

**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA**

**METALÚRGICA**



**TESIS**

**Análisis del proyecto de ampliación de planta concentradora para  
incrementar la producción de concentrado de hierro en Yacimientos  
IOCG**

Para optar el título profesional de:

Ingeniero Metalurgista

**Autor:** Bach. Charles Daniel JACAY LINO

**Asesor:** Mg. Marco Antonio SURICHAQUI HIDALGO

**Cerro de Pasco – Perú - 2022**



**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA**

**METALÚRGICA**



**TESIS**

**Análisis del proyecto de ampliación de planta concentradora para  
incrementar la producción de concentrado de hierro en Yacimientos  
IOCG**

Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:

---

Mg. José Elí CASTILLO MONTALVÁN  
Presidente

---

Mg. Eusebio ROQUE HUAMÁN  
Miembro

---

Mg. Jonás Ananías RAMOS MARTINEZ  
Miembro

## **DEDICATORIA**

A mis padres por sus consejos, enseñanzas y apoyo durante mi formación profesional y personal. Son el mejor soporte en mi vida.

A mi esposa e hijas por todo su amor, comprensión y ser mi fuente de motivación.

## **AGRADECIMIENTO**

Por medio de la presente investigación hago llegar mis sinceros agradecimientos a los docentes de la Escuela de Formación Profesional de Ingeniería Metalúrgica, por todas las enseñanzas brindadas durante mi formación académica, en la actualidad, es el agradecimiento que contribuye en mi desarrollo profesional.

A los trabajadores de Shougang Hierro Perú S.A. en especial aquellos que laboran en el área operaciones. Al enterarse del desarrollo de la investigación aportaron opiniones valiosas para hacer realidad la presente investigación.

## RESUMEN

El tipo de tratamiento a realizar a los minerales de hierro (Fe) obedece a la cantidad de impurezas en su composición mineralógica y la ley de hierro encontrada en el yacimiento. La técnica de concentración consiste en captar partículas magnéticas a través de un rodillo (tambor) con núcleo imantado estacionario rodeado de una carcasa giratoria, que se encuentra dentro de una tina donde se alimenta el mineral previamente molido. Cada depósito mineral tiene sus propias características únicas, por lo tanto, requiere una técnica de concentración diferente. En el presente estudio se dará énfasis al proceso de concentración magnética que incluye las etapas de trituración (por rodillos de alta presión), molienda, clasificación y concentración; con el objetivo de aumentar el contenido de hierro y reducir la cantidad de minerales de ganga. La etapa de concentración está constituida por separación magnética y flotación inversa, que es un método eficaz para eliminar las impurezas, en este caso los sulfuros. Desde el año 2018 existe una escasez en la producción mundial de hierro, por el cierre de operaciones mineras debido a problemas ambientales. Por lo tanto, se hace indispensable realizar el estudio de ampliación de planta concentradora para minerales de hierro con la finalidad de satisfacer la demanda de concentrado.

Palabras clave: Concentración magnética, flotación inversa, ampliación, materiales contaminantes, demanda.

## **ABSTRACT**

The type of treatment to be carried out on iron ores is due to the amount of impurities in their mineralogical composition and the grade of iron (Fe) found in the deposit. The concentration technique consists of capturing magnetic particles through a roller (drum) with a stationary magnetized core surrounded by a rotating casing, which is located inside a vat where the previously ground ore is fed. Each mineral deposit has its own unique characteristics, therefore requiring a different concentration technique. In this study, emphasis will be given to the magnetic concentration process that includes the stages of crushing (by high pressure rollers), grinding, classification and concentration; with the aim of increasing the iron content and reducing the amount of gangue minerals. The concentration stage consists of magnetic separation and reverse flotation, which is an effective method to remove impurities, in this case sulfides. Since 2018 there has been a shortage in global iron production, due to the closure of mining operations due to environmental problems. Therefore, it is essential to carry out a study to expand the concentrator plant for iron ore in order to meet the demand for concentrate.

**Keywords:** Magnetic concentration, reverse flotation, magnification, polluting materials, demand.

## INTRODUCCIÓN

Los metales económicamente importantes son extraídos de minerales naturales, sobre todo los de tipo transición, que desempeñan un papel importante en nuestra vida diaria y en la economía de constante crecimiento. El metal más utilizado en los tiempos modernos es el hierro, en forma de acero. A nivel mundial, la producción de acero ha superado los 1 600 millones de toneladas por año y esta cifra incrementa día a día (Basson, 2 015) [4].

El estudio de “*Ampliación de producción de planta concentradora de minerales de hierro*” se realiza porque existe un déficit de producción mundial de este material, la cual registra una fuerte caída a partir del año 2 018; primeramente, por el cierre de operaciones de alto costo en China; seguido por el accidente ambiental de la empresa Vale en Brasil. No obstante, las proyecciones en la demanda mundial para el año 2 020 se incrementaron en 52 millones de toneladas de concentrado con respecto al año 2 019. (Becerra, 2 019) [5].

La presente investigación dará énfasis al proceso de concentración magnética empezando por la etapa de chancado, molienda, concentración (separación magnética y flotación inversa), filtrado y disposición de relaves. El chancado se realiza mediante molinos HPGR (High Pressure Grinding Rolls) que por su alta capacidad de tratamiento y eficiente reducción aseguran partículas menores a 3 milímetros (mm), que es la granulometría óptima para la etapa de molienda, todo ellos favorecido por una humedad de mineral baja (< 5,0 %) proveniente de mina. Debido a la baja porción de finos en el alimento a los molinos primarios, está constituido por un circuito cerrado directo y la molienda secundaria un circuito cerrado inverso.

Los métodos magnéticos presentan desafíos en términos de sus bajas capacidades, con la necesidad que el mineral de hierro sea susceptible a los campos magnéticos. La flotación inversa es la ruta más popular usada en la industria del hierro, limitada por el costo de los reactivos y tratamiento de aguas residuales, necesitando deshidratación aguas abajo para las aplicaciones finales de un material semi-seco (Filippov et al., 2014) [12].

Es importante destacar que el mineral alimentado a planta conserve bajo contenido de impurezas (silicatos, sulfuros, arcillas, minerales que contienen alúmina y fosforo) y de acuerdo con esto ser utilizado como carga directa a los altos hornos, requiriendo únicamente tratamientos de molienda y concentración (separadores magnéticos). Por lo contrario, si el contenido de impurezas es relativamente alto se adiciona a las operaciones mencionadas, las etapas de flotación inversa y en el peor de los casos pelletización, donde se reducen significativamente la presencia de impurezas.

El presente proyecto de investigación presentado como tesis se sostiene en los siguientes capítulos:

En el capítulo I, dar a conocer el problema de investigación; con la identificación y determinación del problema; delimitación de la investigación; formulación del problema de investigación, planteándose al problema principal y problemas específicos; así como también la formulación de los objetivos general y específicos; concluyendo con la justificación de la investigación.

En el capítulo II, se da a conocer los antecedentes de estudio, bases teóricas científicas, definición de términos básicos, el planteamiento de la hipótesis general como las hipótesis específicas, identificación de las variables dependiente e independiente y la definición operacional de variables e indicadores.

En el capítulo III se considera la metodología y técnicas de investigación: considerando, el tipo, método y diseño de investigación. Seguidamente de la identificación de la población, muestra, técnicas e instrumentos de recolección de datos, técnicas de procesamiento, análisis de datos y tratamiento estadístico.

El capítulo IV refiere a los resultados y discusión, con la descripción del trabajo de campo, presentación, análisis e interpretación de resultados, prueba de hipótesis y discusión de resultados.

## ÍNDICE

<b>DEDICATORIA</b> .....	i
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	ii
<b>RESUMEN</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	iv
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	v
<b>ÍNDICE</b> .....	viii
<b>CAPÍTULO I</b> .....	1
<b>PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN</b> .....	1
<b>1.1 Identificación y Determinación del Problema</b> .....	1
<b>1.2 Delimitación de la Investigación</b> .....	3
<b>1.2.1 Delimitación Espacial</b> .....	3
<b>1.2.2 Delimitación Temporal</b> .....	3
<b>1.3 Formulación del Problema</b> .....	4
<b>1.3.1 Problema General</b> .....	4
<b>1.3.2 Problemas Específicos</b> .....	4
<b>1.4 Formulación de Objetivos</b> .....	4
<b>1.4.1 Objetivo General</b> .....	4
<b>1.4.2 Objetivos Específicos</b> .....	5
<b>1.5 Justificación de la Investigación</b> .....	5
<b>1.6 Limitaciones de la Investigación</b> .....	7
<b>CAPÍTULO II</b> .....	8
<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	8
<b>2.1 Antecedentes del Estudio</b> .....	9
<b>2.1.1 Antecedentes Internacionales</b> .....	9

2.1.2 Antecedentes Nacionales.....	13
<b>2.2 Bases Teóricas – Científicas .....</b>	<b>14</b>
2.2.1 Flotación inversa .....	14
2.2.2 Análisis Tuvo Davis.....	15
2.2.3 Separación magnética de alta intensidad (HIMS).....	15
2.2.4 Separación magnética de baja intensidad (LIMS).....	16
2.2.5 Minerales Ferromagnéticos.....	16
2.2.6 Minerales Paramagnetismo.....	17
2.2.7 Capacidad productiva.....	17
2.2.8 Plan de Comisionamiento .....	17
2.2.9 Ampliación de producción.....	19
2.2.10 HPGR (High Pressure Grinding Rolls).....	19
2.2.11 Zaranda vibratoria húmeda de doble piso.....	24
2.2.12 Molino de Bolas .....	26
2.2.13 Espesadores.....	28
2.2.14 Filtro de discos.....	31
<b>2.3 Definición de Términos Básicos.....</b>	<b>33</b>
<b>2.4 Formulación de Hipótesis: .....</b>	<b>36</b>
2.4.1 Hipótesis General .....	36
2.4.2 Hipótesis Específicos .....	37
<b>2.5 Identificación de Variables .....</b>	<b>37</b>
2.5.1 Variable dependiente (Y).....	37
2.5.2 Variable independiente (X) .....	37
<b>2.6 Definición Operacional de Variables e Indicadores .....</b>	<b>38</b>
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>39</b>
<b>METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>39</b>

<b>3.1 Tipo de Investigación.....</b>	<b>39</b>
<b>3.2 Nivel de investigación .....</b>	<b>40</b>
<b>3.3 Método de Investigación.....</b>	<b>40</b>
<b>3.4 Diseño de Investigación .....</b>	<b>40</b>
<b>3.5 Población y Muestra .....</b>	<b>41</b>
<b>3.6 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.....</b>	<b>42</b>
<b>3.7 Selección, Validación y Confiabilidad de los Instrumentos de Investigación</b>	<b>42</b>
<b>3.8 Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos .....</b>	<b>43</b>
<b>3.9 Tratamiento Estadístico .....</b>	<b>43</b>
<b>3.10 Orientación Ética Filosófica y Epistémica.....</b>	<b>44</b>
<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>45</b>
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>45</b>
<b>4.1 Descripción del Trabajo de Campo.....</b>	<b>45</b>
<b>4.1.1 Introducción a la metalurgia y diseño del proceso.....</b>	<b>45</b>
<b>4.1.2 Mineralogía .....</b>	<b>47</b>
<b>4.1.3 Identificación de minerales.....</b>	<b>49</b>
<b>4.1.4 Índice de Trabajo de Bond .....</b>	<b>51</b>
<b>4.1.5 Pruebas de Separación en Seco .....</b>	<b>52</b>
<b>4.1.6 Pruebas Piloto .....</b>	<b>52</b>
<b>4.1.7 Prueba de flotación .....</b>	<b>60</b>
<b>4.2 Presentación, análisis e interpretación de resultados .....</b>	<b>63</b>
<b>4.2.1 Pruebas de Beneficio .....</b>	<b>63</b>
<b>4.2.2 Clasificación del mineral .....</b>	<b>68</b>
<b>4.2.3 Prueba de flotación de proyectos de alto zinc.....</b>	<b>70</b>
<b>4.2.4 Alimentación de Planta.....</b>	<b>74</b>
<b>4.3 Prueba de Hipótesis .....</b>	<b>75</b>

<b>4.3.1 Prueba de normalidad de datos .....</b>	<b>75</b>
<b>4.3.2 Prueba de correlación de Variables.....</b>	<b>77</b>
<b>4.4 Discusión de Resultados .....</b>	<b>82</b>
<b>CONCLUSIONES</b>	
<b>RECOMENDACIONES</b>	
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	
<b>ANEXOS</b>	

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Datos técnicos de HPGR .....	24
<b>Tabla 2:</b> Datos técnicos de zaranda.....	25
<b>Tabla 3:</b> Datos técnicos de Molino .....	28
<b>Tabla 4:</b> Datos técnicos del espesador de concentrado.....	30
<b>Tabla 5:</b> Datos técnicos del espesador de relave.....	31
<b>Tabla 6:</b> Parámetros de rendimiento de filtro .....	32
<b>Tabla 7:</b> Datos técnicos de operación del filtro de disco .....	33
<b>Tabla 8:</b> Operacionalización de Variables e Indicadores.....	38
<b>Tabla 9:</b> Composición química de las muestras para las Investigaciones Mineralógicas .....	48
<b>Tabla 10:</b> Especificaciones de concentrado de hierro.....	60
<b>Tabla 11:</b> Estadística básica de datos geoquímico.....	61
<b>Tabla 12:</b> Clasificación de la profundidad y contenidos metálicos .....	62
<b>Tabla 13:</b> Resultados de las Pruebas en Tubo Davis, Mina 21 .....	64
<b>Tabla 14:</b> Resultados de Pruebas en Tubo Davis, minas 3/4/5/14.....	65
<b>Tabla 15:</b> Comportamiento de minerales Oxidados y minerales Primarios con el tratamiento HIMS y LIMS .....	67
<b>Tabla 16:</b> Análisis químico de muestra.....	70
<b>Tabla 17:</b> Dosificación de reactivo para pruebas.....	70
<b>Tabla 18:</b> Influencia de la variación de pH en la reducción del % Zn y % S .....	71
<b>Tabla 19:</b> Variación de pH en el concentrado de separadores magnéticos.....	72
<b>Tabla 20:</b> Variables de contrastación de hipótesis.....	77
<b>Tabla 21:</b> Estadística descriptiva .....	79
<b>Tabla 22:</b> Resumen del modelo de regresión.....	80
<b>Tabla 23:</b> Prueba t para medias de dos muestras .....	80
<b>Tabla 24:</b> Balance metalúrgico producción diaria	
<b>Tabla 25:</b> Consumo de reactivos en el área de flotación	

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Evolución de producción de mineral de hierro, miles de toneladas .....	2
<b>Figura 2:</b> Evolución precio del conentrado de hierro (62 % de Fe, US\$ la tonelada) ....	6
<b>Figura 3:</b> Representación gráfica de la molienda de HPGR .....	20
<b>Figura 4:</b> Studs de rodillos .....	21
<b>Figura 5:</b> Rodillo fijo y flotante .....	22
<b>Figura 6:</b> Espacio entre rodillos (Gap) .....	23
<b>Figura 7:</b> Zaranda vibratoria húmeda de doble piso.....	25
<b>Figura 8:</b> Diagrama de espesador .....	30
<b>Figura 9:</b> Propuesta de diagrama simplificado para minerales primarios .....	54
<b>Figura 10:</b> Balance de masa - Prueba con mineral primario .....	55
<b>Figura 11:</b> Propuesta de diagrama simplificado para minerales Oxidados .....	57
<b>Figura 12:</b> Balance de masa - Prueba con con mineral oxidado .....	58
<b>Figura 13:</b> Histograma de datos geoquímico .....	62
<b>Figura 14:</b> Concentración de zinc vs profundidad .....	63
<b>Figura 15:</b> Relación Fe/FeO vs % Recuperación de Hierro- Mina 21 .....	65
<b>Figura 16:</b> Relación Fe/FeO vs. Recuperación - Minas 3, 4, 5, y 14 .....	66
<b>Figura 17:</b> Influencia de la variación de pH en la reducción del % Zn.....	71
<b>Figura 18:</b> Grafica de variación de pH en concentrado de separadores magnéticos.....	73
<b>Figura 19:</b> Prueba de probabilidad de datos .....	76
<b>Figura 20:</b> Gráfica de doble proyección.....	79
<b>Figura 21:</b> Recuperación de Fe vs Índice Fe/FeO .....	80

## **CAPÍTULO I**

### **PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

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

Shougang Corporation también conocida como Capital Steel desarrolla actividades en el campo del hierro y acero con sede principal en China. En el sector de producción siderúrgica se encuentra entre los más importantes proveedores de acero del mundo y compite principalmente con mineras localizadas en Australia, Brasil e India. En 1992 adquieren la Empresa Minera Hierro Perú, desde esa fecha viene desarrollando sus operaciones en el país, en los años posteriores a la compra, vienen incrementando la capacidad de producción de mina, planta concentradora y sus distintas áreas involucradas en la cadena productiva.

Uno de los eventos previo al déficit mundial del concentrado de hierro (Fe) es consecuencia a la disminución de producción de esta materia prima por parte de

China, se redujo a 268 millones de toneladas en el periodo 2 016 hasta alcanzar 180 millones de toneladas el año 2 018. Esto debido al cierre de operaciones de alto costo, por su compromiso de realizar procesos más amigables con el medio ambiente y otras no rentables en un contexto donde predominaría el superávit global del mineral (Rojas y Garay, 2 018) [25]. Seguidamente, se bloquearon las operaciones de la Minera Vale ubicada en Brasil (enero del 2 019), debido al colapso de un dique de contención de relaves, la cual obligo al cierre de sus operaciones en esta parte del continente. Sin embargo, la producción mundial de hierro para el año 2 019 se incrementó en 0,8 % con respecto al 2 018 y se proyectó una producción mundial de 2 900 millones de toneladas en el 2 020, un alza de 1,8 % respecto al 2 019 (Becerra, 2 019) [5].

En la *figura 1* se muestra la producción de hierro en el periodo 2 013 – 2 020, donde se observa el declive de producción a partir del año 2 018.

**Figura 1:** Evolución de producción de mineral de hierro, miles de toneladas



*Fuente.* Tomado de Becerra J. (2 019), “Mercado Internacional del Hierro y del Acero”.

