

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Profesor Patrocinante
Andrés Ramírez M.

Ingeniero Supervisor
Luis Bravo P.

“Caracterización y parametrización del primer tambor perteneciente a la línea de proceso n°3 de la etapa de concentración *finisher* en Planta Magnetita”



RICARDO ANDRÉS ROJAS VILLALOBOS

Informe de Memoria de Título

Para optar al Título de

Ingeniero Civil Metalúrgico

Enero 2020

AGRADECIMIENTOS

Quisiera comenzar agradeciendo a mi pareja, que fue mi fiel compañía y mi mayor soporte para lograr esta meta, junto a mi hijo el cual fue mi motivador personal, ellos siempre estuvieron ahí apoyándome y este logro se los debo a ellos.

A mis padres por haber confiado en mí en todo momento y darme su apoyo para poder lograr todos mis objetivos personales.

Al personal de Planta Magnetita perteneciente a CAP Minería, por confiar en mí para lograr este desafío y otorgarme esta gran oportunidad, además de compartir conmigo sus experiencias, visiones e ideas. Quisiera destacar a Don Luis Bravo, Señorita Nicole Salgado, Señorita Sophia Cisterna, Señorita Andrea Lamilla y Don Cristian Valdés por su constante apoyo y confianza en el proceso.

A mis docentes, los cuales me dieron la formación necesaria para poder afrontar los retos que se me plantearon, además de compartir sus conocimientos y experiencias conmigo. Especialmente a Don Andrés Ramírez por su apoyo, paciencia y disposición en mi última etapa.

Un agradecimiento especial para Don Guillermo Kelly, Don Leopoldo Gutiérrez y Don Cristian Melipichún, por darme la oportunidad de trabajar y aprender de ustedes.

Por último, agradecer a mi grupo de amigos pertenecientes al equipo de fútbol "El Metaplanco", por acogerme y hacerme parte de sus vidas, permitiéndome compartir 4 años llenos de alegrías y frustraciones, ellos son y serán siempre parte de mi familia.

Ricardo Andrés Rojas Villalobos

Resumen

Planta Magnetita perteneciente a CAP Minería, genera concentrados de hierro a partir de pasivos mineros con una ley de 66%. Para lograr un concentrado comercializable requiere que sus procesos de concentración operen de manera eficiente, generando la necesidad de estar en una continua optimización. Entre los procesos de concentración se encuentra la etapa de concentración magnética secundaria o concentración magnética *finisher*, del cual se obtiene un concentrado con ley desde 62% a 65%. La etapa *finisher* consta de cuatro líneas de proceso, no obstante se presentan irregularidades operacionales y diferencias entre el producto obtenido por cada línea, por lo tanto, se realiza una caracterización y optimización en el primer tambor de la línea n°3 la cual presenta los mayores problemas.

La caracterización y optimización del tambor se realizó a través de la modificación de sus parámetros operacionales (*gap* base, *gap* de descarga y arco magnético), proceso que se realiza con un tambor de 750 G y uno de 1000 G, para determinar el impacto que posee el campo magnético sobre la operación. Para la planificación del trabajo se realizó un diseño experimental con las modificaciones y pruebas que se realizaron, obteniéndose un total de 16 condiciones operacionales a evaluar dentro de un plazo de 2 meses.

Los resultados obtenidos permiten determinar la condición en la cual se obtienen los mejores parámetros metalúrgicos y generando un proceso de concentración eficiente, obteniendo una recuperación metalúrgica magnética del 99% en el primer tambor y como línea operacional un concentrado con ley del 65% de hierro. La mejor condición operacional se obtiene para el tambor de 750 G con un *gap* base de 2", un *gap* de descarga de 2" y un arco magnético de 1". Se recomienda que se realice el estudio para la optimización del tambor 2 y posteriormente se repita el estudio en el tambor 3, logrando así obtener una optimización completa de la línea.

Abstract

Magnetite Plant belonging to CAP Mining, generates iron concentrates from tailing pond with a 66% grade. To achieve a marketable concentrate requires that its concentration processes operate efficiently, generating the need to be in continuous optimization. Among the concentration processes there is a stage of secondary magnetic concentration or *finisher* magnetic concentration, where a concentrate with grade from 62% to 65% is obtained. The *finisher* stage consists of four process lines, however there are operational irregularities and differences between the product obtained by each line, therefore, a characterization and optimization is carried out on the first drum of line 3 which presents the main problems.

The characterization and optimization of the drum is carried out through the modification of its operational parameters (base *gap*, discharge *gap* and magnetic arc), this process is performed with a 750 G drum and a 1000 G drum, to determine the impact of the magnetic field on the operation. For the work planning an experimental design was carried out with the modifications and tests that will be performed, obtaining a total of 16 operational conditions to be evaluated within a period of 2 months.

The results obtained allow to determine the condition in which the best metallurgical parameters are obtained and generating an efficient concentration process, obtaining a 99% magnetic metallurgical recovery in the first drum and as an operational line a concentrate with 65% iron grade. The best operational condition is obtained for the 750 G drum with a 2 inch base *gap*, a 2 inch discharge *gap* and a 1 inch magnetic arc. It is recommended that the study for the optimization of the drum 2 be carried out and subsequently the study is repeated in the drum 3, thus obtaining a complete line optimization.

Índice

1. Introducción.....	1
1.1. Planteamiento del problema	2
1.2. Propuesta de trabajo	3
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo general	3
1.3.2. Objetivos específicos	4
2. Antecedentes	5
2.1. Origen de la planta	5
2.2. Ubicación geográfica	5
2.3. Descripción del proceso.....	6
2.3.1. Concentración magnética primaria (<i>rougher 1 Y 2</i>)	6
2.3.2. Molienda y clasificación	7
2.3.3. Deslamado	8
2.3.4. Concentración magnética secundaria	9
2.3.5. Flotación	9
2.4. Marco teórico.....	10
2.4.1. Separación magnética.....	10
2.4.2. Conceptos utilizados en la separación magnética	11
2.5. Clasificación de equipos	13
2.5.1. Tambores magnéticos en vía húmeda	15
Diseño concurrente.....	16
Diseño contrarrotación	17
Diseño contracorriente	18
2.6. Parámetros operacionales del tambor magnético	19
2.6.1. Parámetros metalúrgicos.....	21
Recuperación	21
Razón o índice de enriquecimiento.....	22
Hierro total y hierro magnético	22
2.7. Estado actual de la etapa <i>finisher</i>	23
3. Desarrollo Experimental.....	27
3.1. Diseño experimental	27

3.2. Planificación de muestreo	27
3.2.1. Implementación de normas de muestreo.....	27
3.2.2. Estructura de muestreo.....	29
3.2.3. Variables operacionales.....	30
3.3. Medición de campo magnético	32
4. Resultados y discusiones.....	35
4.1. Efecto del agua de dilución en el proceso	35
4.2. Análisis de resultados para tambor de 750 G	37
4.2.1. Análisis de resultados en el M1	37
4.2.2. Análisis de resultados para la línea de proceso	39
4.2.3. Caracterización de parámetros operacionales para tambor de 750 G.....	40
4.3. Análisis de resultados para tambor de 1000 G.....	44
4.3.1. Análisis de resultados en el M1	44
4.3.2. Análisis de resultados para la línea de proceso	45
4.3.3. Caracterización de parámetros operacionales para tambor de 1000 G	47
4.4. Comparación de M1 con 750 G y M1 con 1000 G	49
5. Conclusiones y recomendaciones	54
6. Bibliografía.....	56
<u>Anexos</u>	<u>58</u>
<u>Anexo A: Diseño experimental inicial</u>	<u>58</u>
<u>Anexo B: Imprevistos operacionales con tambor de 750 G.....</u>	<u>58</u>
<u>Anexo C: Imprevisto operacional con tambor de 1000 G</u>	<u>59</u>
Hoja Resumen Memoria de Título	60

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación geográfica de proyectos CAP (uso interno CAP).	5
Figura 2. <i>Flowsheet</i> de la Planta Magnetita (uso interno CAP Minería).	6
Figura 3. Concentración magnética primaria (uso interno CAP Minería).	7
Figura 4. Molienda y clasificación (uso interno CAP Minería).	8
Figura 5. Deslamado (uso interno CAP Minería).	8
Figura 6. Concentración magnética secundaria (uso interno CAP Minería).	9
Figura 7. Flotación inversa (uso interno de CAP Minería).	10
Figura 8. Imanes permanentes.	15
Figura 9. Diseño de operación concurrente para tambor magnético (modificación a partir de Metso).	17
Figura 10. Diseño de operación contrarrotación para tambor magnético (modificación a partir de Metso).	18
Figura 11. Diseño de operación contracorriente para tambor magnético (modificación a partir de Metso).	19
Figura 12. Ubicación del <i>gap</i> de descarga y altura del arco magnético.	20
Figura 13. Estructura de la línea Eriez (línea 4).	23
Figura 14. Estructura línea Multotec (línea 1).	24
Figura 15. Esquematación de los tambores en contracorriente operando en serie (uso interno Planta Magnetita).	25
Figura 16. Diagrama para análisis de calidad y precisión por método 1 (fuente: International Organization for Standardization, 2002).	28
Figura 17. Puntos de muestreo en concentración <i>finisher</i> en la línea 3.	29
Figura 18. Histograma para alimentación de sólidos a <i>finisher</i>	30
Figura 19. Gráfica de control para alimentación de sólidos a <i>finisher</i>	31
Figura 20. Gráfico de presión de anillo vs presión de manómetro de agua de dilución.	31
Figura 21. Medición de campo magnético con gaussometro.	32
Figura 22. Distribución de polos en tambores de 750 G y 1000 G.	33
Figura 23. Puntos de medición de campo magnético.	33
Figura 24. Recuperación en peso (Rp) vs agua de dilución para condición 6 y 7.	35

Figura 25. Recuperación metalúrgica magnética (Rmm) vs agua de dilución para condición 6 y 7.....	36
Figura 26. Leyes de FeMag obtenidas por condición realizada en M1 de 750 G.	37
Figura 27. Parámetros metalúrgicos obtenidos por condición realizada en M1 de 750 G.	38
Figura 28. Leyes de FeMag obtenidas en la línea 3 del proceso de concentración <i>finisher</i> por condición realizada con M1 de 750 G.	39
Figura 29. Leyes de FeT obtenidas en la línea de proceso n°3 por condición realizada en M1 de 750 G.....	40
Figura 30. Diagrama de Pareto de parámetros operacionales en tambor de 750 G sobre la Rmm.....	41
Figura 31. Efectos principales de parámetros operacionales en tambor de 750 G sobre la Rmm.	41
Figura 32. Diagrama de Pareto de parámetros operacionales en tambor de 750 G sobre la Rp.	42
Figura 33. Efectos principales de parámetros operacionales en tambor de 750 G sobre la Rp.....	42
Figura 34. Optimización del diseño experimental.	43
Figura 35. Leyes de FeMag obtenidas por condición realizada en M1 de 1000 G.	44
Figura 36. Parámetros metalúrgicos obtenidos por condición realizada en el M1 de 1000 G.....	45
Figura 37. Leyes de FeMag obtenidas por condición realizada con M1 de 1000 G en la línea de proceso n°3.	46
Figura 38. Leyes de FeT obtenidas en la línea de proceso n°3.	46
Figura 39. Diagrama de Pareto de parámetros operacionales en tambor de 1000 G sobre la Rmm.....	47
Figura 40. Diagrama de Pareto de parámetros operacionales en tambor de 1000 G sobre la Rp.	48
Figura 41. Efectos principales de parámetros operacionales en tambor de 1000 G sobre la Rp.....	48
Figura 42. Optimización de parámetros para tambor de 1000 G.	49
Figura 43. Diagrama de Pareto para la Rp con respecto al <i>gap</i> de descarga, arco magnético y campo magnético.	50

Figura 44. Diagrama de Pareto para la Rmm con respecto al <i>gap</i> de descarga, arco magnético y campo magnético.	50
Figura 45. Diagrama de Pareto para el %FeMag en cola con respecto al <i>gap</i> de descarga, arco magnético y campo magnético.....	51
Figura 46. Efecto del campo magnético sobre la Rmm del M1.	52
Figura 47. Efecto del campo magnético en la pérdida de FeMag en el M1.....	52
Figura 48. Efecto del campo magnético sobre la Rp del M1.	53



Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación de materiales magnéticos, con respecto a su susceptibilidad magnética y permeabilidad relativa [Svoboda, 2011].	13
Tabla 2. Susceptibilidad magnética de minerales [Espinoza, 2006].	14
Tabla 3. Identificación de los tambores en la etapa <i>finisher</i> (uso interno Planta Magnetita).	26
Tabla 4. Diseño experimental final.	27
Tabla 5. Resultado de la aplicación de normas.	29
Tabla 6. Estructura de muestreo.	29
Tabla 7. Condiciones operacionales para muestreo.	32
Tabla 8. Mediciones de campo magnético en el tambor de 750 G.	34
Tabla 9. Diseño experimental inicial.	58
Tabla 10. Diseño experimental de avance.	59



Nomenclatura y abreviaciones

CAP	Compañía de Acero del Pacífico.
CMP	Compañía Minera del Pacífico.
CCMC	Compañía Contractual Minera Candelaria.
M1	Identificación de Planta Magnetita para el primer tambor magnético perteneciente a una línea de proceso en la etapa <i>finisher</i> .
M2	Identificación de Planta Magnetita para el segundo tambor magnético perteneciente a una línea de proceso en la etapa <i>finisher</i> .
M3	Identificación de Planta Magnetita para el tercer tambor magnético perteneciente a una línea de proceso en la etapa <i>finisher</i> .
%FeT	Ley de hierro total.
%FeMag	Ley de hierro magnético.
%FeDTT	Ley de hierro máximo recuperable determinado por Davis tuve test.
DTT	Fracción másica de hierro magnético presente en Davis tuve test.
\$/dmt	Dólares por tonelada métrica seca.
σ_W	Variación de calidad o grado de heterogeneidad del mineral de hierro.
σ_S	Desviación estándar de muestreo.
β_{MPS}	Precisión general, medida que combina la precisión de muestreo, preparación de las muestras y medición.

1. Introducción

La separación magnética es un método de concentración que tiene como principio el comportamiento de los minerales ante un campo magnético. La separación magnética se puede realizar en húmedo o en seco y aplicando un campo de alta o baja intensidad, condiciones que se determinan según el mineral a concentrar y el objetivo del proceso (recuperar o enriquecer). Este método de separación se aplica a diferentes tipos de minerales, siendo dominante el uso para minerales de hierro.

El comercio del hierro se realiza en dos categorías las cuales son: minerales con índices de hierro entre 62% y 65%, por lo tanto, es importante que los procesos de concentración sean altamente eficientes, para lograr la ley objetivo y obtener un concentrado comercializable. Dentro de las plantas procesadoras de hierro en Chile, se encuentra Planta Magnetita, perteneciente a la Compañía Minera del Pacífico (CMP). Su operación consiste en procesar los relaves provenientes de la Compañía Contractual Minera Candelaria (CCMC), produciendo concentrados con una ley de 66% de hierro y vendiendo su producto a través de la categoría del 65% Fe.

Entre los procesos que posee Planta Magnetita para obtener un concentrado de buena calidad, se encuentran: concentración magnética primaria, molienda y clasificación, deslamado, concentración magnética secundaria y flotación.

La concentración magnética primaria consiste en un proceso *rougher* primario y un *rougher* secundario con el objetivo de recuperar la mayor cantidad de mineral con propiedades magnéticas, y para lo cual se utilizan concentradores magnéticos que permiten aumentar la recuperación disminuyendo la selectividad del proceso. El concentrado de la etapa anterior pasa por un proceso de molienda y clasificación. Posteriormente, el material fino desde molienda y clasificación pasa por un proceso de deslamado, donde se extraen lamas generadas en el proceso de molienda e ingresa como alimentación a la etapa *finisher* o concentración magnética secundaria. La etapa *finisher* tiene como objetivo enriquecer el concentrado, para lo cual se procesa en cuatro líneas en paralelo con tres tambores en serie cada una. Este proceso se debe trabajar con una intensidad de campo menor al proceso *rougher* con la intención de aumentar la selectividad. Finalmente el concentrado ingresa a la etapa de flotación, donde se elimina la sílice y se obtiene un concentrado comercializable.

Con el fin de mejorar los resultados que se obtienen actualmente en la etapa *finisher* se plantea la necesidad de caracterizar y optimizar el proceso, para lo cual se plantea el estudio a nivel industrial del efecto que poseen los *gap* base y *gap* de descarga, el arco magnético y el impacto del campo magnético, buscando el conjunto de condiciones óptimas para la operación.

1.1. Planteamiento del problema

Entendiendo la relevancia que tienen los procesos de concentración, en especial en etapas selectivas, se hace pertinente estudiar las variables operacionales que posee la etapa de concentración magnética *finisher* y evaluar el impacto que poseen en el proceso de concentración con la intención de identificar problemas operacionales y optimizar el funcionamiento de los equipos magnéticos. El estudio se fundamenta de igual forma en irregularidades operacionales que posee esta etapa en el proceso.

Entre las irregularidades comunes que se han reportado en operación se encuentran:

- El primer tambor magnético (M1) de la línea 1, 2 y 3 tiene un campo magnético de 1000 G, mientras que el primer tambor magnético de la línea 4 tiene 750 G.
- No existe control de los flujos de alimentación, concentrado y cola por cada una de las líneas, teniendo solo control de la alimentación al distribuidor de la etapa *finisher* y del acondicionador que recibe el concentrado final de la etapa compuesto por las cuatro líneas de proceso.
- Cada línea de la etapa *finisher* genera una ley de concentrado diferente.
- La línea 3 es la que presenta los peores parámetros metalúrgicos (IE: índice de enriquecimiento, Rp: recuperación en peso, Rm: recuperación metalúrgica y Rmm: recuperación metalúrgica magnética).
- El M1 de la línea 3 presenta rebalse continuo.

La caracterización y parametrización del M1 de la línea 3, es importante con el fin de evitar rebalses y mejorar los parámetros metalúrgicos. Por otra parte, es pertinente analizar el efecto de utilizar un M1 con una intensidad de campo de 1000 G o de 750 G en busca de homogenizar las cuatro líneas de proceso.

1.2. Propuesta de trabajo

El trabajo propuesto para mejorar la etapa *finisher*, consistió en evaluar el efecto de los *gap* (base y descarga), el arco magnético y el efecto que posee utilizar un tambor de 1000 G o un tambor de 750 G en el M1 de la línea 3. Utilizando la herramienta Minitab, se realizó un diseño experimental, obteniéndose un total de 16 condiciones operacionales que permiten evaluar el efecto de los parámetros operacionales del tambor magnético.

El muestreo de las condiciones se realizó durante dos meses, considerando dos a tres modificaciones por semana, dependiendo de las condiciones operacionales en la planta (parada no programada de molino, parada de planta, parada no programada de molino en CCMC, etc.). El proceso de muestreo se realizó en 3 lotes por condición, para esto se tomaron seis muestras de 25 incrementos por lote y en paralelo se tomaron 30 muestras parciales, compuestas de cinco incrementos cada una. Las muestras parciales se realizaron para obtener un conjunto más amplio de datos del proceso industrial y para poder descartar muestras que se vean influenciadas por variaciones operacionales. El método implementado se especifica en las normas:

- ISO3082: Minerales de hierro – Procedimientos de muestreo y preparación de las muestras.
- ISO3084: Minerales de hierro – Métodos experimentales para la evaluación de la variación de la calidad.
- ISO3085: Minerales de hierro – Métodos experimentales para verificar precisión de muestreo, la preparación de las muestras y la medición.
- ISO16742: Minerales de hierro – Muestreo de pulpa.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Realizar un análisis de las condiciones operacionales para el tambor de concentración magnética, M1 de la línea 3 en la etapa de concentración *finisher* a fin de proponer criterios para optimizar la recuperación magnética y evaluar su implementación.

