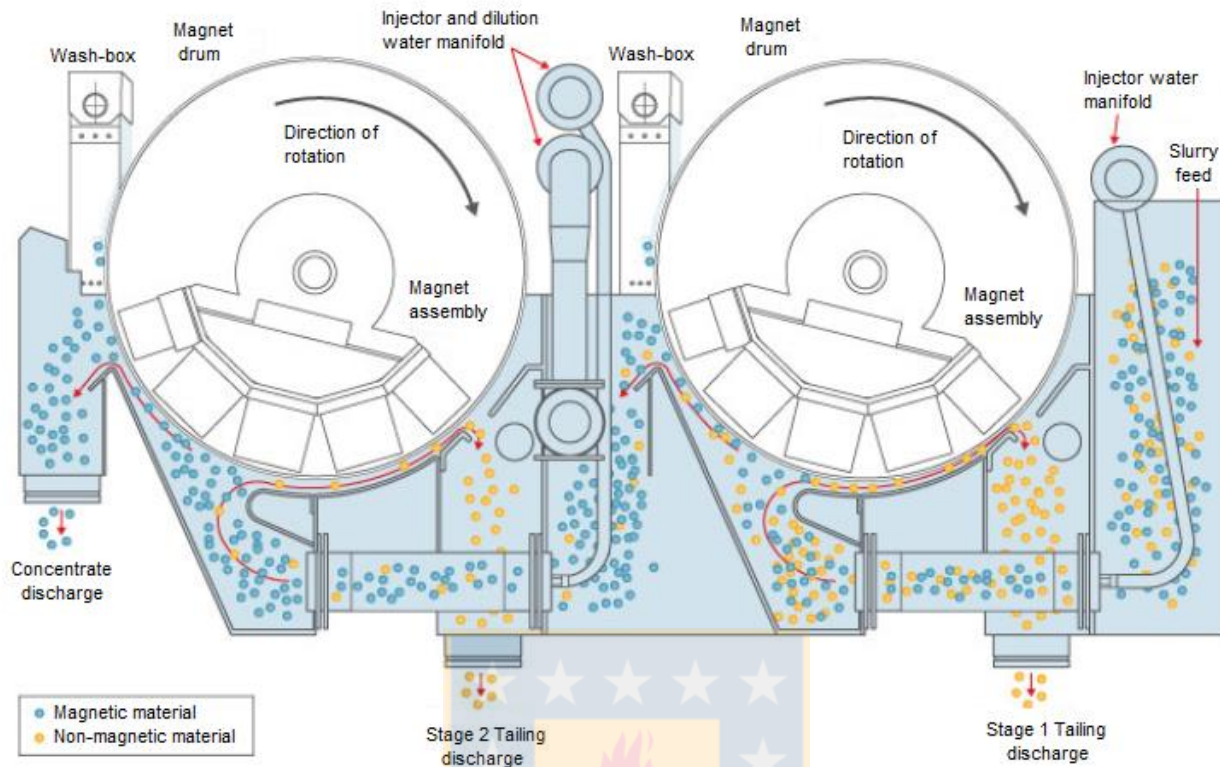


Figura 7: Tambor magnético, configuración contra- corriente (Outotec, 2010).

3.2.2.1 Variables que afectan el rendimiento de un separador magnético en húmedo

- Porcentaje de sólidos en la alimentación
- Proporción de material magnético en los sólidos de alimentación
- Velocidad del tambor
- **Porcentaje de sólido en la alimentación:** esta variable afecta la capacidad volumétrica, la viscosidad y la floculación magnética. Un porcentaje de sólidos en la alimentación menor al del diseño, hará que aumente el volumen de pulpa, pudiendo exceder la capacidad volumétrica del separador magnético, es por esto que se recomienda que el diseño del tambor se haga al menor porcentaje de sólidos posible de tal manera de asegurar el rendimiento del separador. La floculación magnética también se ve afectada cuando el porcentaje de sólidos disminuye, ya que implica una menor cantidad de partículas presentes en la suspensión, disminuyendo la probabilidad de la floculación magnética entre las partículas ferromagnéticas. Por otro lado, al aumentar el porcentaje de sólido también lo hará la viscosidad, el aumento de esta implica un mayor arrastre de partículas no magnéticas en el concentrado magnético. Si se requiere un

concentrado magnético limpio, se debe trabajar a porcentajes de sólidos en peso entre 20-30% y si el objetivo es obtener una alta recuperación de material magnético se debe trabajar a porcentajes de sólidos en peso entre 30-50% [10].

- **Proporción de material magnético en los sólidos de alimentación:** Normalmente el contenido magnético de los sólidos será del 60% o superior, entendiéndose por este a la cantidad de mineral que presenta propiedades magnéticas. Cuando el contenido magnético de los sólidos cae por debajo del 60%, se debe reducir el volumen de alimentación y se debe considerar la opción de tambores múltiples, con el fin de mantener una alta recuperación magnética [10].
- **Velocidad del tambor:** generalmente se trabaja a velocidades de tambor fijas en un rango entre 10 y 20 rpm, para sólidos de alimentación con un alto contenido magnético se requieren velocidades de rotación más altas. Sin embargo, no se ha establecido una relación clara entre la velocidad de tambor y la eliminación del magnetismo y, a la vez, no existe una relación firme con la recuperación del magnetismo. La mayoría de los separadores utilizan velocidades de tambor inferiores a 15 rpm, porque las velocidades más altas aumentan el desgaste del tambor [10].

3.2.2.2 Parámetros de funcionamiento del separador magnético de tambor en húmedo

La maximización de la recuperación y el grado del producto magnético obtenido en un tambor magnético, dependerá de una óptima operación, hay cuatro parámetros operativos que son de suma importancia para obtener una óptima operación.

- Control de nivel
 - Espacio entre tambor/tanque (GAP)
 - Posición del imán
 - Agua de lavado
- **Control de nivel:** la pulpa alimentada al tambor se distribuye uniformemente en todo el ancho de la caja de alimentación y luego fluye por debajo del ancho total del tambor y dentro del tanque (batea) que se encuentra bajo el tambor. El nivel de pulpa en la batea debe mantenerse de modo que la parte inferior del tambor se sumerja constantemente. La mayoría de los separadores de tambor en húmedo poseen un indicador del nivel de pulpa en la parte lateral, de modo de mostrar que el nivel se mantiene en su punto óptimo [10].

La parte inferior del arco del conjunto de imán se coloca en la parte inferior del tambor de modo que se obtenga la máxima intensidad del campo magnético en la superficie del tambor, el área del tambor que cubre la mayoría del arco del conjunto de imán debe sumergirse en la pulpa de alimentación para que la recuperación del magnetismo pueda maximizarse constantemente. Si

existe un espacio entre la pulpa de alimentación y el tambor, la recuperación del material magnético disminuirá sustancialmente [10].

- **Espacio entre tambor/tanque (GAP):** existen dos espacios entre el tambor y el tanque que son críticos para el funcionamiento del separador, estos son: el espacio entre el tambor y el fondo del tanque (GAP base); y el espacio entre el tambor y la salida del concentrado (GAP descarga).

El GAP base determina el gradiente magnético, un GAP mayor disminuirá el gradiente y por lo tanto mejorará la ley, en cambio un GAP menor aumentará el gradiente y facilitará la recuperación del concentrado magnético. Cuando se reduce el espacio, provoca un aumento en la velocidad del flujo de alimentación, si el caudal de alimentación no es reducido, implica un aumento en la resistencia hidrodinámica y una menor recuperación magnética. Por lo tanto, si hay una necesidad de maximizar la recuperación magnética a través de un aumento adicional en el gradiente magnético, se deberá reducir la velocidad de flujo de alimentación. En general se recomienda utilizar un GAP base entre 10 y 25 mm [10].

El GAP de descarga permite la deshidratación del concentrado magnético y su magnitud depende principalmente del contenido magnético de los sólidos de alimentación. Si el GAP es muy grande el concentrado tendrá un mayor contenido de humedad y en caso contrario si este es muy pequeño, parte del concentrado se ira con la cola, reduciendo así la recuperación del magnetismo. Se recomienda comenzar con un GAP de descarga de 15 mm y ajustarlo hasta que se logre una deshidratación razonable sin pérdida de recuperación de magnetismo [10].

- **Posición del imán:** corresponde a la posición del arco del conjunto de imán en relación con el tanque, este arco debe cubrir el área del tambor que se encuentra sumergida en la pulpa del tanque y el lado de descarga del contenido magnético del tanque, el ultimo polo debe estar aproximadamente a 50 mm por encima del borde del concentrado.

Si la posición del imán es demasiado alta, la descarga del concentrado magnético se verá impedida y provocará una acumulación del concentrado magnético, produciéndose una disminución en la recuperación debido a que una parte del concentrado se ira en la cola.

Cuando la posición del imán es demasiado baja, parte del concentrado se descargará antes de llegar al borde de la descarga de concentrado, provocando que parte del concentrado se vaya junto con la cola, reduciendo la recuperación magnética [10].

- **Agua de lavado:** el paso del concentrado a la canaleta de recolección, requerirá de la ayuda de un sistema de agua de lavado. Este sistema será efectivo si se cumplen las siguientes condiciones:

- Presión suficiente en el suministro de agua de pulverización. Un mínimo de 2 bar.

- Un suministro de agua limpia para minimizar los bloqueos de la boquilla de pulverización.
- Cubrir con agua pulverizada todo el ancho del tambor.
- La posición de los aspersores de agua debe ser tal que esta se dirija al borde del concentrado.
- Mantenimiento eficaz del sistema de pulverización de agua y de las boquillas de agua en particular para que la eficiencia no se vea comprometida.

3.3 Indicadores de propiedades magnéticas del mineral y parámetros metalúrgicos

- **Davis tube test (Dtt):** es un proceso de concentración magnética, hecho bajo ciertas condiciones propias del instrumento (como intensidad magnética, inclinación del tubo, granulometría, etc.). Por medio de este es posible obtener la recuperación del mineral que presenta propiedades magnéticas. Indicador que es utilizado para conocer el contenido de hierro magnético [11].

$$Dtt = \left(\frac{m_c}{m_f} \right) 100 \quad (3)$$

m_c : masa concentrado

m_f : masa alimentación

- **Hierro magnético:** corresponde al porcentaje de hierro con comportamiento magnético, respecto al total de la muestra. El hierro con comportamiento magnético es aquel que pasa a formar parte del concentrado, al someter una muestra a la prueba de tubo Davis [11].

$$Fe_{Mag} = Dtt \left(\frac{L_c}{100} \right) \quad (4)$$

Dtt: recuperación en peso (%) del concentrado en la prueba tubo Davis.

L_c : ley de Fe del concentrado del tubo Davis.

- **Recuperación en peso:** corresponde a la razón entre la masa del concentrado y la masa de la alimentación.

$$R_p = \left(\frac{C}{F} \right) 100 \quad (5)$$

F: Alimentación

C: Concentrado

- **Recuperación:** corresponde a la razón entre el metal valioso en el concentrado y metal valioso en la alimentación.

$$R = \left(\frac{c(f-t)}{f(c-t)} \right) 100 \quad (4)$$

c: Contenido de mineral de interés en el concentrado

f: Contenido de mineral de interés en la alimentación

t: Contenido de mineral de interés en el relave.



4 Desarrollo experimental

4.1 Diseño experimental

Para la determinación de las características de la etapa de concentración magnética a incorporar se definieron cuatro variables: intensidad del campo magnético, porcentaje de sólidos, velocidad de giro del tambor y granulometría del mineral alimentado a la etapa de concentración magnética. La tabla 2 muestra los niveles en que fueron estudiadas estas variables.

Tabla 2: Resumen diseño experimental.

Variables	Niveles
Intensidad de campo magnético, Gauss	1000, 2000 y 3000
Velocidad de giro del tambor, rpm	25 y 35
Porcentaje de sólidos en peso la alimentación	25, 40 y 50
Granulometrías de alimentación, % bajo los 44 μm	20, 25, 30, 43, 54 y 61

La primera variable estudiada fue la intensidad del campo magnético, mediante ensayos Dtt a distintos gauss. Definido éste, se procedió a estudiar el efecto de la velocidad de giro del tambor magnético y el porcentaje de sólidos mediante pruebas de concentración magnética. Una vez definida la intensidad del campo magnético, velocidad de giro del tambor y porcentaje de sólidos, se estudió la granulometría de alimentación a la etapa de concentración magnética. Cabe mencionar que estas pruebas se realizaron solo una vez, debido a la disposición de los equipos, espacios y recursos humanos.

Lo último que se estudio fue el comportamiento del mineral en: circuito actual de molienda y clasificación (figura 8) a nivel laboratorio; circuito 1 de concentración selectiva a nivel laboratorio (figura 9); y circuito 2 de concentración selectiva a nivel piloto (figura 10). Tanto el circuito actual de molienda y clasificación como el circuito 1 de concentración magnética se realizaron hasta que alcanzaron su equilibrio. El equilibrio fue alcanzado luego de repetir 3 veces los circuitos.

El circuito actual de molienda y clasificación corresponde a un circuito de molienda cerrado y directo, el cual tiene por objetivo entregar un producto en donde el 80% de las partículas tengan un tamaño inferior a 44 μm . El circuito 1 de concentración selectiva es una modificación al circuito actual de molienda y clasificación, la consiste en incorporar una etapa de concentración primaria

en la descarga del molino. El circuito 2 de concentración selectiva, es un circuito que involucra dos etapas de molienda y una de concentración magnética, la primera etapa corresponde a una molienda abierta, la cual tiene por objetivo alcanzar un P80 inferior a los 300 μm , seguido por una etapa de concentración magnética y luego un circuito cerrado e inverso de molienda y clasificación en el cual se debe obtener un P80 de 44 μm .