A través de los años la industria minera se enfrenta a diferentes dificultades sumamente complejas, los minerales de mena se presentan cada vez con leyes más

bajas, se empiezan a identificar materiales con contenidos más complejos y se encuentran a mayores profundidades. Desde un punto de vista técnico la explotación minera resulta más dificultosa y económicamente los costos se elevan, debido a que la planificación minera en sus primeras etapas explota los bloques mineralógicos con mayores leyes (Valderrama et al., 2 011) [27].

Las reservas mineras de Shougang Perú no se encuentran ajena a los inconvenientes citados en el párrafo anterior, por ello las minas veteranas optan por buscar nuevas alternativas para sus procesos de producción. Analizan la factibilidad de comenzar a tratar mayores volúmenes de mineral e investigar alternativas tecnológicas en los procesos metalúrgico (chancado, molienda y flotación).

## **1.2 Delimitación de la Investigación**

### **1.2.1 Delimitación Espacial**

El trabajo de investigación se delimita a las operaciones de procesamiento que desarrolla la empresa Shougang Hierro Perú, ubicada en la ciudad de Marcona – Nazca, perteneciente al departamento de Ica.

### **1.2.2 Delimitación Temporal**

La delimitación temporal es el periodo 2 020, donde se empezó con el proyecto de ampliación de producción. La planta procesa minerales de hierro principalmente

como magnetita y hematita. Asimismo, existe la presencia de minerales sulfurados de zinc (Zn), plomo (Pb) y cobre (Cu) en cantidades considerables.

### **1.3 Formulación del Problema**

#### **1.3.1 Problema General**

1. ¿En qué medida la ampliación de planta concentradora influye en el incremento de capacidad de producción?

#### **1.3.2 Problemas Específicos**

1. ¿En qué medida la falta de caracterización incluye en el procesamiento de minerales de hierro?

2. ¿Cuáles son los reactivos que se empleara en el tratamiento de minerales de hierro?

### **1.4 Formulación de Objetivos**

#### **1.4.1 Objetivo General**

1. Determinar los beneficios de incrementar la capacidad de tratamiento de planta concentradora.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

1. Analizar la influencia de la caracterización del mineral en la producción de concentrados.
2. Identificar los reactivos a emplear en el tratamiento de minerales de hierro para la obtención de concentrados

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

Beneficio a la empresa, se destaca que las concesiones mineras que se explotan en Marcona cuentan con reservas geológicas equivalentes a 1 500 millones de toneladas de hierro, lo que permite extender por 40 años la explotación de la mina (Huaricalla, 2 018) [15].

Aporte económico, aprovechar la oportunidad del mercado, desde el año 2 015 existe un aumento gradual del precio de los productos de hierro, la razón principal es la progresiva reducción de inventarios en puertos por la menor llegada de material, según informe “Mercado internacional del hierro y el acero” elaborado por la Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO, 2 020) [10].

Como se muestra en la *figura 2*, desde los años 2 015 – 2 016 el precio de concentrado de hierro está experimentando una tendencia al alza. En diciembre del 2 020 se registró un repunte del precio promedio alcanzando los 152,5 US\$ por tonelada, 31,0 % superior al promedio del año anterior.

**Figura 2:** Evolución precio del concentrado de hierro (62 % de Fe, US\$ la tonelada)



*Fuente.* Tomado de Comisión Chilena del Cobre (2 020), “Mercado Internacional del Hierro y del Acero”

El proyecto de ampliación con una inversión de US\$ 1 100 millones permitirá impulsar la rentabilidad de la empresa, promovida por lograr ciclos de producción más cortos e incrementando el control operativo teniendo a la tecnología como aliada (automatización de equipos y monitoreo constante a través de una sala de control).

Existe un acuerdo colectivo entre la empresa Shougang Hierro Perú y sus clientes, sobre todo de origen chino, mediante el cual se debe cumplir una demanda permanente de sus productos. Asimismo, se favorece el dinamismo de la actividad económica de las poblaciones aledañas, introduciendo nuevos puestos de trabajo, incrementa la demanda de bienes y servicios relacionados al proyecto.

Las razones por la cual se realiza el presente estudio de investigación de Ampliación de Operaciones de Shougang Hierro Perú, es el incremento a 10 millones de toneladas de concentrado por año a la capacidad de producción.

El 2 013 se inició la construcción de la obra que se dividió en 2 etapas. La primera etapa empezó en agosto del 2 014 la cual consistió en el desarrollo de la mina 14, construcción de planta chancadora mina (chancado primario y secundario), montaje de fajas transportadoras y el stockpile. La segunda etapa de ampliación empezó en junio del 2 016, esta consistió en la construcción de la planta beneficio (chancado terciario, molienda, espesamiento de concentrado y relaves) y una planta desalinizadora con una capacidad de 20 000 metros cúbicos día. La construcción de infraestructuras de la segunda etapa concluyó a fines del año 2 018. El proyecto empezó las pruebas de arranque el 2 019, a partir de esta fecha se irá incrementando gradualmente la capacidad de producción hasta alcanzar el objetivo de 10 millones de toneladas.

## **1.6 Limitaciones de la Investigación**

La investigación está relacionada al tratamiento de minerales de magnetita y hematita con la finalidad de obtener concentrados de hierro en la empresa Shougang Hierro Perú, en dicho tratamiento el mineral atraviesa por las etapas de reducción (chancado y molienda), clasificación, concentración magnética y flotación inversa. En el desarrollo de la investigación se tuvo como limitaciones la falta de reactivos y disponibilidad de equipos de laboratorio químico – metalúrgico, pero después de la gestión correspondiente se superaron estos impedimentos, haciendo con ello factible la investigación. Otros equipos faltantes no fueron impedimento para el desarrollo de la investigación.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

Ante el incremento a la demanda de concentrado, las empresas mineras requieren ampliar sus plantas concentradoras. Con la premisa de no afectar la continuidad del proceso productivo en el camino surgen retos para los trabajos de ingeniería, uno de los desafíos es buscar donde disponer los nuevos equipos. Debido a la concepción inicial de la planta, donde todos los equipos se encuentran situados en lugares estratégicos y la distribución de espacios fueron concebidas exclusivamente para trabajos de mantenimiento, la mayoría de las nuevas ubicaciones no son ideales, pero si funcionales. Otro factor a considerar es la capacidad de las instalaciones eléctricas; a lo largo de los años estas cargas eléctricas se van incrementando y terminan desbordándose, en muchos casos por modificaciones internas (Berton et al., 2 013) [6].

En este punto se toma como referencia los siguientes trabajos; el primero busca procesar relaves de cobre para obtener concentrado de hierro, la segunda se refiere a la ampliación

de una planta concentradora, donde se destaca no a ver detenido el proceso productivo para su realización, y por último un trabajo donde se busca eliminar las impurezas en los concentrados de hierro mediante métodos de flotación. Por otra parte, el presente capítulo también busca precisar diversos conocimientos que se encuentran dentro del proceso de producción. Simultáneamente será importante describir conceptos como: *ampliación de producción, plan de comisionado, capacidad productiva, planta concentradora y sus distintas etapas.*

## **2.1 Antecedentes del Estudio**

### **2.1.1 Antecedentes Internacionales**

En el estudio realizado por Rodrigues R. y Brandão P. (2018) [24] titulado “Influencia de la Liberación de Minerales en las etapas de Molienda y Flotación de mineral de Hierro” - Universidad Federal de Minas Gerais de Brasil, este trabajo tuvo como objetivo caracterizar tipos de mineral de hierro con un enfoque en la liberación de minerales, y su relación en la molienda y la flotación. Se seleccionaron tres muestras de diferentes tipos y grados de compactación, cada una de ellas fue sometida a análisis granulométrico, trituración, deslamado, pruebas de flotación, análisis químicos, mineralógicos y grado de liberación. En los resultados obtenidos el concentrado presentó alto contenido de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) en 14,0 % y bajas recuperaciones de masa (26,2 %) y metálicas (44,6 %). Se concluyó que los minerales con altos requerimientos energéticos tienden a presentar dificultades para su liberación y consecuentemente dañan el proceso de flotación, ya sea en la calidad del concentrado o en las tasas de producción.

El trabajo de investigación realizado por Matthews D. y Toit T. (2015) [21] titulado “Expansion of iron ore processing plant using a modular design basis as applied to the khumani iron ore mine” - South Africa, describen las ventajas del incremento de capacidad de producción y como pueden tener un impacto importante en la productividad de una instalación minera, durante el período de construcción y puesta en servicio. Teniendo en cuenta una pérdida de producción mínima, se implementó un diseño de planta modular de múltiples fases en la mina Khumani en Northern Cape, Sudáfrica. La primera fase involucró la instalación de una trituradora ejecutada en mina (ROM) y la instalación de equipos de procesamiento modular con capacidad para 8,4 millones de toneladas por año (Tpa) de producto. La fase intermedia que comprende la adición modular a la instalación de procesamiento aumentó la capacidad a 10 millones Tpa, con montajes mecánicos y eléctricos durante los períodos de mantenimientos programados. La segunda fase involucra la instalación de una segunda trituradora de mineral ROM y adiciones modulares a la instalación de procesamiento, aumentando la capacidad a 16 millones Tpa de producto. Los autores describen las consideraciones de diseño y las limitaciones que se tuvieron en cuenta, y muestran la eficacia con la que implementaron los montajes de equipos, asimismo, la puesta en servicio dentro de los períodos de parada y mantenimiento.

En la investigación de Valderrama L. et al. (2014) [28] titulada “Concentración magnética aplicada a relaves de cobre”- Universidad de Atacama Chile, buscan alternativas para reprocesar relaves de cobre para obtener concentrados de hierro, debido al aumento del precio del concentrado de hierro en el mercado resulta una alternativa rentable. A causa del lento agotamiento y disminución de las leyes de

los minerales hace que se despierte interés en fuentes alternativas, como minerales de baja ley, desechos industriales, relaves, etcétera. Este estudio tiene como objetivo recuperar el hierro magnético contenido en los relaves producidos en el tratamiento de minerales de cobre de la Planta Manuel Antonio Matta, de la Empresa Nacional de Minería, mediante diferentes etapas de concentración magnética de baja intensidad. Un problema de las operaciones tradicionales de concentración se encuentra en la dificultad tecnológica de recuperar el hierro en las fracciones granulométricas inferiores a 20 micrones ( $\mu\text{m}$ ). El material depositado en los tranques de relave posee un alto potencial de aprovechamiento del hierro contenido, cuyas leyes varían de 10,0 % a 60,0 %, dependiendo del tipo de mineral tratado y de la tecnología de tratamiento de los minerales.

En la investigación realizada por Ma, M. (2012) [20] titulada “Froth flotation of iron ores” – Australia, enfatiza en la flotación como medio para concentrar minerales de hierro con leyes intermedia a baja, estudia su práctica industrial y las actividades de investigación fundamentales en la flotación. Presenta las últimas innovaciones en la recuperación de mineral de hierro en las principales operaciones en el mundo. Estudia el desarrollo de los tipos de flotación; desde la flotación aniónica directa hasta la flotación catiónica inversa, aunque la flotación aniónica directa fue primera en ser empleada en el procesamiento de minerales de hierro, más tarde fue reemplazada en gran parte por la flotación catiónica inversa que en algunos procesos resulta más eficiente. Asimismo, el autor evalúa los reactivos utilizados en la flotación, incluidos el almidón, las aminas, ácidos grasos y sus mecanismos de interacción con los minerales de hierro. La presencia de algunas impurezas distintas al cuarzo, como minerales que contienen alúmina, es decir;

caolinita, gibbsita y fósforo (que es perjudicial y genera penalizaciones). Finalmente, concluye que la aplicación de la flotación aniónica inversa en la industria de minerales de hierro en los últimos años ofrece una buena oportunidad para reducir costos y aumentar la recuperación en sus concentrados.

En la investigación realizada por De Sales C. (2 012) [11] titulada “Vías de beneficio para la recuperación de minerales férricos en el desbordamiento del espesador de la planta de Brucutu.” - Universidad Federal de Minas Gerais de Brasil, se investigó las rutas de concentración para minerales que contienen hierro en el espesador de lodos de la planta de Brucutu, con el fin de producir pellets para su reducción directa y minimizar la generación de relaves. El análisis químico mostró los siguientes contenidos: hierro (Fe) 46,0 %, óxido de silicio (SiO) 21,5 %, alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 10,0 % y manganeso (Mn) 0,15 %. Las muestras fueron sometidas a caracterizaciones químicas y mineralógicas, así como a mediciones del potencial de hidrógeno (pH), porcentaje de sólidos y separación por tamaño en un clasificador. Los resultados mostraron un alto contenido de goethita en las fracciones de + 10  $\mu\text{m}$ , seguido de hematita laminar como segundo portador de hierro. Por lo tanto, luego de la implementación del proyecto, el producto generado será incluido en el portafolio de productos de la empresa. Otro de los beneficios es la reducción de los relaves generados, aumentando la vida útil de la presa de relaves y mitigar el impacto ambiental resultante.

### **2.1.2 Antecedentes Nacionales**

Inca Cano J. (2 020) [16] en su trabajo de tesis titulado “Proyecto de Optimización y Ampliación del tratamiento en una Planta Concentradora de flotación de cobre arsenical” – Universidad Nacional de Ingeniero del Perú, el estudio se fundamenta en aumentar la capacidad de tratamiento de la planta concentradora, de 8 000 a 10 000 toneladas por día y mejorar el rendimiento de la planta. Con el propósito de recolectar información, la cual permita entender como está relacionado los distintos circuitos de producción, se realizó el análisis metalúrgico a la planta, para lo cual se tuvo en cuenta los parámetros de operación tales como: la mineralogía, granulometría, rendimiento de equipos, porcentaje en sólidos, consumo de reactivos, diseño de circuitos, entre otros. Los resultados previo evaluaciones indican que la principal limitante para el incremento del tonelaje es la reducción de tamaño partiendo desde la etapa de chancado que impacta directamente con la etapa de molienda y clasificación. Al revisar los resultados de las pruebas de flotación encontraron que el punto en común es la elevada flotabilidad del mineral de cobre, la cual debe ser aprovechado en su tratamiento de concentración. Finalmente se realizó una evaluación económica del proyecto para determinar su viabilidad.

En el trabajo de tesis realizada por Almirón C. (2 016) [1], titulada “Estudio preliminar para la ampliación de producción de 8 500 a 10 500 toneladas por día (t/d) Planta Concentradora Paragsha – Unidad Económica Cerro de Pasco.” – Universidad Nacional del Centro del Perú. Se refiere al proyecto de ampliación de una planta concentradora polimetálica, donde es importe destacar la ejecución de una expansión escalonada con la finalidad de no afectar completamente la

producción de la planta existente. Se tiene como objetivo describir la ampliación escalonada de 8 500 – 9 500 – 10 500 t/d operando 30 días por mes, se optimiza la sección de chancado hasta alcanzar 18 horas de operación por día, siendo la operación unitaria más trascendente. La sección molienda donde el molino primario de barras 10-1/2' x 14' va a operar con un molino de bolas secundario 12' x 13' como una cuarta sección encargada de procesar en la ampliación final, además, la sección de molienda actual de 8 500 toneladas por día (t/d) reducirá su tratamiento a 7 500 t/d, para de esta manera completar los trabajos de montaje y alcanzar un tratamiento de 10 500 t/d al finalizar el proyecto, a esta etapa le sigue las secciones de flotación de plomo y zinc con la adición de nuevas celdas de flotación y reubicaciones de equipos. Para la eliminación de agua se tiene espesadores y filtros que serán reemplazados por otros más eficientes. La optimización de los circuitos de chancado, molienda, flotación y filtrado se traduciría en una mayor producción de concentrados de plomo y zinc, lo que conllevaría a un mayor ingreso por ventas de concentrados producidos. Otro de los factores en los cuales se sustenta la ampliación es el aumento del precio de los metales de plomo (Pb), zinc (Zn) y plata (Ag) en los últimos años.

## **2.2 Bases Teóricas – Científicas**

### **2.2.1 Flotación inversa**

En la flotación inversa, los reactivos pertinentes inducen a los minerales de provecho a convertirse en hidrofóbicos (repelentes del agua) y los minerales de desecho se convierten en hidrófilos (atraen el agua). La aireación se consigue

mediante inyectores en la parte inferior de la celda de flotación. Las burbujas atraen y hacen flotar los minerales de desecho, lo que deja los minerales de provecho en la parte inferior. Para lograr la separación es necesario contar con un sistema heterogéneo, que involucre más de una fase. En este caso se consideran las tres fases: sólido (mineral), líquido (agua) y gas (normalmente aire) (Oyarzún, 2 013) [22].

### **2.2.2 Análisis Tuvo Davis**

El tubo magnético Tester Davis consiste en un electroimán muy potente que logra generar una intensidad del campo magnético de hasta 4 000 gauss, cuenta con una separación de vidrio y un mecanismo de agitación accionado por motor. El tubo se coloca entre los polos del imán en un ángulo de aproximadamente 45 grados (el ángulo es ajustable), mientras se mueve hacia adelante y hacia atrás al tiempo que va girando simultáneamente, donde todas las partículas no magnéticas se descargan del tubo (Leiva y Carrasco, 2 017) [19]. Este análisis puede determinar el contenido magnético en productos obtenido a partir de los procesos en medios pesados y el contenido magnético de muestras en programas de prospección.

### **2.2.3 Separación magnética de alta intensidad (HIMS)**

HIMS por sus siglas en inglés, se usa mayormente para recuperar la hematita (mineral oxidado). Las máquinas de alta intensidad trabajan generalmente con intensidades de campo mayores y estos equipos se limitaban solo al uso en menas secas y se usa comercialmente desde 1 908. La separación en seco de alta

intensidad, se usa generalmente en menas que contienen algún material más fino que  $75\mu\text{m}$ , la eficiencia al usar este sistema se ve limitada por efectos de las corrientes de aire, la adhesión partícula-partícula y la adhesión partícula-rotor (Santamaría, 2 017) [26].

#### **2.2.4 Separación magnética de baja intensidad (LIMS)**

LIMS por sus siglas en inglés, se usa para recuperar magnetita en los minerales primarios, en un menor grado también para los minerales oxidados. Por lo tanto, la separación magnética de baja intensidad (LIMS) debe aplicarse en escala industrial después de la molienda de liberación para la recuperación de los concentrados finales.