1.3.2. Objetivos específicos

- Caracterizar el efecto del *gap* base, *gap* de descarga y arco magnético en el M1 y determinar la composición que permita mejorar el funcionamiento del M1 en la línea 3.
- Caracterizar el efecto operacional que posee utilizar un tambor de 750 G o un tambor de 1000 G en el M1 de la línea 3 del proceso de concentración magnética *finisher*.
- Caracterizar el funcionamiento de la línea 3 del proceso de concentración magnética en la etapa *finisher*.
- Identificar el efecto que posee el uso de agua de dilución en el proceso de concentración magnética en la etapa *finisher*.



2. Antecedentes

2.1. Origen de la planta

Minera Hierro Atacama S.A., nace como un proyecto de CAP a través de su unidad estratégica de negocio Compañía Minera del Pacífico S.A. [Carmona, 2013].

El proyecto Minera Hierro Atacama incluye el subproyecto Planta Magnetita, el cual tiene por objetivo producir concentrado de hierro magnético a partir de los relaves de cobre, generados por Compañía Contractual Minera Candelaria (CCMC) [Compañía Minera Del Pacifico, 2015]. De este modo, Planta Magnetita, es una faena productora de concentrado de hierro a partir de pasivos ambientales mineros, por lo cual es considerada una planta recicladora y es reconocida como uno de los proyectos de reciclaje más grandes del mundo por su nivel de producción [CAP Minería, 2018].

2.2. Ubicación geográfica

Planta Magnetita está ubicada en la Región de Atacama, Provincia de Copiapó, Comuna de Tierra Amarilla, a 5 km de la ciudad de Tierra Amarilla y a 20 km al sureste de la ciudad de Copiapó como se puede observar en la Figura 1.

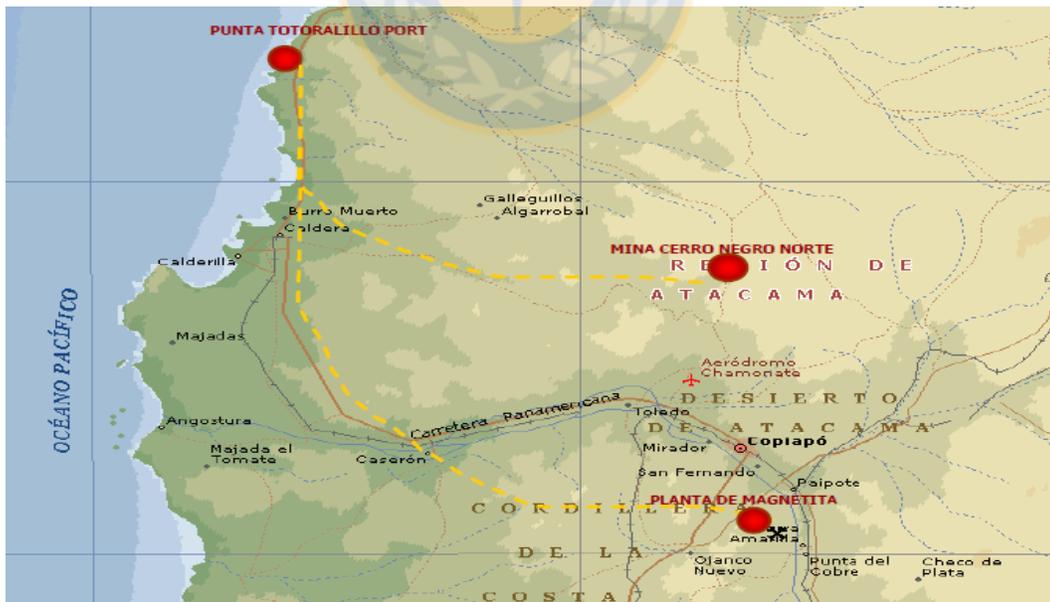


Figura 1. Ubicación geográfica de proyectos CAP (uso interno CAP).

2.3. Descripción del proceso

El proceso general de Planta Magnetita se puede resumir como un sistema de recuperación de hierro desde el relave de cobre proveniente de CCMC, partiendo con leyes entre 7 y 10%, para obtener finalmente concentrados con un contenido mínimo de 66%.

Planta Magnetita posee cinco grandes etapas operacionales: concentración magnética primaria (*rougher* 1 y 2), molienda y clasificación, deslamado (hidroseparator), concentración magnética secundaria (*finisher*) y flotación. Finalmente, el concentrado obtenido del proceso es enviado hasta Puerto Punta Totalillo por medio de un concentraducto, ver Figura 2.

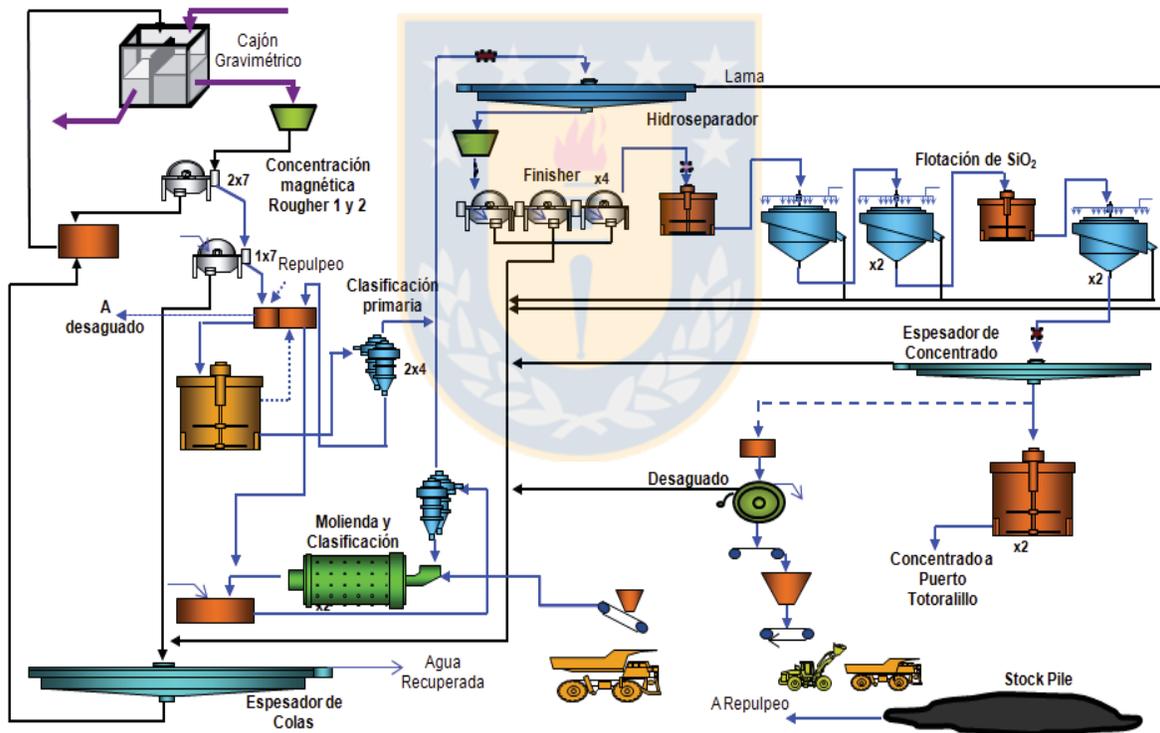


Figura 2. Flowsheet de la Planta Magnetita (uso interno CAP Minería).

2.3.1. Concentración magnética primaria (*rougher* 1 Y 2)

La concentración magnética primaria posee dos etapas *rougher* que funcionan en serie. La primera etapa *rougher* es alimentada desde dos distribuidores y cada uno de estos distribuye a una línea de 7 tambores en paralelo. El concentrado pasa a una

segunda etapa *rougher*, mientras que la cola retorna a CCMC. La segunda etapa *rougher* se compone de una línea de 7 tambores en paralelo que reciben el concentrado de la *rougher* primaria, como se puede observar en la Figura 3. Cada tambor posee una cortina de agua, lo que favorece la recuperación del concentrado. El producto de la etapa *rougher* es un concentrado con un 25% de hierro, el cual pasa a la siguiente etapa de molienda y clasificación.

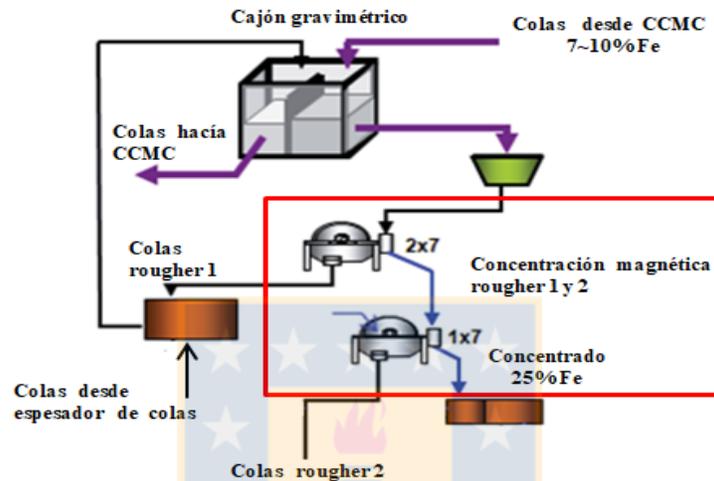


Figura 3. Concentración magnética primaria (uso interno CAP Minería).

2.3.2. Molienda y clasificación

El concentrado proveniente de la etapa *rougher* pasa a una clasificación primaria que posee dos baterías de hidrociclones. El *overflow* (salida de finos por parte superior) de los hidrociclones pasa al hidroseparador, mientras que el *underflow* (salida de gruesos por la parte inferior) es enviado a la etapa de molienda.

La etapa de molienda cuenta con dos molinos en paralelo con modalidades operacionales diferentes. El molino 1 puede recibir alimentación dual, esto quiere decir que puede ser alimentado de manera inversa (alimentación como pulpa), directa (alimentación de sólidos) o ambas simultáneamente, mientras que el molino 2 solo puede ser alimentado de manera inversa. La descarga de cada molino pasa a una batería de hidrociclones, donde el *overflow* de las baterías alimenta al hidroseparador, mientras que el *underflow* es recirculado al molino, como se observa en la Figura 4. La pulpa proveniente de molienda y clasificación posee un P_{80} inferior a #325, valor necesario para un correcto funcionamiento de las etapas de concentración.

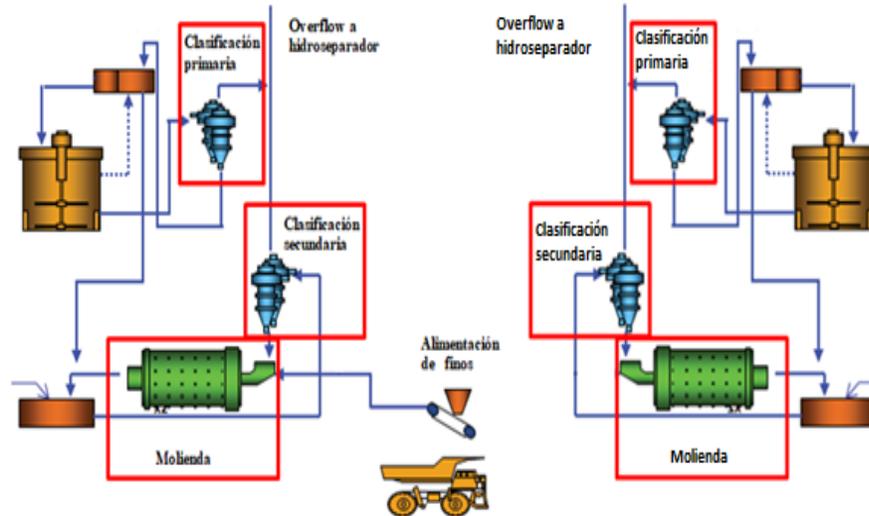


Figura 4. Molienda y clasificación (uso interno CAP Minería).

2.3.3. Deslamado

El deslamado es una etapa de concentración gravitacional que se produce al interior de un hidroseparador, en el cual se utiliza la diferencia de densidad entre la ganga (sílice) y la mena (magnetita) para lograr la separación. La ganga, en esta etapa, es extraída en forma de lamas (ganga ultrafina) por la parte superior y es enviada al espesador de colas, mientras que por la parte inferior, sale la pulpa a concentración magnética secundaria con un contenido en sólido del 30% y aumentando la ley de hierro desde 25% a un 42% (ver Figura 5).

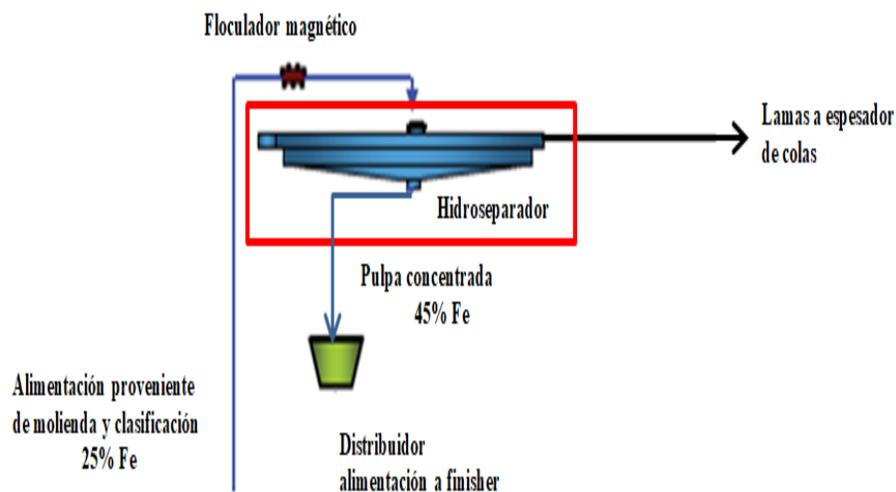


Figura 5. Deslamado (uso interno CAP Minería).

2.3.4. Concentración magnética secundaria

La pulpa proveniente del hidroseparador ingresa a un distribuidor que alimenta 4 líneas *finisher* que operan en paralelo. Cada una de estas líneas funciona con tres tambores magnéticos en serie que operan en contracorriente, como se observa en la Figura 6.

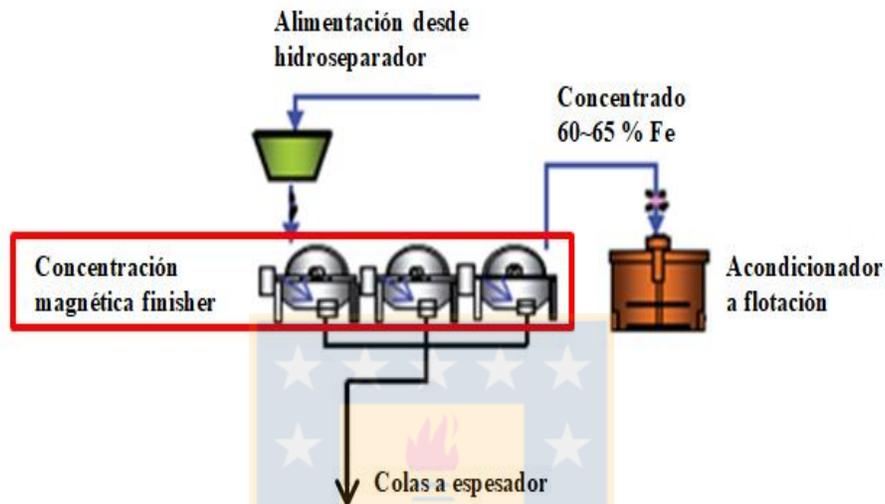


Figura 6. Concentración magnética secundaria (uso interno CAP Minería).

En esta etapa, la pulpa ingresa de manera homogénea a lo largo del cajón de alimentación, fluye hacia la parte inferior del tanque donde se añade agua de dilución para fomentar la agitación del sistema y evitar embancamiento. Posteriormente, ingresa por la parte inferior del tambor donde se genera la separación magnética. La cola se ve forzada a salir en dirección opuesta al giro del tambor, mientras que el concentrado se separa del tambor por el extremo opuesto del tanque. Por último, para facilitar la separación del concentrado desde el tambor magnético, se utiliza una cortina de agua (agua de lavado).

2.3.5. Flotación

El concentrado proveniente de la etapa *finisher* ingresa al acondicionador, donde se añade un colector con características espumantes y de ser necesario ácido acético para regular el pH entre 8 y 10,2. La pulpa es concentrada por medio de flotación inversa, por lo que la cola flota con la espuma mientras que el concentrado sale por la parte inferior de la celda. En Planta Magnetita poseen dos líneas de flotación en

paralelo, de dos celdas cada una. El sistema funciona como un sistema *cleaner* donde la segunda celda es alimentada por el concentrado de la primera. El concentrado de ambas líneas pasa a un segundo acondicionador e ingresa a una última etapa de flotación que posee dos celdas en paralelo, como observa en la Figura 7.

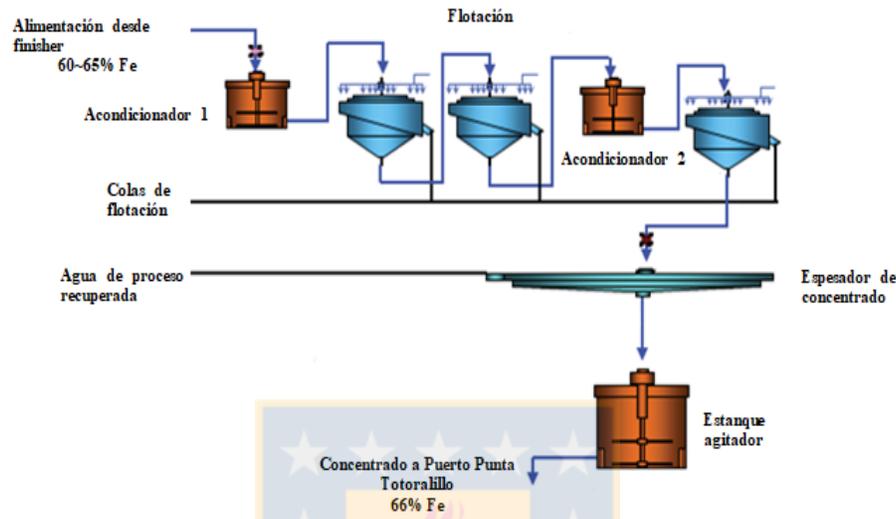


Figura 7. Flotación inversa (uso interno de CAP Minería).

Las colas generadas son enviadas al espesador de colas y el concentrado de la flotación pasa a un espesador de concentrado, luego ingresa a los estanques agitadores donde se agrega cal para tener un pH 11 y ser enviado a Puerto Punta Totoralillo por concentraducto.

2.4. Marco teórico

2.4.1. Separación magnética

La separación magnética es un proceso en el cual se separan dos sólidos utilizando diferencia de propiedades magnéticas, obteniendo como resultado una corriente de mineral con susceptibilidad a campo magnético mayor y otra corriente con menor susceptibilidad de campo magnético [Osses, 2016].

El proceso de separación magnética depende de la interacción del material magnético con el campo magnético aplicado llamado fuerza magnética. Esta fuerza magnética compite con el conjunto de fuerzas existentes en el proceso como son: la fuerza gravitacional, inercial, hidrodinámica y centrífuga. Para que la separación sea efectiva

la fuerza magnética debe ser superior al conjunto de las otras fuerzas existentes. En otras palabras, un proceso de separación magnética se vuelve efectivo si se cumple la ecuación (1). Esta relación indica que la fuerza magnética debe ser superior a la suma del conjunto de fuerzas para lograr extraer el material deseado. No obstante, si la fuerza magnética es muy superior comparada con la suma del conjunto de fuerzas el proceso pierde selectividad [Stener, 2015].

$$F_{mag}^m > F_{comp} > F_{mag}^g \quad (1)$$

Dónde:

- F_{mag}^m es la fuerza magnética aplicada sobre un material magnético deseado (mena).
- F_{comp} es la suma del conjunto de fuerzas que compiten en el proceso.
- F_{mag}^g es la fuerza magnética aplicada sobre un material que no se desea extraer del flujo (ganga).