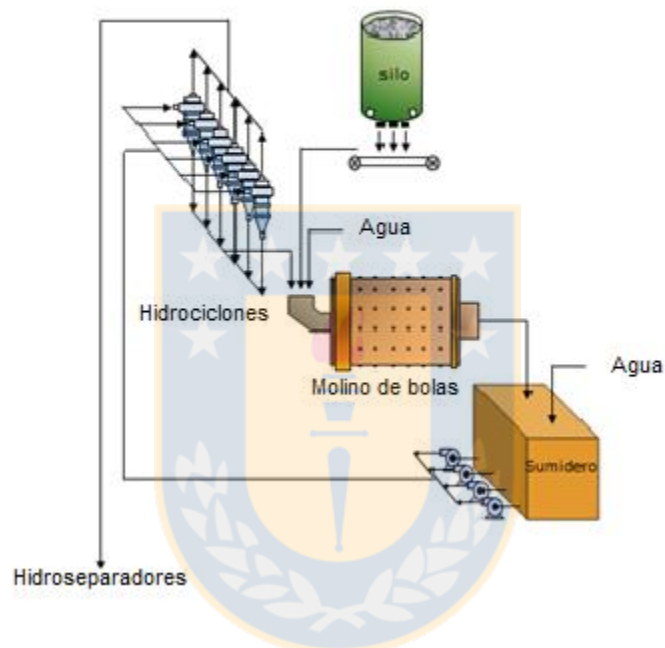


Figura 8: Circuito actual de molienda y clasificación (Uso interno CAP).

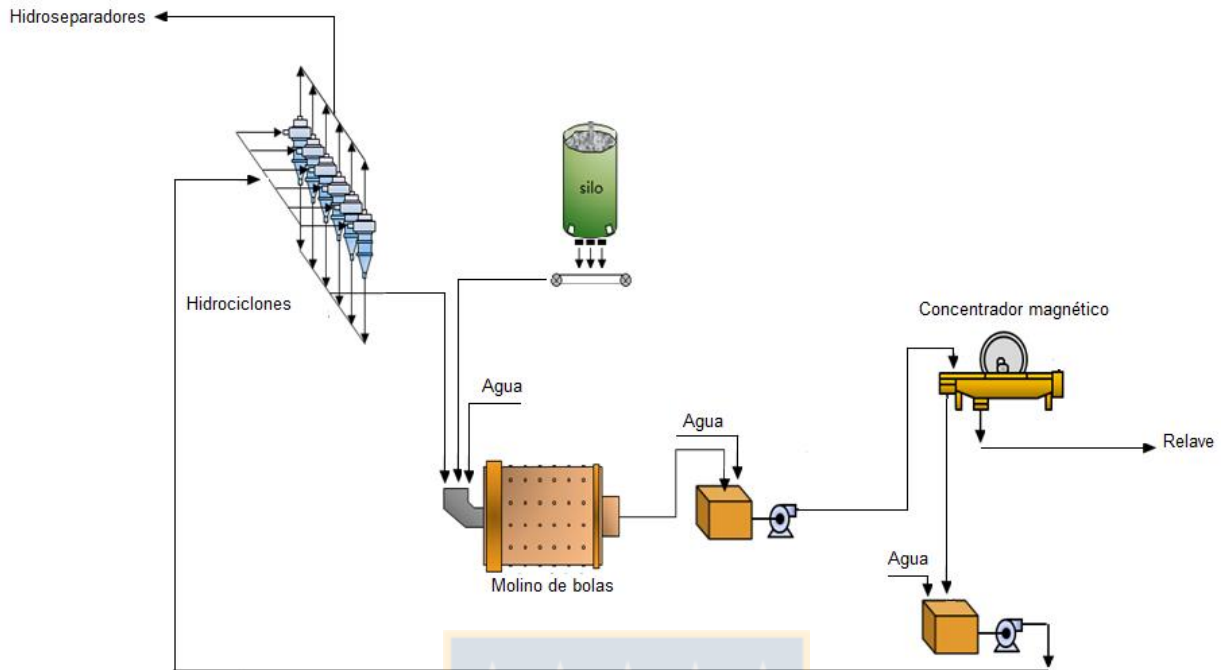


Figura 9: Circuito 1 concentración selectiva (Elaboración propia).

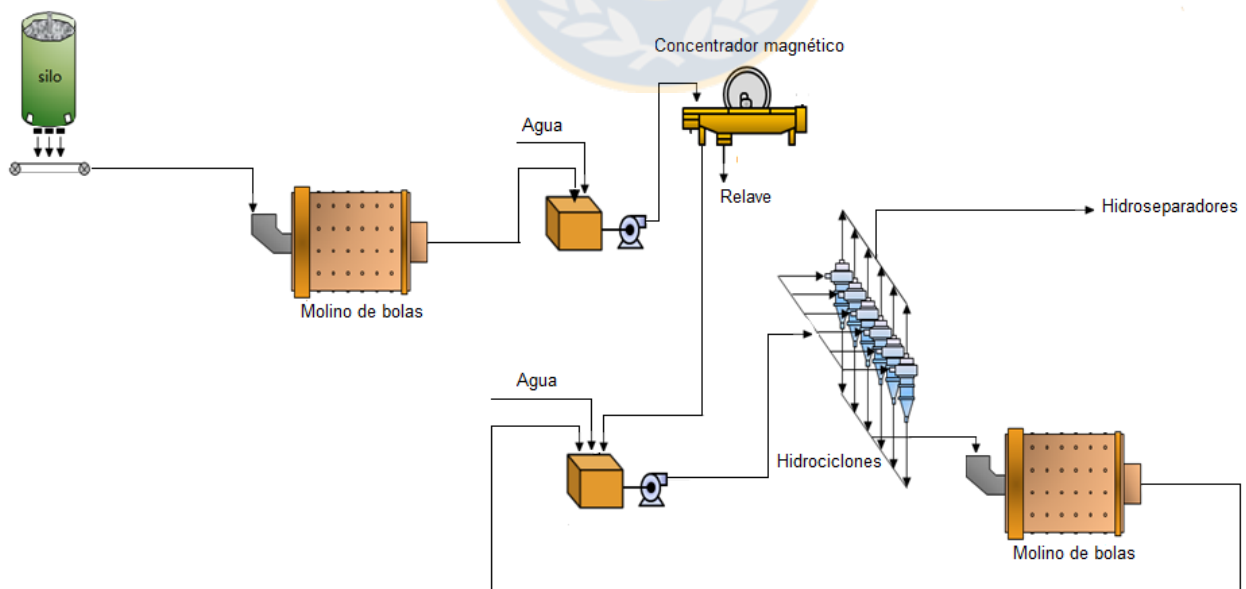


Figura 10: Circuito 2 concentración selectiva (Elaboración propia).

4.2 Muestras

Para el trabajo experimental de este estudio se utilizaron dos tipos de minerales que procesa la planta. El primero de ellos corresponde a un mineral denominado sinter, el cual provenía de la descarga de los molinos 1, 2 y 4. Este fue utilizado en la realización de las pruebas para definir parámetros operacionales como intensidad de campo magnético, velocidad de giro del tambor y porcentaje de sólidos. El segundo tipo de mineral corresponde a preconcentrado básico, el cual fue obtenido desde las canchas de acopio y fue utilizado para evaluar la influencia de la granulometría de alimentación en la etapa de concentración magnética y para la realización de los circuitos propuestos de concentración selectiva. La tabla 3 muestra las principales características de los minerales antes mencionados.

Tabla 3: Caracterización minerales utilizados en el estudio.

Característica	Sinter	Preconcentrado Básico
Fe [%]	64.27	59.98
Fe magnético [%]	62.94	58.73
GER	4.88	4.20
FeO [%]	27.94	25.75
P [%]	0.06	0.11
SiO ₂ [%]	4.98	8.40
MgO [%]	1.70	2.64
Al ₂ O ₃ [%]	1.16	1.64
V [%]	0.30	0.28

En la figura 11 se puede apreciar el contenido de hierro por fracción de tamaño para ambos minerales, los cuales se comportan de forma similar. Se aprecia que para tamaños de partículas superiores a los 300 μm e inferiores a los 38 μm , el contenido de hierro disminuye. Este comportamiento también es posible de observar en otras texturas del mineral, las cuales son mostradas en el anexo 1.

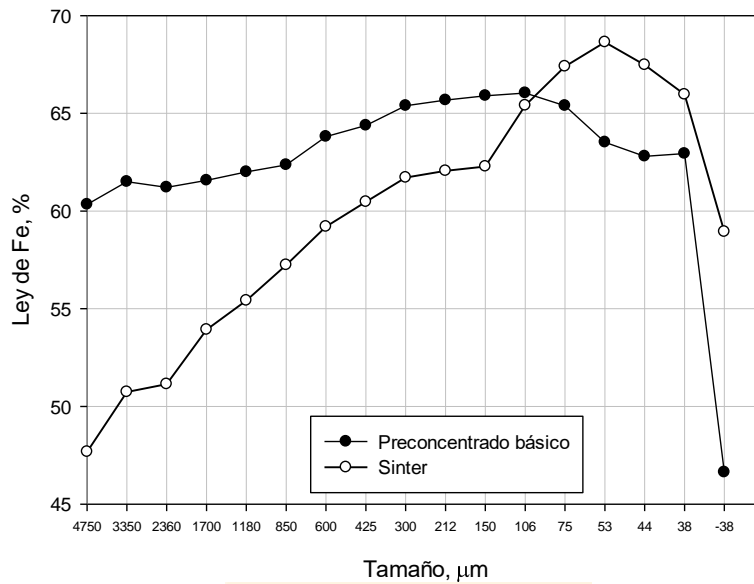


Figura 11: Contenido de hierro por fracción de tamaño, en los dos minerales utilizados en este estudio.

Las figuras 12 y 13 corresponden a los difractogramas realizados a ambas muestras, en ellos es posible apreciar que, las especies mineralógicas presentes en el preconcentrado básico y en el sinter corresponden a hematita, magnetita, actinolita y cuarzo.

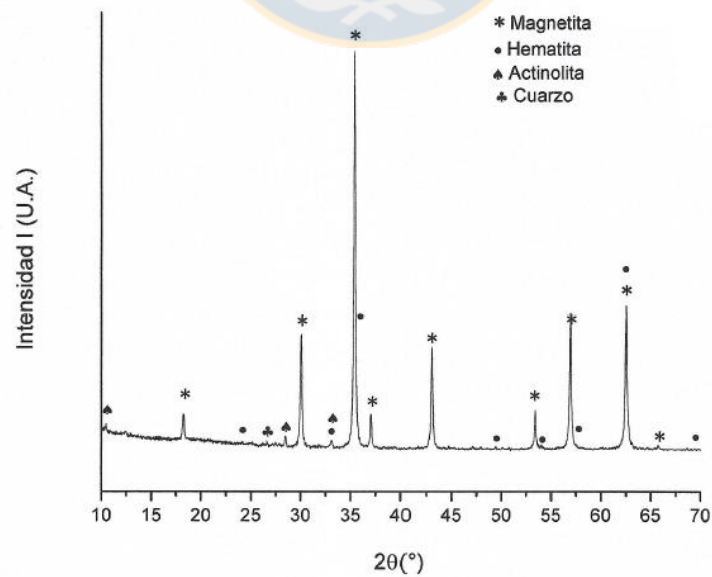


Figura 12: Difractograma realizado a la muestra de preconcentrado básico (Guzmán, 2019).

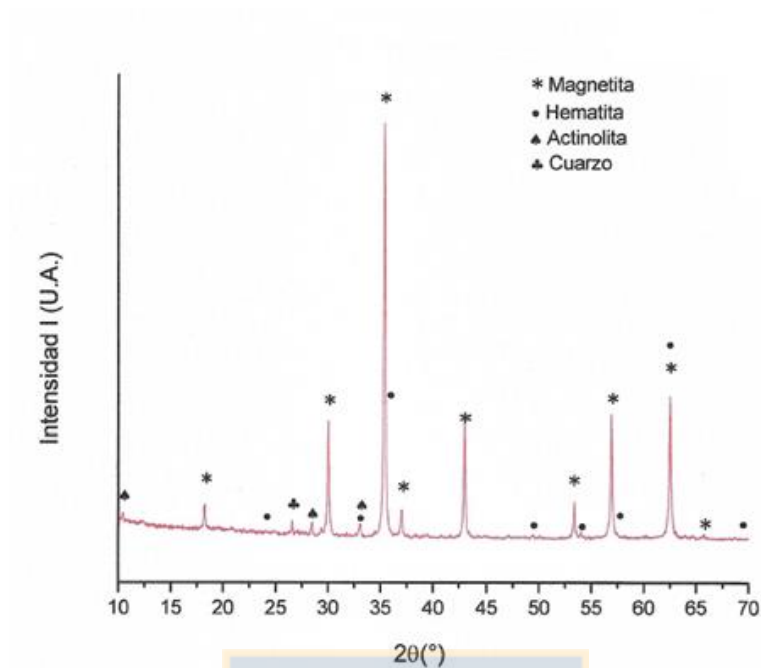


Figura 13: Difractograma realizado a la muestra de sinter (Guzmán, 2019).