La separación mediante vía seca de baja intensidad se centra primordialmente a la concentración de arenas gruesas, que son fuertemente magnéticas. Cuando el material mide menos de 0,5 cm, la separación en seco es cambiada por los métodos húmedos, generando menos pérdidas de polvo y obteniendo un producto más limpio (Santamaría, 2 017) [26].

#### **2.2.5 Minerales Ferromagnéticos**

Son materiales que experimentan una alta magnetización ante un campo magnético. Tienen una permeabilidad relativa muy superior a la unidad. Ejemplo: hierro, magnetita, ilmenita, etcétera.

### **2.2.6 Minerales Paramagnetismo**

Los materiales paramagnéticos se magnetizan débilmente en el mismo sentido que el campo magnético aplicado con una permeabilidad relativa ligeramente superior a la unidad. Ejemplo: hematita, pirrotita, goethita, etcétera.

### **2.2.7 Capacidad productiva**

Es la máxima cantidad de servicios que puede producir, fabricarse en condiciones normales y en una unidad productiva. Krajewski, Ritzman, and Malhotra [18] citan que “La capacidad de producción es la máxima cantidad de bienes o servicios que puede obtenerse en un centro de trabajo en condiciones normales de funcionamiento en un período de tiempo determinado” (2 011, p. 82).

### **2.2.8 Plan de Comisionamiento**

Beytia J. [7] refiere que es un “Proceso estructurado y orientado a la calidad, para verificar y documentar el desempeño de las instalaciones, sistemas y equipos cumplen tanto con los parámetros y criterios definidos en el diseño, con el propósito de asegurar la entrega del proyecto” (2 012, pp. 1-47).

**2.2.8.1 Completamiento mecánico:** En esta etapa se confirma a través de un certificado extendido por el cliente o su ingeniero, que los equipos y sistemas que componen a la planta estén completos y hayan sido construidos e instalados de acuerdo a la información y especificaciones finales de diseño.

Asimismo, aseguran el cumplimiento de las recomendaciones de los fabricantes, respetando la normas y regulaciones cuya aplicación es exigible contractualmente para el proyecto, o que son parte de las buenas prácticas de ingeniería utilizables. Con este certificado la planta o un sistema en particular están listos para comenzar las siguientes actividades.

**2.2.8.2 Pre-comisionado:** Consiste en el conjunto de chequeos y ensayos estáticos de una instalación industrial realizados en condición desenergizada, que implica una prueba sin energía eléctrica y sin los fluidos del proceso, con el objeto de asegurar que la instalación ha sido construida de acuerdo a los documentos de ingeniería y que se encuentra en condiciones de iniciar el comisionado.

**2.2.8.3 Comisionado:** Son las actividades de verificación dinámica de cada sistema y equipo mecánico, eléctrico, instrumentación y control. Esta fase se la realiza en condición energizada, es decir con suministro eléctrico y todos los fluidos funcionando a presión. Esta etapa se define como la verificación de la Ingeniería Aprobada y las pruebas con energía.

**2.2.8.4 Puesta en marcha:** Es la última fase y normalmente incluye el arranque inicial del sistema, los ajustes de parámetros operativos y las pruebas de funcionamiento integral para certificar que todo el equipo y sistema se encuentra en óptimas condiciones. Esto es una prueba para verificar el desempeño (Performance test).

### **2.2.9 Ampliación de producción**

La estructura proyecta a largo plazo la adquisición de máquinas y equipo en función de utilidad no percibida, por la falta de capacidad para cubrir la potencialidad de la demanda. La naturaleza estratégica del modelo proyecta las necesidades de infraestructura en lo relacionado a maquinaria y equipo para procesos de producción por etapas, toma en cuenta los requerimientos de fuerza laboral expresada como mano de obra polivalente, además, se dimensiona en cuanto a la disponibilidad de espacio físico requerido para la instalación de nueva maquinaria y equipo, sobre un horizonte temporal. En función de dicho horizonte, se analiza y evalúa el impacto de las decisiones de aumento de la capacidad (Velandia, 2 015) [29].

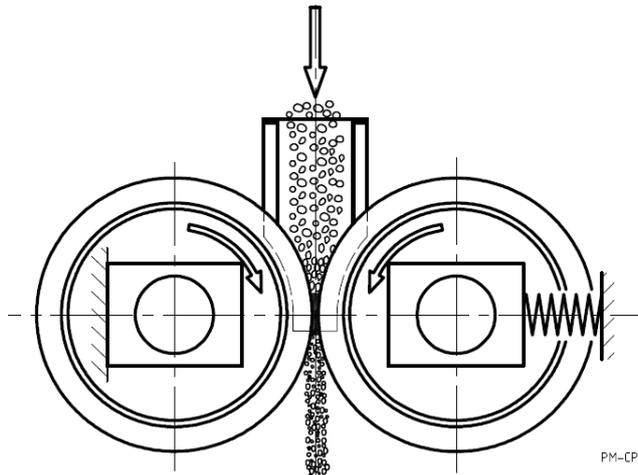
### **2.2.10 HPGR (High Pressure Grinding Rolls)**

Las chancadoras de rodillos de alta presión se utilizan para reducir el material, que posteriormente será alimentada hacia la etapa de Molienda, donde el material se muele entre dos rodillos que giran en sentido contrario uno del otro, bajo presión.

***Principios de molienda:*** El mineral después de pasar el espacio entre los rodillos se fragmenta, y generalmente emerge como una torta altamente compactada. El accionamiento, los componentes del equipo de transporte, el sistema hidráulico y el sistema de lubricación son monitoreados durante la operación. Si un componente importante (por ejemplo: sistema de lubricación, monitor de temperatura, monitor

de vibración, el acoplamiento de seguridad) falla, el rodillo de molienda de alta presión se detiene.

**Figura 3:** Representación gráfica de la molienda de HPGR



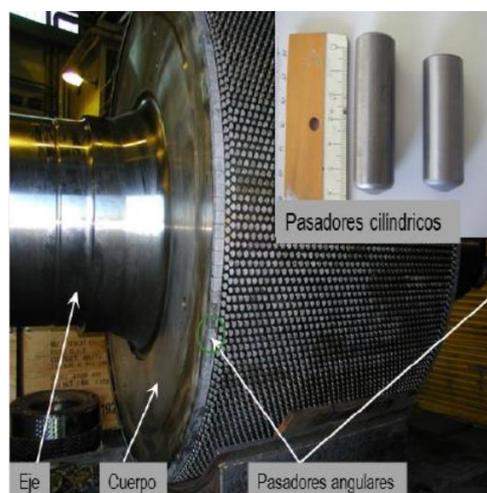
*Fuente.* Tomado de “Impacto productivo de Implementación de un HPGR al circuito de chancado en la Molienda” (p. 85) por García P. (2 018) [13].

Los bloques de apoyo de la unidad de rodillo fijo están atornillados al bastidor del rodillo de molienda de alta presión. La presión requerida para la trituración se transmite a través de la unidad del rodillo flotante al material de alimentación. Durante el funcionamiento, la unidad de rodillo flotante se adapta constantemente a las propiedades cambiantes del material de alimentación, cambiando su posición.

**Studs de los Rodillos:** Las caras de los rodillos están cubiertas con studs (espárragos) de carburo - tungsteno, para reducir el desgaste en la superficie del rodillo. El desgaste es reducido posteriormente por la formación de una capa de finos de mineral compactada que se acumula y permanece sobre la superficie del rodillo, de tal modo que la carga fresca no entre en contacto directo con la cara del metal, la capa en mención se puede desestabilizar por la falta de finos o la

inadecuada humedad en la alimentación. La ausencia o rotura de los studs permitirá que se rompan las áreas de capa autogenerada. La medición del desgaste proporciona información sobre qué adaptaciones al rodillo son necesarias. El desgaste de la superficie del rodillo, el perfilado o los pernos metálicos depende de la abrasividad del material de alimentación.

**Figura 4:** Studs de rodillos

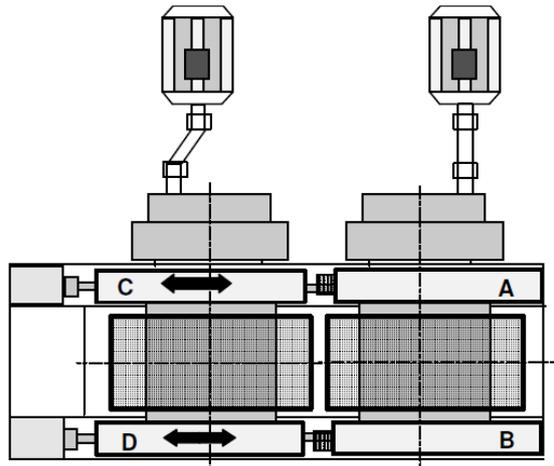


*Fuente.* Tomado de “Impacto productivo de Implementación de un HPGR al circuito de chancado en la Molienda” (p. 89) por García P. (2 018) [13].

**Unidad de Rodillo flotante:** Cuenta con dos rodamientos, reductor, cardán y motor. Los bloques de apoyo de la unidad de rodillo flotante se deslizan sobre los rieles de guía en el marco del rodillo. La fuerza de rectificado se transfiere a través de las placas de presión desde el cilindro del émbolo a los bloques de cojinetes y a la unidad de rodillos. Con el desgaste creciente de las superficies de los rodillos, las placas de presión de los cilindros del émbolo deben estar recubiertas con placas de compensación, ya que la carrera de los cilindros del émbolo es limitada.

**Unidad de Rodillo fijo:** Cuenta con dos rodamientos, reductor, cardán y motor. Las tiras compensadoras de la unidad de rodillo fijas se atornillan al marco, como resultado, las fuerzas de rectificado se transmiten directamente al marco del rodillo.

**Figura 5:** Rodillo fijo y flotante



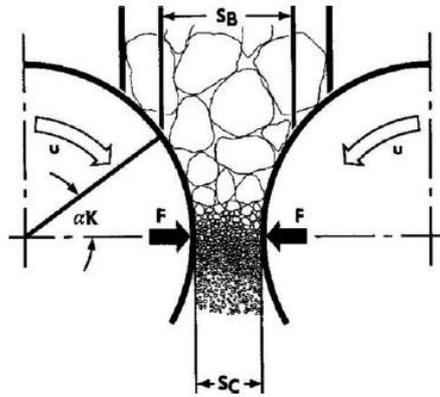
*Fuente.* Tomado de “Informe técnico del proceso de operaciones de los molinos de rodillo de alta presión (HPGR)” (p. 64) por Ballon C. (2 015) [3].

**Distancia entre rodillos (Gap):** Es el espacio entre la unidad de rodillo flotante y la unidad de rodillo fijo depende de la capacidad de los rodillos para tirar del material de alimentación, la velocidad del rodillo y la densidad del material de alimentación del molino. Para evitar el contacto de los rodillos, se establece un espacio básico entre los rodillos por medios de los espaciadores durante la primera puesta en marcha.

Durante el funcionamiento, las superficies de los rodillos están sujetas a desgaste y el espacio de trabajo se mueve en la dirección de la unidad de rodillo fijo y se

ensancha. Para mantener el ancho del espacio básico, los espaciadores deben ser reajustados.

**Figura 6:** Espacio entre rodillos (Gap)



*Fuente.* Tomado de “The wear pattern in high pressure grinding rolls” (p. 238) por Kazerani R. y Sam A. (2 017) [17].

**Sistema de alimentación:** Dependiendo de la aplicación, el sistema de alimentación del molino de alta presión consiste en una tolva o un depósito de alimentación con un eje de alimentación ajustable. Dependiendo del material de alimentación, el canal consta de paredes inclinadas o rectas y revestidos con protección contra el desgaste. Un lazo de control asegura que siempre haya un nivel de llenado adecuado en el depósito de alimentación. Para evitar que el depósito de alimentación se desborde, se instala adicionalmente un monitor de nivel de llenado.

Por medio del eje de alimentación ajustable, el ancho del eje de alimentación vertical puede ser ajustado de forma continua, lo que permite la corrección del comportamiento de arrastre del material de alimentación y la tasa de rendimiento. El eje de alimentación ajustable puede diseñarse con o sin válvulas de compuerta.

**Tabla 1:** Datos técnicos de HPGR

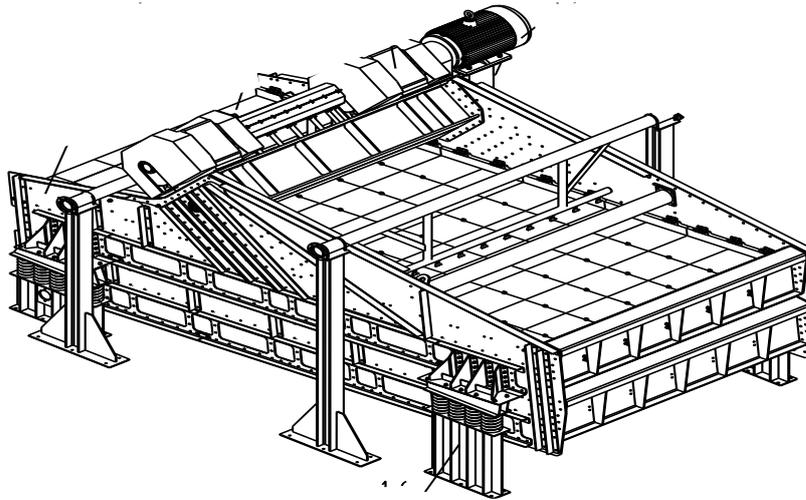
<b>Equipo</b>	
Tipo	Variador frecuencia
Potencia de accionamiento	650 – 2 600 Kw
Gama de revoluciones	205 – 1 180 rpm
Densidad de material	2 300 kg/m <sup>3</sup>
Tamaño de partículas	max. 40 mm
Humedad	< 4,0 %
Emisión de ruido	> 80 dB(A)
<b>Sistema Hidráulico</b>	
Peso del grupo hidráulico	Aprox. 830 kg
Presión de servicio	Máx. 170 bar
Volumen tanque hidráulico	800 Lts
<b>Cilindros de retroceso</b>	
Diámetro del émbolo	125 mm
Recorrido del émbolo	205 mm

*Nota.* La tabla muestra los datos técnicos de los molinos HPGR, cabe resaltar la potencia de motor es para c/u de los rodillos.

### **2.2.11 Zaranda vibratoria húmeda de doble piso**

Las zarandas vibratorias son equipos que se utilizan para la clasificación de productos sólidos por granulometría y también para separar sólidos de líquidos. La frecuencia y la amplitud de las vibraciones de estos equipos constituyen parámetros de vital importancia, para obtener un buen rendimiento, eficiencia y calidad adecuada durante el proceso. Estos parámetros revisten especial interés para la determinación de las cargas dinámicas que actúan sobre el equipo y, por tanto, para el cálculo de elementos importantes, como los elementos elásticos, cojinetes, componentes estructurales, etc.

**Figura 7:** Zaranda vibratoria húmeda de doble piso



*Nota.* Representación gráfica de una zaranda doble piso tipo banana.

Las mallas tienen un diseño modular fijo en el asiento de riel de soporte mediante una ranura a presión, el material de las mallas es de poliuretano de 45 mm espesor. La malla superior tiene una abertura de 8 mm con una tasa de abertura o área libre del 48,0 %, la malla inferior tiene una abertura de 3 mm con un área libre del 40,0 %.

**Tabla 2:** Datos técnicos de zaranda

<b>Condiciones de operación</b>			
1	Tiempo de servicio	Años	20
2	Cantidad		8 set
3	Servicio	horas/año	7 900
4	Tipo de carga	-----	carga pesada (continua)
5	Tipo de zaranda	-----	vibratoria doble piso
6	Especificación	M	3,60 ancho x 7,30 largo
7	Material		Mineral de hierro
9	Ley del mineral	%	42,50-56,50
10	Densidad de mineral	t/m3	3,75-4,12
11	Densidad aparente	t/m3	2,30
12	Tamaño de alimentación	mm	-3,0 mm 55 % pasante
13	Tipo de proceso		Zarandeo húmedo
14	Carga circulante	%	114

15	Cap. total (TMS)	t/h	4 943
16	Cap. individual (TMS)	t/h	824
17	Eficiencia de la zaranda	%	≥ 85
18	Frecuencia vibratoria	r/min	890
19	Amplitudes	Mm	9-11 golpes

#### **Malla / Paneles**

1	Material de la malla	--	Poliuretano
2	Tipo de conexión	--	por chute
3	Pisos	--	2
4	Área de malla por piso	m2	26,28
5	Inclinación	Grados	5°
6	Abertura de malla superior	Mm	8
7	Abertura de malla inferior	Mm	3
8	Tamaño de plataforma	Mm	610×305×45

#### **Unidad de accionamiento**

1	Motor (Hp/Kw)	100/75
2	Cantidad de motor	1
3	tipo de acoplamiento	acoplamiento universal
4	modelo de acoplamiento	SWP
5	valor de torque del acople (KN-m)	16
6	Cubierta protectora de acoplamiento	Tipo fijo

*Nota.* La tabla presenta datos técnicos y operativos de la zaranda tipo banana.

### **2.2.12 Molino de Bolas**

El objeto de los procesos de molienda es la reducción mecánica del tamaño de los materiales suministrados por la etapa de chancado. Se emplean habitualmente para reducir los minerales a una finura tal que se obtenga una liberación de los constituyentes, basada sobre sus propiedades específicas. Es el área de mayor consumo de potencia y de materiales resistentes al desgaste de una planta.

La más conocida es la molienda mediante el uso de molinos en los cuáles se introducen materiales molidores con el objeto de reducir el material. La

fragmentación se produce gracias a la presión, los impactos y la erosión. La molienda se produce normalmente en tambores rotativos.

En la molienda se puede obtener una mayor razón de reducción que en el proceso de chancado, especialmente se trabaja en medio húmedo, no obstante, la forma de aplicación de la carga sobre las partículas y los factores que controlan este proceso limitan su uso a partículas con tamaño inferior al que se puede triturar, el resultado de la molienda es influenciado por:

- Tamaño del alimento (partículas a moler y medios de molienda).
- Movimiento de la carga dentro del molino (mecanismo de molienda).
- Espacios vacíos existentes entre la carga del molino.