2.4.2. Conceptos utilizados en la separación magnética

Para la comprensión de la separación magnética y los procesos de concentración por estos medios se deben conocer algunos conceptos que se explican brevemente a continuación:

- Densidad de flujo magnético o inducción magnética: número de líneas de fuerza que pasan a través de un área unitaria de material; su símbolo es B ; se define en la ecuación (2). Su unidad de medida en el S.I. es el Tesla (T), sin embargo, en los procesos industriales la unidad Tesla es una unidad de medida muy grande por lo que se emplea generalmente Gauss (G) como unidad, la cual pertenece al CG, donde 1 T equivale a 10.000 G.

$$B = \mu_0(H + M) \quad (2)$$

Dónde:

- o μ_0 es la constante de proporcionalidad en el vacío, también conocida como permeabilidad de espacio libre.
- o H es la intensidad de campo magnético.
- o M es la magnetización del material.

En el vacío, $M = 0$, obteniéndose la ecuación (3) [Wills and Finch, 2015].

$$B_0 = \mu_0 H \quad (3)$$

- Intensidad de campo magnético: fuerza magnética que inducen las líneas de fuerza a través del material. Su unidad de medida es A/m y está representado por el símbolo H [Wills and Finch, 2015].
- Permeabilidad magnética: está representada como la relación entre la densidad de flujo y la intensidad de campo magnético, definida por la ecuación (4) [Gupta and Yan, 2016].

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (4)$$

- Permeabilidad relativa: se define como la razón entre la permeabilidad del material y la permeabilidad en el vacío; se define por la ecuación (5) [Gupta and Yan, 2016].

$$\mu_{relativa} = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (5)$$

- Gradiente de campo magnético: razón a la cual, la intensidad de campo aumenta hacia la superficie del imán y se define por la ecuación (6).

$$F \propto H \frac{dH}{dx} \quad (6)$$

Donde F es la fuerza sobre la partícula y $\frac{dH}{dx}$ es el gradiente de campo [Dworzanowski, 2010].

- Susceptibilidad magnética: la susceptibilidad magnética se define por la ecuación (7).

$$M = \kappa H \quad (7)$$

Donde κ es la susceptibilidad magnética volumétrica [Gupta and Yan, 2016]. La susceptibilidad magnética es la respuesta del material a un campo magnético [Dworzanowski, 2010].

Los materiales pueden ser clasificados en cinco grupos según su susceptibilidad magnética y su permeabilidad relativa, como se presenta en la Tabla 1. La diferencia entre los materiales que poseen un mismo intervalo de susceptibilidad y permeabilidad relativa, es la alineación del momento magnético que posee cada tipo de material.

Tabla 1. Clasificación de materiales magnéticos, con respecto a su susceptibilidad magnética y permeabilidad relativa [Svoboda, 2011].

Parámetro	Diamagnéticos	Paramagnéticos Antiferromagnéticos	Ferromagnéticos Ferrimagnéticos
Susceptibilidad magnética	<0	$0 \leq$	$0 <<$
Permeabilidad relativa	<1	$1 \leq$	$1 <<$

Con base en la diferencia de la susceptibilidad magnética que poseen los materiales, estos se pueden clasificar como se muestra en la Tabla 2, en la cual, además, se señala un intervalo de *intensidad requerida para separación*, que hace referencia a la intensidad de campo magnético que requiere inducir un equipo separador para lograr separar el mineral deseado. Por último, se destaca que la magnetita es un mineral con alta susceptibilidad magnética, al igual que la principal ganga en Planta Magnetita, la Sílice. Por lo tanto el proceso de separación magnética *finisher* que se realiza en la planta debe poseer un campo magnético de baja intensidad para lograr un concentrado de buena calidad.

2.5. Clasificación de equipos

Existen numerosas formas de clasificación de los equipos de separación magnética, principalmente se basan en:

- Intensidad de campo magnético:
 - o Separador magnético de baja intensidad.
 - o Separador magnético de alta intensidad.
- Fuente generadora del campo magnético:
 - o Imanes permanentes.
 - o Electroimanes con núcleo de hierro.
 - o Imán resistivo.
 - o Imán superconductor

Tabla 2. Susceptibilidad magnética de minerales [Espinoza, 2006].

Intensidad requerida para separación [G]	Mineral	Fuerza de atracción
Fuertemente magnético		
500 a 5.000	hierro	100
	magnetita	40,2
	franklinita	33,5
	leucita	17,5
	sílice	17,4
	pirrotita	15,4
Moderadamente magnético		
5.000 a 10.000	limenita	11,7
	biotita	8,90
	granate	6,68
	wolframita	5,68
Débilmente magnético		
10.000 a 18.000	hematita	4,64
	columbita	4,08
	limonita	3,21
	romo	3,12
	pirolusita	2,61
	rodocrosita	1,93
	siderita	1,82
	manganita	1,36
Pobrementemente magnético		
18.000 a 23.000	rutilo	0,930
	rodonita	0,760
	dolomita	0,570
	calamina	0,510
	tantalita	0,400
	cerusita	0,300
	epídota	0,300
	monacita	0,300
	fergusonita	0,290
	zircón	0,280
	ceragirita	0,280
	argentita	0,270
	oropimente	0,240
	pirita	0,230
	esfalerita	0,230
	molibdenita	0,230
	bornita	0,220
wilimita	0,210	
tetraedrita	0,210	
scheelita	0,150	

La intensidad de campo magnético que debe ser aplicada está fuertemente asociada al mineral que se desea separar y al proceso que se desea realizar, a modo de ejemplo, si se desea concentrar magnetita se requiere una baja intensidad de campo magnético, como se aprecia en la Tabla 2, pues la magnetita es un mineral fuertemente magnético, y por lo tanto, utilizar una alta intensidad de campo pudiera favorecer la recuperación de todo tipo de mineral y no se genera un proceso selectivo de concentración.

La fuente generadora del campo magnético se define por: factores económicos, sensibilidad y flexibilidad operacional. Actualmente, existe una alta demanda de imanes permanentes. Si bien los imanes permanentes disminuyen la flexibilidad operacional, no requieren energía eléctrica para generar un campo magnético, disminuyendo costos operacionales en los procesos.

La gran variedad de equipos y aplicaciones existentes hace necesario centrarse en los concentradores magnéticos en vía húmeda del tipo tambor, debido a que son utilizados en Planta Magnetita.

2.5.1. Tambores magnéticos en vía húmeda

Los tambores magnéticos en vía húmeda consisten fundamentalmente de un tambor rotatorio no magnético que contiene entre tres y seis magnetos estacionarios de polaridad alternada (ver Figura 8).

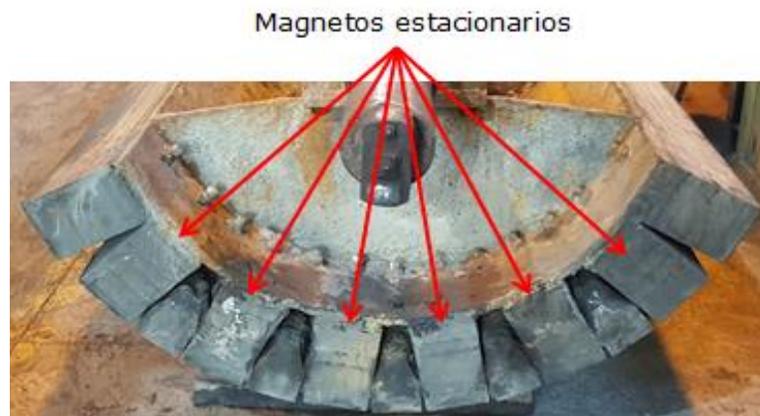


Figura 8. Imanes permanentes.

El material con propiedades magnéticas se adhiere a la superficie del tambor rotatorio y se desadhiere a medida que se aleja del último magneto, sin embargo, el material magnetizado no siempre logra desadherirse del tambor y se pierde en la descarga de colas. Para evitar la pérdida de material magnético y favorecer la separación del concentrado, se utiliza una cortina de agua a la altura de la descarga de concentrado.

En este tipo de separador magnético el tamaño de partícula de la alimentación rara vez supera los 5 mm; partículas de tamaños mayores son usualmente tratadas en seco [Campillay, 2010].

Estos tambores pueden emplear dos tipos de imanes, electromagnéticos o permanentes. Los imanes electromagnéticos son usados principalmente en tambores de alta intensidad, mientras que los imanes permanentes se utilizan en los de baja intensidad. Los tambores de baja intensidad se usan para la separación magnética de minerales fuertemente magnéticos o bien en procesos donde se desea aumentar el índice de enriquecimiento, como en la concentración de magnetita. Los tambores de alta intensidad son utilizados para la separación de minerales débilmente magnéticos o bien en procesos donde predomina la recuperación de material sobre el enriquecimiento de la pulpa.

Además, los tambores magnéticos pueden clasificarse en tres tipos dependiendo de su diseño: concurrente, contra rotación y contracorriente.

Diseño concurrente

La Figura 9, muestra el diseño de operación de un tambor concurrente. En el esquema se puede observar que la alimentación es introducida por un extremo de la batea a un cajón de alimentación. Posteriormente, la pulpa ingresa a un tanque de separación donde las partículas con propiedades magnéticas son atraídas por los imanes hasta la superficie del tambor rotatorio. El concentrado con propiedades magnéticas recorre la batea adherida al tambor rotatorio hasta el punto de descarga, mientras que la cola es separada del concentrado y eliminada por la zona central de la batea.

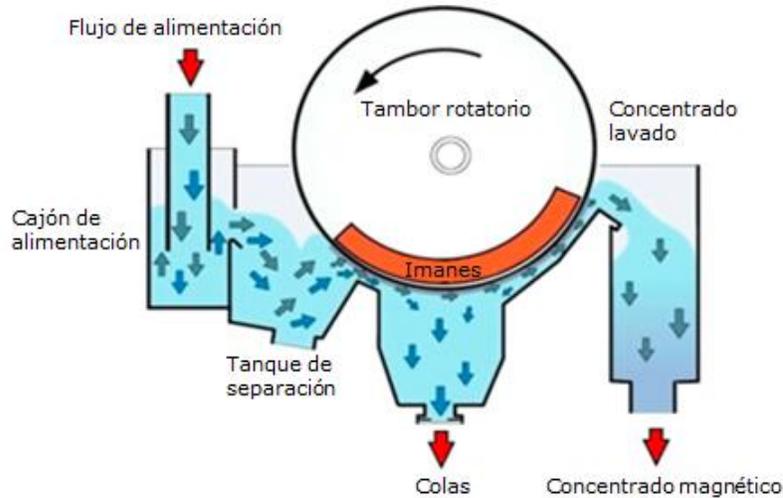


Figura 9. Diseño de operación concurrente para tambor magnético (modificación a partir de Metso).

Este tipo de diseño se denomina concurrente debido a que el tambor magnético gira en la misma dirección que posee la pulpa entrante a la batea. Además es un diseño efectivo para producir un concentrado magnético de alta ley a partir de materiales relativamente gruesos (aproximadamente 5 mm). La intensidad de campo magnético utilizada en este tipo de diseño es del orden de 700 G. Se usa ampliamente en los sistemas de recuperación de medios densos [Campillay, 2010; Osses, 2019; Svoboda, 2011].

Diseño contrarrotación

La Figura 10 esquematiza el proceso de un diseño contrarrotación para la concentración magnética de minerales de hierro. En este diseño la alimentación pasa del cajón de alimentación hacia la zona de separación del tanque, en sentido opuesto a la rotación del tambor, donde el material magnético se adhiere a la superficie del tambor y sale por la descarga de concentrado prácticamente de forma inmediata. La característica principal del diseño es que minimiza el tiempo de adhesión de la partícula magnética al tambor y la pulpa recorre todo el arco magnético, por lo que posee una gran capacidad de recuperación. Debido a su capacidad de recuperar material magnético, es implementado como etapa Rougher en concentración magnética, donde se desea obtener altas recuperaciones y no es requerido obtener un concentrado de alta calidad. Este diseño generalmente utiliza material que puede ser

hasta de 4 mm, pero es preferible que sea menor a 0,5 mm. [Campillay, 2010; Wills and Finch, 2015; Svoboda, 2011].

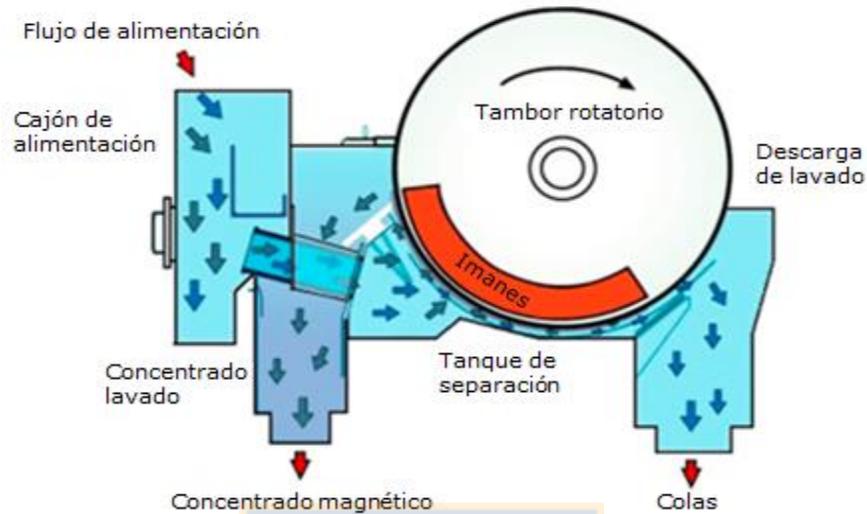


Figura 10. Diseño de operación contrarrotación para tambor magnético (modificación a partir de Metso).

Diseño contracorriente

El diseño contracorriente es utilizado en etapas finales de concentración donde el grado de limpieza o pureza es requerido. El término contracorriente hace referencia al hecho de que la cola va en sentido contrario al giro del tambor al momento de abandonar el separador magnético (ver Figura 11). En este diseño, la alimentación ingresa por la parte inferior del tanque, además, se agrega agua de dilución al sistema generando un sistema agitado, permitiendo que el material particulado suba hasta la cercanía del tambor y evitando que se acople en la superficie del tanque. Las colas se ven forzadas a viajar en dirección opuesta al giro del tambor, hasta que logran salir del separador por la descarga de colas, zona de la batea que funciona como controlador de nivel.

El diseño genera concentrados de alta calidad, además posee bajas pérdidas de material magnético por lo que su recuperación no se ve afectada de forma significativa. Estos tambores funcionan de manera eficiente para material particulado fino con un tamaño inferior a $100 \mu\text{m}$ y con una intensidad de campo magnético del orden de 700 G [Campillay, 2010; Wills and Finch, 2015; Svoboda, 2011].

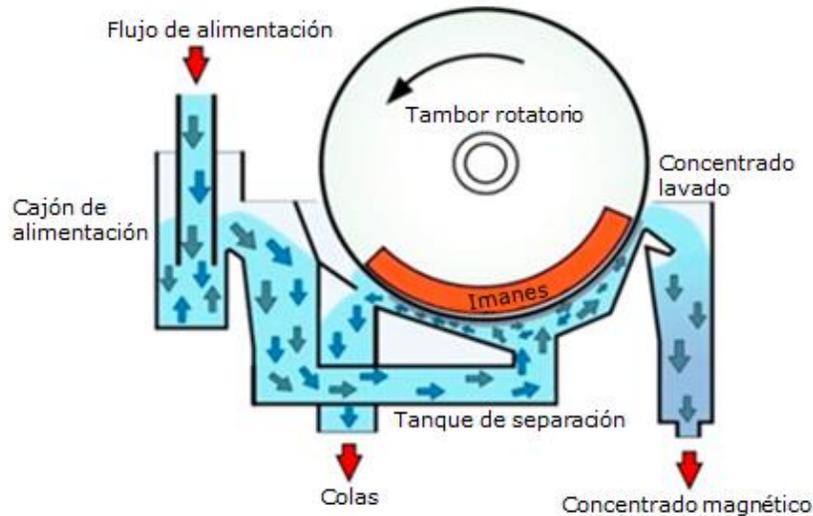


Figura 11. Diseño de operación contracorriente para tambor magnético (modificación a partir de Metso).

2.6. Parámetros operacionales del tambor magnético

Para que los tambores magnéticos funcionen de manera eficiente se requiere mantener un adecuado control de los parámetros operacionales. Los cuatro parámetros operativos que generan mayor impacto en el óptimo funcionamiento del tambor son: control de nivel, espacio entre el tanque y el tambor (*gap*), posición del imán y agua de lavado.

- **Control de nivel:** la alimentación al tambor se distribuye homogéneamente en la caja de alimentación; luego fluye por debajo del ancho del tambor ingresando al tanque de separación. El nivel en el tanque debe mantenerse sobre la parte inferior del tambor, de modo que, este se encuentre sumergido constantemente. Si el tambor no se encuentra sumergido en la pulpa, la recuperación del material magnético disminuye considerablemente [Dworzanowski, 2010; Osses, 2019].
- **Espacio entre el tanque y el tambor (*gap* base y *gap* de descarga):** En la operación constante del tambor magnético existen dos distancias importantes que se deben controlar para un óptimo funcionamiento, y son el *gap* base (distancia entre el tanque y la parte inferior del tambor) y el *gap* de descarga (distancia entre el tambor y el labio de descarga del concentrado, las cuales se encuentran en la Figura 12).

El *gap* base básicamente determina la selectividad. A medida que el *gap* base aumenta, el proceso se vuelve más selectivo, caso contrario, si el *gap* base

disminuye, la recuperación aumenta. Existe una acotada distancia en la que se puede ajustar el *gap* base y generar una operación óptima y se debe tener presente que la modificación del *gap* afecta el caudal por la variación del área transversal. Por ende, si se desea reducir el *gap* base, el ajuste debe ser acompañado con una reducción en la velocidad del flujo de entrada [Dworzanowski, 2010; Osses, 2019], lo que significa una disminución de capacidad en toneladas o un aumento en el porcentaje de sólidos.

El *gap* de descarga permite el desaguado del concentrado magnético y su magnitud depende principalmente del contenido magnético en los sólidos de alimentación. Si el *gap* aumenta, el concentrado tendrá un mayor contenido de humedad; por otra parte, si el *gap* disminuye, parte del concentrado se verá forzado a ir en dirección de la colección de colas, disminuyendo la recuperación magnética [Dworzanowski, 2010; Osses, 2019].

- **Posición del imán:** La posición del imán hace referencia a la posición del arco magnético en relación con el labio de descarga de concentrado (ver Figura 12).



Figura 12. Ubicación del *gap* de descarga y altura del arco magnético.

El arco magnético debe cubrir el área en que el tambor es sumergido. Además, el último imán del arco magnético, debe estar a 50 mm, aproximadamente, sobre la descarga de concentrado. Si la posición del imán es muy alta, la desadhesión del concentrado se dificultará, generando que parte del concentrado recircule y se separe al ingresar nuevamente en la zona de colección de colas. Por otra parte, si

el arco magnético está en una posición muy baja, parte del concentrado se separará antes de llegar a la zona de colección de concentrado, provocando que el concentrado sea forzado a ir en dirección de la zona de colección de colas, reduciendo la recuperación metalúrgica [Dworzanowski, 2010; Osses, 2019].