4.3 Equipos y Procedimiento

4.3.1 Determinación de la intensidad del campo magnético

Las pruebas para la determinación de la intensidad del campo magnético se realizaron mediante un ensayo Dtt. Dicho ensayo corresponde a un proceso de concentración magnética, el cual se realiza en el equipo mostrado en la figura 14. El procedimiento consiste en alimentar 20 gramos de mineral al tubo, el que generalmente es pulverizado para alcanzar un 80% de partículas menores a los 44 μm . En este caso la muestra no fue pulverizada y la cantidad de partículas bajo los 44 μm fue de un 34%. Como producto se obtienen dos corrientes: concentrado y relave. La recuperación en peso y la ley de hierro del concentrado obtenido en este ensayo sirven para determinar el contenido de hierro magnético presente en la muestra.



Figura 14: Equipo utilizado para la realización del Davis tube tester.

4.3.2 Pruebas de molienda nivel laboratorio

Las pruebas de molienda se llevaron a cabo en molino torque cuyas dimensiones son 1,50 pies de diámetro y 1.25 pies de largo (figura 15 y 16). Lo primero que se realizó fue la definición de las condiciones de operación de este, es decir, nivel de llenado (28%), collar de bolas (se utilizaron solo bolas de 1,5 pulgadas), porcentaje de sólidos en peso (80%) y cantidad de alimentación (14 kilogramos). Se definió que los valores del nivel de llenado y porcentaje de sólidos fueran los antes mencionados, debido a que eran las condiciones de operación del molino 4. Utilizado como referente en este estudio. El collar de bolas y la alimentación al molino fueron determinados mediante la utilización de la planilla ballparam-batch de Moly-Cop Tools. Una vez definidas estas, el procedimiento fue cargar el collar de bolas junto con el mineral y el agua acorde al porcentaje de sólidos, al molino y moler durante los tiempos establecidos. Para las pruebas de concentración magnética a distintas granulometrías los tiempos de molienda fueron 3, 3.5, 6, 11,18, 40 y 60 minutos. El tiempo de molienda para la realización del circuito actual y 1 de concentración selectiva fue de 6 minutos. Al finalizar el tiempo de molienda, el molino se vacía y el mineral es depositado en baldes, para su posterior decantación y secado en los hornos.



Figura 15: Molino Torque, utilizado en las pruebas de molienda nivel laboratorio, que opera bajo condiciones batch.



Figura 16: Interior molino Torque, cargado con bolas y mineral.

4.3.3 Pruebas de concentración magnética escala laboratorio

Se realizaron en el tambor magnético L8 que se muestra en la figura 17, el cual tiene un diámetro de 8 pulgadas. Este equipo puede operar en forma concurrente y contra rotación, a una intensidad de campo magnético de 750 ó 1000 gauss y la alimentación puede ser en forma de pulpa o seco. Además cuenta con sistema de agua de lavado, el cual facilita la separación del concentrado del tambor.

Se realizaron diversas pruebas de concentración magnética, las primeras fueron para determinar el porcentaje de sólidos de la alimentación y la velocidad de giro del tambor, las condiciones para estas pruebas fueron: porcentaje de sólidos 25%, 40% y 50%, rpm 25 y 35, flujo de alimentación 4,7 L/min, intensidad del campo magnético 1000 gauss y configuración contra-rotación. Una vez que se definieron las variables operacionales (intensidad de campo magnético, velocidad de giro del tambor y porcentaje de sólidos en la alimentación), las pruebas siguientes de concentración magnética se realizaron a un porcentaje de sólidos de 40%, una velocidad de giro de 25 rpm y un flujo de alimentación de 4,7 L/ min.

El procedimiento para la realización de las pruebas de concentración magnética consistió primero en preparar la pulpa de alimentación al porcentaje de sólidos requerido en un estanque agitador. Luego se alimenta la pulpa al concentrador magnético por medio de bombas peristálticas, para lograr la concentración del mineral. El concentrado (figura 18 (b)) obtenido es depositado en bandejas, mientras que el relave es almacenado en baldes. Una vez que el concentrado y relave sedimentan son enviados a los hornos de secado. Posterior a esto se le realizan análisis químico y granulométrico.



Figura 17: Concentrador magnético L8, utilizado en las pruebas de concentración magnética a nivel laboratorio.



(a)

(b)

Figura 18: Funcionamiento concentrador magnético L8. a) mineral de hierro adherido al tambor magnético y b) salida del concentrado.

4.3.4 Pruebas de clasificación en húmedo escala laboratorio

Las pruebas de clasificación en húmedo se llevaron a cabo en un ro-tap, el cual es mostrado en la figura 19. En la realización de estas pruebas lo primero que se hace es homogenizar la muestra a clasificar y definir la malla de corte. Las mallas utilizadas en las pruebas fueron la 200 y 325, la malla 200 se eligió en base a la malla de corte de los hidrociclones y la 325 para asegurar la obtención de un producto con un tamaño de partículas de 80% inferior a los 44 μm . Al ro-tap se le alimenta una cantidad de 500 gramos de mineral y se comienza a clasificar añadiéndole agua, la prueba se termina una vez que se ha clasificado todo el mineral. Para asegurar que no queda mineral en el equipo se coloca un vaso precipitado bajo la malla y se adiciona agua, si el contenido del vaso es solo agua se termina la prueba. Tanto el sobre como bajo tamaño (figura 20) son recolectados en bandejas para su posterior sedimentación, secado y análisis químico y granulométrico.



Figura 19: Clasificación en húmedo, en Equipo Ro-Tap.



(a)

(b)

Figura 20: Productos obtenidos de la clasificación en húmedo: a) partículas de mineral superior a la malla 200 y b) partículas de mineral inferiores a la malla 325.

4.3.5 Prueba de molienda abierta nivel piloto

La prueba de molienda abierta nivel piloto se realizó en un molino salas, el cual tiene forma de cilindro con un diámetro de 2,5 pies y un largo de 4 pies (figura 21). Las condiciones de esta prueba fueron: flujo de alimentación 12,5 kg/min, porcentaje de sólidos en la descarga 55%, nivel de llenado 30% y velocidad de giro de 36 rpm.

El procedimiento para la prueba piloto consistió en: primero homogenizar la muestra, luego alimentarla al buzón contenedor, el cual es el encargado de alimentar la correa transportadora que finalmente alimenta al molino, en conjunto con el flujo de agua requerido. Al ser esta molienda un proceso continuo, se debe estabilizar el molino y esto se logra cuando el porcentaje de sólidos en la descarga es igual a 55%. La estabilización se logró a un tiempo de 50 minutos. La descarga del molino es recolectada en iso contenedores. Una vez que se logra la estabilización, el iso contenedor es cambiado y se lleva un registro del porcentaje de sólidos en la descarga, flujo de alimentación y porcentaje pasante bajo la malla 100, cada 5 minutos. Finalizada la prueba la descarga sedimenta y se seca en los hornos, para su posterior análisis químico y granulométrico. La figura 22 muestra el mineral antes y después de ser molido.



Figura 21: Circuito molienda abierta a nivel piloto.



(a)

(b)

Figura 22: a) Alimentación circuito molienda abierta y b) Descarga circuito molienda abierta.

4.3.6 Prueba de concentración magnética escala piloto

Esta prueba se realizó en el tambor magnético de baja intensidad (LIMS) Eriez (figura 23), el cual posee un diámetro de 48 pulgadas, igual que un tambor industrial y un largo de 15.7 pulgadas. La

alimentación al concentrador magnético puede ser en forma de pulpa o seca. Las condiciones bajo las cuales se llevó a cabo esta prueba fueron: flujo de alimentación de 96 kg/min, porcentaje de sólidos en la alimentación de 40%, intensidad del campo magnético de 1000 Gauss y configuración contra-rotación.

Para la realización de esta lo primero que se hizo fue homogenizar y alimentar la muestra en seco al buzón contenedor, el cual alimenta una correa transportadora, que alimenta al tambor magnético. A medida que el mineral seco va ingresando al concentrador, se le adiciona un flujo de agua acorde al porcentaje de sólidos deseado en la alimentación. Una vez que el equipo comienza a concentrar, tanto el concentrado (figura 24 (a)) como el relave (figura 24 (b)) son recolectados en iso contenedores y se lleva un control operacional de esta. El cual consiste en llevar un registro del porcentaje de sólidos, densidad de pulpa y flujo del concentrado y relave obtenido, cada 2 minutos. La prueba finaliza una vez que todo el mineral es procesado y su duración dependerá de la cantidad de muestra a tratar. Cuando se finaliza la prueba, se deja sedimentar y secar el concentrado y relave para su posterior análisis químico y granulométrico.



Figura 23: Concentrador magnético de baja intensidad de 48 pulgadas de diámetro.



(a)

(b)

Figura 24: Productos obtenidos en la prueba de concentración magnética escala piloto: a) concentrado y b) relave.

4.3.7 Prueba de molienda y clasificación escala piloto

Esta prueba se realizó de forma continua en un circuito compuesto por un molino Hardinger, el cual está compuesto por una parte cilíndrica de 2.79 pie de diámetro y 1.9 pie de largo en el centro y por dos conos en los extremos uno de 0.5x0.7 pie y el otro de 1.5x2.2 pie (figura 25 (a)) y un hidrociclón de 0.33 pie de diámetro por 0.65 de largo (figura 25 (b)). La tasa de alimentación al circuito es de 7 kg/min, el molino opera a un porcentaje de sólidos de 80% y se obtiene como producto del hidrociclón un 80% de partículas bajo los 44 μm .

La duración de la prueba depende de la cantidad de mineral a procesar, se recomienda que esta sea mayor a una tonelada, ya que una parte de esta es utilizada en la estabilización del circuito. La alimentación fresca al molino se hace mediante una correa transportadora. La descarga del molino es almacenada en iso contenedores, de donde es bombeada hasta el hidrociclón para ser clasificada, el sobre flujo es almacenado en iso contenedores para su posterior sedimentación y secado, mientras que el bajo flujo es retornado al molino.



(a)



(b)

Figura 25: Equipos utilizados en la prueba de molienda y clasificación escala piloto. a) molino Hardinger y b) hidrociclón.



5 Resultados y discusiones

5.1 Determinación de la intensidad del campo magnético

En la figura 26 es posible apreciar el comportamiento que tuvo la muestra de sinter, proveniente de la descarga del molino 4, al ser sometida a ensayo Dtt a distintas intensidades de campo magnético.

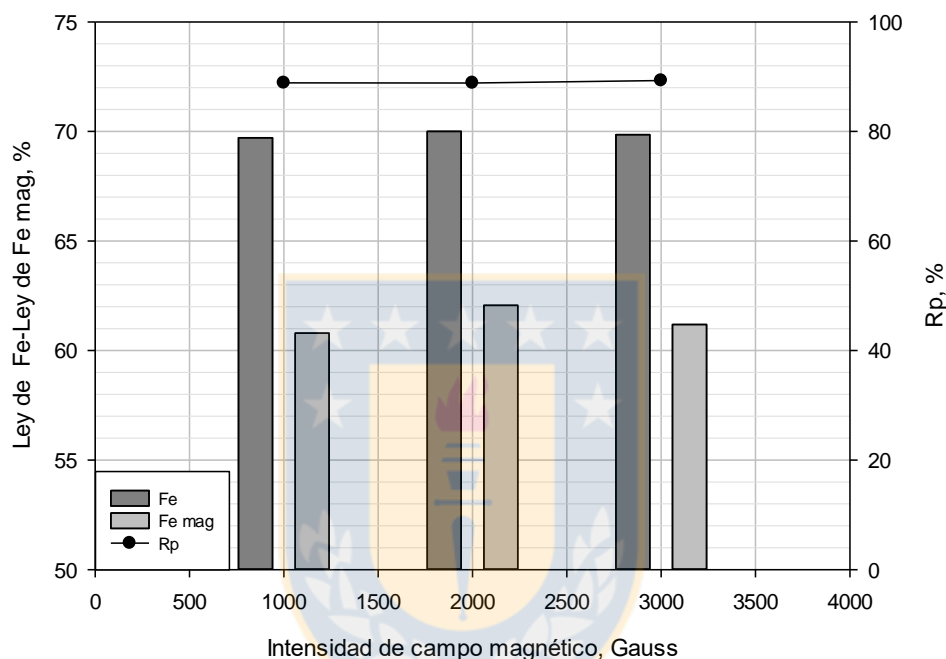


Figura 26: Resultados obtenidos del ensayo Dtt a distintas intensidades de campo magnético.

El ensayo Dtt es un test de concentración magnética que sirve para indicar el máximo grado de hierro al que se puede llegar. En la figura 26 se observa que la muestra se comporta de forma similar a 1000, 2000 y 3000 gauss. Existe un aumento de 0.4% de la recuperación en peso a los 3000 gauss, esto es debido a que aquellas partículas que presentan un menor grado de magnetismo, pueden ser concentradas a intensidades de campo magnético más altas

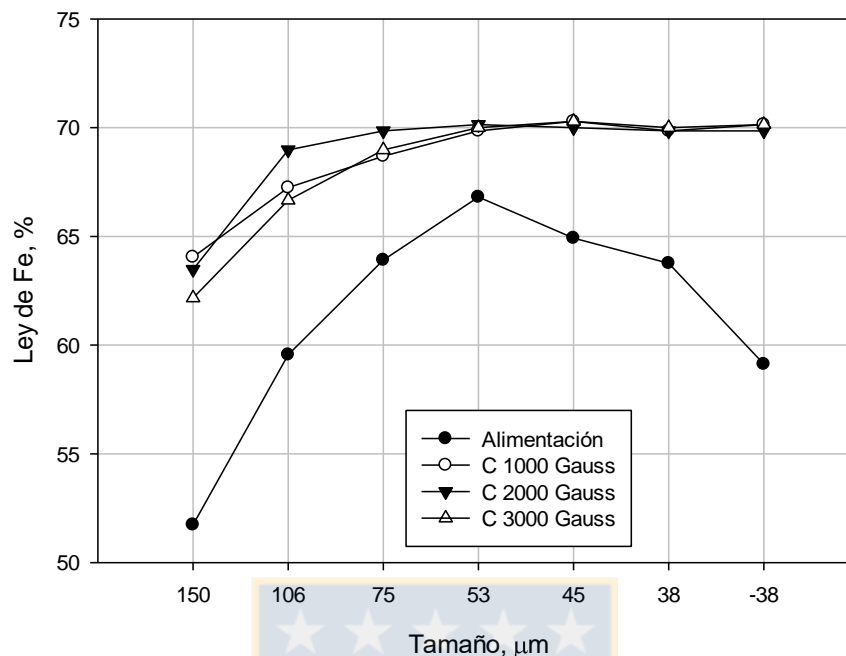


Figura 27: Contenido de hierro por fracción de tamaño para los distintos concentrados obtenidos en el ensayo Dtt.