La elección del diseño de un molino depende de la distribución de tamaños de partículas en la alimentación y en el producto deseado, siendo lo más común una molienda primaria y secundaria donde se obtienen los productos de granos muy finos, las partes principales del molino son:

- Trunnion de alimentación: Es el conducto para la entrada de carga.
- Chumaceras: Se comporta como soporte del molino y es a la vez la base sobre la que gira el molino.
- Piñón y Catalina: Son los mecanismos de transmisión de movimiento, el motor de molino acciona un contraeje al que está acoplado el piñón. Se encarga de accionar la catalina la que proporciona el movimiento al molino.

- **Cuerpo o Casco:** Es de forma cilíndrica y está en posición horizontal, dicha posición permite la carga y descarga continua. En su interior se encuentran las chaquetas o blindajes, que van empernadas.
- **Trunnion de descarga:** Es la parte por donde se realiza la descarga de la pulpa.
- **Trommel:** Desempeña un trabajo de retención de bolas, especialmente de aquellos que por excesivo trabajo han sufrido demasiado desgaste. De igual modo sucede con el mineral o rocas muy duros que no pueden ser molidos completamente, por tener una granulometría gruesa quedan retenidos en el trommel, de esta forma se impiden que tanto bolas como partículas minerales muy gruesas ingresen a las bombas.

**Tabla 3:** Datos técnicos de Molino

<b>Molino 21'x 38'</b>	<b>Valor</b>
Diámetro (ft)	21
Longitud (ft)	38
Potencia (Kw)	8 500
Volumen efectivo (m3)	352
Vel. de operación (rpm)	12,92
% S Molienda Primaria	70–72
% S Molienda Secundario	72–75
Carga Material (t)	128
Carga Bola(t)	537 (38,0 %)

*Nota.* La tabla presenta datos técnicos y operativos de los molinos de bolas.

### **2.2.13 Espesadores**

El espesador es un estanque circular, donde la alimentación es realizada por la parte central, lo que permite la homogeneización de la pulpa, de forma que sedimentación ocurra de forma adecuadamente, sus principales características son,

que su parte inferior es cónica, posee una caja central de alimentación llamada “feedwell”, posee una canaleta colectora para la recuperación de agua clarificada “overflow” (canal para recuperar el agua recuperada a una velocidad baja para evitar el arrastre de partículas finas) y posee una rastra (su función es llevar el material depositado en el fondo del espesador hacia la abertura de descarga).

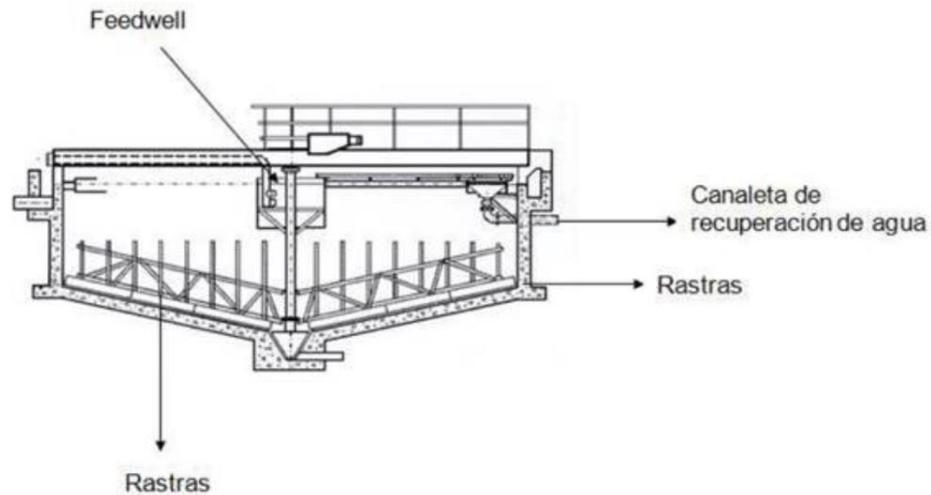
**Tanque:** Generalmente cilíndricos de altura normal de 3 metros y diámetro variable, construidos en acero o concreto. A diámetros mayores a 30 metros es recomendable que sean de concreto, la pendiente típica es de  $14^\circ$ , pero pueden usarse pendientes mayores. El tanque constituye de un 40 a 50 % del costo total del equipo.

**Pozos de alimentación (Feedwell):** En los espesadores típicos se diseñan para conducir  $1 \text{ m}^3/\text{min m}^2$  generalmente son de 10,0 % el diámetro del tanque y 1,50 m de profundidad, aunque la anterior puede variar de acuerdo a la aplicación. Su diseño afecta fuertemente a la calidad del derrame obtenido (sólidos suspendidos).

**Rastrillos:** Su principal función es depositar los lodos en la parte central del tanque, aunque también destruyen los floculos para permitir la salida de agua de estos y darle mayor densidad a la pulpa, se recomienda el uso de sistemas que cuentan con dos rastrillos cortos y dos largos para dar cuatro rastrilladas por revolución. En los tanques espesadores se deberá de utilizar un sistema de levante de rastras automática, para evitar complicaciones en la operación.

**Torque:** El torque es la demanda máxima que puede tener el motor del espesador sin dañar ninguno de sus elementos (rastras, mecanismo y eje central).

**Figura 8:** Diagrama de espesador



*Nota.* La figura presenta las partes de un espesador de alta eficiencia.

**Tabla 4:** Datos técnicos del espesador de concentrado

Vida útil (años)	20
Tipo de dispositivo	Soportado por columnas
Modelo	Unidad de alta eficiencia
Diámetro Interno (m)	53
Área de Asentamiento (m <sup>2</sup> )	2 205
Pendiente de piscina (°)	14
Altura sección de pared recta (m)	3,40
Profundidad de centro (m)	7,73
Modo de accionamiento	Accionamiento hidráulico
Revoluciones de rastrillo (min/r)	15 – 25
Altura elevación rastrillo (mm)	600
Vel. elevación rastrillo (mm/min)	31
Potencia sistema hidráulico (kw)	22
Presión Nominal (Mpa)	16
Torque máximo (kN.m)	2 248
Torque trabajo continuo (kN.m)	1 124
Torque de alarma (kN.m)	1 348
Torque de rastrillo (kN.m)	1 461
Stop torque (kN.m)	1 798

*Nota.* La tabla presenta datos técnicos y operativos de espesador de concentrado.

**Tabla 5:** Datos técnicos del espesador de relave

Vida útil (años)	20
Tipo de dispositivo	Espesador semi-subterránea
Modelo	Unidad de alta eficiencia
Diámetro Interno (m)	43
Cap. tratamiento (tms/d)	20 016–32 160
Cap. por hora (tms/hr)	834–1 340
Cap. de tratamiento (tms/hr)	417-670
Flujo de lodo de mineral (m3/Hr)	15 757–19 528
Proporción de lechada (tm/m3)	1,04-1,07
Densidad aparente (tm/m3)	3,26
Granularidad Feed F80/F50 (µm)	200
Cantidad de flujo inferior (m3/h)	352–566
Concentración de flujo inferior (%)	65±2
Cantidad desbordamiento (m3/h)	7 526-9 320
Turbiedad desbordamiento (Ppm)	<100
Pendiente del tanque (°)	15°
velocidad de rastrillo (rpm)	0,067-0,093
Torsión operación continua (Nm)	870
Torsión elevación (Nm)	1 740

*Nota.* La tabla presenta datos técnicos y operativos de espesador de relaves.

#### **2.2.14 Filtro de discos**

La alimentación a la zona de filtrado consiste en una pulpa con 50 % a 60 % de sólidos proveniente de la etapa de espesamiento, obteniéndose como producto un concentrado con una humedad del orden de menor a 9,50 %, con esta humedad el concentrado puede ser manejado adecuadamente en cancha para su posterior carguío, transporte y alimentación a las operaciones siguientes. El agua recuperada de la filtración (provenientes del vacío generado de esta etapa) se recircula a las distintas operaciones de planta.

La filtración es un proceso que separa sólidos de líquidos, usando un medio filtrante que retiene el sólido, pero permite pasar el líquido. Para que esta separación sea posible se requiere que exista una diferencia de presión entre la cara anterior del

medio filtrante, donde se alimenta la pulpa, y la cara posterior, lo que se consigue en nuestro caso aplicando vacío. Como resultado de esta operación se obtiene un líquido prácticamente libre de partículas, y un producto sólido con algún grado de humedad, denominado queque, que queda adherido al medio filtrante. En realidad, el medio filtrante actúa más bien como soporte del queque, ya que el verdadero filtro lo constituyen las capas del queque que progresivamente se va formando.

El medio filtrante se selecciona, principalmente, por su capacidad para retener los sólidos sin que se presente obstrucción, pero además debe ser mecánicamente fuerte, resistente a la corrosión y permeable al flujo del líquido filtrado, lo que se consigue con telas fabricadas de material textil de fibra sintética.

**Tabla 6:** Parámetros de rendimiento de filtro

Vida Útil (Año)	20
Tipo e Equipo	GPT120-10
Aspecto Dimensión (largo*alto* ancho) (m)	7,27×3,74×3,65
Eficiencia de Filtración (t/m <sup>2</sup> ·h)	≥0,65
Contenido Humedad de torta del filtro (%)	≤9,50
Concentración de filtrado (%)	≤1,50
Concentración Másica del Overflow (%)	≤20
Volumen de desbordamiento / volumen de alimentación del material (%)	≤10
Volumen del aire comprimido para la descarga de material (Nm <sup>3</sup> /min·piez)	10
Presión de aire comprimido descarga material (Psi)	20
<b>Filtro de discos</b>	
Diámetro del disco de filtro (m)	3,10
Cantidad de disco de filtro (Pieza)	10
Velocidad de rotación disco de filtro (rpm)	0,10-1
N° de Sectores filtro para cada disco (Pieza)	20
Material del Sector del filtro	Plásticos de alta resistencia
	A

<b>Tela filtrante</b>	
Material	Polipropileno
Ciclo de reemplazo (Día)	30

*Nota:* La tabla presenta datos de rendimiento de los filtros de discos.

**Tabla 7:** Datos técnicos de operación del filtro de disco

Vida Útil (Año)	20
Cantidad	18 operación y 2 stand by
Tipo de carga	Pesado
Alimentación de materia	Pulpa de mineral de hierro
Grado del mineral (%)	68,50 – 71
Densidad del Mineral (t/m <sup>3</sup> )	4,84
Tamaño de alimentación (µm)	F80 = 44
Conc alimentación (%)	60 – 65
Proporción pulpa de mineral (t/m <sup>3</sup> )	2,05
Capacidad de manejo (tms/h· pieza)	73-88 (filtrado y el ciclo de Overflow)
Capacidad de manejo (cantidad de pulpa) (m <sup>3</sup> /h·pieza)	55-66 (filtrado y el ciclo de Overflow)
Coefficiente de filtración (tms/m <sup>2</sup> ·h)	≥ 0,65
Área de filtrado (m <sup>2</sup> )	120
Contenido humedad de torta (%)	≤9,50
Cantidad de tanque de aire (Pieza)	8
Bomba de Vacío (Pieza)	12 operación y 4 stand by)
Agua para sello de bomba	Agua desalinizada

*Nota.* La tabla presenta datos técnicos y operativos de los filtros de discos.

### 2.3 Definición de Términos Básicos

**Agua de proceso:** Es generado en el overflow de los espesadores de relaves, posteriormente este flujo es reutilizado en el proceso de producción tales como: dilución de pulpa en molidos, dilución para bombas, aspersores para zarandas, dilución para celdas de flotación, filtros, etcétera (ver anexo 3).

**Agua de sello (agua desalinizada):** Este flujo se produce eliminando las sales del agua de mar (desalinización) mediante el proceso de ósmosis inversa. La osmosis Inversa es la transformación de una sustancia salada a una purificada, en este proceso se separa el agua de la sal a través de la presión sobre el líquido, esta presión depende de la cantidad de sólidos y del grado de desalinización que se quiera obtener (ver anexo 2).

**Alteración:** Se refiere a “proceso físico-químico de transformación de una roca por efecto de la temperatura, presión y/o circulación de fluidos” (Castro, 1 989) [8].

**Concentrado:** “es el mineral valioso que se obtiene por el procedimiento de concentración empleado y que contiene la mayor parte de la especie mineral valiosa, que cumple con las especificaciones del mercado” (Ballester et al., 2 000) [2].

**Ganga:** “Aquellos minerales que acompañan a los minerales de mena, pero que no tienen valor económico, tales como: el cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), pirita ( $\text{FeS}_2$ ), etcétera. En general, presentes en una proporción mayor” (Castro, 1 989). [8].

**Granulometría:** “Esta permite conocer la medida de las partículas de una determinada muestra. Mediante el análisis granulométrico se puede obtener información importante como: su origen, propiedades mecánicas y el cálculo de la

abundancia de cada uno de los granos según su tamaño dentro de la escala granulométrica” (Ballester et al., 2 000) [2].

**Metalurgia:** “Es la técnica de la obtención y tratamiento de los metales desde minerales metálicos hasta los no metálicos” (Ballester et al., 2 000) [2].

**Mena:** “Agregado de mineral sólido, natural, utilizable, puede ser tal como se extrae, del cual uno o más componentes valiosos se pueden recuperar económicamente. Ejemplo: menas de Cu: Calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ), Calcosina ( $\text{Cu}_2\text{S}$ )” (Castro, 1 989) [8].

**Meteorización:** “Es la descomposición de minerales y rocas que ocurre sobre o cerca de la superficie terrestre cuando estos materiales entran en contacto con la atmósfera, hidrósfera y la biósfera” (Castro, 1 989) [8].

**Mineral ROM:** “Es la producción a boca de mina, y ROM Pad es el lugar donde se deposita esa producción a procesar” (Castroviejo et al., 2 003) [9].

**Mineralización:** “Término general, el cual se refiere usualmente a mineral es de mena, pero que a menudo se utiliza para referirse a otros minerales metálicos como pirita. También suele usarse para referirse al proceso por el cual se producen concentraciones de minerales de mena” (Castroviejo et al., 2 003) [9].

**Mixtos o intermedios:** son los productos sobre los que no se ha podido realizar una buena separación de mena y ganga, y que necesita ser sometido a un tratamiento adicional.

**Ley de cabeza:** “Contenido de finos en el mineral que entra al proceso de concentración” (Ballester et al., 2 000) [2].

**Recuperación:** “Es la proporción expresada como %, del elemento valioso obtenido en el concentrado respecto al total que ingresa al tratamiento” (Ballester et al., 2 000) [2].

**Roca de caja o roca huésped:** “Se refiere a la unidad litológica que contiene a la mineralización (minerales de mena y ganga)” (Castroviejo et al., 2 003) [9].

**Relave o colas:** “Fracción sin valor económico que se separa del concentrado durante el tratamiento, compuesto fundamentalmente por ganga y pequeñas cantidades de mineral valioso” (Ballester et al., 2 000) [2].

## **2.4 Formulación de Hipótesis:**

### **2.4.1 Hipótesis General**

1. Un eficiente análisis de la ampliación de planta concentradora permitirá incrementar la producción de concentrado de hierro.

### **2.4.2 Hipótesis Específicos**

1. Al analizar la influencia de la caracterización del mineral permitirá mejorar la producción de concentrados.
2. Al Identificar los reactivos adecuados permitirá aumentar la tasa de recuperación y calidad de concentrado.

## **2.5 Identificación de Variables**

### **2.5.1 Variable dependiente (Y)**

Incremento de producción

### **2.5.2 Variable independiente (X)**

Ampliación de planta concentradora

## 2.6 Definición Operacional de Variables e Indicadores

**Tabla 8:** Operacionalización de Variables e Indicadores

<b>Variables</b>	<b>Definición Conceptual</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Indicador</b>	<b>Técnicas e instrumentos</b>
(V.I) Ampliación de planta concentradora	Es el proceso de adecuación y adquisición de equipos, aumento de la fuerza laboral, desarrollo de nuevos productos y procesos de operación. Se emplea para mantener la tendencia de crecimiento de una empresa.	Capacidad de equipos.  Comisionamiento.	Toneladas por hora.  Incremento de equipo.  Confiabilidad de equipos.  Inspecciones.  Implementación procedimientos.  Cronograma de entrega equipos.	Análisis documental, Observación experimental.
(V.D) Incremento de producción	Se refiere a satisfacer la demanda potencial de los productos y servicios que ofrece una organización, es importante visualizar el proceso de crecimiento sobre un horizonte temporal con el fin de mejorar la capacidad productiva y calidad.	Pruebas metalúrgicas.  Calidad de producto.  Tonelaje de producción.	F80, P80. Grado liberación. Densidad. Consumo energía.  Grado de concentrado  Grado recuperación.	Análisis documental, Observación experimental.

## CAPÍTULO III

### METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

La investigación utiliza como vía a la ciencia para enriquecer los conocimientos, este aspecto es un proceso de vital importancia para el hombre en su labor cotidiana. La acción de explorar se caracteriza por ser reflexiva, sistemática y metódica, tiene por propósito obtener conocimientos y solucionar problemas (científicos, formales o empíricos), esto se debe desarrollar mediante procesos determinados (Quezada, 2 016) [23].

#### 3.1 Tipo de Investigación

Teniendo en cuenta los objetivos de la investigación y la naturaleza del problema planteado para el desarrollo del presente estudio, se empleó el tipo de Investigación **cuasi experimental**, porque permite responder a los problemas planteados de acuerdo al tratamiento de minerales para obtener concentrados de hierro. Este tipo

de investigación se caracteriza porque el sujeto de estudio no se selecciona de forma aleatoria, sino que se encuentra establecido.

### **3.2 Nivel de investigación**

En este punto, el nivel de investigación es descriptiva por que el estudio se realizó a fines del año 2 020 en la unidad minera Shougang Hierro Perú, Ubicada en ciudad de Marcona – Nazca, donde intentaremos conocer, identificar, describir las características de los fenómenos que afectan a la variable respuesta.

### **3.3 Método de Investigación**

La metodología de investigación se inicia luego de haber realizado la formulación del estudio de investigación que comienza con el planteamiento del problema, se procede con el **método descriptivo** el cual consiste en observar el comportamiento de los individuos, variables y registrar datos. Todo con la finalidad de precisar, clasificar y caracterizar el objeto de estudio, lo que permite plantear estrategias a nivel de planta, para definir los parámetros, materiales y equipos necesarios.