- **Agua de lavado:** el sistema de agua de lavado, es esencial para promover la correcta desadhesión del concentrado del tambor magnético, facilitando el paso del concentrado desde el tambor hacia la zona de colección de concentrado. La efectividad del sistema de lavado o cortina de agua, depende tanto del diseño como de las características que posee la cortina de agua (presión, grado de limpieza del agua, distribución homogénea a lo largo del tambor, etc.) [Dworzanowski, 2010; Osses, 2019].

2.6.1. Parámetros metalúrgicos

Recuperación

La recuperación es la relación entre la cantidad de metal o mineral de interés que es obtenido en el concentrado respecto del mineral de interés alimentado. Habitualmente se expresa en porcentaje.

$$F = C + T \quad (8)$$

$$Ff = Cc + Tt \quad (9)$$

Donde F , C , T , son toneladas de alimentación, concentrado y cola respectivamente.

Donde f , c , t , leyes % de alimentación, concentrado y cola respectivamente.

La recuperación, o también definida como recuperación metalúrgica, R o Rm , se define en la ecuación (10):

$$R = Rm = \frac{Cc}{Ff} * 100 \quad (10)$$

Por otra parte, la recuperación en peso, Rp , se define como la relación entre la masa de concentrado y la masa total alimentada al sistema, y como se expresa en la ecuación (11):

$$Rp = \frac{C}{F} * 100 \quad (11)$$

Razón o índice de enriquecimiento

Es un indicador que permite determinar el aumento en la ley asociada al proceso de concentración; es utilizado como una forma de describir la eficiencia del proceso. Si la razón de enriquecimiento es mayor a 1, significa que existe una mayor ley en el concentrado respecto de la cabeza; su expresión matemática se presenta en la ecuación (12) [Bustamante, Gaviria y Restrepo, 2008].

$$I.E. = R.E. = \frac{c}{f} \quad (12)$$

Hierro total y hierro magnético

El hierro total es la cantidad de hierro contenido en una muestra de mineral incluyendo tanto la parte magnética como la no magnética.

El hierro magnético, FeMag, es la fracción del hierro total que es susceptible a un campo magnético de 4000 G. Para determinar la cantidad de hierro magnético existente en una muestra, se realiza la prueba del tubo Davis (Davis tube test) [Osse, 2019].

La prueba del tubo Davis es un *test* de concentración magnética realizada bajo condiciones estándar propias del instrumento (como inclinación del tubo, granulometría, rpm, intensidad magnética, etc.) [Osse, 2019]. Este *test* es utilizado para conocer %FeMag (ley de hierro magnético), %FeDTT (ley de Fe en el concentrado del test Davis) y %DTT (Rp del test Davis). El %DTT se define en la ecuación (13) como:

$$\%DTT = \frac{m_c}{m_f} * 100 \quad (13)$$

Donde m_c representa la masa concentrada en el test Davis y m_f es la masa total de la muestra (alimentación). Con esta información más el %FeDTT, se determina %FeMag a través de la ecuación (14).

$$\%FeMag = \frac{\%FeDTT * \%DTT}{100} \quad (14)$$

2.7. Estado actual de la etapa *finisher*

La etapa *finisher* posee cuatro líneas operacionales que trabajan en paralelo, por lo que la operación de cada línea es independiente de las demás. No obstante al momento de realizar la detención de una línea se genera rebalse en las otras tres líneas que continúan operando, lo que indica que se requiere realizar un ajuste en el dimensionamiento o en la capacidad de la etapa.

El diseño de las líneas es en contracorriente, y consta de tres líneas Multotec (línea 1, 2 y 3) y una línea Eriez (línea 4). Si bien el diseño de las líneas es el mismo, la estructura de la última es distinta a las otras tres debido a que posee una estructura tipo cascada (ver Figura 13), en que el M1 se encuentra a una altura superior respecto del M2 y estos a su vez a una altura superior que el M3, mientras que la estructura de las otras tres líneas es horizontal debido a que todos los tambores están a la misma altura (ver Figura 14).



Figura 13. Estructura de la línea Eriez (línea 4).

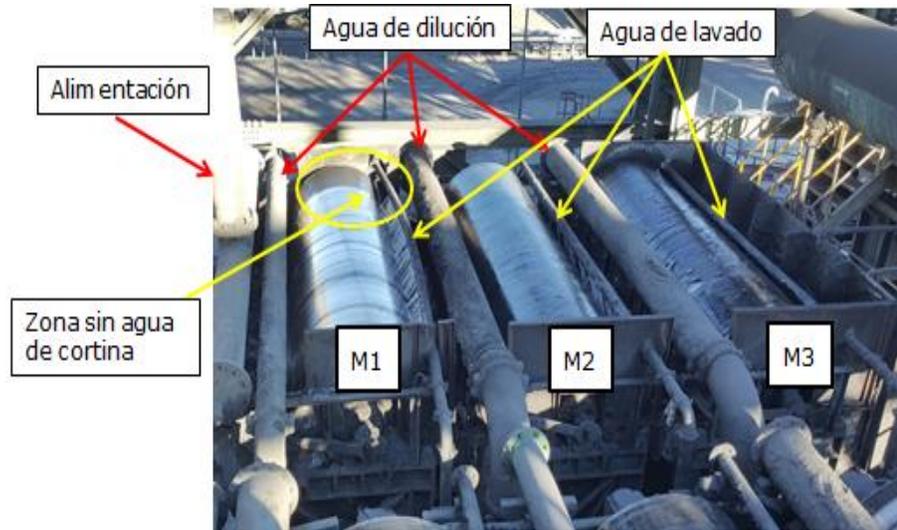


Figura 14. Estructura línea Multotec (línea 1).

Como se observa en las Figuras 13 y 14, cada línea posee tres tambores que operan en serie, donde cada tambor posee agua de dilución y de lavado, en las zonas de alimentación y descarga de concentrado respectivamente. En el M1 de la Figura 14, se observa una zona del tambor en la cual no hay cortina de agua, debido a que el agua utilizada es agua de proceso que contiene partículas finas remanentes del espesador de colas. Las partículas finas generan obstrucción de las líneas que alimentan la cortina de agua, fenómeno que ocurre en todas las líneas de operación generando un lavado ineficiente del tambor.

En la Figura 15, se esquematiza el funcionamiento de los tambores en serie con un diseño en contracorriente. La pulpa proveniente desde el proceso anterior, de color rojo, ingresa por la parte izquierda de la batea a un cajón de alimentación, donde se agrega agua de dilución. Posteriormente, entra por la parte inferior de la batea a la zona de separación, donde el material magnético, de color negro, se adhiere al tambor y sale por la parte derecha del estanque hacia el segundo tambor. La cola, de color azul, se ve forzada a fluir en dirección opuesta a la rotación del tambor saliendo del estanque por la zona izquierda.

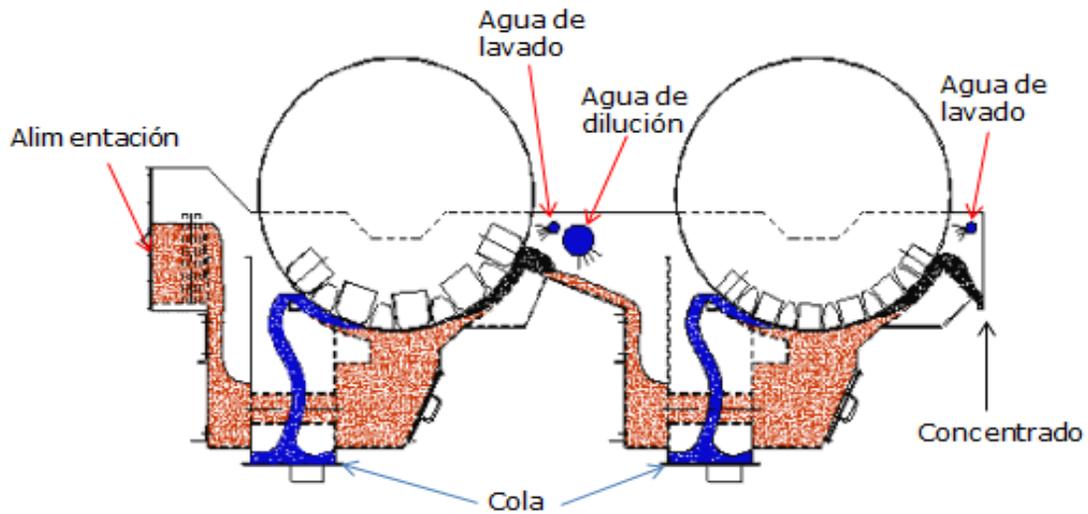


Figura 15. Esquematación de los tambores en contracorriente operando en serie (uso interno Planta Magnetita).

La Tabla 3, presenta las distribuciones de las líneas en la etapa *finisher* y los valores operacionales en que se encuentran los parámetros a modificar en el estudio.

En la Tabla 3, el código 21255, hace referencia a la identificación numérica de la etapa en el *flowsheet* (FS); el número que acompaña a la identificación de la etapa, es la línea y los M1, M2 y M3, representan los tambores 1, 2 y 3 de cada línea, respectivamente. La sigla del tambor, R o F, en la Tabla 3 indica si el tambor es tipo *rougher* o tipo *finisher* respectivamente, en cambio, la numeración que acompaña la sigla es la numeración del tambor. La diferencia entre un tambor tipo *rougher* y un tipo *finisher*, se basa en la intensidad del campo magnético. Los tambores tipo *rougher* operan a una intensidad de campo de 1000 G, mientras que los tambores tipo *finisher* operan a una intensidad de campo de 750 G. Por último, el doble manto hace referencia al tipo de cubierta que posee el tambor magnético.

Tabla 3. Identificación de los tambores en la etapa *finisher* (uso interno Planta Magnetita).

<i>Finisher</i> Actualizado el 04/03/2019.						
Equipo	Tambor	Tipo	Doble Manto	Gap descarga	Gap base	Arco magnético
FS21255-1 M1	R06	Rougher	Sí	1 1/8"	2"	1 1/2"
FS21255-1 M2	F08	<i>Finisher</i>	No	1 1/2"	2"	2 1/2"
FS21255-1 M3	F07	<i>Finisher</i>	No	1 1/2"	2"	3 1/2"
FS21255-2 M1	R25	Rougher	No	1"	2"	1"
FS21255-2 M2	F01	<i>Finisher</i>	No	1 1/4"	2"	1"
FS21255-2 M3	F03	<i>Finisher</i>	Sí	1"	2"	4"
FS21255-3 M1	R09	Rougher	No	1"	2"	1"
FS21255-3 M2	F04	<i>Finisher</i>	No	1"	2"	1"
FS21255-3 M3	F02	<i>Finisher</i>	No	3/4"	2"	1"
FS21255-4 M1	ERIEZ	ERIEZ	No	1"	2"	1"
FS21255-4 M2	ERIEZ	ERIEZ	No	1"	2"	1"
FS21255-4 M3	ERIEZ	ERIEZ	No	3/4"	2"	1"



3. Desarrollo Experimental

3.1. Diseño experimental

El diseño experimental se basó en tres parámetros operacionales que se modificaron para el estudio, los cuales fueron: *gap* base, *gap* de descarga y arco magnético. Para cada parámetro operacional se buscó una tendencia de mejora basándose en dos niveles de operación, en vista que actualmente se utiliza un *gap* base de 2" se decidió utilizar este nivel como un nivel estandarizado en la planta, por lo tanto, los niveles a estudiar serán 1" y 3" para cada parámetro operacional, ver Anexo A. Con el avance del estudio se presentaron imprevistos operacionales (ver Anexos B y C), dentro de los cuales se destaca el aumento en el amperaje del equipo motriz al utilizar un *gap* de descarga de 3" con un *gap* base de 2", modificando el diseño experimental inicial y obteniéndose el presentado en la Tabla 4.

Tabla 4. Diseño experimental final.

		Diseño Experimental		
	Condición	<i>Gap</i> base [""]	<i>Gap</i> descarga [""]	Arco magnético [""]
Tambor <i>finisher</i>	1	3	3	3
	2	3	3	1
	3	3	1	1
	4	3	1	3
	5	2	1	3
	6	2	2	3
	7	2	2	1
	8	2	1	1
Tambor <i>rougher</i>	9	2	1	3
	10	2	2	3
	11	2	2	1
	12	2	1	1

3.2. Planificación de muestreo

3.2.1. Implementación de normas de muestreo

La determinación del número de incrementos y precisión de muestreo, se realizó a través de las normas ISO3082, ISO3084, ISO3085 e ISO16742, las que debido a su

extensión se añaden como anexos al PDF en el CD correspondiente de la memoria de título. Utilizando la norma ISO3084 e ISO3085 se analizaron la precisión y la calidad de muestreo, por lo que se realizó un muestreo preliminar de 10 lotes, y cada lote fue formado por 20 incrementos de material de alimentación, con un intervalo de tiempo de 30 s. Posteriormente, los 10 lotes pasaron por procesos de preparación mecánica (filtrado, secado, roleo y cuarteo); de cada lote se obtuvo ocho muestras que fueron enviadas a análisis para determinar: %Fe, %FeDTT, %DTT y %FeMag. El proceso se realiza siguiendo la estructura presentada en la Figura 16.

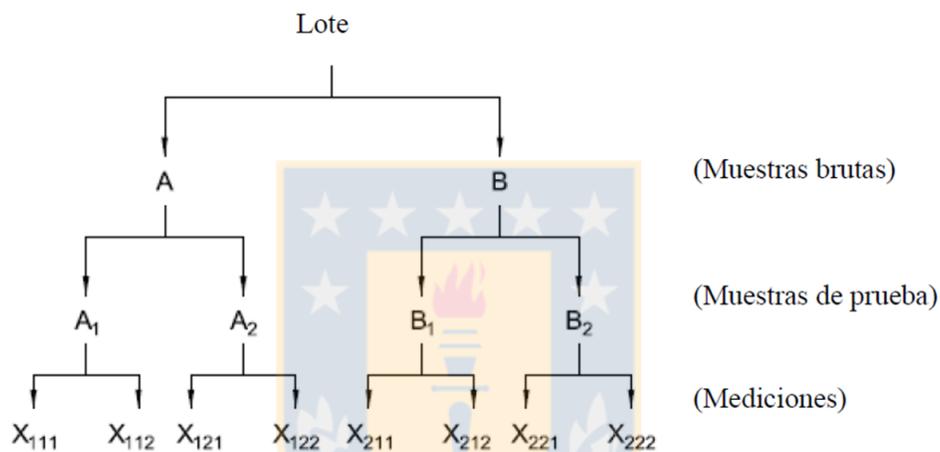


Figura 16. Diagrama para análisis de calidad y precisión por método 1 (fuente: International Organization for Standardization, 2002).

Los puntos de muestreo usados se presentan en la Figura 16 y cada muestra fue formada con 50 incrementos, requisito establecido por la norma ISO3082 para verificar la variación de calidad por primera vez.

Con los datos obtenidos del análisis de las muestras, se determinó: variación de calidad, desviación estándar de la muestra, precisión general y el número de incrementos necesarios para alcanzar la precisión general (β MPS) a un nivel de probabilidad del 95%. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5, los cuales fueron determinados por análisis de %FeMag, que fue la variable que mostró el número mayor de incrementos y es la de mayor relevancia en la etapa *finisher*. Por lo tanto, se determina que una muestra representativa del proceso requiere de 25 incrementos.

Tabla 5. Resultado de la aplicación de normas.

Característica	Valor
Variación de calidad, σW	0,684
Desviación estándar de la muestra, σS	0,137
Precisión general, βMPS	0,55
Incrementos mínimos para cumplir con la norma ISO3082	24,75

3.2.2. Estructura de muestreo

El muestreo fue realizado en la línea 3 de la etapa *finisher* y los puntos muestreados son los señalados en la Figura 17. En estos puntos se tomaron muestras brutas y en paralelo muestras parciales, siguiendo la estructura presentada en la Tabla 6.

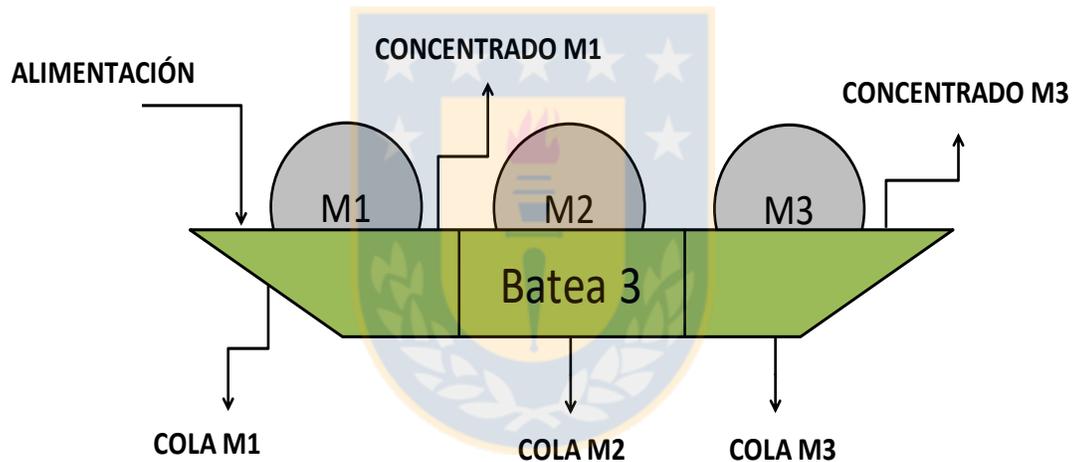
Figura 17. Puntos de muestreo en concentración *finisher* en la línea 3.

Tabla 6. Estructura de muestreo.

Característica de muestreo	Valor
Puntos de muestreo	6
Muestras brutas por muestreo	6
Muestras parciales por muestreo	30
Muestreos por condición	3
Tiempo de muestreo (min)	120
Tiempo de toma de incremento (min)	5
Total de muestras por condición	108
Total de muestras del estudio	1.512

3.2.3. Variables operacionales

Para poder realizar un muestreo eficiente y para un análisis representativo de las condiciones operacionales y no de variaciones en el proceso, es necesario que durante el muestreo, las condiciones operacionales fueran estables. Para esto se realizó un estudio de las características de la alimentación a la etapa *finisher*, a partir de un análisis de datos entre el 1 de enero de 2019 y el 27 de julio de 2019. Dentro de las variables operacionales se tienen: alimentación de sólidos a la etapa *finisher*, %sólido en la alimentación, presión del anillo de agua de alimentación a la planta, alimentación de finos al molino 1 y alimentación de candelaria al molino 1. Los valores de las variables de alimentación fueron determinados a través de gráficos de control e histogramas del periodo de tiempo analizado. Las Figuras 18 y 19, presentan los histogramas y gráficos de control de alimentación de sólidos a etapa *finisher* como ejemplo del análisis realizado para la determinación de las variables operacionales en el periodo de muestreo. La Figura 19 presenta valores límites diferentes a los valores máximos y mínimos de la totalidad de datos presentes en la Figura 18, por la eliminación de datos fuera de límites de control superior e inferior.

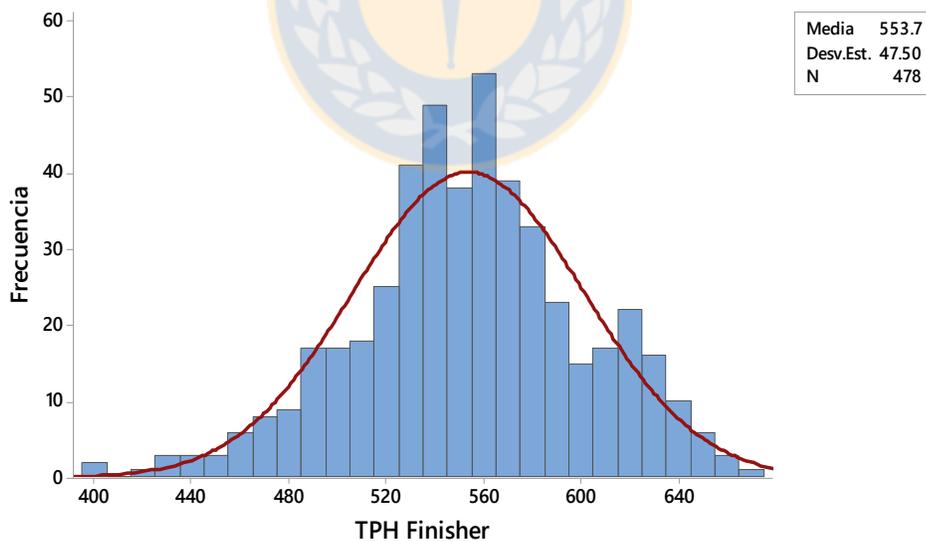


Figura 18. Histograma para alimentación de sólidos a *finisher*.