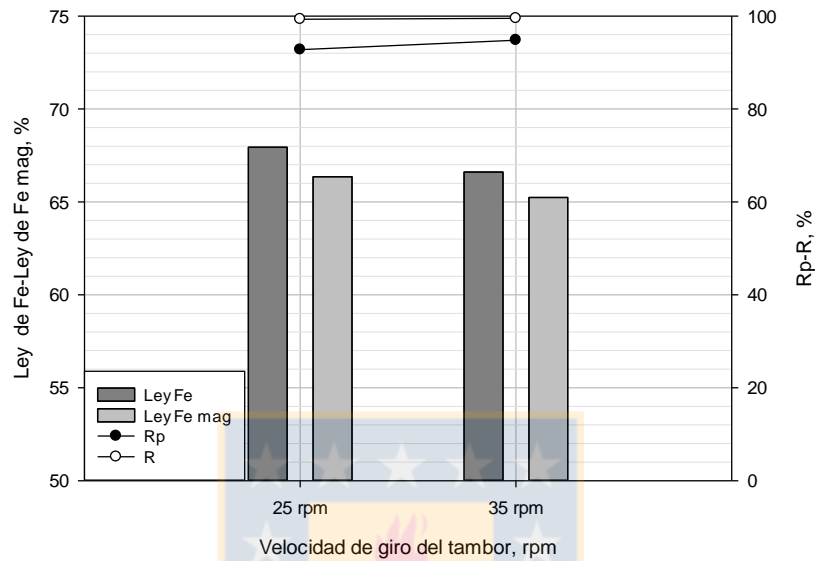
En la figura 27 se muestra el contenido de hierro por fracción de tamaño de los concentrados obtenidos a distintas intensidades de campo magnético. Se observa que los concentrados presentan un contenido de hierro de 70% para tamaños de partículas inferiores a los 53 μm . En cambio para tamaños de partículas superiores a los 53 μm existe una diferencia y una disminución del contenido de hierro. El concentrado que presenta mayores contenidos de hierro para partículas sobre los 53 μm , es el obtenido a una intensidad de campo magnético de 2000 Gauss.

Debido a que se obtuvieron recuperaciones en peso similares y que el contenido de hierro para partículas inferiores a los 53 μm fue alrededor del 70% para las 3 pruebas. Se determinó que la intensidad del campo magnético debe ser de 1000 Gauss.

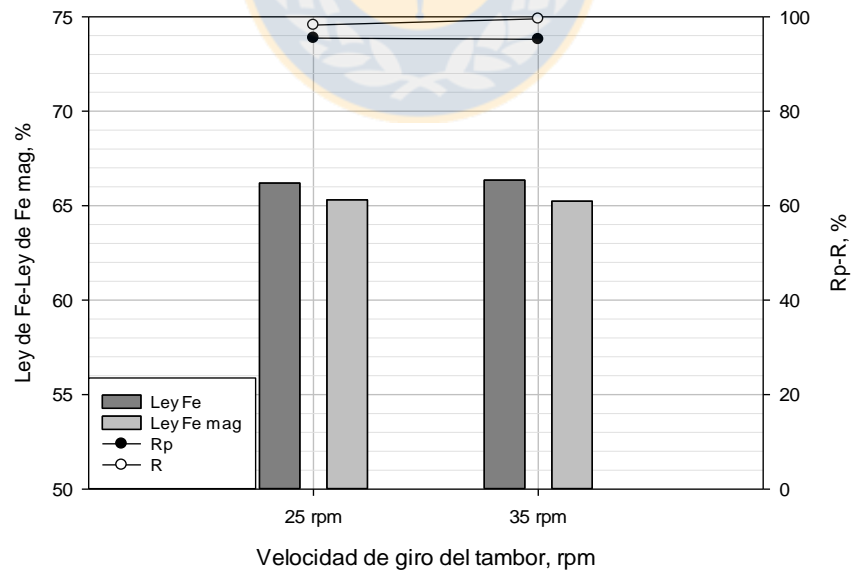
5.2 Determinación de la velocidad de giro del tambor magnético y porcentaje de sólidos en la alimentación

Se estudió el efecto de la variación de la velocidad de giro del tambor magnético, para porcentajes de sólidos en la alimentación de 25 y 50%. En la figura 28 (a) es posible observar que la recuperación es peso aumenta en un 3% al pasar de 25 a 35 rpm, que la ley de hierro disminuye en un 1.5% y que la recuperación metalúrgica se mantiene constante. Mientras que la figura 28 (b)

muestra que tanto la recuperación en peso, ley de hierro y de hierro magnético, se mantienen constantes al variar la velocidad de giro del tambor.



(a)



(b)

Figura 28: Variación de la velocidad de giro del tambor para porcentajes de sólidos de: a) 25 % y b) 50 %.

De la figura 28 es posible deducir que la velocidad de giro del tambor magnético tiene mayor influencia en la recuperación en peso, ley de hierro y de hierro magnético a un porcentaje de sólidos de 25%, que para uno de 50%. Si bien teóricamente no se ha comprobado cual es la relación de la velocidad de giro con la recuperación y ley, se recomienda trabajar a velocidades menores a 15 rpm, para un menor desgaste del tambor [10]. Sin embargo industrialmente se trabaja a velocidades de 25 rpm. En base a lo dicho anteriormente y que para ambos casos la recuperación metalúrgica alcanza valores de 99% se decidió trabajar a una velocidad de giro de 25 rpm.

Para determinar el porcentaje de sólidos en la alimentación, se mantuvo constante la velocidad de giro del tambor. En la figura 29, se observa que al aumentar el %Cp, tanto la ley de hierro como la de hierro magnético disminuyen, mientras que la recuperación en peso aumenta. El aumento de la recuperación en peso se debe a que cuando aumenta el %Cp, también aumenta la viscosidad, lo que implica un mayor arrastre de partículas no magnéticas en el concentrado [10]. Por esto, para etapas en donde se desea obtener una mayor ley del mineral, se recomienda utilizar porcentajes de sólidos entre 20 y 30% y si el objetivo es obtener una alta recuperación de material magnético se debe trabajar a porcentajes de sólidos entre 30 y 50% [10].

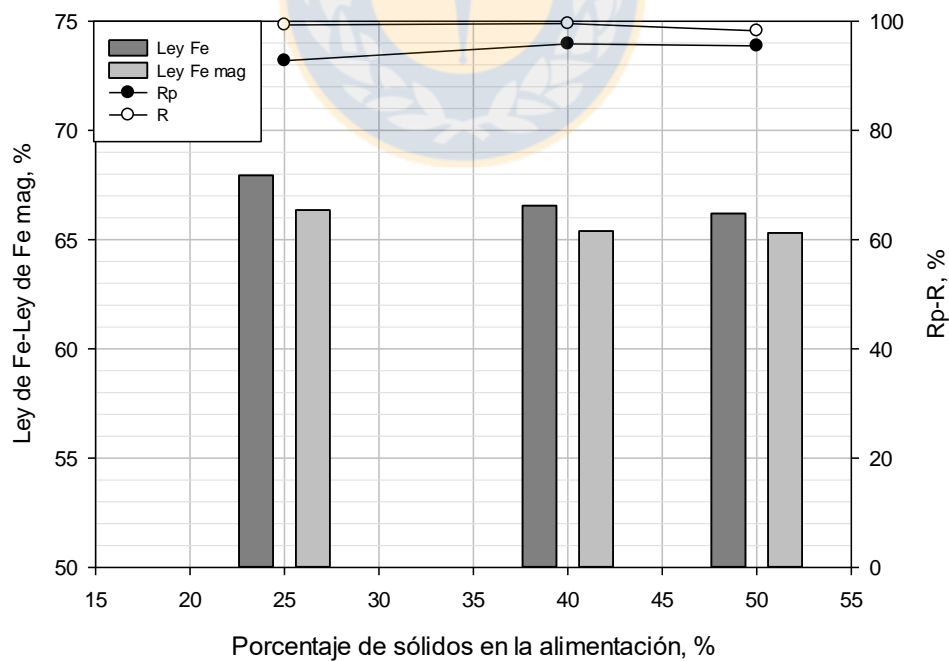


Figura 29: Variación del porcentaje de sólidos en la alimentación a una velocidad de giro de tambor magnético de 25 rpm.

Cuando se trabaja con un porcentaje de sólidos en la alimentación de 40%, se obtiene una recuperación en peso de 96% y una recuperación metalúrgica de 99.6%. Estos valores son inferiores para %Cp de 25 y 50%. Por esta razón se decidió trabajar a 40% de sólidos en la alimentación, ya que la etapa de concentración magnética a incorporar en ambos circuitos, corresponde a una etapa rougher. Donde se busca recuperar el material magnético y no necesariamente alcanzar leyes de hierro superiores al 67%, como la obtenida a un %Cp de 25%.

5.3 Pruebas de concentración magnética a distintas granulometrías de alimentación

La etapa de concentración magnética a incorporar en ambos circuitos propuestos, se encuentra después de la descarga del molino. Si bien los molinos son diseñados para entregar un cierto P80, este varía dependiendo de la granulometría de alimentación. En planta de Pellets no se lleva un registro del P80 en la descarga del molino, pero si del porcentaje de partículas que posee un tamaño menor a los 44 μm .

Se estudió el comportamiento del mineral al realizar pruebas de concentración magnética a distintos porcentajes de tamaños de partículas inferiores a los 44 μm . Estos porcentajes fueron definidos en base al porcentaje de tamaño de partículas inferiores a 44 μm que presentaba la descarga del molino 4. Para replicar estos porcentajes se realizaron moliendas a distintos tiempos (3, 3.5, 6, 11, 18, 40 y 60 minutos) al preconcentrado básico.

La figura 30, muestra los resultados obtenidos al variar la granulometría de alimentación. Se aprecia que la ley de hierro del concentrado es alrededor de 64 y 65% hasta granulometrías de 37% de partículas inferiores a los 44 μm . Para porcentajes mayores se obtienen leyes de hierro entre 65 y 66%, debido a que el mineral se encuentra más liberado. Se puede observar que el mayor grado de ley y la menor recuperación en peso se obtiene a una granulometría de 43% bajo los 44 μm . En cuanto a la recuperación metalúrgica, la muestra se comportó de forma similar para todas las granulometrías estudiadas, obteniéndose la más alta a un 30% bajo los 44 μm .

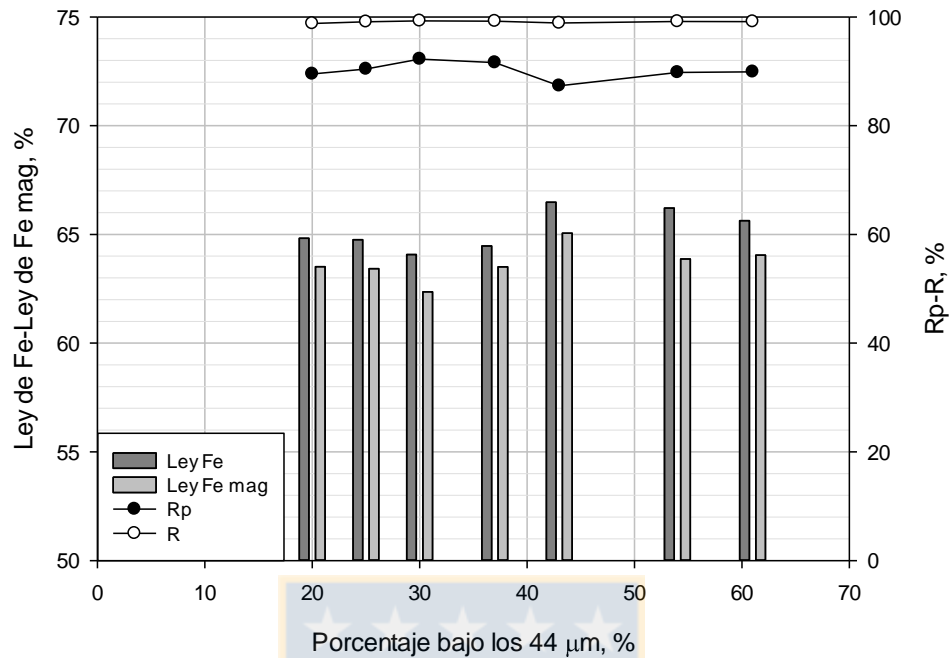


Figura 30: Resultados pruebas de concentración magnética a distintas granulometrías de alimentación.