### **3.4 Diseño de Investigación**

El diseño empleado en la Investigación es mixto, el trabajo en forma general se presenta con carácter **descriptivo correlacional**, se describe el comportamiento de hechos tal como son observados e identificaremos la relación de las variables

dentro del proceso de producción. Dentro de la investigación será necesario realizar muestreo y análisis en los circuitos con mayor relevancia, en este punto la investigación será **Cuasi - experimental**, porque se tratan valores que ya conocidos y carecen de asignación aleatoria.

### **3.5 Población y Muestra**

#### **3.5.1 Población**

La población es el material de mina que cuenta con reservas probadas y probables por más de 2 215 millones de toneladas, el mineral es clasificado en forma de bloques mineralógicos, para ser extraído progresivamente de acuerdo a su valor económico.

#### **3.5.2 Muestra**

El muestreo es del tipo transversal por desarrollarse en tiempos determinados en un proceso continuo. Un parte de las muestras son proporcionadas por área de geología y otra es tomada de diversos puntos de planta (alimento a planta concentradora, separadores magnéticos y celdas de flotación). En total comprenden 52 muestras reducidas a 2 kilogramos (kg) cada una, posteriormente son acondicionadas para análisis químico y pruebas físicas.

### **3.6 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos**

Por medio de la observación, se identifica las variaciones en el comportamiento de los fenómenos y registrar la información para su posterior análisis. Mediante el análisis de registros, una parte de la información se almacena en la base datos de sala control para su posterior procesamiento. Como instrumento de recolección de datos se utiliza listas de cotejo para recabar información y llevarla a un registro de datos (hoja de control, plantillas), en su mayoría hojas Excel, acondicionadas con los formulas usadas en el área del procesamiento de minerales, para la determinación de: análisis granulométrico, medición de densidad, análisis de leyes, determinación de gravedad específica, medición de flujos y pesos. Asimismo, como fuentes primarias se obtendrá información por contacto como el sujeto de estudio por medio de la observación, como fuente secundaria la información será obtenida de los reportes de producción.

### **3.7 Selección, Validación y Confiabilidad de los Instrumentos de Investigación**

Los instrumentos utilizados para llevar a cabo mediciones y análisis de diversos tipos son: equipo de absorción atómica, ro-tap, picnómetro, balanza, test de Bond, etcétera. Los datos obtenidos son almacenados en listas de cotejo (hoja de control) que sirvieron para recabar la información y llevar un registro. El laboratorio de la unidad minera, donde se realizó las mediciones, cuenta con certificación ISO

17025: 2017, la cual garantiza la validez y confiabilidad de los instrumentos utilizados.

### **3.8 Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos**

Como mencionan Hernández y Olmos [14] consiste en “procesar los datos (dispersos, desordenados e individuales) obtenidos de la población objeto de estudio, con el propósito de convertirlos en información significativa y posterior interpretación de resultado.” (2011, p. 12).

El procesamiento se desarrolló mediante la técnica de consistencia que radica básicamente en depurar la información no confiable mediante la revisión de datos debido algún descuido al momento de las pruebas (Silvestre y Huamán, 2019) [27], muestras contaminadas o expuestas al ambiente por tiempos prolongados. En esta etapa se determina como analizar los datos y que herramientas de análisis estadístico son adecuadas para este propósito.

### **3.9 Tratamiento Estadístico**

Para el tratamiento de datos se usó hojas de cálculo Excel y el programa estadístico MINITAB. Los datos son procesados en plantillas que contienen fórmulas para la determinación de valores de interés para el estudio. Se han aplicado técnicas de cálculo propias del área de metalurgia, por ejemplo: densidades, gravedad

específica y volúmenes para realizar los balances de masa y metalúrgicos; igualmente, se emplearon técnicas de estadística básica.

### **3.10 Orientación Ética Filosófica y Epistémica**

En el presente proceso de la investigación el acto ético se ejerce de manera veraz, honesta, responsable y transparente. La información está debidamente presentada y referenciadas, por lo tanto, se demuestra permanecer dentro de los principios éticos.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **4.1 Descripción del Trabajo de Campo**

Se describe los tipos de mineral a procesar y los métodos que han sido seleccionados para el tratamiento de los minerales proveniente de mina, con la finalidad de lograr productos comercializables a velocidades de recuperación aceptables. El trabajo está basado en una serie de pruebas, que corresponden a los lotes y muestras recolectadas. Adicionalmente, la experiencia operativa y los resultados de la planta de procesamiento fueron considerados para determinar el proceso.

##### **4.1.1 Introducción a la metalurgia y diseño del proceso**

Se conoce que los minerales de Marcona son complejos y los parámetros de calidad varían en rangos amplios, estas particularidades también son propias de los

minerales encontrados en sus exploraciones. Los nuevos depósitos fueron explorados en su mayoría por medio de testigo, por lo tanto, las muestras estuvieron disponibles para las pruebas de laboratorio e investigar el comportamiento de beneficio de estos minerales.

Primeramente, los concentrados de hierro deben cumplir con estas especificaciones para ser usados en los altos hornos, contener: Fe en 67,0 %,  $\text{SiO}_2$  entre 3 – 3,50 %, azufre (S) < 0,10 % y contenido de cobre lo más bajo posible. Una parte de los depósitos explorados consisten en minerales en transición, bajos en magnetita, y se complementada con minerales que contienen hierro como fase dominante.

Dado que los minerales son igualmente duros con una resistencia a la compresión < 400MPa (mega pascal), la elección de un sistema de molienda con un consumo de energía mucho menor tiene un gran impacto en la economía del proyecto. El estudio de compensación para la selección del proceso y los resultados de las pruebas de laboratorio han preparado las bases para la ruta de procesamiento seleccionada. La ruta del proceso fue definida básicamente de la siguiente forma:

- ✓ Chancado primario y secundario por medio de chancadoras giratorias.
- ✓ Molienda primaria con rodillos de molino de alta presión (HPGR).
- ✓ Molienda secundaria en molino de bolas.
- ✓ Separación magnética de baja intensidad (LIMS) para recuperar la magnetita.
- ✓ Flotación para eliminar los minerales de azufre del concentrado.

- ✓ Separación magnética de alta intensidad (HIMS) para recuperar la hematita (solo mineral oxidado).
- ✓ Agotamiento del agua de los concentrados en filtros rotativos.
- ✓ Espesado de relaves en espesadores de alta capacidad.

La ruta del proceso descrita brevemente arriba, permite la producción de concentrados comercializables para concentración en separadores de baja intensidad (LIMS) y separadores de alta intensidad (HIMS) a velocidades de recuperación aceptables.

Shougang Hierro Perú viene operando plantas de procesamiento para el beneficio del mineral de hierro en minas existentes hace más de 4 décadas. Se decidió llevar a cabo pruebas adicionales con muestras de las minas propuestas 11, 14 y 21 por su composición diferente. Previo al inicio del desarrollo de los diagramas de flujo para el proyecto de expansión de las Minas de Shougang, se desarrolló prueba con el fin de obtener información suficiente en términos de propiedades mineralógicas, físicas y químicas.

#### **4.1.2 Mineralogía**

Se llevaron a cabo diversos análisis para determinar la composición de los minerales de Marcona durante el estudio, las pruebas iniciales de laboratorio tienen una composición química la cual se muestra en la *Tabla 9*.

**Tabla 9:** Composición química de las muestras para las Investigaciones Mineralógicas

<b>Análisis Químico - 6 Muestras de Laboratorio</b>								
<b>Muestras</b>		<b>Mina 21</b>	<b>Mina 21</b>	<b>Mina 21</b>	<b>Mina 11</b>	<b>Mina 14</b>	<b>Mina11+14</b>	<b>Mina 14</b>
	<b>N°</b>	<b>Mineral Oxidado</b>	<b>Mineral Primario</b>	<b>Mineral Primario</b>	<b>Mineral Oxidado</b>	<b>Mineral Oxidado</b>	<b>Mineral Oxidado</b>	<b>Mineral Primario</b>
		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>4+5</b>	<b>6</b>
Fe tot.	%	56,80	40,20	54,60	64,70	57,00	62,14	58,90
FeO	%	2,42	19,44	23,10	2,10	8,02	4,07	22,94
SiO <sub>2</sub>	%	11,70	27,00	12,55	2,95	8,52	4,80	6,81
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	2,06	5,15	2,25	0,36	0,40	0,37	0,37
CaO	%	0,41	2,38	1,75	0,16	1,78	0,70	1,55
MgO	%	0,44	1,90	1,28	0,38	1,60	0,79	2,02
P	%	0,054	0,078	0,051	0,027	0,045	0,033	0,029
S	%	0,34	3,38	4,25	0,22	1,01	0,48	3,12
Na <sub>2</sub> O	%	0,14	0,47	0,06	0,04	0,72	0,27	0,12
K <sub>2</sub> O	%	0,14	0,66	0,11	0,04	0,10	0,06	0,03
Mn	%	0,064	0,145	0,110	0,030	0,034	0,031	0,032
TiO <sub>2</sub>	%	0,12	0,25	0,15	0,03	0,052	0,037	0,16
V	%	0,006	0,021	0,012	0,002	0,22	0,075	0,23
Magne tita	%	7,4	23,6	61,0	6,0	8,9	7,0	68,6
<b>Índice Fe/FeO</b>		<b>23,5</b>	<b>2,07</b>	<b>2,36</b>	<b>20,8</b>	<b>7,11</b>	<b>15,3</b>	<b>2,57</b>
Cr	%	0,007	0,006	0,003	0,007	0,006	0,007	0,005
Co	%	0,026	0,02	0,028	0,055	0,006	0,039	0,008
Ni	%	0,004	0,015	0,009	0,003	0,028	0,011	0,043
Cu	%	0,145	0,161	0,198	0,144	0,046	0,111	0,077
Zn	%	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	1,81
Pb	%	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,071	0,023	0,355
As	%	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	0,008	0,001	0,013
Cd	%	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,001	0,007
Tl	%	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005

*Nota.* La tabla presenta el análisis químico realizado a 6 muestras, tanto para minerales primarios y oxidados.

Resumiendo, se pueden establecer que los resultados de las muestras cubren una amplia variedad de meteorización desde muy resistente en la muestra 1 y otros como las muestras 4 y 5 (que representa material resistente y medianamente meteorizado), hasta con poca meteorización en las muestras 2, 3 y 6.

La magnetita y la hematita son los minerales de hierro primarios, y la meteorización incrementa la cantidad de hematita y limonita. Las muestras 1 y 4 tienen muy poca pirita, mientras que las demás muestras tienen componentes de pirita/calcopirita.

La muestra 6 destaca por el contenido evidente de esfalerita, calcopirita y pirita, además de galena.

Las muestras presentan dos tipos de hematita: una es la martita como resultado de la meteorización de la magnetita; el otro tipo es una hematita que bordea la magnetita o ganga, y puede afirmarse como hematita primaria. Parte de la magnetita es cristalizada finamente hasta 10  $\mu\text{m}$  e incluso más fina y es incrustada en las fases de la ganga. En gran cantidad, la hematita primaria es asociada con pirita o calcopirita.

#### **4.1.3 Identificación de minerales**

Los minerales que van a ser explotados para procesar en la nueva planta muestran un margen de fluctuación amplio en el contenido de magnetita. Para mejorar el conocimiento sobre los minerales en términos de comportamiento en su beneficio se realizaron pruebas.

El valor de proporción Fe/FeO da un indicio bastante bueno sobre la etapa de meteorización de cualquier mineral como magnetita, martita y hematita considerando que un valor de proporción de 2,30 indica magnetita pura (minerales primarios), valores de 8 a 16 minerales de transición y valores mayores a 16 indican

minerales muy meteorizados (minerales oxidados). Al investigar los minerales de Marcona, el valor de proporción Fe/FeO se volvió significativo para la tipificación de los minerales, especialmente para el diagrama de flujo que sería aplicado para el procesamiento.

La proporción Fe/FeO y el contenido de hierro del mineral crudo varían entre minerales de baja ley con un mínimo de 20 % de Fe y minerales de alta ley hasta 60 % de Fe, el contenido de azufre del mineral crudo también varía entre 1,0 a 3,0 %, además la diseminación de las diferentes fases minerales que tiene un impacto en la liberación por molienda. En general, los minerales que se pretenden procesar en la nueva planta de procesamiento se muestran en amplias variedades.

**4.1.3.1 Proporción  $Fe/FeO \leq 8$  (Mineral primario):** Para los Minerales primarios, la fase principal del mineral es la magnetita que está meteorizada ligeramente a martita y hematita. Además, las fases del mineral de azufre ocurren como pirita, calcopirita y esfalerita; los tamaños de los granos están en una gama milimétrica (mm) a menos. Los minerales primarios con una proporción Fe/FeO de 4 a  $\leq 8$  están más meteorizados y además el contenido de magnetita tienen más martita, hematita y limonita; los azufres son parcialmente meteorizados a limonita. Para la liberación de las fases minerales, se tiene que realizar una molienda  $< 0,10$  mm e incluso más fina para la recuperación de los concentrados deseados.

**4.1.3.2 Proporción  $Fe/FeO > 8$  (Mineral oxidado):** Para los Minerales oxidados, la fase mineral que contiene hierro dominante es la hematita, con poca porción de magnetita meteorizada (magnetita martita). La mayor parte del azufre es meteorizado a sulfatos hidrosolubles y limonita, por lo tanto, los sulfitos son raros. Además, se presenta hasta un 10 % del yeso según el tipo de muestra. Los minerales óxidos con una proporción  $Fe/FeO$  de 8 a 16 son meteorizados; además, la martita, hematita y limonita contienen todavía un poco de magnetita. Finalmente, los minerales oxidados también deben ser molidos a  $< 0,10$  mm e incluso más finos para la liberación de las fases minerales, para la recuperación de los concentrados.

#### **4.1.4 Índice de Trabajo de Bond**

La mayoría de las muestras son sometidas a la prueba del índice de trabajo de Bond, que varían entre 13-14 Kwh/t (kilowatt-hora por tonelada métrica). Como cifra más baja para un mineral primario con alto contenido de hierro, se obtuvo 9,10 Kwh/t; y para un mineral meteorizado (con índice  $Fe/FeO$  de 35,20) que corresponde al valor más alto con 15,90 Kwh/t. Se tiene que considerar que este alto índice de trabajo de Bond es quizás el resultado de una prueba que no ha sido llevada a cabo adecuadamente. Las pruebas en molino de barras a escala de laboratorio indican que los minerales con una proporción menor (índice  $Fe/FeO$  de 3,50) tienen facilidad para ser sometidos a una molienda más suave.

#### **4.1.5 Pruebas de Separación en Seco**

Al aplicar la separación en seco en el mineral de cabeza, principalmente a granulometría < 30 mm, a través de una separación magnética de baja intensidad con tambor, una cantidad de relaves pueden ser desechados antes de cualquier molienda, por lo tanto, se predispone al proceso a recudir su carga.

En este punto el mineral rechazado por los separadores puede contener de 26,0 % hasta un 37,0 % en peso de relave, alcanzando una refinación a 34,10 % de hierro; las pérdidas de hierro fueron analizadas en un 19,90 % y las pérdidas de magnetita en un 7,0 %. Cuando el contenido de hierro es mayor en el mineral de cabeza, el desecho de los relaves disminuye, las pérdidas de magnetita y hierro también disminuyen. Es probable que la separación en seco sea efectiva solo en cantidades de desecho < 15,0 % en peso, que es alcanzada en minerales de cabeza con niveles de hierro alrededor de 45,0 %.

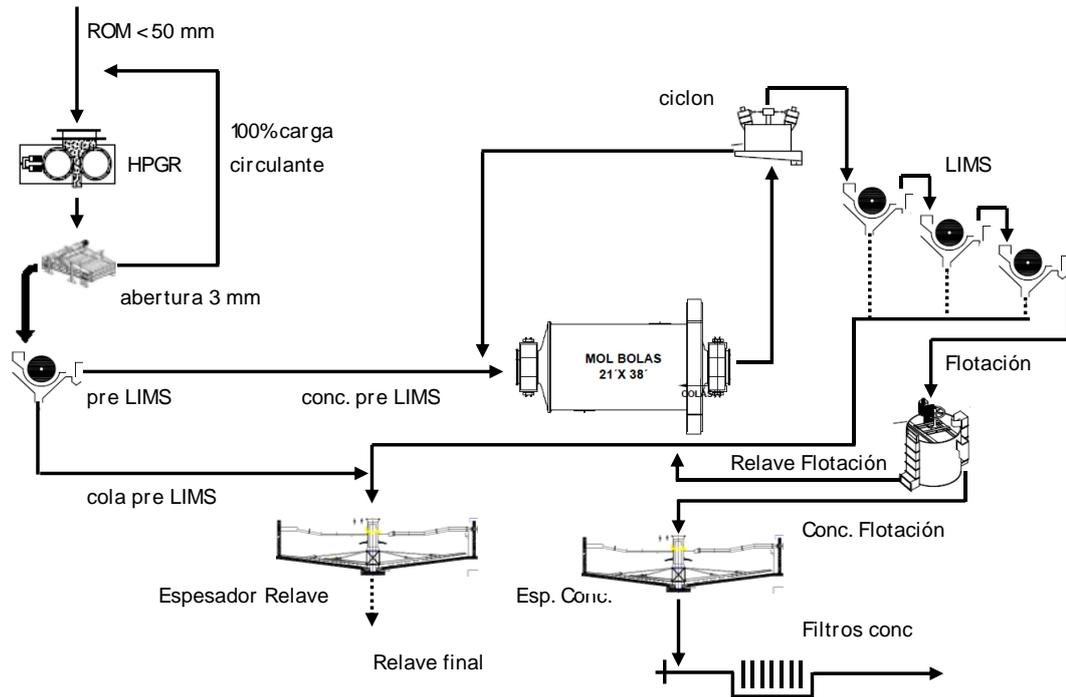
#### **4.1.6 Pruebas Piloto**

En la práctica general, en la industria de procesamiento minero se opta por confirmar los resultados de las pruebas de laboratorio con pruebas de planta piloto. Después de las pruebas a escala de laboratorio, se prepararon dos propuestas: una para minerales primarios y otra para minerales oxidados.