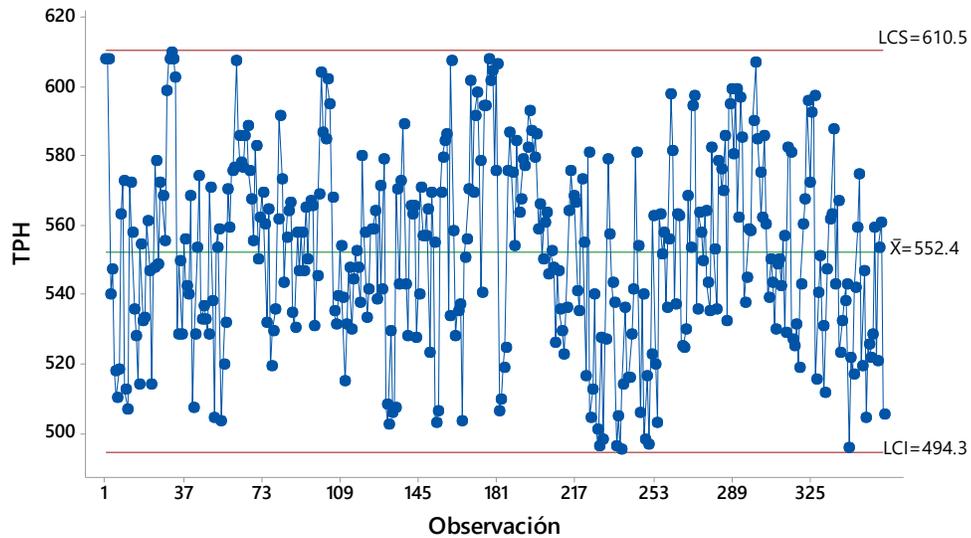


Figura 19. Gráfica de control para alimentación de sólidos a *finisher*.

La presión de anillo se determinó a partir de pruebas con un flujómetro móvil variando presiones de anillo y presiones del manómetro ubicado en el agua de dilución, obteniéndose los resultados presentados en la Figura 20. En esta se observa que a valores de presión del anillo entre 28 PSI a 32 PSI se obtiene un flujo más estable, donde el flujo varía entre 250 y 350 m³/h, en un intervalo de 3,3 PSI en el manómetro, a diferencia de lo que se obtiene sobre los 32 PSI, donde el flujo varía entre 250 y 350 m³/h, en un intervalo de 1,6 PSI en el manómetro.

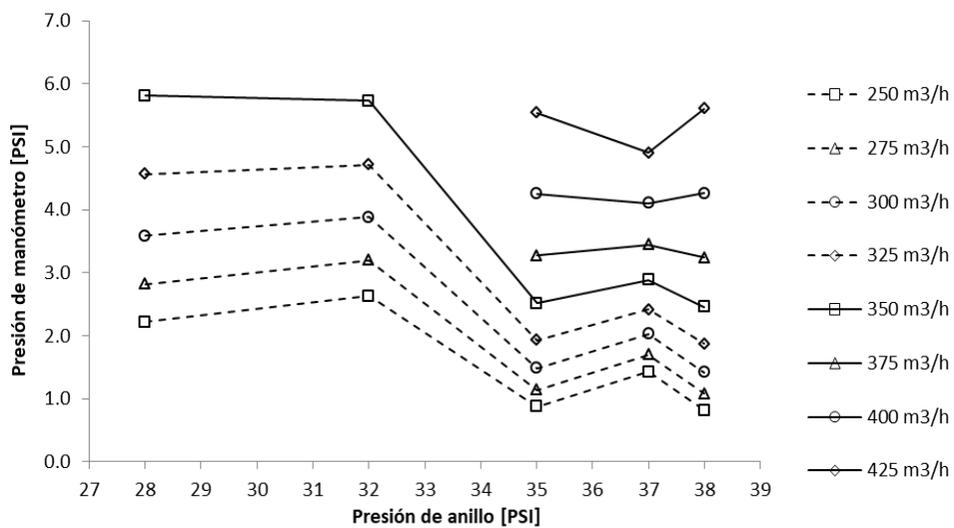


Figura 20. Gráfico de presión de anillo vs presión de manómetro de agua de dilución.

A través del análisis realizado para cada variable, se establecen las condiciones operacionales señaladas en la Tabla 7.

Tabla 7. Condiciones operacionales para muestreo.

Variable	Valor solicitado
TPH a <i>finisher</i>	520-580
%S a <i>finisher</i>	31-35
TPH Finos a molino 1	120-140
TPH Bomba a molino 1	190-230
Presión del anillo, PSI	28-32

3.3. Medición de campo magnético

Los tambores de 750 G y 1000 G son referidos a la medición a 2" de distancia del manto. Si bien se utilizan imanes permanentes en los tambores, estos presentan pérdidas de intensidad de campo magnético con el uso continuo, por lo tanto se realiza la medición del campo magnético de manera previa a la instalación del tambor.

Para la medición del campo magnético se utiliza un medidor de campo magnético o gaussímetro, y el procedimiento se llevó a cabo como se puede observar en la Figura 21.



Figura 21. Medición de campo magnético con gaussometro.

La medición del campo magnético se realizó a lo largo del tambor y en cada polo e interpolo que contenga. Además, se realiza sobre la superficie y a 2" del tambor. Para el tambor de 750 G se tienen seis polos, cinco interpolos y dos polos de barrido (ver figura 22 a). En el tambor de 1000 G se tienen cinco polos y cuatro interpolos (ver figura 22 b).

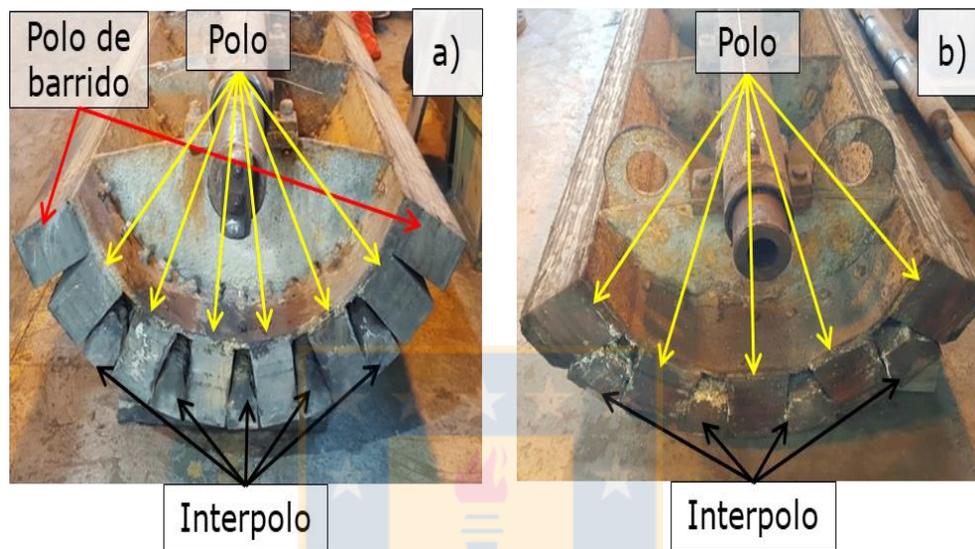


Figura 22. Distribución de polos en tambores de 750 G y 1000 G.

A modo de ejemplo, se presentan las mediciones realizadas para el tambor de 750 G, como se muestra en la Tabla 8.

Los puntos de medición señalados en la Tabla 8 se presentan en la Figura 23.

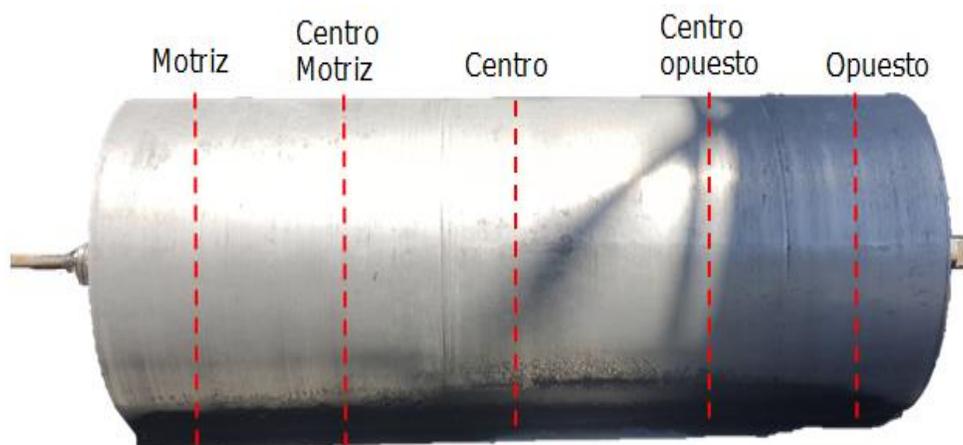


Figura 23. Puntos de medición de campo magnético.

Tabla 8. Mediciones de campo magnético en el tambor de 750 G.

Mediciones de campo magnético en G.							
Ángulo	Distancia de medición		Motriz	Centro motriz	Centro	Centro opuesto	Opuesto
15°	Polo1	0"	980	1.040	1.030	1.110	990
		2"	300	380	410	440	400
35°	Polo2	0"	1.060	1.240	1.040	1.250	1.170
		2"	250	480	450	470	470
45°	Interpolo 1	0"	1.180	1.160	1.080	1.000	960
		2"	450	510	460	360	510
55°	Polo 3	0"	1.250	1.170	860	1.100	1.330
		2"	600	500	470	550	550
65°	Interpolo 2	0"	1.300	1.080	1.100	800	1.120
		2"	490	510	460	560	480
75°	Polo 4	0"	1.230	1.210	1.160	940	1.150
		2"	610	510	550	460	530
85°	Interpolo 3	0"	910	1.150	930	1.150	980
		2"	550	480	500	370	500
95°	Polo 5	0"	1.140	1.800	890	1.250	840
		2"	400	500	480	580	470
105°	Interpolo 4	0"	890	990	1.060	1.260	840
		2"	510	430	480	490	470
115°	Polo 6	0"	1.240	1.190	920	1.280	1.260
		2"	510	560	530	590	560
125°	Interpolo 5	0"	910	1.100	1.130	1.190	770
		2"	370	380	400	480	370
135°	Polo 7	0"	1.180	1.140	1.050	1.290	1.180
		2"	440	470	340	520	460
150°	Polo 8	0"	960	970	930	990	1.070
		2"	380	360	360	380	400

4. Resultados y discusiones

Los resultados se obtuvieron bajo condiciones de alimentación dual y 100% fino al molino 1, considerando un intervalo de normalidad del proceso para leyes de alimentación de FeMag desde 34,62% hasta 53,84%.

4.1. Efecto del agua de dilución en el proceso

El análisis del efecto del agua de dilución sobre el proceso de concentración, se realizó para cada condición de manera individual, con el objetivo de observar el efecto que posee sobre el proceso sin interferencia de la modificación de los parámetros operacionales. Debido a la variación en el proceso industrial, se logró obtener información suficiente y relevante en dos condiciones, la condición 6 y la condición 7.

La Figura 24 presenta la variación de la Rp con respecto a la variación en el flujo de agua de dilución, en la cual se aprecia que el aumento del flujo de agua de dilución posee un efecto negativo en la Rp del tambor magnético, la cual disminuye cerca de 8 puntos porcentuales. El agua de dilución beneficia el proceso de limpieza del tambor, por lo tanto la disminución en la Rp es un efecto positivo mientras no afecta la Rmm del proceso.

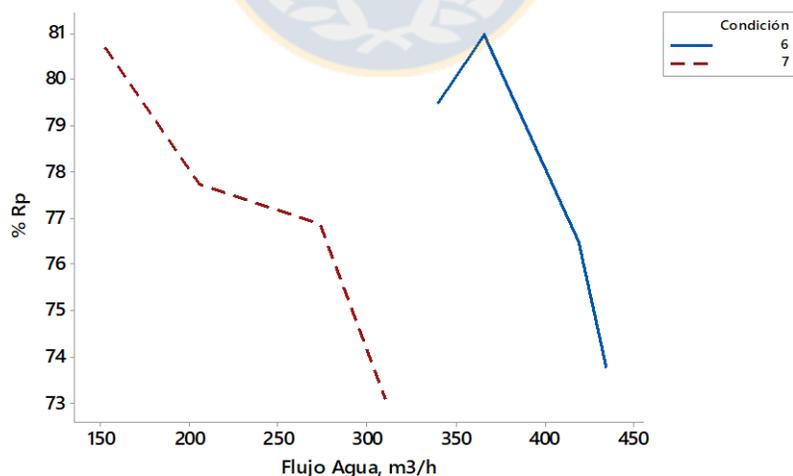


Figura 24. Recuperación en peso (Rp) vs agua de dilución para condición 6 y 7.

En la Figura 25 se observa que la Rmm de la condición 7 no disminuye inicialmente, manteniendo un valor constante a medida que el flujo aumenta hasta llegar a un

punto límite, donde el agua de dilución comienza a aumentar las pérdidas de FeMag y en consecuencia disminuye la eficiencia operacional del tambor. Sin embargo, en la condición 6 se aprecia que la Rmm disminuye constantemente a medida que aumenta el flujo de agua de dilución, aumentando las perdidas y disminuyendo la eficiencia del proceso. Por lo tanto, el flujo de agua de dilución puede generar un concentrado de mayor calidad, pero es necesario identificar el intervalo óptimo de agua de dilución para no afectar el proceso de concentración.

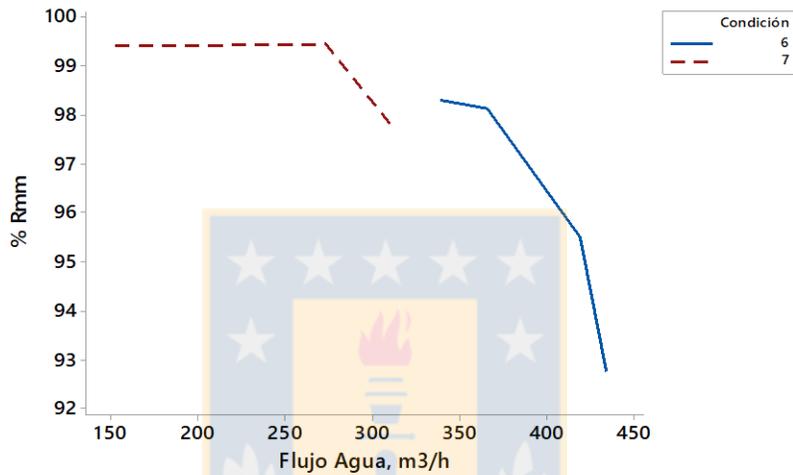


Figura 25. Recuperación metalúrgica magnética (Rmm) vs agua de dilución para condición 6 y 7.

Los resultados obtenidos en la condición 6 y 7 poseen la misma tendencia frente al aumento del agua de dilución, sin embargo el intervalo de agua de dilución es completamente diferente. Para el caso de la condición 7 como se aprecia en las Figuras 24 y 25 se tiene un intervalo de agua de dilución que va desde 150 m³/h hasta 310 m³/h aproximadamente, donde inicialmente se observa que el flujo de agua disminuye la Rp sin afectar la Rmm del proceso mejorando la calidad del concentrado y la eficiencia del proceso, mientras que en la condición 6 el intervalo va desde 350 m³/h hasta 440 m³/h, donde posee un efecto negativo tanto en la Rp como en la Rmm del proceso. Por lo tanto el efecto del agua de dilución sobre el proceso de concentración se ve afectado por las condiciones operacionales del tambor.

Los resultados obtenidos entregan una propuesta de estudio y mejoras del proceso de concentración. Considerando que existe un límite para la cantidad de agua de dilución

que puede suministrarse y con el objetivo de obtener un proceso de concentración eficiente, se considera necesario realizar un estudio que permita determinar con mayor claridad la cantidad de agua de dilución requerida por el proceso, logrando disminuir la Rp sin tener efectos negativos sobre la Rmm, generando un concentrado de mejor calidad. Además, en la Figura 20 se observa que la variación en la presión del anillo influye sobre el flujo de agua de dilución, por lo tanto es necesario implementar un sistema de agua de dilución que sea independiente de la presión del anillo y permita realizar una operación eficiente en la etapa de concentración.

4.2. Análisis de resultados para tambor de 750 G

4.2.1. Análisis de resultados en el M1

Las leyes obtenidas del proceso de muestreo, se presentan en la Figura 26. Se aprecia que un M1 de 750 G aumenta en promedio 17 puntos porcentuales de ley. Además, se observa que la condición 8 posee la menor pérdida de FeMag y genera una ley de concentrado de FeMag del 60% aproximadamente. Por otro lado la condición 4 posee la mayor pérdida de FeMag; pese a generar uno de los mejores concentrados, el proceso es ineficiente en cuanto a la recuperación magnética que posee el tambor.

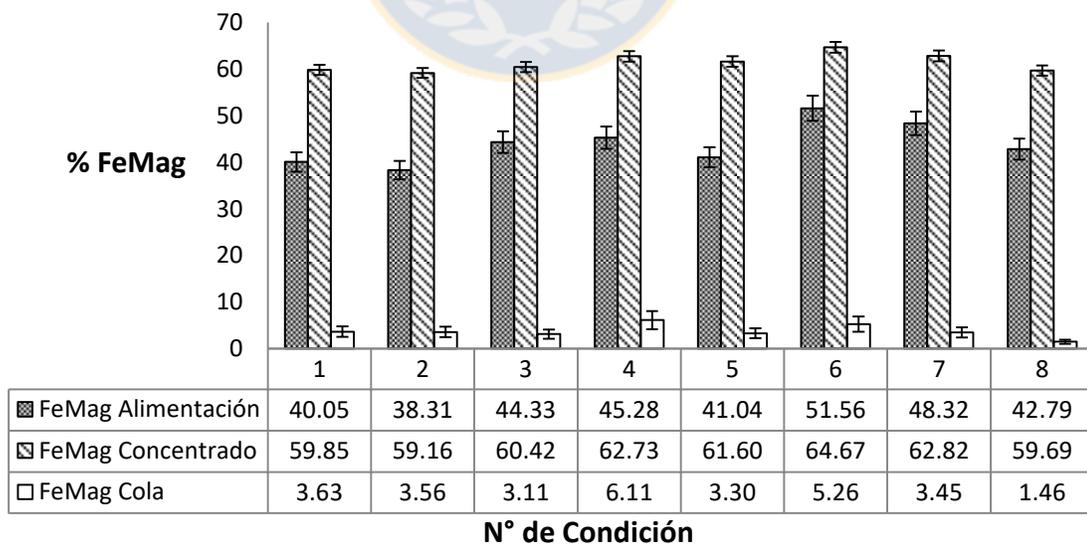


Figura 26. Leyes de FeMag obtenidas por condición realizada en M1 de 750 G.

En la Figura 27, se presentan los parámetros metalúrgicos obtenidos en cada condición realizada con el tambor de 750 G. Los valores de Rp y Rmm poseen un error del 5% y 1% respectivamente. Se observa que la condición 8 posee la mejor Rmm, parámetro metalúrgico que representa la eficiencia del proceso de concentración.