En general de la figura 30 se puede deducir que no es necesario obtener un concentrado con tamaños de partículas inferiores a los 44 μm entre 80 y 85%, para obtener leyes en el concentrado primario superiores al 64%. Sin embargo la producción de pellets exige que el concentrado posea la granulometría antes mencionada.

El comportamiento granulométrico de la prueba de concentración magnética, con una granulometría de alimentación de 20% bajo los 44 μm , es mostrado en la figura 31. Debido a que el comportamiento es similar para el resto de las pruebas, son expuestos en el anexo 2. En la figura 31 se observa que una parte importante del concentrado corresponde a mineral grueso, mientras que en el relave ocurre lo contrario, la mayor cantidad corresponde a mineral fino. Esto es un buen indicio, ya que el 99% de las partículas del relave poseen un tamaño inferior a los 1000 μm .

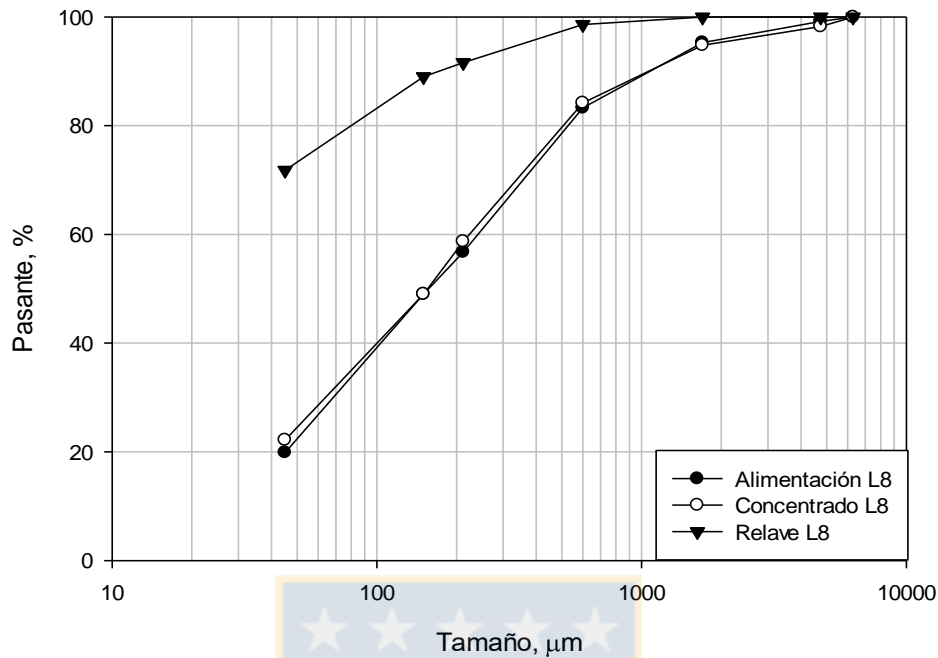


Figura 31: Comportamiento granulométrico, prueba de concentración magnética con un 20% bajo los 44 μm en la alimentación.

5.4 Circuito actual molienda y clasificación a escala laboratorio

El circuito corresponde a un circuito de molienda cerrado y directo como el que se muestra en la figura 32. La etapa de molienda se realizó en el equipo molino torque y la etapa de clasificación se llevó a cabo en un ro-tap. Ambas etapas fueron descritas en el punto 4. Para la realización de este circuito se utilizó el mineral preconcentrado básico, obtenido desde las canchas de acopio.

Este circuito se realizó hasta alcanzar su equilibrio y esto ocurrió a la tercera vez. En cada realización se mantuvo constante el tiempo de molienda de 6 minutos.

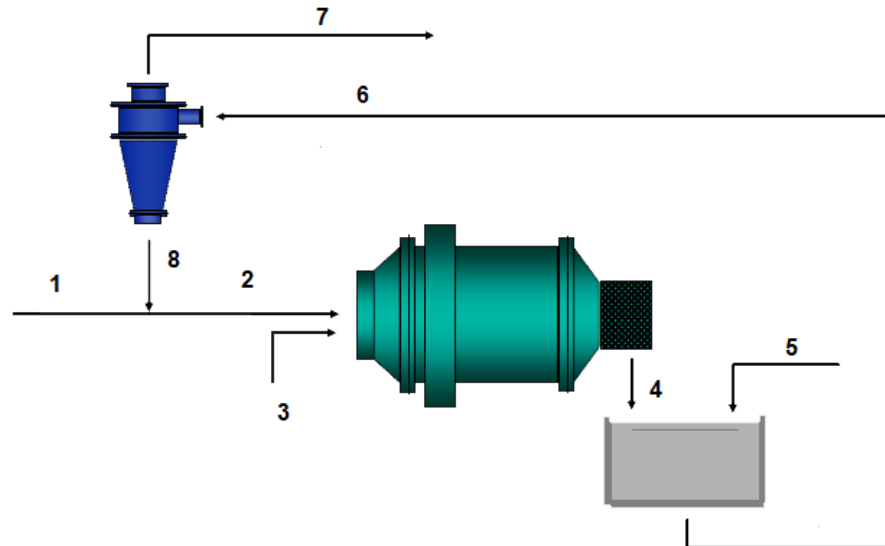


Figura 32: Circuito actual de molienda y clasificación.

Al replicar el circuito de molienda y clasificación, se obtiene como principal resultado la carga circulante. Esta alcanza un valor de 260%, según lo indicado en la tabla 4. Industrialmente la etapa de molienda, alcanza valores de carga circulante entre 400 y 500%. El anexo 3 muestra el promedio anual de carga circulante para el molino 4.

La diferencia de los valores de carga circulante entre el laboratorio y la planta, se debe principalmente al método de clasificación utilizada y al control que se tiene de las variables. Al realizar la clasificación en el laboratorio en un ro-tap y utilizar la malla 325, se aseguró que todo el mineral menor a los 44 μm , saliera del circuito. Esto no sucede a nivel industrial, ya que hay partículas menores a los 44 μm , que retornan al circuito por el underflow y que corresponde a un 15%, según los datos obtenidos diariamente.

Tabla 4: Balance de masa circuito molienda y clasificación.

Ítem	Sólido seco kg	Agua L	Pulpa kg	Sólido %	CC %	Fe T %	Fe Mag %
Molienda- Clasificación							
1.-Alimentación fresca	5.30	0.11	5.41	98	260	59.52	56.87
2.-Alimentación compuesta molino	13.80	3.45	17.25	80		59.52	56.87
3.- Agua al molino	-	3.34	-	-		-	-
4.-Descarga molino	13.80	3.45	17.25	80		59.52	56.87
5.-Agua de dilución a sumidero de molino	-	13.42	-	-		-	-
6.-Alimentación clasificador	13.80	16.87	30.63	45		59.52	56.87
7.-Overflow clasificador	5.30	30.03	35.33	15		59.52	56.87
8.-Underflow clasificador	8.50	3.45	10.63	80		59.52	56.87

5.5 Circuito 1 concentración selectiva escala laboratorio

El circuito 1 de concentración selectiva está compuesto por tres etapas: molienda, concentración magnética y clasificación. La figura 33 muestra cómo están distribuidas estas etapas. Este circuito se realizó hasta alcanzar el equilibrio, esto sucedió luego de hacerlo 3 veces y se utilizó el mineral preconcentrado básico. Los equipos utilizados fueron: en la molienda el molino torque, en la concentración magnética el equipo L8 y en la clasificación un ro-tap.

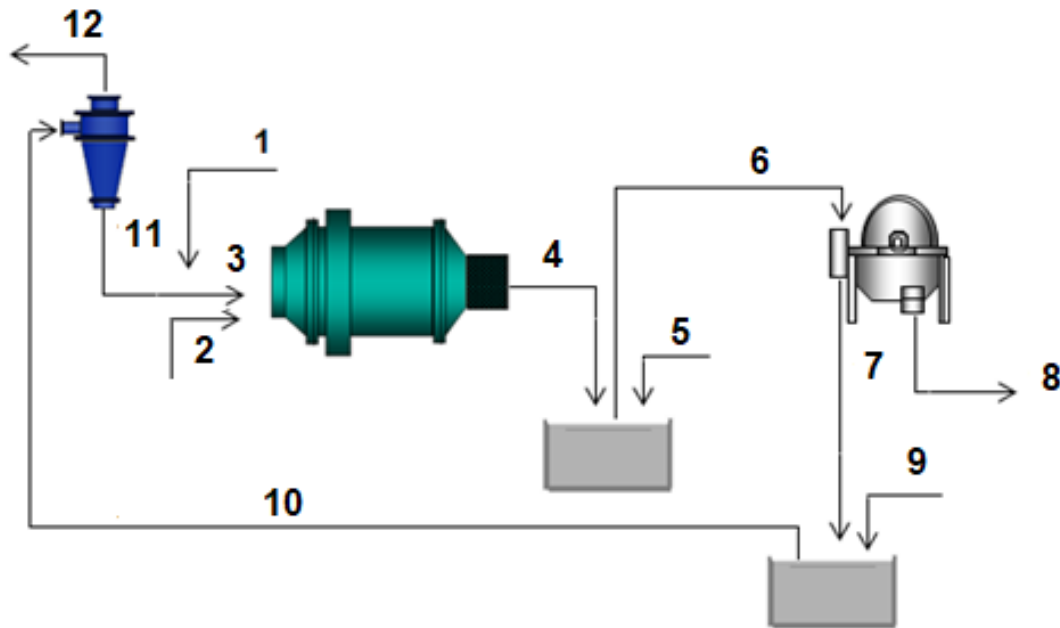


Figura 33: Circuito 1 de concentración selectiva.

Para realizar un análisis más detallado del resultado de la simulación del circuito 1 de concentración selectiva a nivel laboratorio, es preferible hacerlo por etapa. En primer lugar, la etapa de concentración selectiva primaria arrojó como resultado una recuperación en peso de 96.0% y una recuperación metalúrgica de 99.7%. Estos resultados se muestran en la tabla 5. A la vez, la ley de hierro del concentrado primario obtenido fue de un 66.12 %, mientras que la del relave fue de un 5.47%.siendo esta inferior a la ley de hierro que actualmente se obtiene en el relave de la concentración primaria a nivel industrial. El anexo 4 muestra el contenido de hierro en el relave de la concentración primaria a nivel industrial, para los meses entre enero y mayo de 2018.

La etapa de molienda y clasificación se comporta de forma similar a la del punto 5.4. En este caso se obtiene un valor de carga circulante de 247%. En cuanto al contenido de hierro se observa una diferencia de 0.34% entre el overflow y el underflow.

En la tabla 5 se puede ver que, este circuito permite obtener un producto con un 80% de partículas bajo los 44 μm y una ley de hierro y de hierro magnético de 66.12 y 65.26% respectivamente. Mientras que en el circuito actual se logra obtener un producto con una ley de hierro de 59.5% y una ley de hierro magnético de 56.9%.

Tabla 5: Balance de masa circuito 1 concentración selectiva.

Ítem	Sólido seco kg	Agua L	Pulpa kg	Sólido %	Rp o CC %	Fe T %	Fe Mag %	R %
Molienda								
1.-Alimentación fresca	10.10	0.21	10.31	98	-	59.62	57.31	-
2.-Agua al molino	-	6.02	-	-		-	-	
3.-Alimentación compuesta al molino	24.94	6.23	31.17	80		63.69	62.67	
4.-Descarga molino	24.94	6.23	31.17	80		63.69	62.67	
Concentración Magnética Rougher								
6.-Alimentación	24.94	37.41	63.60	40	Rp, % 96.00	63.69	62.67	99.70
5.-Agua de dilución	-	31.80	-	-		-	-	
7.-Concentrado	23.94	19.59	43.53	55		66.12	65.26	
8.-Relave	1.00	10.09	11.08	9		5.47	0.50	
Clasificación								
9.-Agua de dilución a sumidero	-	9.51	-	-	CC, % 247	-	-	-
10.-Alimentación clasificador	23.94	29.26	53.20	45		-	-	
12.-Overflow clasificador	9.10	51.57	60.67	15		66.12	65.26	
11.-Underflow clasificador	14.84	3.71	18.55	80		66.46	66.12	

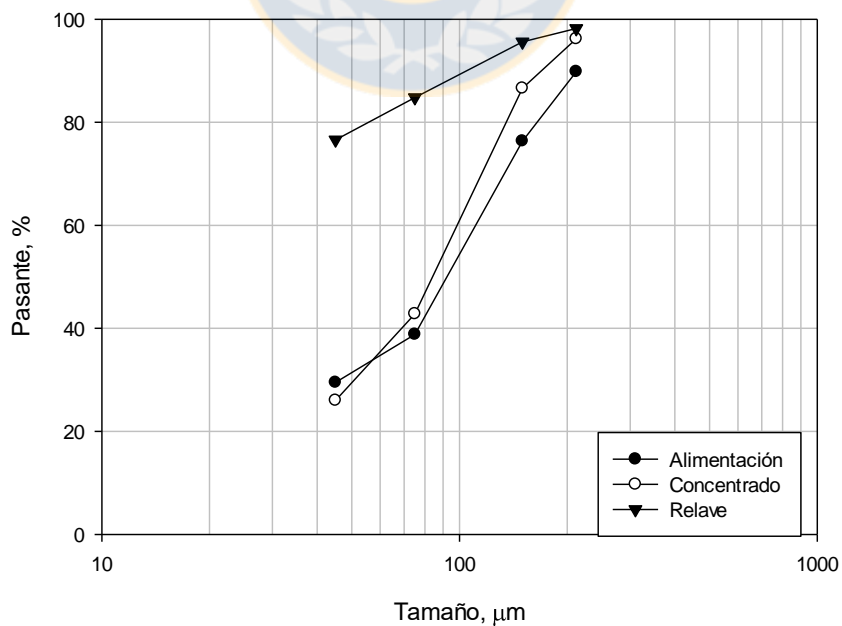


Figura 34: Comportamiento granulométrico, prueba de concentración magnética, realiza en equipo L8.