**4.1.6.1 Pruebas de planta piloto con mineral primario:** Basado en los hallazgos de las pruebas a escala de laboratorio, los minerales primarios tienen que ser mejorados según el siguiente diagrama (ver figura 9) y procedimiento:

- ✓ Alimentación de partículas al circuito < 50 mm.
- ✓ Molienda con prensas de rodillo de los minerales < 50 mm a < 3 mm en un circuito cerrado con zarandas.
- ✓ Separación magnética en húmedo del flujo inferior de la zaranda (< 3 mm), para la recuperación de un pre concentrado y el desecho de relaves gruesos.
- ✓ Remolienda del pre concentrado con molino de bolas en un circuito cerrado con un ciclón.
- ✓ Separación magnética de baja intensidad en húmedo de 3 - 4 etapas del flujo inferior del ciclón.
- ✓ Si fuera necesaria, flotación de la separación magnética de baja intensidad en húmedo del concentrado para la reducción de azufre y para la recuperación de un concentrado final.

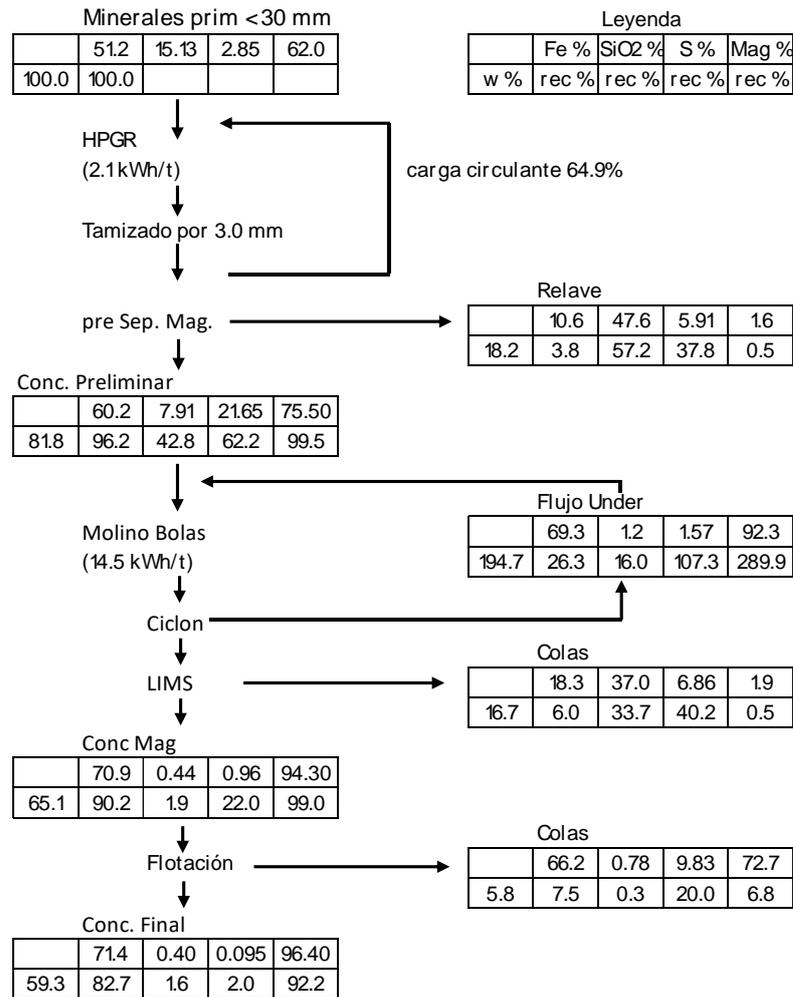
**Figura 9:** Propuesta de diagrama simplificado para minerales primarios



*Nota.* La figura muestra el diagrama de flujo propuesto para el tratamiento de minerales primarios de hierro.

La prueba de planta piloto se realizó alimentando una mezcla de las minas 3, 4 y 5 con contenidos: hierro de 51,20 %, 15,10 % de  $\text{SiO}_2$ , 2,80 % de S, 62,0 % magnetita y alrededor del 86,0 % del hierro está como magnetita. El balance resumido para valores de masa, hierro, silicio, azufre y magnetita se presenta en la *Figura 10*.

**Figura 10:** Balance de masa - Prueba con mineral primario



*Nota.* Se presenta el balance resumido para masa, hierro, oxido de silicio, azufre, magnetita y sus respectivos % de recuperación en cada etapa del modelo.

Mediante molienda con prensa de rodillo en un circuito cerrado con zaranda en húmedo a malla pasante de 3 mm, se registró un consumo de 2,10 Kwh/t de energía respecto a la muestra de mineral, para obtener un material que pasa por la zaranda con un valor d80 de 1,40 mm. Mediante la separación LIMS seguida de una clasificación en húmedo del material, se puede obtener un pre concentrado con 60,20 % de Fe y valores de recuperación de 81,80 % en peso (W). La remolienda del pre concentrado en un circuito cerrado con un consumo de energía de 14,50 Kwh/t, seguida

de una separación magnética de 4 etapas, condujo a un concentrado magnético con 70,90 % de Fe, 2,11 % de SiO<sub>2</sub>, 0,96 % de S y 94,30 % de magnetita; asimismo, el valor d80 se calculó en 0,036 mm.

Algunas investigaciones se han realizado para la molienda en molino de bolas más gruesas, seguida de la LIMS, remolienda y flotación. Mediante la remolienda (d80 de 0,025 mm) del concentrado magnético y seguida de una etapa de flotación, se puede obtener un concentrado final con 71,40 % de Fe, 0,40 % de SiO<sub>2</sub> y 0,095 % de S, sin embargo, a los valores de recuperación descendientes.

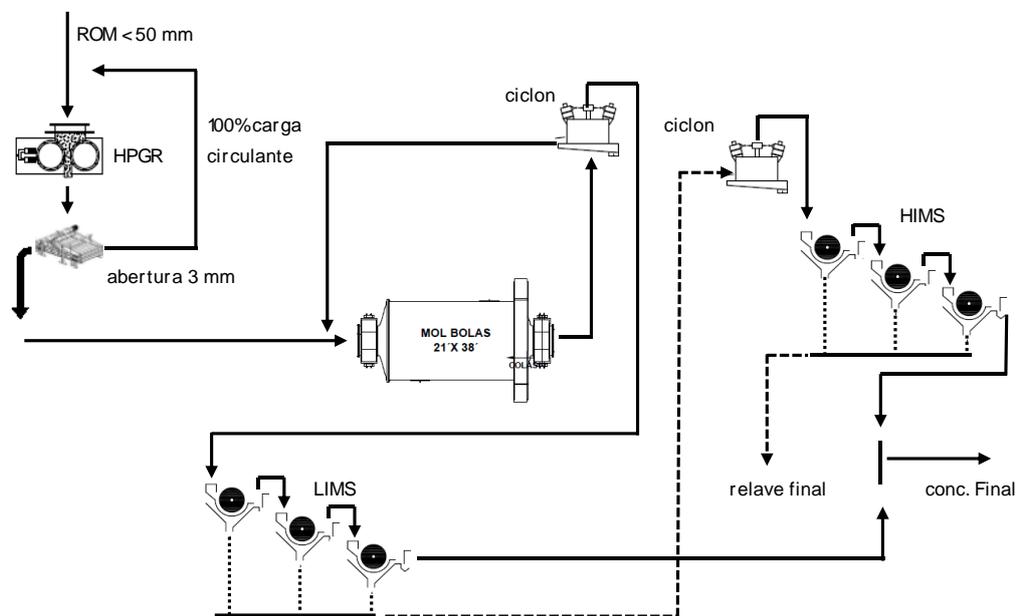
Finalmente, con respecto al contenido de hierro y sílice luego de la molienda gruesa a < 0,10 mm, el concentrado magnético ya se ajusta de forma suficiente a las leyes deseadas, únicamente el contenido de azufre será mucho más alto. Por lo tanto, se aplicó flotación de forma adicional para la reducción de azufre.

**4.1.6.2 Pruebas de planta piloto con mineral Oxidado:** Basados en los hallazgos de la prueba a escala de laboratorio, los minerales oxidados corresponden a las minas 14 y 21, y tienen que ser mejorados de acuerdo al siguiente diagrama (*figura 11*) y proceso:

- ✓ Chancado en 2 etapas a < 50 mm.
- ✓ Chancado de mineral por prensa de rodillos con alimentación < 50 mm a >3 mm (después de la clasificación se recircula la fracción > 3,0 mm).

- ✓ Molienda de la fracción < 3 mm, en un molino de bolas a un valor d80 de aproximadamente 0,04 mm en circuito cerrado con hidrociclón.
- ✓ LIMS húmedo de 2 - 3 etapas, el material alimentación será previamente clasificado por ciclones.
- ✓ Separación HIMS de 2 - 3 etapas para la recuperación del concentrado final de hematita.

**Figura 11:** Propuesta de diagrama simplificado para minerales Oxidados

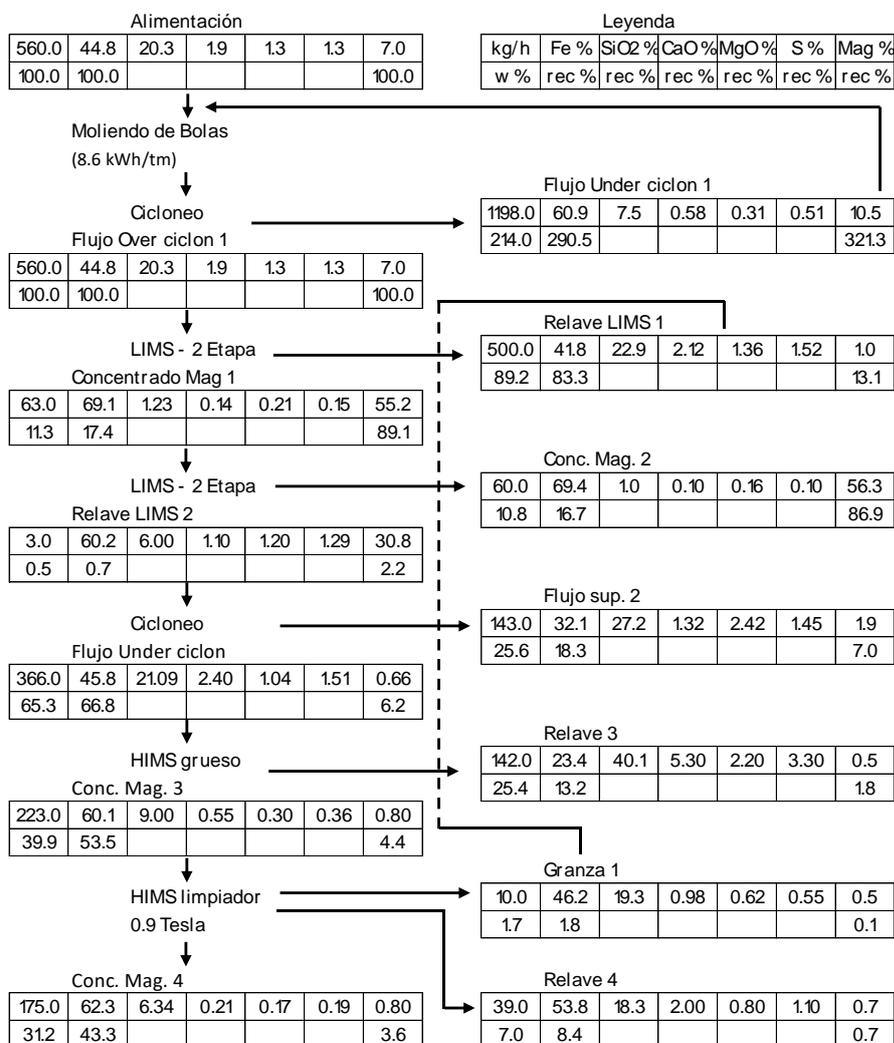


*Nota.* La figura muestra el diagrama de flujo propuesto para minerales oxidados de hierro.

Si los minerales oxidados tienen alto contenido de limonita y yeso, las zarandas en húmedo de la descarga de los HPGR a 3 mm no se podrán ejecutar, debido a que no se pueden desaglomerar las escamas producidas por la molienda por prensa de rodillos, por lo tanto, se propone alimentar la descarga de la prensa directamente al molino de bolas aguas abajo. Se

espera que las partículas no reducidas por los HPGR sean disueltas en la molienda.

**Figura 12:** Balance de masa - Prueba con con mineral oxidado



*Nota.* Se presenta el balance resumido para masa, hierro, oxido de silicio, azufre, magnetita y sus respectivos % de recuperación en cada etapa del modelo para la muestra 3.

La segunda serie de pruebas fue llevada a cabo con una mezcla de mineral de las Minas 11, 14 y 21 que contienen 40,20 % de Fe, 20,50 % SiO<sub>2</sub>, 2,35 % azufre, 6,0 % magnetita (valor de relación Fe/Feo 21,4), cerca de 10,80

% del hierro es debido a la magnetita. Al procesar este mineral en particular, se notó que aproximadamente 10,0 % del peso se disuelve en agua. El contenido de hierro del mineral aumenta; sin embargo, el contenido CaO se reduce de 3,65 % a 1,21 %, MgO de 1,04 % a 0,80 %, y el contenido S de 2,35 % a 1,01 %.

Como se menciona anteriormente, no se pudo efectuar la molienda con prensa de rodillos en circuito cerrado para la muestra proporcionada de mineral oxidado, debido a que las escamas eran demasiado compactas para su criba en húmedo. Por medio de LIMS, se recuperó un primer concentrado final con 69,40 % Fe, 1,01 % SiO<sub>2</sub>, 0,10 % S. Por consiguiente, los relaves LIMS fueron centrifugados para su deslamado y para cargar la 1er separación HIMS con una resistencia en campo más alta de 1,1 Tesla, para recuperar un pre concentrado con 60,10 % Fe, 9,0 % SiO<sub>2</sub> y 0,36 % S.

Al reprocesar el pre concentrado en un 2da HIMS, a una resistencia de campo de 0,90 Tesla, la ley para Fe aumento a 62,30 % y la de SiO<sub>2</sub> disminuyo a 6,34 %, el contenido de S a 0,19 %. Solo 31,20 % por peso y 43,30 % para recuperación de hierro se pudieron alcanzar para esta etapa HIMS.

#### 4.1.7 Prueba de flotación

El trabajo de pruebas metalúrgicas mostró que la flotación está constituida por minerales que contienen hierro igual o superior a 58,0 %. Esto se debe, que la mayoría de minerales no magnéticos fueron desechados en las etapas de limpieza previas, separación magnética de baja intensidad (LIMS). El contenido de hierro del producto de limpieza (LIMS) se encuentra muy cerca al contenido de hierro del producto final (*Tabla 10*). El objetivo de la flotación es remover el azufre, cobre, zinc y sílice.

**Tabla 10:** Especificaciones de concentrado de hierro

<b>% Fe</b>	<b>% S</b>	<b>% Cu</b>	<b>% Zn</b>	<b>% SiO</b>	<b>H2O</b>
68,0 min.	0,20 max.	0,020 max	0,020 max	1,80 max.	8,5 max.

*Nota.* Se presenta los valores máximos permisible en la comercialización del concentrado de hierro.

El concentrado obtenido en la etapa de LIMS, contienen azufre, y están compuestos principalmente de magnetita con azufre; conformado por minerales como pirrotita y pirita. Estos minerales presentan contenidos considerables de hierro (pirita 40 % y pirrotita: 60 %, aproximadamente). El intercrecimiento de magnetita con estos azufres (con alto contenido de hierro) implica que los desechos de la etapa de flotación presenten alta ley de hierro.

**4.1.7.1 Identificación de muestras con alto contenido de zinc:** De acuerdo con la información proporcionada por el área de geología existe regiones mineralizadas, en la Mina 14, que presentan contenido de zinc elevados que podría afectar el proceso de beneficio en planta concentradora. Como se observa en la *Tabla 11*, en los datos se presenta valores máximos para el zinc de 2,46 % y una media de 0,62 %.

**Tabla 11:** Estadística básica de datos geoquímico

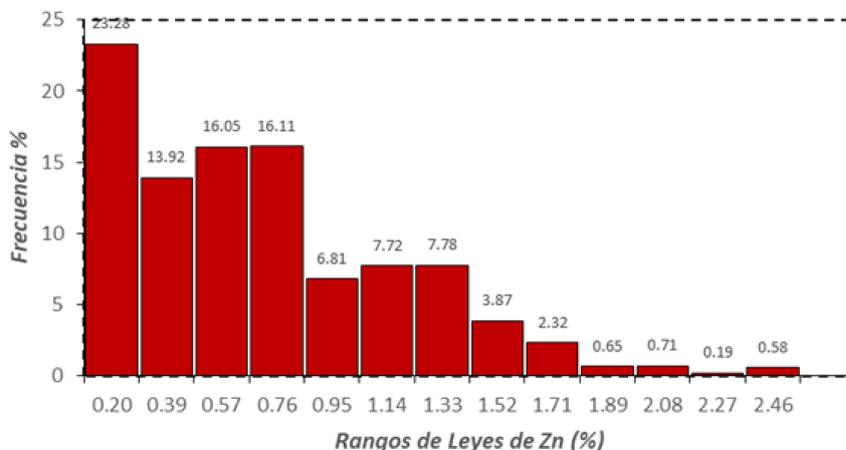
Estadística	Fe	FeO	S	Cu	Zn
Nº datos	3 114	3 114	3 109	3 102	3 097
Mínimo	27,60	9,00	0,28	0,028	0,009
Máximo	64,30	29,20	6,97	0,87	2,46
Media	54,15	21,83	3,40	0,092	0,617
Varianza	40,41	11,35	0,76	0,005	0,221
Desv. Std	6,35	3,37	0,875	0,068	0,470

*Nota.* La tabla presenta datos de las perforaciones brindados por el área de geología.

En el histograma (ver *Figura 13*) se puede apreciar que más del 30,0 % de las muestras contienen zinc superior a 0,95 %, lo que nos indica que se debería realizar pruebas para determinar la influencia de esta especie mineralógica en el concentrado final.

En la *Tabla 12* y *figura 14* se aprecia que existe una relación directa entre la profundización y el porcentaje de zinc encontrado en el yacimiento.