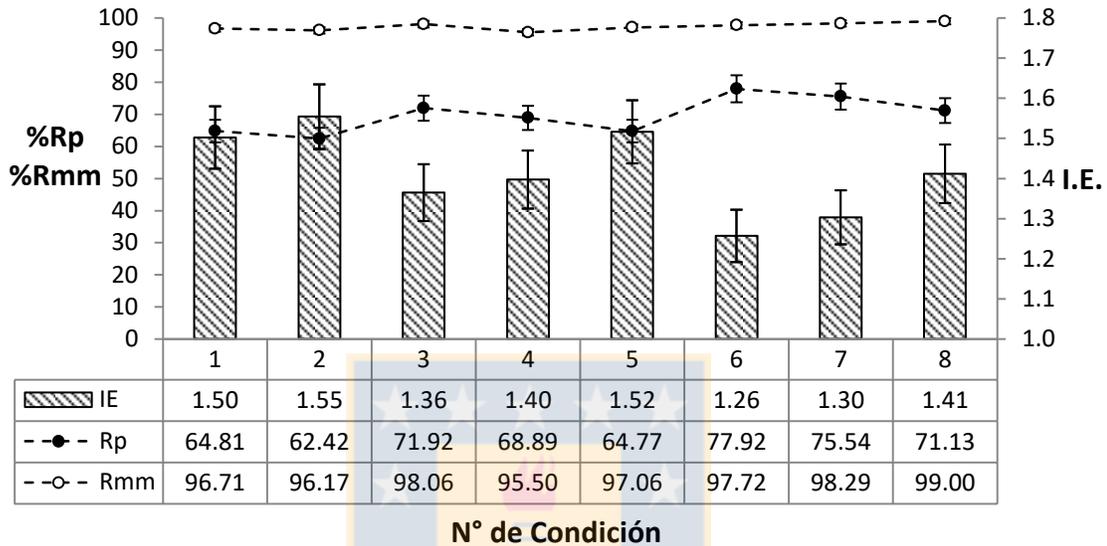


Figura 27. Parámetros metalúrgicos obtenidos por condición realizada en M1 de 750 G.

En las Figuras 26 y 27, se observa que las condiciones 6 y 7 poseen las leyes de alimentación más elevadas, lo cual también genera que posean un Rp más elevado, por lo tanto, se requiere un análisis global considerando los parámetros metalúrgicos de Rp, Rmm y la pérdida de FeMag para poder determinar la mejor condición. De aquí se aprecia que la condición 6 posee elevadas pérdidas de FeMag siendo un proceso ineficiente de recuperación magnética. La condición 7 posee un Rmm de 98% con un error del 1% y una Rp de 75,5% con un error del 5% siendo una de las mejores condiciones obtenidas dentro del proceso, junto a la condición 8.

En el funcionamiento del primer tambor se destaca que es fundamental el %Rmm. En las Figuras 26 y 27 se destaca que la condición 2 posee el mayor IE, no obstante tiene el mayor valor de pérdida de FeMag y requiere más agua de dilución que otras condiciones debido al *gap* de descarga de 3", lo cual genera un proceso ineficiente del tambor. Por último, en la condición 2 se obtiene la menor ley de alimentación de

FeMag, por lo tanto los valores de IE y Rp pueden no ser parámetros representativos del funcionamiento del tambor.

4.2.2. Análisis de resultados para la línea de proceso

En la Figura 28 se aprecia que el %FeMag en la cola de la línea de proceso es producida, en su mayoría por las pérdidas que genera el M1. Con base en este primer análisis se obtiene como mejor condición operacional la condición 8, donde se observa el menor valor en las pérdidas del proceso. De igual forma, se aprecia que el mejor concentrado magnético lo posee la condición 6, sin embargo, la ley de alimentación es considerablemente superior a la media de 44% y la ley de FeMag que se pierde en las colas es 3,3 puntos porcentuales superior a la condición 8.

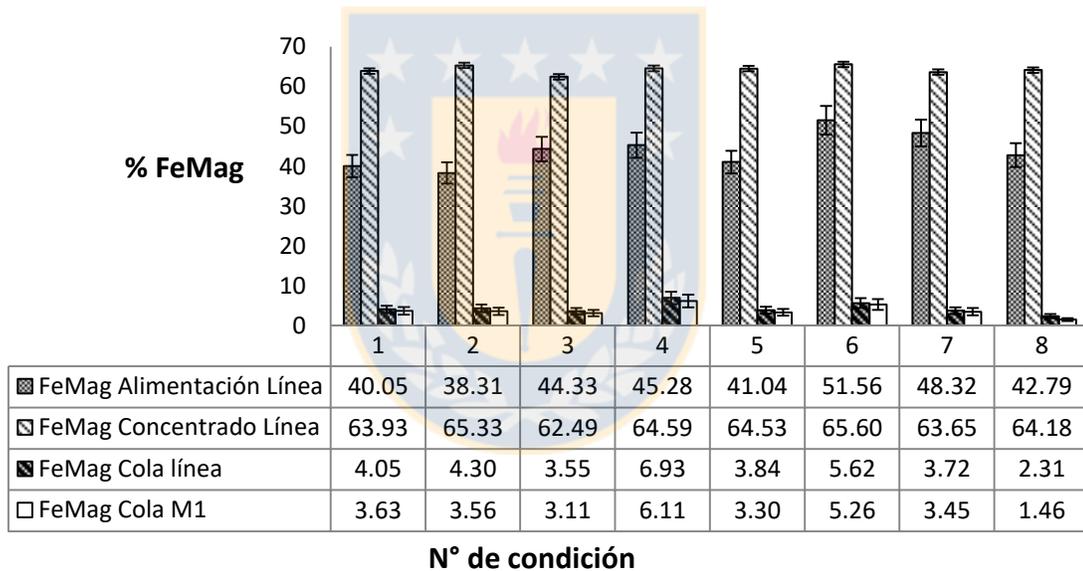


Figura 28. Leyes de FeMag obtenidas en la línea 3 del proceso de concentración *finisher* por condición realizada con M1 de 750 G.

En la figura 29 se tiene que utilizar un M1 de 750 G produce un concentrado con ley promedio de 65%, lo cual facilita el proceso de flotación debido a que se requiere aumentar 1 punto porcentual de ley para generar un concentrado comercializable con los estándares de calidad que utiliza la planta.

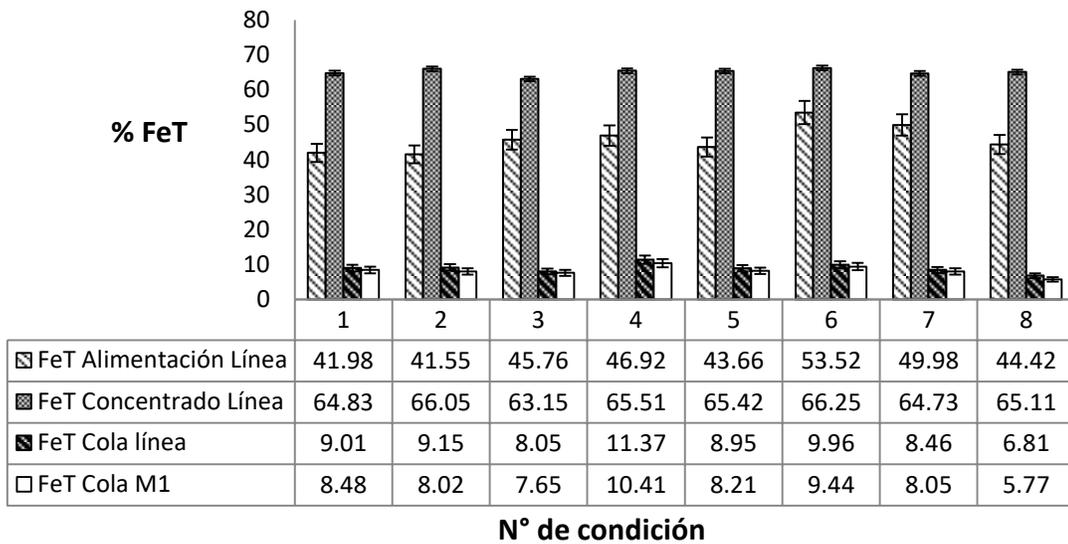


Figura 29. Leyes de FeT obtenidas en la línea de proceso n°3 por condición realizada en M1 de 750 G.

Por lo tanto, de los resultados obtenidos utilizando un tambor de 750 G se destacan dos condiciones en las cuales se realiza un proceso de concentración eficiente y se genera un concentrado de buena calidad, la condición 7 y 8. Sin embargo, al comparar ambas condiciones se logra apreciar que la condición 8 posee mejores resultados, generando un concentrado de mejor calidad.

4.2.3. Caracterización de parámetros operacionales para tambor de 750 G

Las Figuras 30 y 31 presentan el diagrama de Pareto y los efectos principales de los parámetros operacionales del tambor de 750 G sobre la Rmm respectivamente. Se observa que el *gap* base (GB) como factor individual genera el mayor efecto sobre la Rmm del tambor, no obstante, el efecto sinérgico que posee el arco magnético (AM) junto al *gap* de descarga (GD) genera un efecto superior sobre la Rmm del proceso. Se destaca que a medida que aumenta el *gap* de los parámetros operacionales del tambor aumenta la pérdida de FeMag, disminuyendo la Rmm.

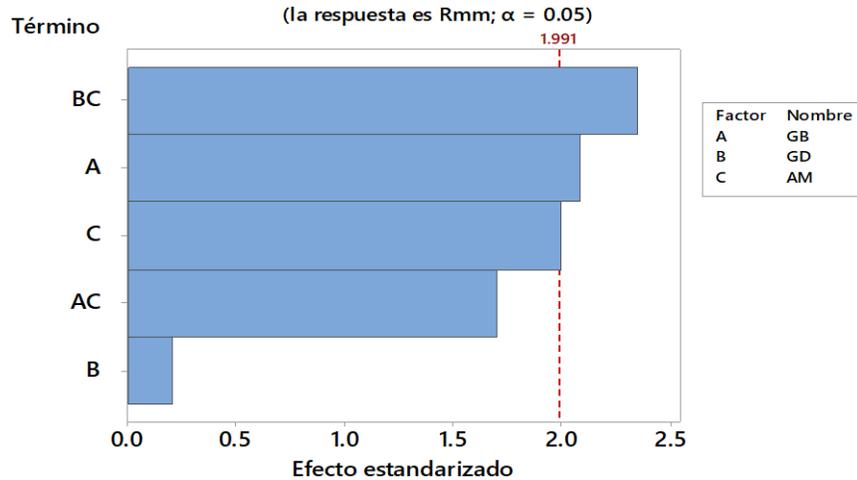


Figura 30. Diagrama de Pareto de parámetros operacionales en tambor de 750 G sobre la Rmm.

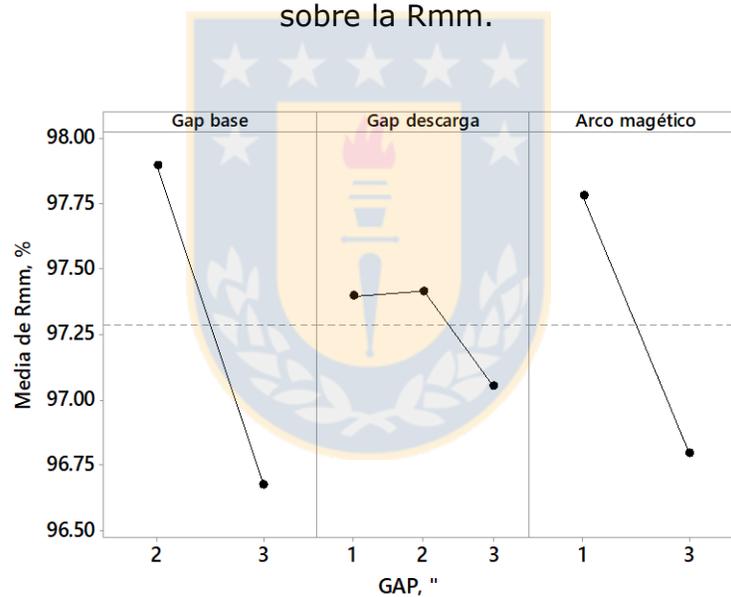


Figura 31. Efectos principales de parámetros operacionales en tambor de 750 G sobre la Rmm.

El aumento del *gap* base y el arco magnético genera un aumento en las pérdidas de FeMag en el M1, las cuales representan prácticamente la totalidad de las pérdidas en la línea de proceso. El *gap* de descarga no posee un efecto visible entre 1" y 2", permitiendo cierto grado de flexibilidad en la operación.

Las Figuras 32 y 33 presentan el diagrama de Pareto y los efectos principales de los parámetros operacionales del tambor de 750 G sobre la Rp respectivamente. Se

observa que el *gap* de descarga y el *gap* base tienen impacto sobre la Rp del M1 como factores individuales, mientras que el arco magnético no posee efectos visibles. Sin embargo, el factor más influyente en la Rp es el *gap* de descarga a diferencia de lo ocurrido con la Rmm. Considerando que el proceso de concentración busca aumentar la calidad del concentrado obtenido minimizando las pérdidas del proceso se debe realizar el ajuste del *gap* base maximizando la Rmm y el *gap* de descarga buscando minimizar la Rp sin afectar la Rmm.

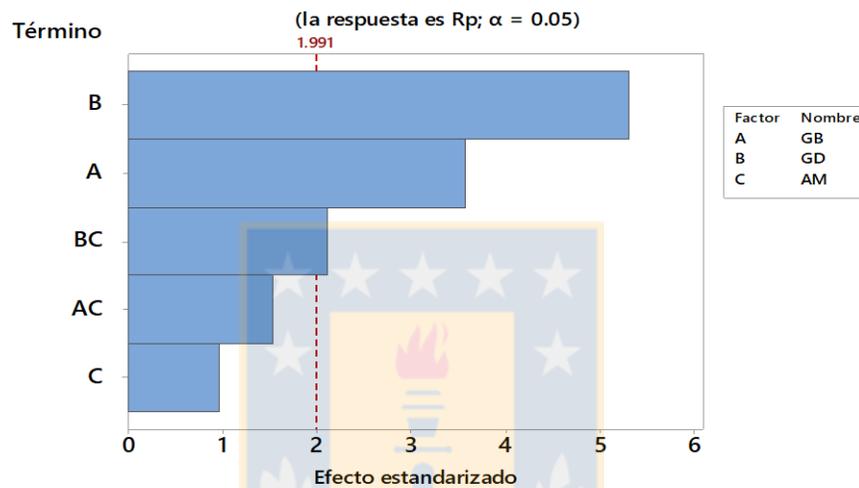


Figura 32. Diagrama de Pareto de parámetros operacionales en tambor de 750 G sobre la Rp.

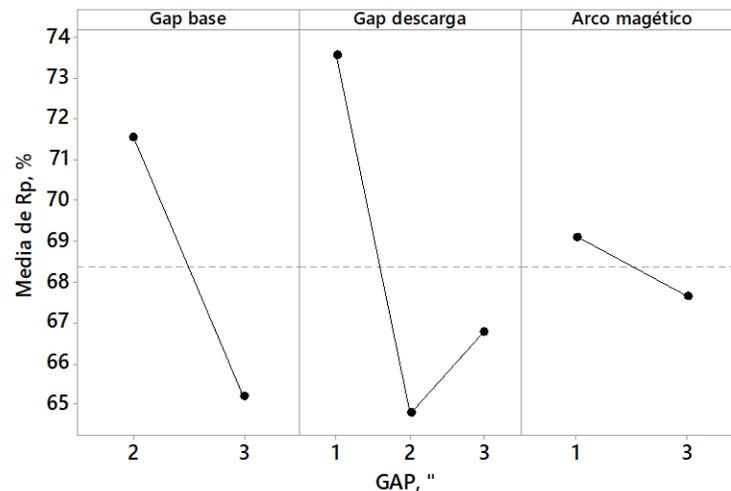


Figura 33. Efectos principales de parámetros operacionales en tambor de 750 G sobre la Rp.

Por lo observado anteriormente, se determinó que el parámetro del tambor que posee una mayor incidencia en los parámetros metalúrgicos es el *gap* de descarga. No obstante debido a la importancia que posee un punto de Rmm en esta etapa, es esencial un óptimo ajuste del *gap* base para maximizar la Rmm y posteriormente ajustar el *gap* de descarga y el arco magnético, buscando disminuir la Rp del proceso sin afectar la Rmm, generando un concentrado de alta calidad para la etapa de flotación.

Utilizando la herramienta Minitab se realizó una optimización del diseño experimental maximizando la Rmm, minimizando %FeMag en la cola y maximizando la Rp. Al maximizar la Rp se obtuvo una condición físicamente no viable, con un Rp del 73,8%. Por lo tanto se realiza un ajuste en el programa solicitando como Rp objetivo un valor de 73% obteniendo como condición óptima la condición 8, con una deseabilidad compuesta de 0,94 lo cual indica que la configuración obtenida entrega resultados favorables para todas las respuestas solicitadas, obteniéndose una Rmm del 99%, una Rp del 71% y pérdidas de FeMag por las colas del 1,5%, como se observa en la Figura 34.

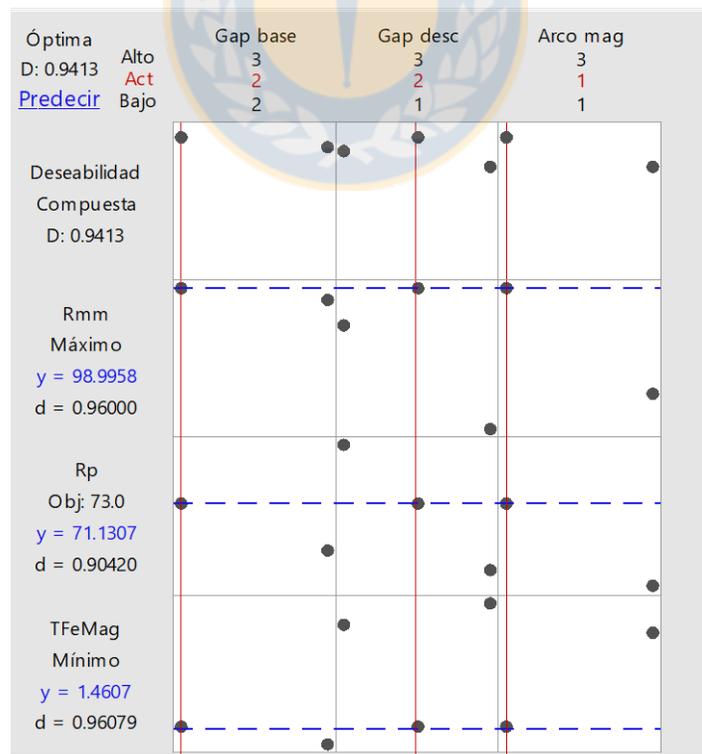


Figura 34. Optimización del diseño experimental.

4.3. Análisis de resultados para tambor de 1000 G

Dentro de las condiciones operacionales realizadas con el tambor de 1000 G, se generó un rebalse continuo por el lado libre y el lado motriz del tambor, lo que implica un problema de dimensionamiento del estanque el cual debe ser modificado si se desea utilizar un tambor de 1000 G como M1 en la línea 3 de proceso.

4.3.1. Análisis de resultados en el M1

En la Figura 35, se aprecia que utilizar un M1 de 1000 G genera un aumento promedio de 13 puntos porcentuales de ley, además se observa que la condición 12 presenta la menor pérdida de FeMag y genera un concentrado con un 55% de ley aproximadamente. Dentro de los resultados obtenidos se destaca el descenso en la ley de FeMag en la cola. Por último, el intervalo en que varía la ley de FeMag en la cola es desde 0,2 hasta 1,5 por lo tanto la operación al utilizar un M1 de 1000 G minimiza las pérdidas, pero genera concentrados de menor calidad que utilizando un M1 de 750 G.