La figura 34 muestra las curvas granulométricas de la alimentación, concentrado y relave, de la etapa de concentración magnética primaria. Se observa que ocurre lo mismo que en la figura 31. La mayor parte del mineral grueso se encuentra en el concentrado y la mayor parte de partículas finas en el relave.

5.6 Circuito 2 concentración selectiva a escala piloto

El segundo circuito propuesto de concentración selectiva se divide en tres etapas. Molienda abierta, la cual tiene por objetivo lograr un P80 menor a los 280 μm . Concentración magnética primaria, encargada de alcanzar leyes de hierro sobre el 64% y un circuito de molienda y clasificación inverso, cuyo propósito es obtener un producto con un 80 % de partículas bajo los 44 μm . En la figura 35 es posible observar la disposición de las etapas descritas anteriormente.

Este circuito se realizó en la planta piloto que posee la empresa, debido que a nivel laboratorio no se cuenta con un molino, donde se pueda realizar una molienda continua y abierta. El mineral utilizado en la realización de este circuito fue el preconcentrado básico proveniente de las canchas de acopio.

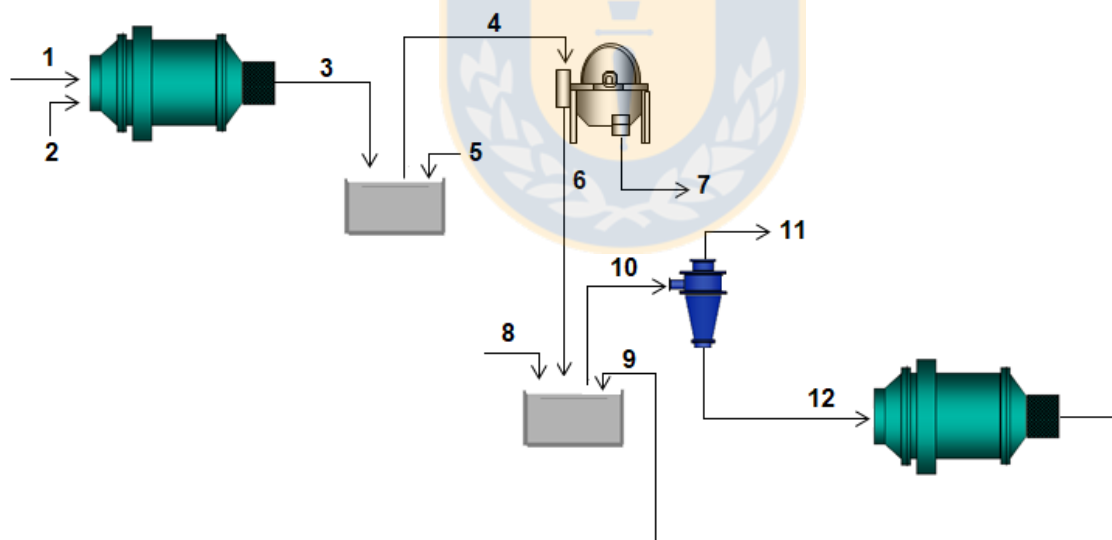


Figura 35: Circuito 2 de concentración selectiva.

En la tabla 6 se expone el balance de masa del circuito 2 de concentración selectiva. Adicional a esto es posible observar los principales resultados como: recuperación en peso de la etapa de concentración magnética, carga circulante de la etapa de molienda y clasificación y las leyes de hierro y hierro magnético obtenidos en overflow del circuito.

Tabla 6: Balance de masa circuito 2 concentración selectiva.

Ítem	Sólido seco kg/min	Agua L/min	Pulpa kg/min	Sólido %	Rp o CC %	Fe T %	Fe Mag. %	R %
Molienda								
1.-Alimentación fresca	12.60	0.26	12.86	98	-	60.15	57.82	-
2.-Agua al molino	-	10.05	-	-				
3.-Descarga molino	12.60	10.31	22.91	55		60.15	57.82	
Concentración Magnética Rougher								
4.-Alimentación	12.60	18.90	31.50	40	Rp, % 92.34	60.15	57.82	99.31
5.-Agua de dilución	-	8.59	-	-		-	-	
6.-Concentrado	11.63	9.52	21.15	55		64.69	62.58	
7.-Relave	0.97	9.76	10.73	9		5.44	0.50	
Molienda- Clasificación								
8.-Agua al clasificador	-	33.57	-	-	CC, % 303	-	-	-
9.-Descarga molino	23.62	5.91	29.53	80		64.69	62.58	
10.-Alimentación clasificador	35.26	43.09	78.35	45		64.69	62.58	
11.-Overflow clasificador	11.63	65.93	77.56	15		64.69	62.58	
12.-Underflow clasificador	23.62	5.91	29.53	80		64.69	62.58	

Al igual que en el punto 5.5, es preferible realizar el análisis del circuito por etapas. En primer lugar, se realizó una molienda abierta en donde se obtuvo un P80 de 266 μm y un porcentaje bajo los 44 μm de 42%, esto se aprecia en la figura la figura 36.

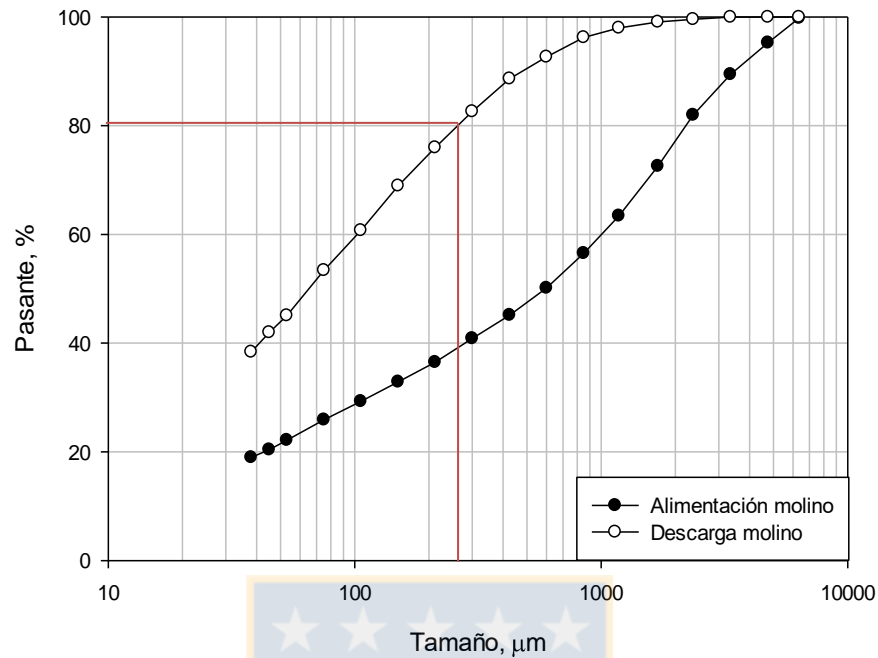


Figura 36: Curvas granulométricas correspondientes a la prueba de molienda abierta.

En la etapa de concentración magnética primaria, se obtuvo una recuperación en peso y metalúrgica de 92.34% y 99.31% respectivamente, permitiendo alcanzar una ley de hierro de 64.69% en el concentrado y de hierro magnético de 62.58%, mientras que la ley de hierro del relave corresponde a un 5.44%.

La figura 37 muestra las curvas granulométricas de la etapa de concentración primaria, el comportamiento de estas es igual que en las figuras 31 y 34. La figura 38 muestra el contenido de hierro por fracción de tamaño. Se aprecia que este va en aumento hasta un tamaño de partícula de 44 μm donde alcanza el valor máximo de hierro, luego para tamaños más pequeños comienza a disminuir.

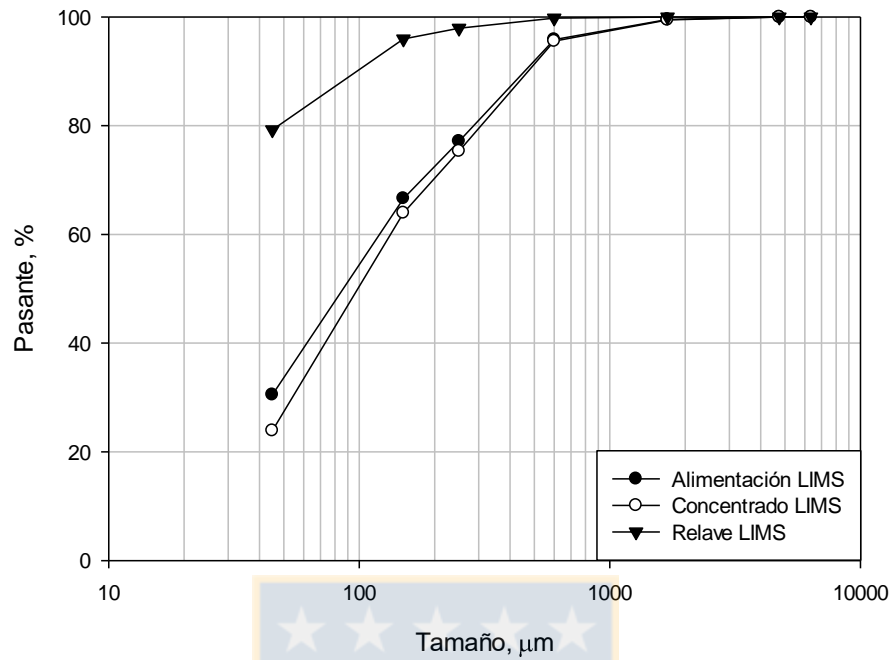


Figura 37: Comportamiento granulométrico, prueba de concentración magnética.

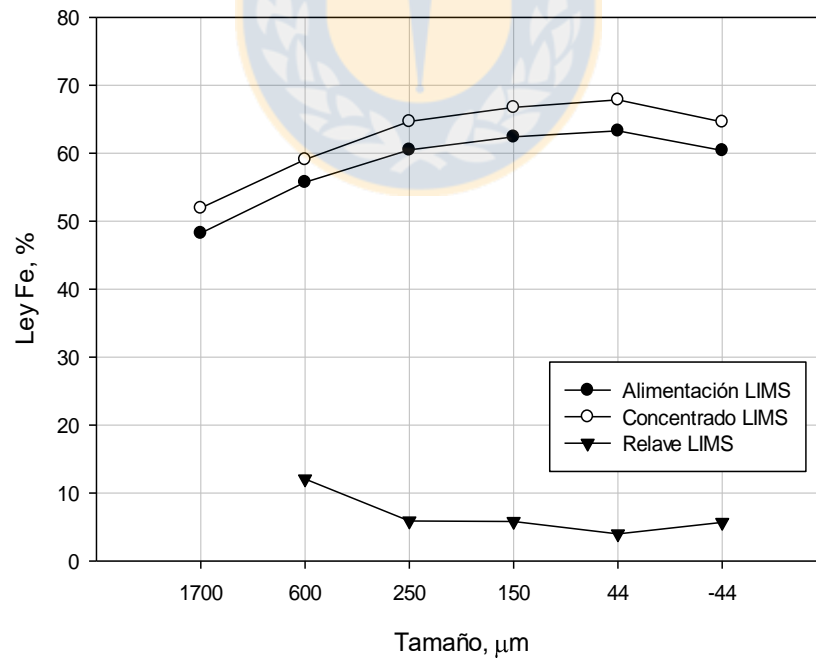


Figura 38: Contenido de hierro por fracción de tamaño, prueba de concentración magnética.

En el circuito de molienda y clasificación inverso, se obtuvo como resultado una carga circulante de 303% y un producto con un 80% de partículas con un tamaño menor a 44 μm y una ley de hierro y de hierro magnético de 64.69% y 62.58% respectivamente.

Cabe destacar que los flujos observados en la tabla 6 son flujos referenciales, ya que cada etapa del circuito se llevó a cabo por separado y los flujos de alimentación o procesamiento dependían de la capacidad del equipo. Para la primera molienda el flujo fue de 12.5 kg/min, para la etapa de concentración primaria fue de 96 kg/min y la molienda y clasificación inversa con un flujo de 7 kg/min.

5.7 Comparación capacidad de producción de los circuitos estudiados

Los circuitos se realizaron a distinta escala, por motivos de funcionamiento de los equipos, ya que a nivel laboratorio no se cuenta con un molino, donde se pueda realizar una molienda abierta. Para poder obtener una mejor comparación se asumió que a nivel industrial el circuito de molienda y clasificación se comporta de la misma manera que a nivel laboratorio. Permitiendo así obtener la capacidad de alimentación al molino y de esta forma obtener la capacidad de procesamiento del circuito 1 y 2 de concentración selectiva (los balances correspondientes a estas nuevas capacidades son mostrados en el anexo 5).

La tabla 7 muestra las capacidades de procesamiento de los tres circuitos estudiados. El circuito 2 de concentración selectiva involucra la utilización de 3 molinos, debido a esto la capacidad del circuito actual y circuito 1 de concentración selectiva fueron multiplicados por 3. Además la planta cuenta con un vector metalúrgico, el cual consiste de una ecuación empírica que predice la recuperación en peso de la etapa de concentración magnética, dependiendo de la ley de alimentación y de la ley que se desee obtener en el concentrado. Este se aplicó al producto obtenido de los 3 circuitos, con el fin de conocer la cantidad de pellets feed que se obtendrá de cada circuito.