**Figura 13:** Histograma de datos geoquímico  
**Histograma**



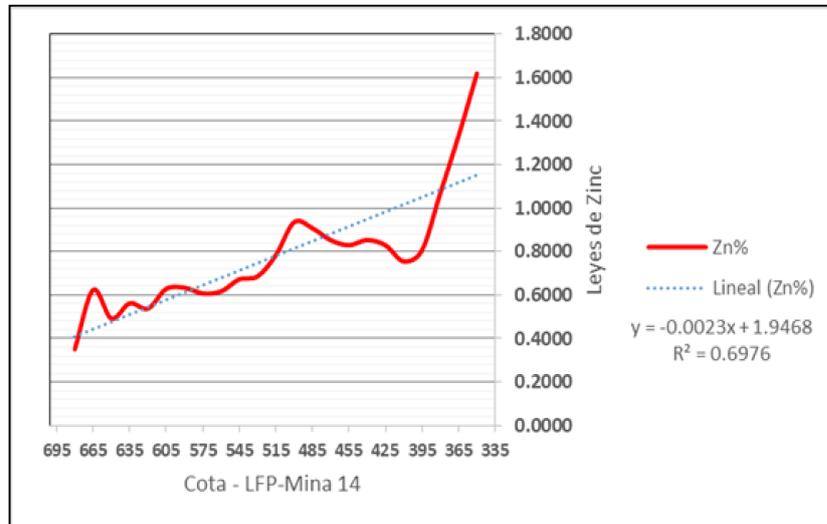
*Nota:* La figura modela un histograma sesgado hacia la derecha.

**Tabla 12:** Clasificación de la profundidad y contenidos metálicos

Rock	Nivel	Vol.	Ton.	Densid	Fe%	FeO%	S%	Cu%	Pb%	Zn%
PO	680	702	3,140	4,47	59,6	20,59	3,16	0,069	0,123	0,3510
PO	665	102,086	456,323	4,47	57,2	21,15	3,24	0,063	0,255	0,6232
PO	650	427,874	1,912,595	4,47	55,4	20,57	3,63	0,073	0,208	0,4920
PO	635	1,242,303	5,553,096	4,47	58,2	22,05	3,08	0,087	0,224	0,5620
PO	620	1,242,279	5,552,985	4,47	57,8	22,22	3,02	0,087	0,215	0,5377
PO	605	1,363,388	6,094,344	4,47	58,1	22,23	2,94	0,093	0,214	0,6285
PO	590	1,446,275	6,464,851	4,47	57,4	22,08	2,86	0,106	0,229	0,6337
PO	575	1,371,401	6,130,164	4,47	56,5	21,43	2,86	0,095	0,225	0,6076
PO	560	1,210,129	5,409,277	4,47	56,6	21,10	3,04	0,079	0,216	0,6167
PO	545	924,799	4,133,849	4,47	56,3	20,62	2,99	0,073	0,248	0,6722
PO	530	741,881	3,316,208	4,47	54,8	20,43	3,09	0,127	0,259	0,6859
PO	515	675,387	3,018,979	4,47	59,3	21,45	3,16	0,120	0,276	0,7839
PO	500	822,630	3,677,155	4,47	58,8	21,36	3,26	0,100	0,300	0,9352
PO	485	1,011,917	4,523,271	4,47	56,2	20,28	3,25	0,095	0,292	0,9075
PO	470	1,090,865	4,876,164	4,47	54,2	19,63	3,17	0,089	0,280	0,8526
PO	455	1,096,365	4,900,752	4,47	54,5	19,75	3,01	0,080	0,275	0,8297
PO	440	1,034,333	4,623,470	4,47	57,1	20,13	3,01	0,073	0,274	0,8531
PO	425	895,834	4,004,377	4,47	58,0	20,74	3,20	0,074	0,251	0,8288
PO	410	758,714	3,391,450	4,47	57,5	20,55	3,18	0,112	0,205	0,7546
PO	395	601,223	2,687,467	4,47	56,3	20,60	2,94	0,132	0,195	0,8062
PO	380	470,464	2,102,973	4,47	55,6	20,62	3,12	0,067	0,130	1,0701
PO	365	374,093	1,672,195	4,47	58,4	21,60	3,09	0,072	0,087	1,3328
PO	350	293,842	1,313,476	4,47	61,0	21,95	3,25	0,072	0,117	1,6192

*Nota.* Datos de análisis químico de taladros de perforación.

**Figura 14:** Concentración de zinc vs profundidad



*Nota.* La grafica lineal indica que a mayor profundidad la concentración de Zinc incrementa, con una correlación de 0,69.

## 4.2 Presentación, análisis e interpretación de resultados

### 4.2.1 Pruebas de Beneficio

La prueba en tubo Davis es un procedimiento comúnmente usado y muy confiable para simular la separación magnética de baja intensidad (LIMS). La siguiente *Tabla 13* representa el resumen de los hallazgos relacionados a la Mina 21.

Las muestras fueron analizadas por Fe y FeO, posteriormente fueron acondicionadas (moliendas a 100 % < 0,063 mm) para ser cometidas a la prueba tubo Davis. Después de realizarse el test, los valores obtenidos en la recuperación

nos servirán para calcular el índice Fe/FeO y finalmente se analizarán los resultados.

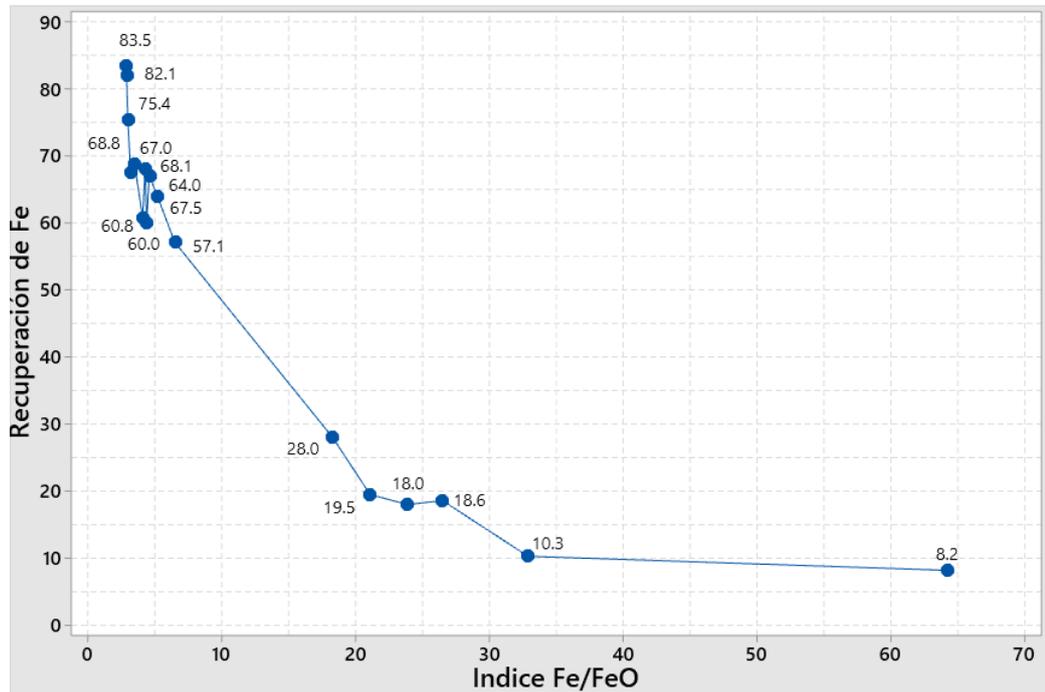
**Tabla 13:** Resultados de las Pruebas en Tubo Davis, Mina 21

Pruebas en Tubo Davis									
Muestra	Mina 21				Pruebas T. Davis 100 % < 0,063 mm				
	Fe %	FeO %	Índice Fe/FeO	Fe % Magneti	Peso %	Fe %	Fe <sub>rec.</sub> %	SiO <sub>2</sub> %	S %
3 Mina 21	54,6	19,1	2,8	80,4	65,8	64,2	83,5	2,29	0,19
(007) (100 kg)	40,1	14	2,9	80,6	48,1	68,4	82,1	3,14	0,135
2 Mina 21	40,2	13,2	3,0	75,9	65,8	71,0	75,4	2,78	0,13
(006) (100 kg)	33,9	10,6	3,2	72,0	34,0	67,2	67,5	4,73	0,185
8 Mina 21	33,6	9,7	3,5	66,7	33,4	67,4	68,8	3,69	0,155
DT 37	38,3	9,4	4,1	56,5	33,8	68,9	60,8	2,74	0,145
Muestras Control	41,8	9,8	4,3	54,1	41,8	68,1	68,1	2,31	0,12
DT 56	40,5	8,8	4,6	50,1	40,2	67,5	67,0	4,03	0,13
1 M, prueba Corto	31,3	7,1	4,4	59,6	28,3	66,6	60,0	4,34	0,138
3 M, prueba Corto	52,5	10,1	5,2	44,5	49,3	68,3	64,0	2,14	0,1
009 (100 kg)	41,3	6,4	6,5	35,7	34,3	67,0	57,1	2,38	0,073
010 (100 kg)	40,2	2,2	18,3	12,6	16,8	67,1	28,0	2,08	0,028
1 Mina 21	56,8	2,7	21,1	10,9	16,3	67,9	19,5	2,32	0,035
4 M, Prueba Corto	47,1	2,0	23,9	9,6	12,6	67,3	18,0	2,53	0,075
011 (100 kg )	42,5	1,6	26,5	8,8	12,1	65,4	18,6	3,54	0,05
7 grado bajo OXI	34,9	1,1	32,9	7,0	5,4	66,7	10,3	2,8	0,11
5 Control Corto	46,2	0,7	64,3	3,5	5,6	67,6	8,2	2,32	0,055

*Nota.* Se presenta los resultados de análisis por tubo Davis con una granulometría de alimentación 100 % < 0,063 mm. Las muestras están ordenadas de acuerdo al índice de Fe/FeO.

En las *figuras 15* y *figura 16* se muestran la relación entre los valores: índice Fe/Feo, el hierro como magnetita, y la recuperación de hierro a una molienda de 100 % < 0,063 mm dentro de las pruebas de Tubo Davis.

**Figura 15:** Relación Fe/FeO vs % Recuperación de Hierro- Mina 21



*Nota.* Las muestras tienen una granulometría 100 % < 0,063 mm. Los valores con índice de Fe/FeO < 4 se manifiestan con mayor % de recuperación.

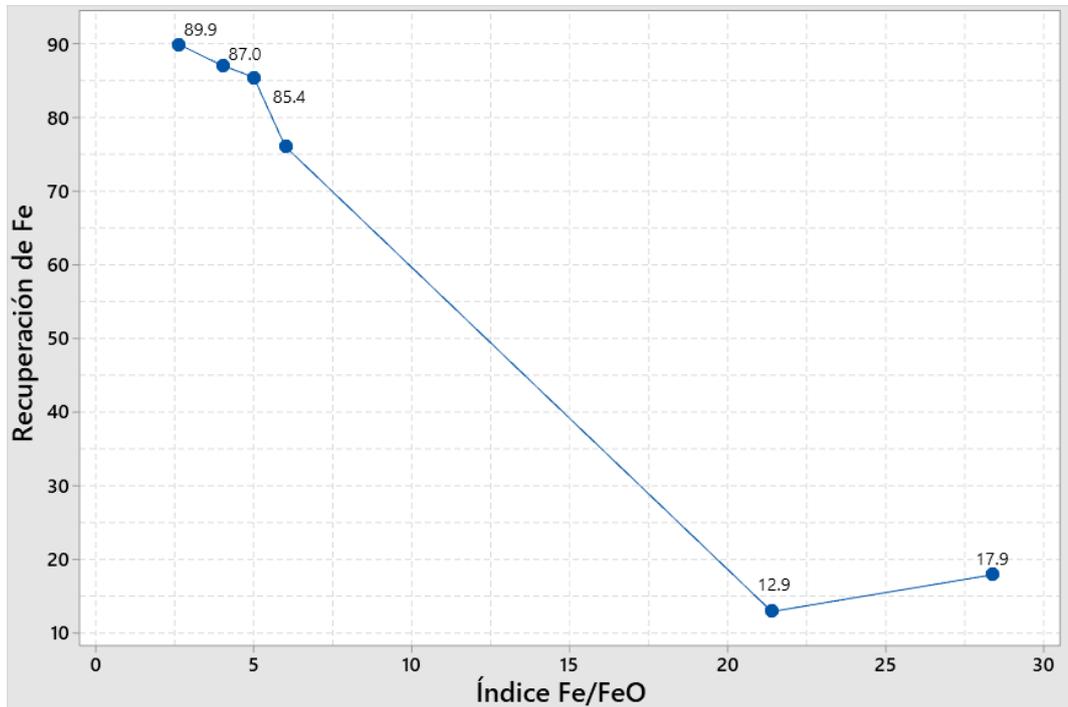
**Tabla 14:** Resultados de Pruebas en Tubo Davis, minas 3/4/5/14

### Resumen de Pruebas en Tubo Davis

Muestra	Minas 3 / 4 / 5 / 14				Pruebas en Tubo Davis 100 % < 0,063 mm				
	Fe %	FeO %	Índice	Fe % Magnetit	Peso %	Fe %	Fe <sub>rec.</sub> %	SiO <sub>2</sub> %	S %
9 Mina 5	53,8	20,7	2,6	88,6	68,3	70	89,9	0,28	1,78
Planta Piloto S1 Mina 3/4/5	52,0	19,5	2,7	86,3	62,7	70,6	85,1	0,37	0,84
6 Mina 14	58,9	21,4	2,7	83,8	70,8	71,0	85,4	0,24	0,175
Planta Piloto S2 Mine 14	58,7	21,9	2,7	85,9	71,6	71,3	87,0	0,195	0,45
11/14/21 Piloto Oxi	42,0	1,9	21,4	10,7	8,2	69,2	12,9	1,13	0,1
Mina 4+5	62,1	2,2	28,4	8,1	16,0	69,4	17,9	0,72	0,066

*Nota.* Se presenta los resultados de análisis por tubo Davis con una granulometría de 100 % < 0,063 mm. Las muestras están ordenadas de acuerdo al índice de Fe/FeO.

**Figura 16:** Relación Fe/FeO vs. Recuperación - Minas 3, 4, 5, y 14



*Nota:* Las muestras tienen una granulometría 100 % < 0,063 mm. Los valores con índice de Fe/FeO < 4 se manifiestan con mayor % de recuperación.

De los hallazgos mostrados en la parte superior se pueden interpretar que a índices menores < 4, la recuperación de hierro se aproxima al valor calculado para el hierro presente en magnetita. El material con valores de índices mayores > 4, la recuperación de hierro es más alto que el valor calculado para el hierro unido con magnetita.

Los minerales de la Mina 21 muestran una diseminación fina de magnetita y de SiO<sub>2</sub>, por lo tanto, la degradación de SiO<sub>2</sub> es menor, mientras la degradación de azufre es más eficiente, incluso a grados menores de hierro. Para minerales con un índice > 15, todos los concentrados de magnetita presentan contenido de

azufre < 0,1 %, así cumpliendo con la especificación deseada. En los concentrados generados por la prueba de Tubo Davis, los minerales primarios muestran parcialmente un contenido de azufre de aproximadamente < 0,15 % para la Mina 21, para las otras minas el porcentaje es > 0,15 % en su mayoría,

Con referencia a los minerales oxidados, además de la separación magnética de baja intensidad (LIMS) se tiene que aplicar separación magnética de alta intensidad (HIMS) para la recuperación de hematita. Las pruebas de laboratorio realizadas con los minerales oxidados se representan en la siguiente *Tabla 15*.

**Tabla 15:** Comportamiento de minerales Oxidados y minerales Primarios con el tratamiento HIMS y LIMS

Sample	Mina 21		LIMS Concentrado						Feed to HIMS		HIMS Cleaner Concentrado					LIMS + HIMS Concentrado				
	Feed	Indice	d80	W	Fe	Fe rec	SiO2	S	Fe	W	Fe	Fe rec	SiO2	S	W	Fe	Fe rec	SiO2	S	
	Fe %	Mm	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
S. N°2	41,8	4,3	<25	39,9	68,3	64,5	2,04	0,13	25,0	9,8	47,5	10,9	15,9	2,43	49,7	64,2	78,4	4,77	0,58	
S. N°1	31,3	4,4	26	28,8	67,1	59,0	3,77	0,18	18,9	6,6	43,5	6,9	20,1	1,53	35,4	62,7	65,9	6,8	0,43	
S. N°3	52,6	5,2	<25	49,0	69,0	63,7	1,71	0,07	37,5	19,8	56,9	19,5	9,3	3,98	68,8	65,5	83,2	3,89	1,12	
Full N9	41,3	6,4	26	28,6	68,9	47,6	1,55	0,04	31,7	16,3	59,5	22,6	7,3	0,38	44,9	65,5	70,2	3,64	0,17	
Full N10	40,2	18,3	27	8,3	68,4	14,1	1,92	0,03	38,0	27,4	64,3	43,1	4,35	0,13	35,7	65,3	57,2	3,78	0,10	
Test N1	56,8	23,5	(80)	20,3	67,2	24,0	2,61	0,03	54,2	40,8	64,6	46,0	4,2	0,09	62,1	65,5	70,5	3,7	0,07	
S. N°4	47,1	23,9	26	12,0	67,4	17,2	2,3	0,09	44,7	35,0	65,5	46,9	3,64	0,12	47,0	66,0	64,1	3,3	0,11	
Test N°7	34,9	32,9	(<38)	4,3	67,8	8,5	2,22	0,09	32,7	12,4	65,2	22,1	3,64	0,14	16,7	65,9	30,6	3,27	0,13	
S. N°5	46,2	64,3	<25	2,3	67,3	3,2	2,9	0,24	48,1	31,7	64,6	42,7	3,64	0,29	34,0	64,8	45,9	3,59	0,29	
<b>Mina 11 / 14</b>																				
Test N4+5	62,1	28,4	(80)	21,7	69,2	24,2	0,7	0,05	60,2	36,1	66,4	38,5	2,08	0,11	57,8	67,5	62,7	1,56	0,09	
<b>Mine 11 / 14 / 21</b>																				
Oxi Pilot P. S. 1																				
L Test1			48	8,0	69,1	12,6	0,84	0,35	37,7	34,5	63,4	50,1	5,53	0,16	42,5	64,5	62,7	4,65	0,16	
L Test2			58	11,3	68,6	17,6	1,46	0,14	36,6	31,2	63,2	45,5	6,0	0,17	42,6	64,5	63,1	4,87	0,16	
P.T.1	40,2	21,4	35	11,2	68,6	17,2	1,33	0,14	36,6	21,0	63,8	29,9	5,21	0,18	32,2	65,5	47,1	3,86	0,16	
P.T.2			42	10,9	69,3	17,0	1,05	0,1	36,6	18,2	63,7	26,1	5,2	0,17	29,1	65,8	43,1	3,65	0,15	
P.T.3			36	10,5	69,1	16,5	1,1	0,09	36,8	20,8	64,3	30,4	4,68	0,15	31,3	65,9	46,7	3,5	0,13	
P.T.4			35	10,8	69,4	16,7	1,0	0,1	36,7	31,2	62,3	43,4	6,34	0,17	42,0	64,1	60,1	5,0	0,15	

*Nota:* Resultados de las pruebas de laboratorio para los minerales oxidados primarios, clasificados por índice de Fe/FeO más alto.