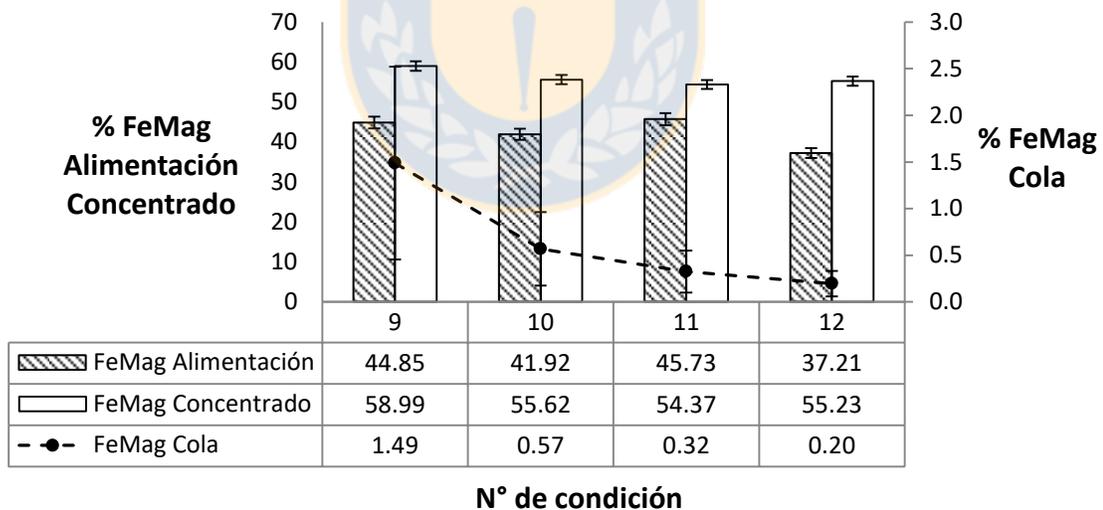


Figura 35. Leyes de FeMag obtenidas por condición realizada en M1 de 1000 G.

En la figura 36, se presentan los parámetros metalúrgicos obtenidos en cada condición realizada con el tambor de 1000 G. Los valores de Rp y Rmm poseen un error de 3% y 0,3% respectivamente. Se aprecia que la Rmm obtenida con un tambor de 1000 G es de 99%, sin importar la variación del *gap* de descarga y el arco magnético bajo

condiciones con un *gap* base de 2", lo que permite un grado de flexibilidad de los parámetros del tambor para poder disminuir la Rp sin afectar la Rmm. Dentro de los resultados obtenidos se aprecia que la condición 12 posee los mejores parámetros metalúrgicos dentro de las condiciones realizadas con un M1 de 1000 G, debido a que disminuye la Rp sin afectar la Rmm del proceso, aumentando la calidad del concentrado obtenido.

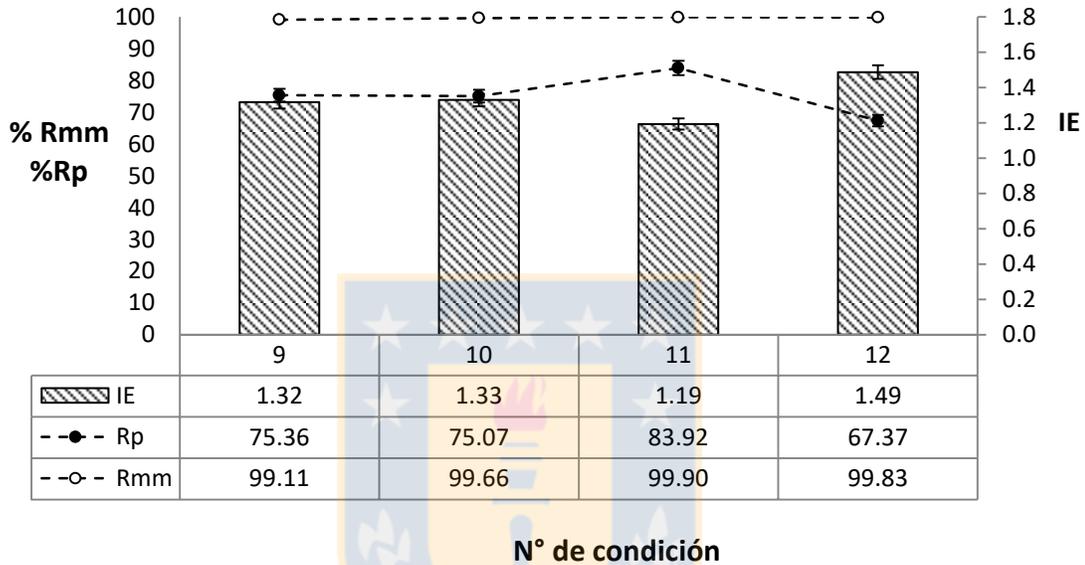


Figura 36. Parámetros metalúrgicos obtenidos por condición realizada en el M1 de 1000 G.

4.3.2. Análisis de resultados para la línea de proceso

En la Figura 37, se observa que existe un aumento de 6 puntos en la ley aproximadamente entre el M2 y el M3, mejorando la calidad del concentrado obtenido en el M1. La ley promedio de concentrado para el proceso con un M1 de 1000 G es de 61%, sin importar la ley de alimentación. Por último, se observa que la condición 12 posee la menor pérdida de FeMag como línea operacional.

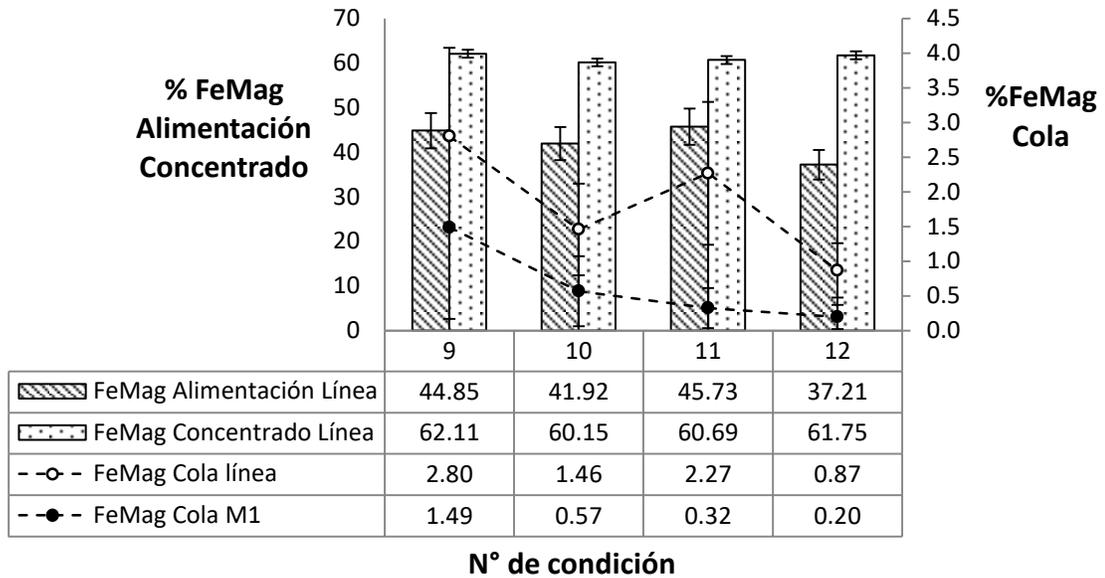


Figura 37. Leyes de FeMag obtenidas por condición realizada con M1 de 1000 G en la línea de proceso n°3.

En la figura 38, se aprecia que utilizar un M1 de 1000 G genera una ley promedio de concentrado del 62% de Fe, lo cual implica que el proceso de flotación requiere subir 4 puntos porcentuales de ley para generar un concentrado comercializable.

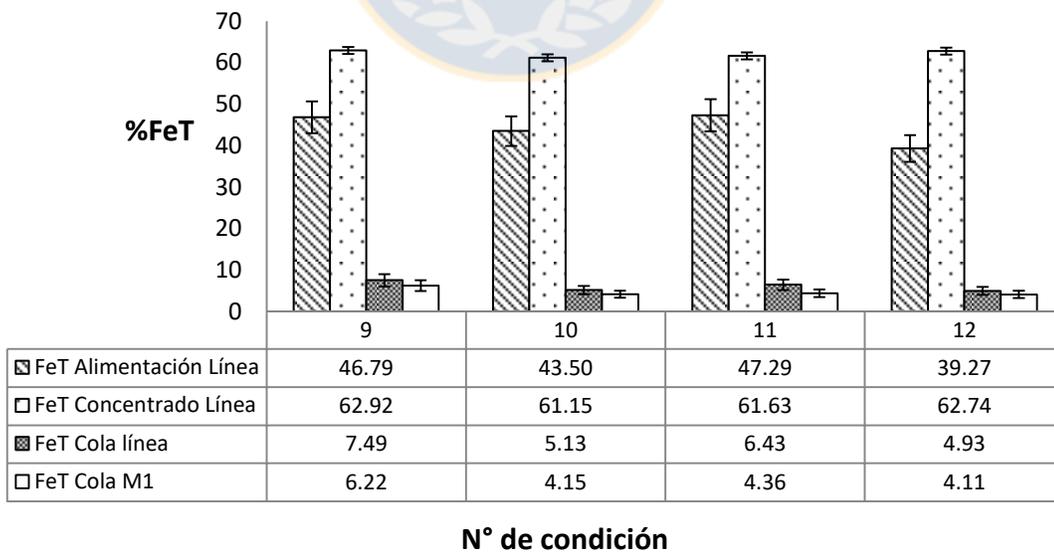


Figura 38. Leyes de FeT obtenidas en la línea de proceso n°3.

Dentro de los objetivos que posee la etapa *finisher* en el proceso de la planta, se destaca la búsqueda de mejorar la calidad del concentrado y minimizar las pérdidas de FeMag en la operación. Por lo tanto, es necesario destacar la diferencia en la ley del concentrado obtenido como línea de proceso, donde al utilizar un M1 de 750 G se obtiene un concentrado de 65% de ley mientras que al utilizar un M1 de 1000 G se obtiene un concentrado de 62% de ley. Esta diferencia de 3 puntos porcentuales genera un mayor consumo en el proceso de flotación lo cual disminuye las ganancias del proceso productivo.

4.3.3. Caracterización de parámetros operacionales para tambor de 1000 G

En la Figura 39 se presenta el diagrama de Pareto de los parámetros operacionales del tambor de 1000 G sobre Rmm. Se observa que el *gap* de descarga y el arco magnético no generan efecto sobre la Rmm del proceso. Por lo tanto, para este caso particular no es relevante evaluar los efectos que poseen los parámetros operacionales del tambor.

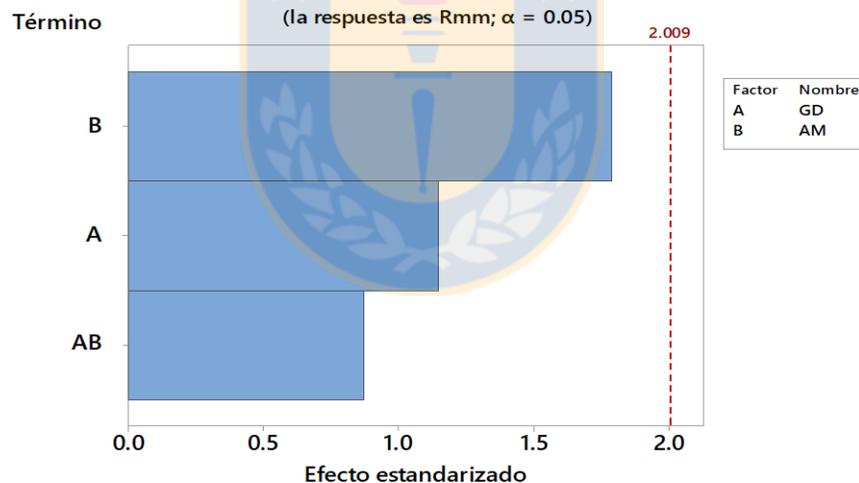


Figura 39. Diagrama de Pareto de parámetros operacionales en tambor de 1000 G sobre la Rmm.

Las Figuras 40 y 41 presentan el diagrama de Pareto y los efectos principales de los parámetros operacionales del tambor de 1000 G sobre la Rp respectivamente. Se observa que el arco magnético no posee efecto visible sobre la Rp del tambor, mientras que el *gap* de descarga sí posee efecto sobre la Rp del proceso, aumentando su valor a medida que el *gap* de descarga aumenta. Además, se aprecia que la

combinación de ambos parámetros afecta la Rp, por lo tanto, es necesario modificar el arco magnético con base en el *gap* de descarga.

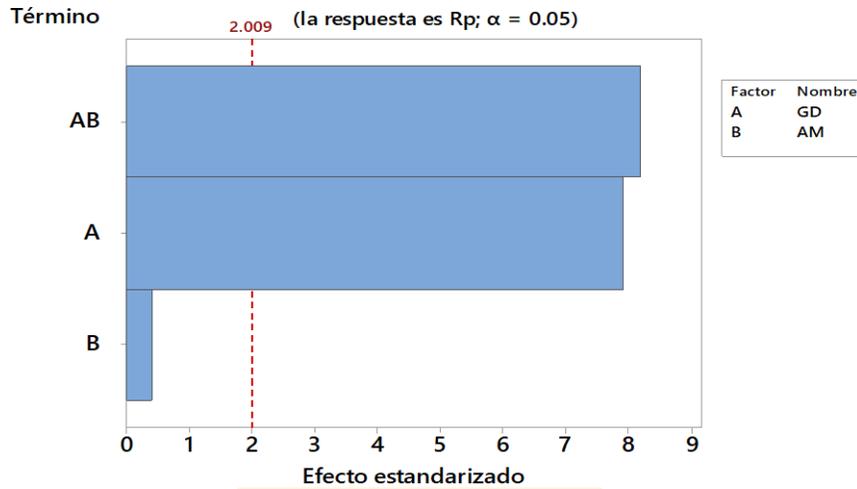


Figura 40. Diagrama de Pareto de parámetros operacionales en tambor de 1000 G sobre la Rp.

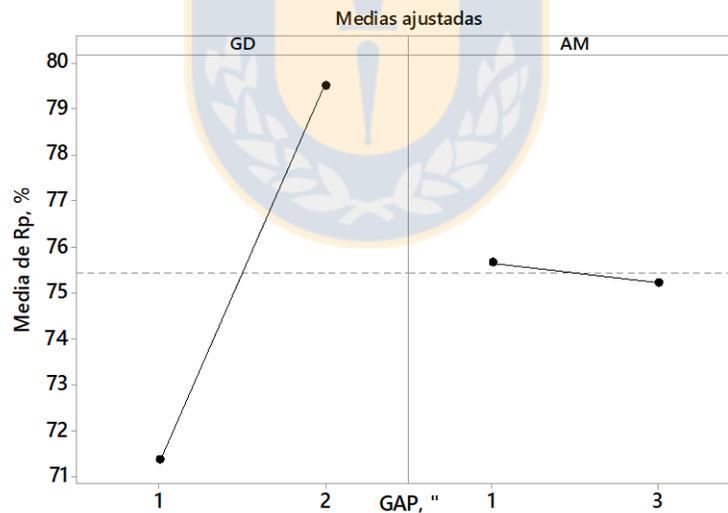


Figura 41. Efectos principales de parámetros operacionales en tambor de 1000 G sobre la Rp.

La Rp del M1 se ve fuertemente afectada por la modificación del *gap* de descarga, generando en un intervalo de 1" una diferencia de 10 puntos porcentuales. En el M1 de la línea de operación es importante mantener la Rmm lo más cercano a 100, lo cual implica tener una Rp elevada, sin embargo, al no existir una influencia del *gap* de

descarga en la Rmm, el proceso de concentración se ve flexible a su modificación buscando minimizar la Rp para así lograr un concentrado de mayor calidad. Realizando la optimización con la herramienta Minitab, maximizando la Rmm y minimizando la Rp y la pérdida de FeMag, se obtiene la condición 11 como mejor condición, con una Rmm del 99%, una Rp de 67% y generando pérdidas de 0,19% de FeMag, con una deseabilidad compuesta de 0,92 lo cual indica que la configuración obtenida entrega resultados favorables para todas las respuestas solicitadas, como se observa en la Figura 42.

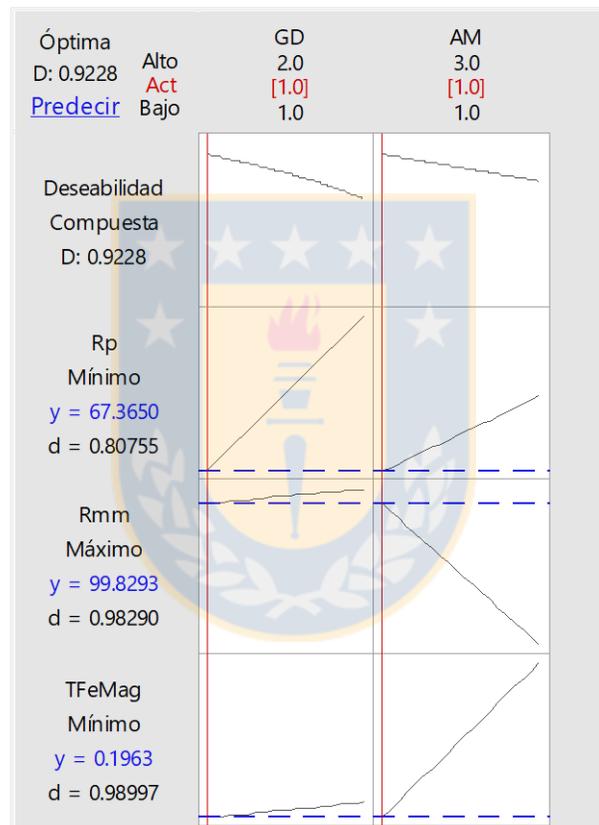


Figura 42. Optimización de parámetros para tambor de 1000 G.

4.4. Comparación de M1 con 750 G y M1 con 1000 G

La comparación se realizó bajo condiciones de *gap* base de 2", debido a los problemas operacionales del tambor de 1000 G al trabajar a 3" de *gap* base y considerando que la mejor condición para el tambor de 750 G se encuentra a 2" de *gap* base.

En las Figuras 43, 44 y 45 se muestran los diagramas de Pareto del arco magnético, *gap* de descarga y campo magnético sobre la Rp, Rmm y la pérdida de FeMag

respectivamente. Se puede destacar, que el campo magnético (factor C) es el factor más determinante en la R_p , R_{mm} y la pérdida Fe_{Mag} del primer tambor. Además, es clara la existencia de un efecto sinérgico entre el gap de descarga y el campo magnético sobre la R_p del proceso. Por último, se aprecia que todos los factores tienen efecto sobre la pérdida de Fe_{Mag} , por lo tanto, es necesario definir inicialmente el campo magnético que se a utilizar para así modificar los parámetros en función de los resultados deseados.