Tabla 7: Capacidad de producción de los circuitos estudiados, considerando el funcionamiento de 3 molinos.

Simulación datos laboratorio y planta piloto					
Circuito	Alimentación, tph	Producto, tph	Producto 3 molinos, tph	Rp etapa de concentración, %	Pellets feed, tph
Actual	354	354	854	85.6	731
Propuesta 1	373	336	812	95.9	779
Propuesta 2	693	640	640	93.7	600

De la tabla 7 es posible observar que el circuito propuesta 1 permite aumentar la capacidad de producción en un 5.4 % con respecto a la capacidad actual y aumentar la cantidad de pellets feed en un 6.6 %. Además se puede ver que el circuito 2 de concentración selectiva no permite aumentar la capacidad de procesamiento y de obtención de pellets feed, por el contrario disminuye la tasa de producción.

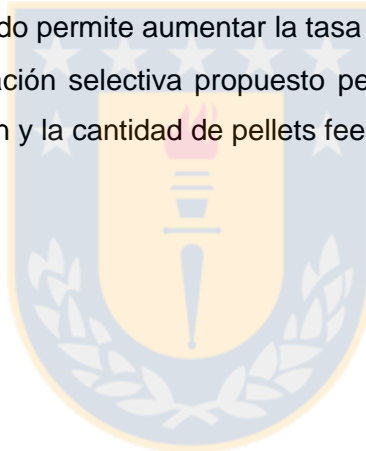
La planta cuenta con dos tipos de molinos, con capacidades de producción promedio de 250 tph para los molinos 1, 2, y 3 y 354 tph para el molino 4. La tabla 8 muestra las capacidades para los circuitos actual y 1 de concentración selectiva para los dos tipos de molinos.

Tabla 8: Capacidad de producción de los molinos 1 y 4.

Simulación datos laboratorio y planta piloto				
Circuito actual			Circuito 1 concentración selectiva	
Molino	Alimentación, tph	Producto, tph	Alimentación, tph	Producto, tph
Nº 1	250	250	264	238
Nº 4	354	354	373	336

6 Conclusiones

- Se definió que la etapa de concentración magnética primaria a incorporar debe ser de carácter recuperativo. Las condiciones operacionales de esta deben ser: intensidad de campo magnético 1000 gauss, velocidad de giro del tambor 25 rpm y porcentaje de sólidos de 40%.
- Al estudiar el efecto de la granulometría de alimentación a la etapa de concentración magnética primaria, es posible concluir dos cosas. Primero: al trabajar a un porcentaje de 30% de partículas con un tamaño inferior a los 44 μm se obtiene una mayor recuperación en peso y metalúrgica. Segundo: Se puede obtener un concentrado con un contenido de hierro sobre el 66%, sin tener que llegar a un grado de molienda donde el 80-85% de las partículas estén bajo los 44 μm . Sin embargo alcanzar esa granulometría es un requisito para la formación de pellets.
- Al replicar el circuito de molienda y clasificación actual a escala laboratorio y el circuito 1 de concentración selectiva, el segundo permite aumentar la tasa de alimentación en un 5.4%.
- El circuito 1 de concentración selectiva propuesto permite obtener mejores resultados en cuanto a capacidad de producción y la cantidad de pellets feed a obtener.



7 Recomendaciones

- Realizar un escalamiento más detallado de los 2 circuitos propuestos, con el fin de conocer cuál sería su comportamiento a nivel industrial.
- Realizar una evaluación económica, para ver si la realización del circuito 1 de concentración selectiva es factible y rentable.
- Realizar pruebas de concentración magnética, con un flujo de alimentación mayor, con el propósito de utilizar menos concentradores magnéticos en la etapa de concentración primaria.
- Realizar el circuito 1 y 2 de concentración selectiva considerando la utilización de dos tambores magnéticos, en la etapa de concentración magnética primaria.



Bibliografía

- [1] CAP Minería. 2018. CAP Minería. *CAP Minería*. [En línea] 2018. <http://www.capmineria.cl/>.
- [2] CAP Minería;. 2018. CAP Minería. [En línea] 2018. <http://www.capmineria.cl/capmineria/site/artic/20181002/asocfile/20181002104256/Memoria-CAP-Mineria-2018.pdf>.
- [3] ESPINOZA, Pablo. 2006. *Evaluación técnica y económica de la concentración de minerales del proyecto Cerro Negro Norte*. Santiago : Universidad de Santiago, 2006.
- [4] AUSTIN, Leonard and CONCHA, Fernando. 1994. *Diseño y simulación de circuitos de molienda y clasificación*. Concepción : CYTED. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. Subprograma de Tecnología Mineral. Red de Fragmentación XIII-A, 1994. 9567418015.
- [5] *Recent developments in magnetics methods of material separation*. SVOBODA, J and FUJITA, T. 2003. s.l. : Minerals engineering, 2003.
- [6] ERIEZ. 2005. *Wet drum separators*. Knoxville : Eriez, 2005.
- [7] CARRERA, Edison and ESTRELLA, Angel. 2018. *Diseño y construcción de un separador magnético para minerales*. Cuenca : Universidad del Azuay, 2018.
- [8] METSO. 2006. *Wet low intensity magnetic separators iron processing*. Suecia : METSO, 2006.
- [9] SVOBODA, JAN. 2004. *Magnetic Techniques for the Treatment*. EE.UU : Kluwer Academic Publishers, 2004. 1-4020-2107-0.
- [10] *Optimizing the performance of wet drum*. DWORZANOWSKI, M. 2010. s.l. : The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2010.
- [11] Compañía de acero del pacifico S.A. 1977. *Medición de propiedades magnéticas del mineral* . Vallenar : Compañía de acero del pacifico S.A, 1977.
- [12] OUTOTEC. 2010. *Magnetic separation technology for iron ore* . *Magnetic separation technology for iron ore*. OUTOTEC : s.n., 2010.
- [13] GUZMÁN, Alexis. 2019. *Informe de difracción de rayos x Compañía de Acero del Pacífico*. Copiapó : Universidad de Atacama , 2019.

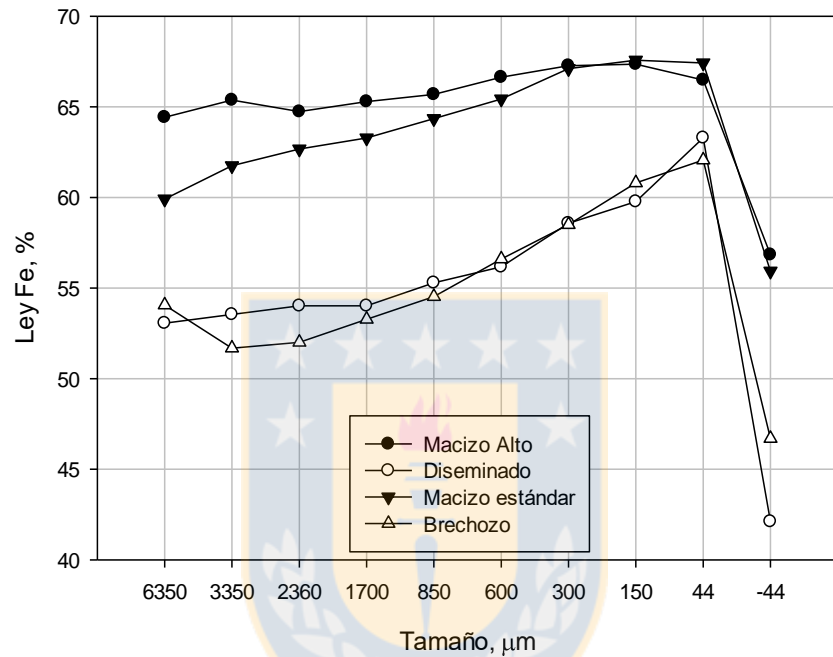
Anexos**Anexo 1: Contenido de hierro por fracción de tamaño para diferentes texturas**

Figura 39: Contenido de hierro por fracción de tamaño para distintas texturas de mineral obtenidas en mina Los Colorados.

Anexo 2: Curvas granulométricas pruebas de concentración magnética a distintas granulometrías de alimentación.

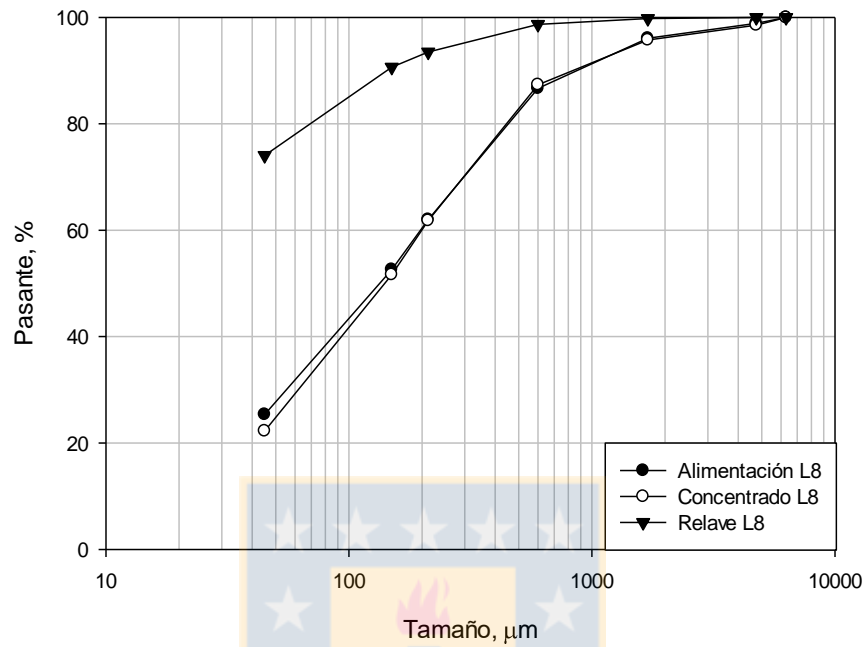


Figura 40: Curvas granulométricas, prueba de concentración magnética con una granulometría de alimentación de 25 % bajo los 44 μm .

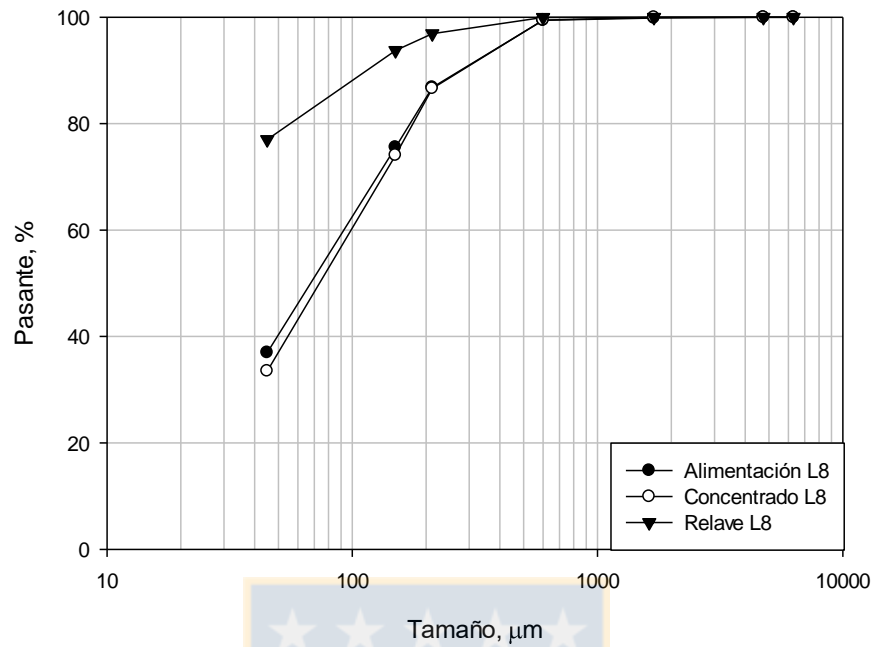


Figura 41: Curvas granulométricas, prueba de concentración magnética con una granulometría de alimentación de 37 % bajo los 44 μm .

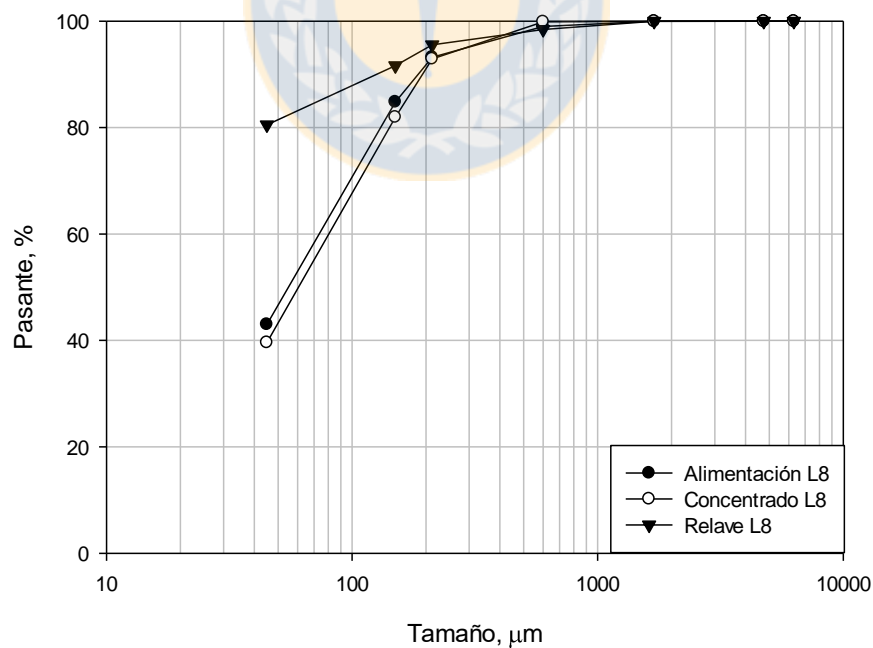


Figura 42: Curvas granulométricas, prueba de concentración magnética con una granulometría de alimentación de 43 % bajo los 44 μm .

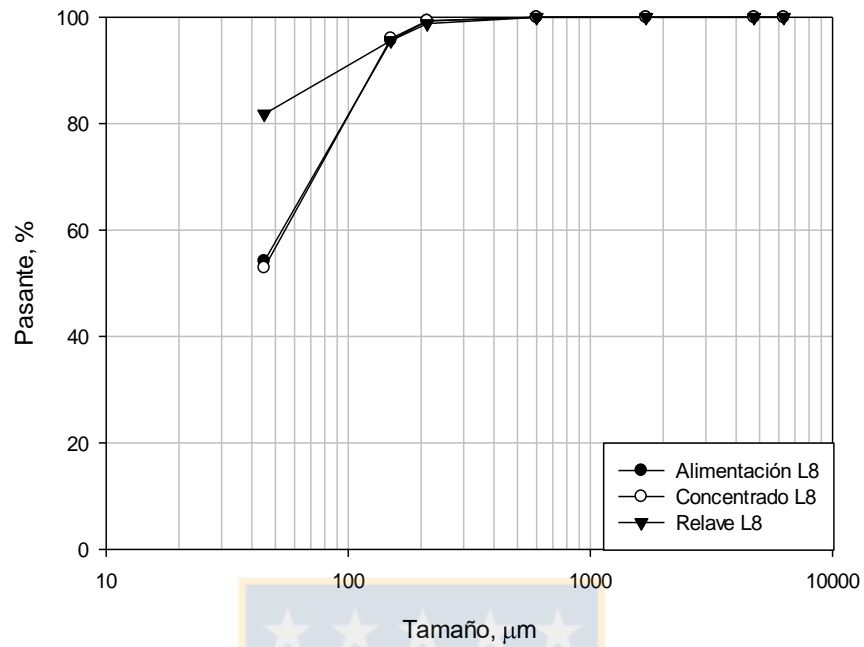


Figura 43: Curvas granulométricas, prueba de concentración magnética con una granulometría de alimentación de 54% bajo los 44 μm .

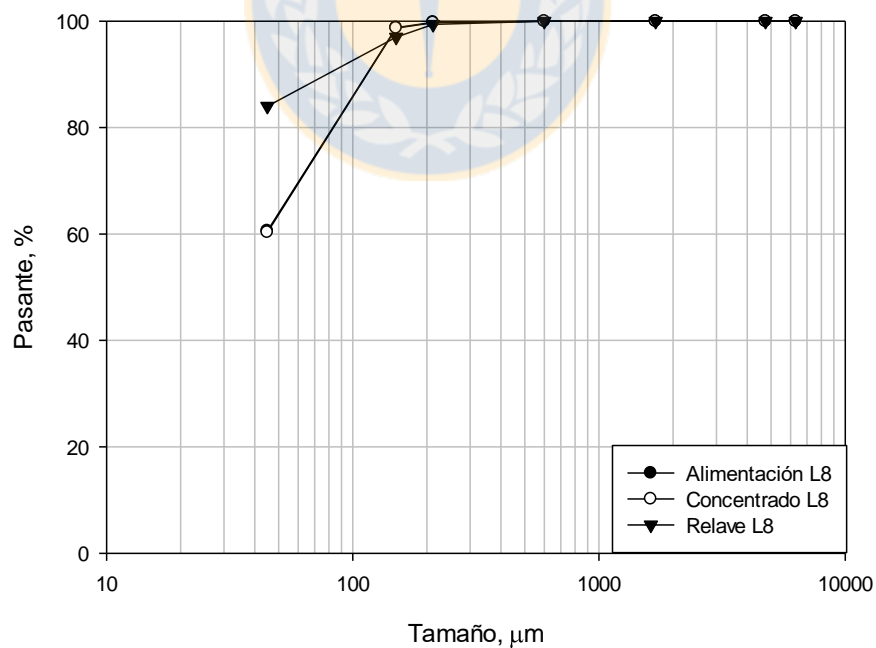


Figura 44: Curvas granulométricas, prueba de concentración magnética con una granulometría de alimentación de 61% bajo los 44 μm .

Anexo 3: Cargas circulantes

Se muestra la carga circulante correspondiente al molino 4, el cual ha sido utilizado como referente para este estudio, en la tabla 8 se muestra la carga circulante correspondientes a los meses de enero a mayo de 2018, en los cuales se trató preconcentrado básico, mineral utilizado en esta investigación y en la tabla 9 se aprecia un promedio anual de años anteriores.

Tabla 9: Promedio mensual carga circulante molino 4 año 2018.

Mes	Carga Circulante [%]
Enero	502
Febrero	490
Marzo	422
Abril	431
Mayo	501
Promedio	469

Tabla 10: Promedio anual carga circulante molino 4.

Año	Carga circulante [%]
2013	462
2014	425
2015	411
2016	397
2017	500

Anexo 4: Contenido de hierro en el relave

En la tabla 10 se muestra el promedio mensual del contenido de hierro en el relave de la concentración primaria, para los meses de enero a mayo de 2018.

Tabla 11: Promedio mensual contenido de hierro en el relave de la concentración primaria.

Mes	Contenido de hierro en el relave [%]
Enero	6.3
Febrero	6.7
Marzo	7.7
Abril	8.3
Mayo	8.5

Anexo 5: Balance de masa de los circuitos estudiados

Tabla 12: Balance de masa circuito actual molienda y clasificación, con tasa de alimentación del molino 4.

Ítem	Sólido seco kg	Agua L	Pulpa kg	Sólido %	CC %	Fe T %	Fe Mag %
Molienda- Clasificación							
1.-Alimentación fresca	354.0	7.2	361.2	98	260	59.5	56.9
3.-Agua al molino	-	230.4	-	-		-	-
2.-Alimentación compuesta molino	921.7	230.4	1152.2	80		59.5	56.9
4.-Descarga molino	921.7	230.4	1152.2	80		59.5	56.9
5.-Agua de dilución a sumidero de molino	-	896.1	-	-		-	-
6.-Alimentación clasificador	921.7	1126.5	2048.2	45		59.5	56.9
7.-Overflow clasificador	354.0	2006.0	2360.0	15		59.5	56.9
8.-Underflow clasificador	567.7	141.9	709.7	80		59.5	56.9

Tabla 13: Balance de masa circuito 1 concentración selectiva, con tasa de alimentación del molino 4.

Ítem	Sólido seco kg	Agua L	Pulpa kg	Sólido %	Rp o CC %	Fe T %	Fe Mag %	R %
Molienda								
1.-Alimentación fresca	373.0	7.6	380.9	98	-	59.6	57.3	-
2.-Agua al molino	-	230.4	-			-	-	
3.-Alimentación compuesta al molino	921.7	230.4	1152.2	80		63.7	62.7	
4.-Descarga molino	921.7	230.4	1152.2	80		63.7	62.7	
Concentración Magnética Rougher								
6.-Alimentación	921.7	1382.6	2304.4	40	Rp, % 96.00	63.7	62.7	99.7
5.-Agua de dilución	-	1152.2	-	-		-	-	
7.-Concentrado	884.9	724.0	1608.9	55		66.1	65.3	
8.-Relave	36.87	372.8	409.7	9		5.5	0.5	
Clasificación								
9.-Agua de dilución a sumidero	-	357.5	-	-	CC, % 247	-	-	-
10.-Alimentación clasificador	884.9	1081.5	1966.4	45		-	-	
12.-Overflow clasificador	336.4	1906.0	2242.4	15		66.1	65.3	
11.-Underflow clasificador	548.5	137.13	685.7	80		66.5	66.1	

Tabla 14: Balance de masa circuito 2 concentración selectiva.

Ítem	Sólido seco kg/min	Agua L/min	Pulpa kg/min	Sólido %	Rp o CC, %	Fe T %	Fe Mag. %	R %
Molienda								
1.-Alimentación fresca	693.1	14.2	707.3	98	-	60.2	57.8	-
2.-Agua al molino	-	552.9	-	-		-	-	
3.-Descarga molino	693.11	567.1	1260.2	55		60.2	57.8	
Concentración Magnética Rougher								
4.-Alimentación	693.1	1039.7	1732.8	40	Rp, % 92.34	60.2	57.8	99.31
5.-Agua de dilución	-	472.6	-	-		-	-	
6.-Concentrado	640	523.6	1163.6	55		64.7	62.6	
7.-Relave	53.1	537.0	590.1	9		5.4	0.5	
Molienda- Clasificación								
8.-Agua al clasificador	-	37.80	-	-	CC, % 303	-	-	-
9.-Descarga molino	1303.1	325.5	4274.8	80		64.7	62.6	
10.-Alimentación clasificador	1943.1	2374.8	4317.9	45		64.7	62.6	
12.-Overflow clasificador	640	3633.6	4274.8	15		64.7	62.6	
11.-Underflow clasificador	1303.1	325.5	4274.8	80		64.7	62.6	

Tabla 15: Balance de masa circuito actual molienda y clasificación, con tasa de alimentación del molino 1.

Ítem	Sólido seco kg	Agua L	Pulpa kg	Sólido %	CC %	Fe T %	Fe Mag %
Molienda- Clasificación							
1.-Alimentación fresca	250.0	5.1	255.1	98	260	59.5	56.9
3.-Agua al molino	-	157.63	-	-		-	-
2.-Alimentación compuesta molino	650.9	162.7	831.7	80		59.5	56.9
4.-Descarga molino	650.9	162.7	831.7	80		59.5	56.9
5.-Agua de dilución a sumidero de molino	-	632.9	-	-		-	-
6.-Alimentación clasificador	650.94	795.6	1446.5	45		59.5	56.9
8.-Underflow clasificador	400.9	100.2	501.2	80		59.5	56.9
7.-Overflow clasificador	250	1416.7	1666.7	15		59.5	56.9

Tabla 16: Balance de masa circuito 1 concentración selectiva, con tasa de alimentación del molino 1.

Ítem	Sólido seco kg	Agua L	Pulpa kg	Sólido %	Rp o CC %	Fe T %	Fe Mag %	Rm %
Molienda								
1.-Alimentación fresca	263.6	5.4	269.0	98	-	59.6	57.3	-
2.-Agua al molino	-	157.4	-	-		-	-	
3.-Alimentación compuesta al molino	650.9	162.7	813.7	80		63.7	62.7	
4.-Descarga molino	650.9	162.7	813.7	80		63.7	62.7	
Concentración Magnética Rougher								
6.-Alimentación	650.9	976.4	1627.4	40	Rp,% 96.00	63.7	62.7	99.7
5.-Agua de dilución	-	813.7	-	-		-	-	
7.-Concentrado	624.9	511.3	1136.2	55		66.1	65.3	
8.-Relave	26.0	263.3	289.3	9		5.5	0.5	
Clasificación								
9.-Agua de dilución a sumidero	-	252.5	-	-	CC,% 247	-	-	-
10.-Alimentación clasificador	624.9	763.8	1388.7	45		66.1	65.3	
12.Underflow clasificador	387.4	96.8	484.2	80		66.1	65.3	
11.-Overflow clasificador	237.5	1346.0	1583.5	15		66.5	66.1	

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

Título: Evaluación técnica de alternativas de adecuación de los circuitos de molienda clasificación concentración magnética para optimizar la capacidad de Planta de Pellets Huasco CAP minería.

Nombre Memorista: Adriela Estephania Esperanza Osses Tapia

Modalidad		Profesor(es) Patrocinante(s)
Concepto		
Calificación		
Fecha	06/05/2019	
Prof. ^a Eugenia Araneda H.		Prof. Leopoldo Gutierrez
		Ingeniero Supervisor: Galo Brito
		Institución: Planta de Pellets Huasco, CAP Minería

Comisión (Nombre y Firma)

Prof. Dennis Vega	Prof. Andrés Ramírez
-------------------	----------------------

1. Resumen

El objetivo de este trabajo fue realizar una evaluación técnica de alternativas de adecuación de los circuitos de molienda clasificación y concentración magnética de la planta de Pellets Huasco, con el fin de aumentar la capacidad de procesamiento. Se plantearon dos alternativas de circuitos; el primero de ellos comprende las etapas de molienda, concentración magnética primaria y clasificación. El segundo comprende las etapas de: molienda abierta, concentración magnética primaria y molienda y clasificación inversa.

Se realizaron pruebas de concentración magnética a distintos porcentajes de sólidos y velocidades de giro del tambor, con el fin de determinar las condiciones operacionales de la etapa de concentración magnética primaria. Para conocer el comportamiento de los circuitos propuestos se realizaron pruebas de molienda, concentración magnética y clasificación a nivel laboratorio y piloto, estas dieron como resultado: primero que las condiciones de la etapa de concentración magnética debe ser 1000 Gauss, 25 rpm y 40% de sólido en la alimentación, además que el circuito 1 de concentración selectiva permite aumentar la capacidad de procesamiento en un 5.4% y en un 6.6% la producción de pellets feed y que el circuito 2 de concentración selectiva no permite aumentar la capacidad de procesamiento, por el contrario la disminuye