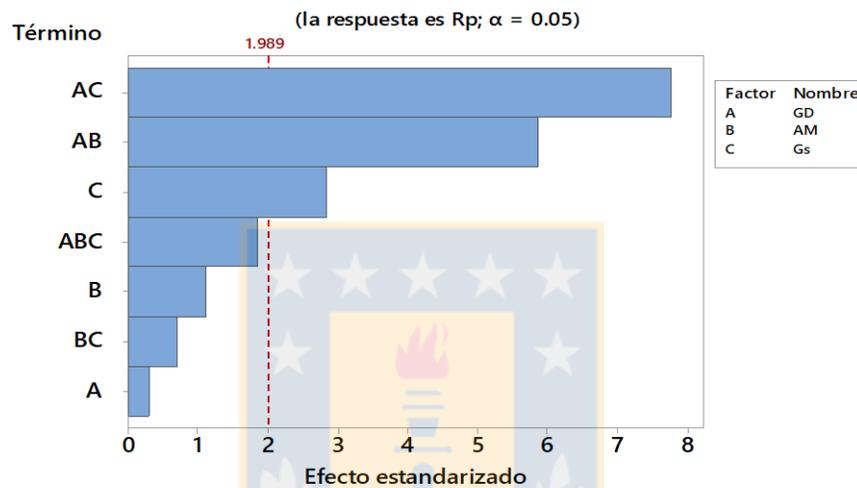


Figura 43. Diagrama de Pareto para la R_p con respecto al gap de descarga, arco magnético y campo magnético.

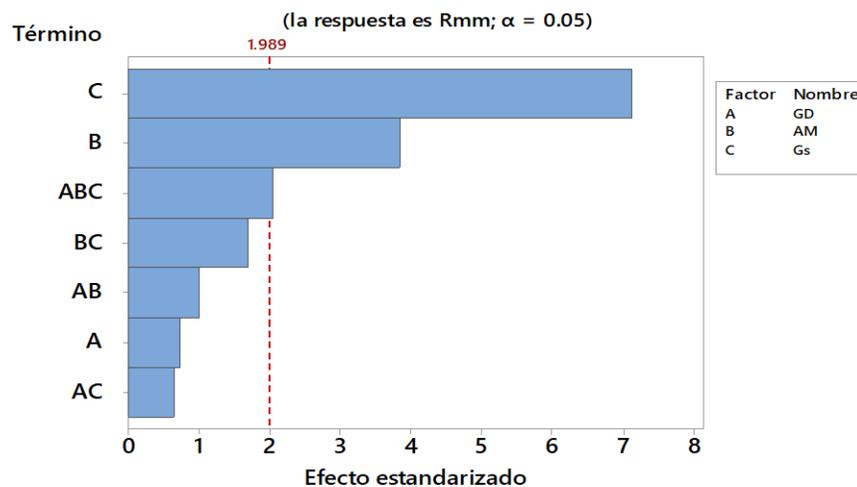


Figura 44. Diagrama de Pareto para la R_{mm} con respecto al gap de descarga, arco magnético y campo magnético.

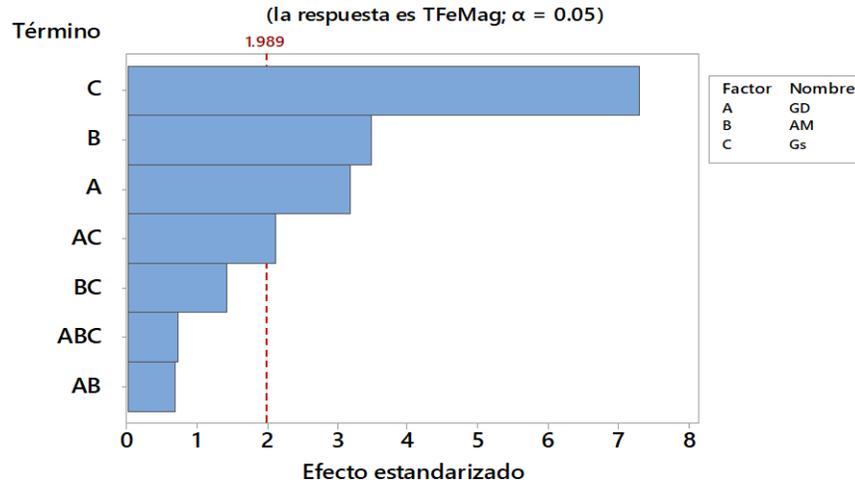


Figura 45. Diagrama de Pareto para el %FeMag en cola con respecto al *gap* de descarga, arco magnético y campo magnético.

En las Figuras 46, 47 y 48, se presenta el efecto que posee el campo magnético sobre la Rmm, la pérdida de FeMag y la Rp del primer tambor. Se puede destacar que un campo magnético de 1000 G mejora la Rmm, la Rp y minimiza la pérdida de FeMag del primer tambor, mejorando la recuperación y disminuyendo la selectividad del primer tambor. Sin embargo, utilizando los resultados de los apartados 4.2.1 y 4.3.1, se determinó que utilizar un tambor de 1000 G genera un concentrado con una ley promedio de 55%, mientras que utilizando un tambor de 750 G se obtiene una ley promedio de 60%. Por lo tanto utilizar un tambor de 750 G genera una diferencia de 5 puntos porcentuales de ley en el concentrado del primer tambor, obteniendo un proceso de concentración de mejor calidad y más eficiente.

El M1 de la línea de concentración realiza un trabajo importante para el proceso, generando un aumento en la ley del concentrado desde 13 hasta 17 puntos porcentuales, mientras que el funcionamiento conjunto del M2 y M3 logra subir 3 puntos porcentuales de ley de FeMag. Un óptimo funcionamiento en el primer tambor permite minimizar pérdidas de FeMag y obtener concentrados de alta calidad, mejorando considerablemente la operación.

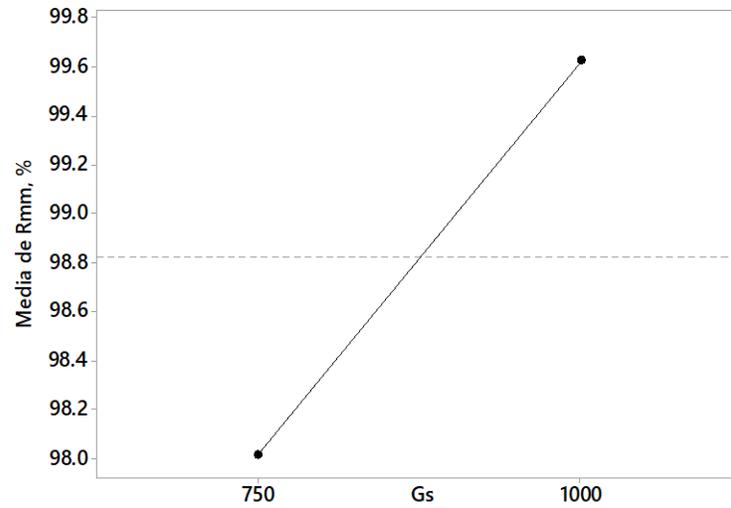


Figura 46. Efecto del campo magnético sobre la Rmm del M1.

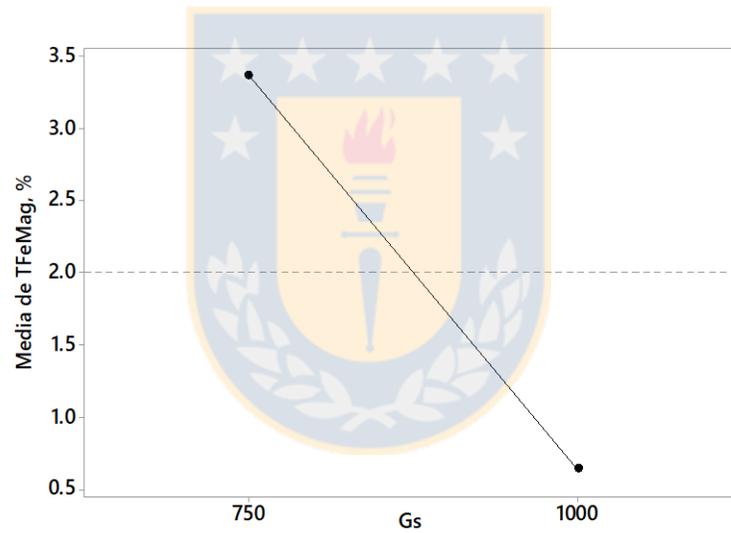


Figura 47. Efecto del campo magnético en la pérdida de FeMag en el M1.

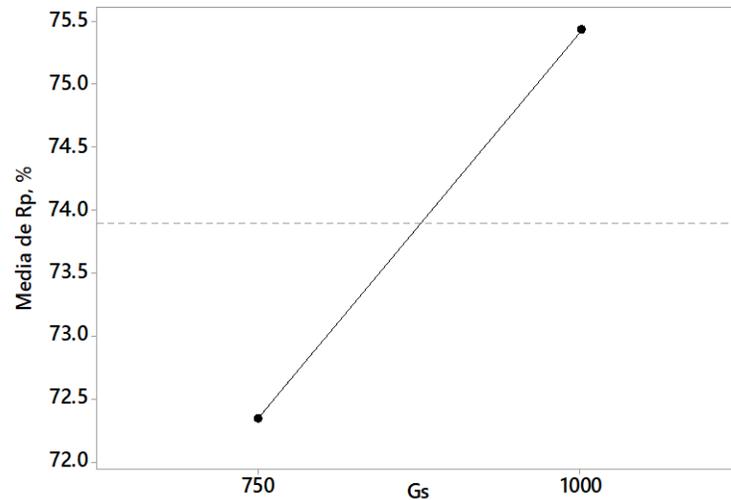


Figura 48. Efecto del campo magnético sobre la Rp del M1.

Al considerar las características de la etapa dentro del proceso de la planta, se vuelve fundamental encontrar un ajuste que mejore los parámetros metalúrgicos del tambor, sin embargo, es necesario considerar el resultado que se obtiene como línea de proceso, el cual afecta directamente a la etapa de flotación. Por lo tanto al analizar el funcionamiento de los tambores como línea de proceso, utilizando los resultados expuestos en los apartados 4.2.2 y 4.3.2, se tiene que, utilizar un M1 de 1000 G genera un concentrado como línea de operación de menor calidad que si se utiliza un M1 de 750 G, obteniéndose una diferencia de 3 puntos porcentuales de ley, lo que en flotación significa un mayor consumo de reactivos para obtener un concentrado comercializable.

Por último, de los resultados obtenidos en los apartados 4.2 y 4.3 se destaca que la participación de los parámetros operacionales es altamente dependiente de la intensidad de campo magnético que posee el tambor, por lo tanto a medida que el campo magnético disminuye, los parámetros operacionales del tambor se vuelven más relevantes y requieren de un mayor control.

5. Conclusiones y recomendaciones

- La mejor condición encontrada es la condición 8 con un *gap* base de 2", un *gap* de descarga de 2", un arco magnético de 1" y una intensidad de campo magnético de 750 G. Con la configuración señalada se obtienen resultados de Rp de 71%, Rmm del 99%, minimiza las pérdidas de FeMag a un valor de 1,5% y se logra obtener como línea de proceso un concentrado de 65% de FeT, minimizando el consumo de reactivos en el proceso de flotación.
- Un M1 con un campo magnético de 1000 G y a un *gap* base de 2" posee una Rmm del 99%, otorgando flexibilidad en la modificación de los otros parámetros del tambor para lograr obtener un concentrado de mayor calidad.
- El M1 de 1000 G genera un aumento de 13 puntos porcentuales de ley, mientras que el M1 de 750 G genera un aumento de 17 puntos porcentuales de ley en el concentrado. Por lo tanto, considerando que el proceso de concentración *finisher* es un proceso selectivo, las mejores condiciones operacionales se obtienen al utilizar un M1 de 750 G.
- El *gap* de descarga es el parámetro más influyente del tambor, afectando la Rp, la cantidad de agua de dilución requerida y el amperaje del equipo motriz. A medida que aumenta el *gap* de descarga se genera un aumento en el amperaje del equipo motriz y en la cantidad de agua de dilución requerida. Por otro lado, el efecto que posee el *gap* de descarga sobre la Rp del tambor depende de la intensidad de campo magnético, donde a medida que el *gap* de descarga aumenta la Rp aumenta a 1000 G y disminuye a 750 G.
- Los resultados obtenidos en el apartado 4.1 demuestran que existe una falencia en el control de agua de dilución, lo que en el proceso implica generar concentrados de menor calidad y disminuir los parámetros metalúrgicos obtenidos por el tambor, aumentando las pérdidas de FeMag en la etapa *finisher*.

Se recomienda a Planta Magnetita implementar un tambor de 750 G, ajustando los parámetros operacionales del tambor a la condición 8, para posteriormente realizar los siguientes estudios y mejoras:

- Repetir el estudio en el tambor 2 y el tambor 3 de manera individual, buscando obtener una optimización completa de la línea operacional.

- Se requiere implementar un sistema de control en el agua de dilución que permita aislar el impacto que posee la variación de presión en el anillo de agua que alimenta a la planta, logrando así mantener un flujo de agua de dilución constante. Posteriormente, se debe realizar un estudio para determinar el flujo de agua de dilución que permita optimizar el funcionamiento de los tambores magnéticos, mejorando la calidad del concentrado obtenido.



6. Bibliografía

- Alcayaga, E. (2018). Evaluación y optimización de la etapa de concentración magnética *Finisher* en Planta Magnetita. Memoria de Título. Universidad Católica del Norte, Chile.
- Bustamante, M., Gaviria, A. y Restrepo, O. (2008). Concentración de minerales. Manuscrito inédito, Universidad Nacional, Instituto de Minerales CIMEX, Colombia.
- Campillay, R. (2010). Optimización de la concentración magnética *Finisher* y Flotación neumática en Planta Magnetita de Minera Hierro Atacama. Memoria de Título. Universidad de Atacama, Chile.
- CAP Minería (2018). CAP Minería - Planta Magnetita. Chile. Recuperado de: <http://www.capmineria.cl/capmineria/planta-magnetita/2018-09-25/111131.html> [Acceso 24 Jun. 2019].
- Carmona, F. (2013). Modificaciones del proceso de flotación inversa de hierro en celdas neumáticas de Planta Magnetita. Memoria de Título. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile.
- Compañía Minera Del Pacífico (2005). Proyecto Hierro Atacama, Subproyecto Planta Magnetita. Manuscrito inédito, Investigación de Procesos Metalúrgicos Huasco, Chile.
- Dworzanowski, M. (2010). Optimizing the performance of wet drum magnetic separators. Este artículo fue presentado por primera vez en la conferencia a beneficio físico SAIMM. Pretoria, South Africa. Recuperado de <http://www.scielo.org.za/pdf/jsaimm/v110n11/04.pdf>
- Espinoza, P. (2006). Evaluación técnica y económica de la concentración de minerales del proyecto Cerro Negro Norte. Memoria de Título. Universidad de Santiago de Chile, Chile.
- Flores, B. (2011). Optimización de parámetros metalúrgicos de la etapa rougher en Planta Magnetita. Memoria de Título. Universidad de Atacama, Chile.
- Gupta, A. and Yan, D. (2016). Mineral processing design and operations: An Introduction (2ª. Ed.). Oxford, United Kingdom: Elsevier.

- International Organization for Standardization (1998). *Minerales de hierro: Métodos experimentales para la evaluación de la variación de la calidad*. ISO 3084:1998(E) (3ª. ed.). Suiza.
- International Organization for Standardization (2002). *Minerales de hierro: Métodos experimentales para verificar la precisión del muestreo, la preparación de las muestras y la medición*. ISO 3085:2002(E) (4ª. ed.). Suiza.
- International Organization for Standardization (2014). *Minerales de hierro: Muestreo de pulpa*. ISO 16742:2014(E) (1ª. ed. y ed. corregida 2015). Suiza.
- International Organization for Standardization (2017). *Minerales de hierro: Procedimientos de muestreo y preparación de las muestras*. ISO 3082:2017(E) (5ª. ed.). Suiza.
- Metso Corporation (2015). *Iron ore processing: Wet low intensity magnetic separators*. Sweden.
- Osses, A. (2019). *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*. Memoria de Título. Universidad de Concepción, Chile.
- Stener, J. (2015). *Wet Low-Intensity Magnetic Separation: Measurement Methods and Modelling*. Tesis de Doctorado. Luleå University of Technology, Suecia.
- Svoboda, Jan. (2004). *Magnetic Techniques for the treatment of materials*. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Wills, B. and Finch, J. (2015). *Magnetic and Electrical Separation*. En *Butterworth-Heinemann (8ª. ed.)*. *Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery* (pp. 381-407). Oxford, United Kingdom: Elsevier.

Anexos

Anexo A: Diseño experimental inicial

Tabla 9. Diseño experimental inicial.

Diseño Experimental				
	Condición	GAP base ["]	GAP descarga ["]	Arco magnético ["]
Tambor <i>finisher</i>	1	3	3	3
	2	3	3	1
	3	3	1	1
	4	3	1	3
	5	1	1	3
	6	1	3	3
	7	1	3	1
	8	1	1	1
Tambor <i>rougher</i>	9	1	1	3
	10	1	3	3
	11	1	3	1
	12	1	1	1
	13	3	1	1
	14	3	1	3
	15	3	3	3
	16	3	3	1

Anexo B: Imprevistos operacionales con tambor de 750 G

Con el avance del estudio se presentaron imprevistos operacionales con el diseño experimental inicial, los cuales fueron:

- Aumento en el amperaje del equipo motriz en condición 1 y 2, llegando a valores cercanos al nominal de 15,5, aumentando el agua de dilución requerida por el proceso.
- El tambor entra en contacto con la batea por los laterales al disminuir el *gap* base. En consecuencia el estudio se realiza modificando el *gap* base entre 2" y 3".
- Las condiciones con un *gap* base de 2" poseen un intervalo de *gap* de descarga entre 1" y 2", debido a que a 2,5" el tambor entra en contacto con la batea por la zona de descarga de colas.

Al finalizar las condiciones para el tambor de 750 G se instala el tambor de 1000 G y se realiza nuevamente el diseño experimental, sujeto a las modificaciones previamente señaladas (ver tabla 10).

Tabla 10. Diseño experimental de avance.

		Diseño Experimental			
		Condición	Gap base ["]	Gap descarga ["]	Arco magnético ["]
Tambor finisher	1		3	3	3
	2		3	3	1
	3		3	1	1
	4		3	1	3
	5		2	1	3
	6		2	2	3
	7		2	2	1
	8		2	1	1
Tambor rougher	9		2	1	3
	10		2	2	3
	11		2	2	1
	12		2	1	1
	13		3	1	1
	14		3	1	3
	15		3	3	3
	16		3	3	1

Anexo C: Imprevisto operacional con tambor de 1000 G

El aumento del *gap* de descarga de 1" a 3" en condiciones 3" de *gap* base genera un aumento en el amperaje del equipo motriz, superando el valor nominal de 15,5 amp que posee el equipo, provocando paradas en el funcionamiento del tambor. Debido a la imposibilidad de realizar las últimas condiciones operacionales se excluyen del análisis las condiciones con un *gap* base de 3" y se concluye la parte experimental.

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

Título: Caracterización y parametrización del primer tambor perteneciente a la línea de proceso n°3 de la etapa de concentración finisher en Planta Magnetita.

Nombre Memorista: Ricardo Andrés Rojas Villalobos

Modalidad		Profesor Patrocinante
Concepto		
Calificación		
Fecha		
Prof. ^a Eugenia Araneda H.		Prof. Andrés Ramírez M.
		Ingeniero Supervisor: Luis Bravo P.
		Institución: Universidad de Concepción

Comisión (Nombre y Firma)

Prof. Fernando Betancourt C.	Prof. Víctor Parra S.
------------------------------	-----------------------

7. Resumen

El estudio realizado en Planta Magnetita identifica el efecto que poseen los parámetros del tambor (*gap* de descarga, *gap* base y arco magnético) y el efecto que posee utilizar un campo magnético de 750 G o uno de 1000 G en el primer tambor de la línea 3 de la etapa finisher. Además entrega una tendencia del efecto que posee el agua de dilución en el primer tambor de la línea 3.

Con los resultados obtenidos, se logra determinar los parámetros del tambor y la intensidad de campo que permiten realizar un proceso de concentración eficiente, produciendo un concentrado de alta calidad para la siguiente etapa del proceso productivo.