De las pruebas de laboratorio se puede observar, que los concentrados LIMS cumplen con los grados deseados para un concentrado final y en su mayoría, el contenido de azufre se encuentra dentro del rango de 0,1 % e incluso más bajo.

En la etapa HIMS, para el grado de hierro, todos los concentrados se encuentran debajo del grado de hierro y encima del grado deseado de SiO<sub>2</sub> esto se debe a la diseminación menor de los minerales de mina 14. Asimismo, el grado de hierro de la alimentación en esta etapa de procesamiento es importante, si el grado esta debajo de 40,0 %, fue difícil mejorarlo a 65,0 % de Fe. Resumiendo, los concentrados LIMS y HIMS se ajustan a la especificación deseada y con la adición de una etapa de flotación se puede reducir considerablemente el porcentaje de azufre.

Contrario a la mayoría de los depósitos de Marcona, el azufre en la Mina está unido con pirrotita en un grado superior a la pirita. Aplicando separación magnética de baja intensidad, se recupera pirrotita del concentrado magnético debido al ferromagnetismo de esta.

#### **4.2.2 Clasificación del mineral**

De acuerdo a los resultados obtenidos anteriormente, los minerales se pueden clasificar en:

**Minerales primarios – no meteorizados – con magnetita como principal componente con hierro.**

- ✓ Los minerales primarios se definen básicamente con la relación de  $Fe/FeO \leq 8$ .
- ✓ Los minerales tipo primario se pueden mejorar luego de la reducción al tamaño de liberación por separación magnética de baja intensidad (LIMS).
- ✓ Los minerales tipo primario tienen contenidos variables de minerales con azufre que necesitan una etapa de flotación posterior a la separación magnética de baja intensidad (LIMS).

**Minerales Oxidados – meteorizados – magnetita se meteoriza parcialmente a hematita.**

- ✓ Los minerales tipo óxidos se definen básicamente mediante la relación de  $Fe/FeO > 8$ .
- ✓ Los minerales tipo óxidos necesitan de una separación en dos etapas compuestas por una separación magnética de baja intensidad (LIMS) para extraer partículas ferromagnéticas, seguida de separación magnética de alta intensidad (HIMS) para extraer las partículas paramagnéticas.
- ✓ Estos minerales no contienen contaminación por azufre, por lo tanto, no se considera una etapa de flotación.

### 4.2.3 Prueba de flotación de proyectos de alto zinc

Las siguientes pruebas se realizaron a 5 proyectos de alto zinc (entre 0,80 % -1,50 %), en este caso se modificó el pH de la pulpa desde un medio ácido hasta básico, donde se evaluó la reducción del porcentaje de Zn y S en función a la variación del pH. Como se mencionó anteriormente el concentrado de hierro debe cumplir con determinadas especificaciones (*Tabla 10*) para evitar penalizaciones en su comercialización.

**Tabla 16:** Análisis químico de muestra

Cabeza de mineral	Análisis químico (%)					
	Fe	S	FeO	Insol.	Zn	Pb
<b>M-107</b>	55,7	3,57	21,8	13,21	1,482	0,704
<b>M-104</b>	56,0	2,81	20,2	14,50	1,454	0,527
<b>M-43</b>	53,6	3,33	19,4	15,42	1,317	0,458
<b>M-44</b>	54,9	2,94	15,7	15,19	1,056	0,412
<b>M-46</b>	57,5	3,29	21,4	13,01	0,819	0,343

*Nota.* Se muestran un alto contenidos de hierro y zinc en el mineral estudiado.

Las pruebas se realizaron con un porcentaje de sólidos de 40 y la dosificación de reactivos se presenta en la *Tabla 17*. Como se muestra en la *Tabla 18*, las pruebas se ejecutaron dentro de los rangos de pH 2,0 hasta 12.

**Tabla 17:** Dosificación de reactivo para pruebas

Reactivos	Dosificación (gr/TM)
<b>Z6</b>	150
<b>DF-1012</b>	50
<b>H<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub></b>	2 500 a 11 000
<b>Cal</b>	0 a 4 500
<b>% Sólidos</b>	40

*Nota:* La dosificación del ácido oxálico (H<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) y cal varían de acuerdo al pH de la pulpa a trabajar.

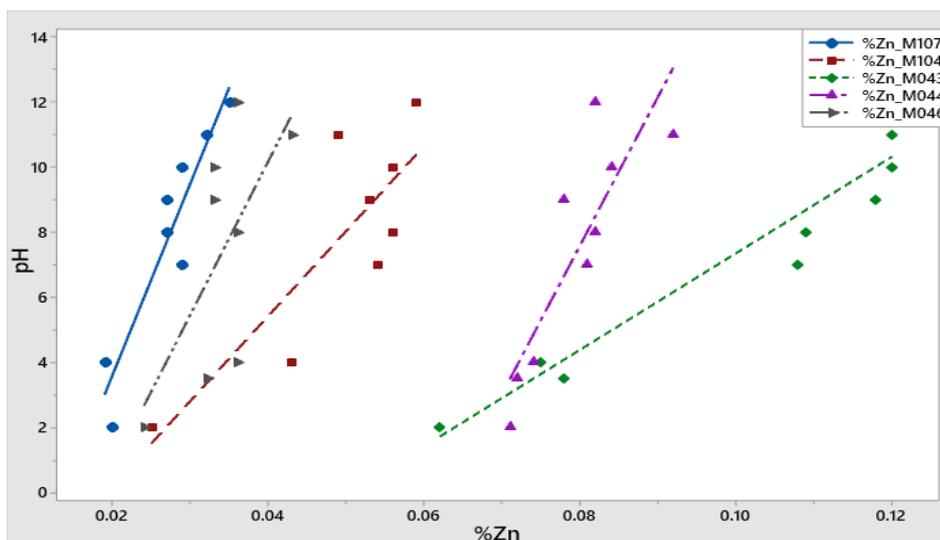
**Tabla 18:** Influencia de la variación de pH en la reducción del % Zn y % S

PH	M - 107		M - 104		M - 43		M - 44		M - 46	
	%S	%Zn								
2,0	0,098	0,020	0,059	0,025	0,155	0,062	0,229	0,071	0,157	0,024
3,5	-	-	-	-	0,153	0,078	0,152	0,072	0,226	0,032
4,0	0,054	0,019	0,081	0,043	0,123	0,075	0,138	0,074	0,276	0,036
<b>*7,0</b>	<b>0,046</b>	<b>0,029</b>	<b>0,052</b>	<b>0,054</b>	<b>0,207</b>	<b>0,108</b>	<b>0,093</b>	<b>0,081</b>	<b>0,297</b>	<b>0,03*</b>
8,0	0,048	0,027	0,063	0,056	0,187	0,109	0,110	0,082	0,170	0,036
9,0	0,044	0,027	0,056	0,053	0,157	0,118	0,081	0,078	0,169	0,033
10	0,043	0,029	0,063	0,056	0,240	0,120	0,099	0,084	0,256	0,033
11	0,061	0,032	0,050	0,049	0,168	0,120	0,117	0,092	0,201	0,043
12	0,142	0,035	0,081	0,059	0,490	0,112	0,133	0,082	0,259	0,036

Nota. \*Evaluado a pH natural

Conforme a la *figura 17*, la eliminación de Zn y S tiene una relación directa con el pH en la flotación de estos minerales. Se deduce que los minerales presentes (sulfuro y/o óxidos) se vuelven hidrosolubles a medida que aumenta el pH en la pulpa de flotación, lo que hace más difícil su eliminación en flotación directa y/o en una sola etapa.

**Figura 17:** Influencia de la variación de pH en la reducción del % Zn



*Nota.* Las líneas prolongadas presentes en la gráfica, corresponde a líneas de regresión lineal.

En resumen, la flotación de los minerales evaluados (con mediano o alto contenido de zinc) muestra mejores resultados (en relación a la reducción del porcentaje de zinc) en la flotación a pH ácido. Los mejores resultados se han obtenido a pH 2, es necesario considerar el uso de colectores más resistentes para la flotación en este medio.

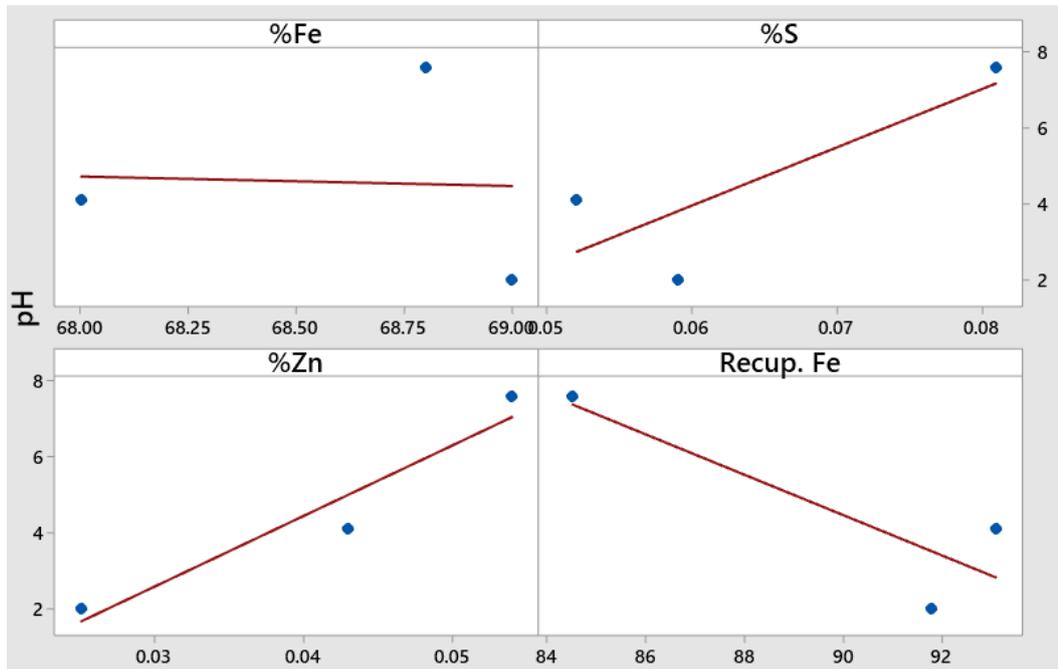
Por último, se realizan 03 pruebas de flotación, donde la muestra de cabeza corresponde al concentrado de los separadores magnéticos, con el objeto de modificar el pH de la pulpa en la etapa de flotación final. Asimismo, esto se realiza con la finalidad de simular la reducción del contenido de zinc y la recuperación de hierro en el concentrado final. En la siguiente *Tabla 19* y *figura 18*, se presenta la variación del % de Fe, S, Zn y la recuperación de hierro.

**Tabla 19:** Variación de pH en el concentrado de separadores magnéticos

Test	Dosificación (g/TM)			pH	Análisis químico (%)				Distribución (%)				
	Z-6	DF-1012	H2C204		Fe	S	Zn	Pb	Fe	S	Zn	Pb	
1	Alim.				65,9	0,919	0,481	0,315	100	100	100	100	
	Conc.	150	50	0	7,6	68,8	0,052	0,054	0,095	84,5	4,6	9,1	24,4
	Colas					53,6	4,611	2,299	1,252	15,5	95,4	90,9	75,6
2	Alim.					65,8	0,935	0,466	0,311	100	100	100	100
	Conc.	150	50	6748	4,1	68,0	0,081	0,043	0,115	92,1	7,8	8,3	33,3
	Colas					45,9	8,673	4,299	2,087	6,9	92,2	91,7	66,7
3	Alim.					65,3	0,97	0,487	0,308	100	100	100	100
	Conc.	150	50	11314	2,0	69,0	0,059	0,020	0,081	91,8	5,3	4,5	22,9
	Colas					40,8	7,007	3,548	1,812	8,2	94,7	95,5	77,1

*Nota.* Balance metalúrgico.

**Figura 18:** Grafica de variación de pH en concentrado de separadores magnéticos



*Nota.* Graficas de interacción entre pH - % Fe, pH - % S, pH - % Zn y pH - Recup, Fe.

Sobre la *figura 18*, podemos afirmar que en las interacciones pH - % Zn y pH - % S existe una correlación directa; y en la interacción pH - Recup. Fe la correlación es inversa, pues a medida que se baja el pH se incrementa recuperación (esta última afirmación se debe validar mediante la realización de pruebas metalúrgicas).

De la *Tabla 19*, se observa que la mejor recuperación (prueba 02 con 92,10 %) se representa con un pH de 4,1 en la pulpa, este valor se descarta, porque el porcentaje de azufre y zinc no están dentro de las especificaciones de concentrado comerciable (*Tabla 10*). Con respecto a la prueba 3, con un acondicionamiento de pulpa a pH 2, se aprecia que la recuperación se mantiene (91,80 %), y los valores de azufre y zinc cumplen con las especificaciones deseadas. Se tendrá que realizar más pruebas

para verificar el comportamiento de la recuperación de concentrados de hierro en medios ácidos.

#### **4.2.4 Alimentación de Planta**

Existirán dos tipos de alimentación de la planta:

- ✓ Mezcla homogenizada de mineral primario.
- ✓ Mezcla homogenizada de mineral oxidado.

La ley de hierro del mineral ROM tiene una gran influencia sobre las recuperaciones esperadas, este criterio es de suma importancia para la clasificación del mineral y se tiene que considerar en el planeamiento minero a corto plazo. El corte de ley no es constante y depende de un número de parámetros como el precio del mineral, ubicación del bloque, etcétera y a esto se debe incluir el índice Fe/FeO. Según los criterios de diseño, el valor más bajo de la ley de corte propuesto para mineral primario es 30,0 % de Fe, el valor de ley de corte propuesto para mineral oxidado es el rango de 35,0 % a 38,0 % de Fe (cabe resaltar que estos parámetros son criterios de diseño, después de las pruebas de puesta en marcha estos parámetros cambiaron).

El proceso debe ser el adecuado para aceptar una variedad definida de calidad de la alimentación. Para cumplir con este objetivo, es fundamental una clasificación del mineral más detallada. El criterio principal yace en la relación de Fe/FeO, que finalmente define qué recuperaciones se pueden lograr por medio de la separación

a baja intensidad. Para operar la planta con su capacidad de diseño, se debe asegurar el cronograma detallado de la mina, el buen manejo y procesamiento del material. Además, un cronograma detallado tendrá en cuenta todos los parámetros adicionales, los cuales influirán en las características de alimentación a planta como: dilución, pérdidas, clasificación en seco (solo para minerales primarios) y mezclas de mineral en lechos.

Será la tarea de la minería detallada, la manipulación de material y el cronograma de procesamiento, el asegurar que las características de los lechos individuales de mezcla estén dentro del rango de planta beneficio y estas puedan aceptarse como alimentación. Como resultado de la reconciliación entre la planificación minera y la ingeniería de proceso, se propone que la planta de beneficio debería ser capaz de procesar el mineral con un amplia rango leyes.

### **4.3 Prueba de Hipótesis**

#### **4.3.1 Prueba de normalidad de datos**

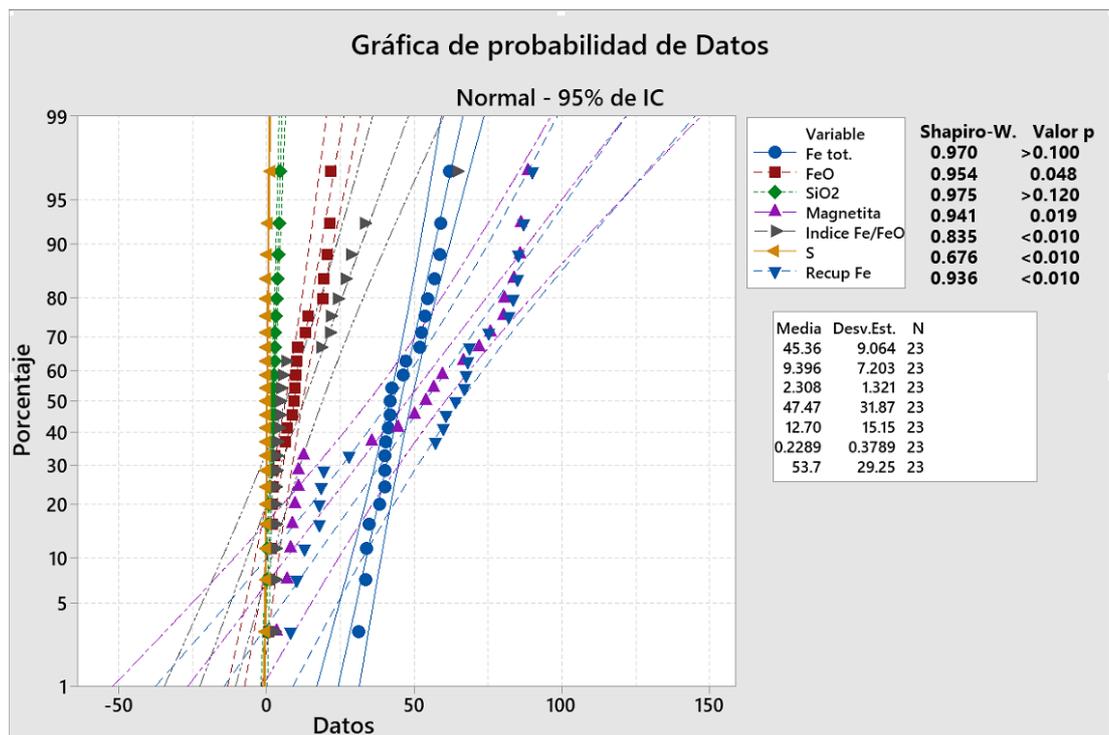
Con la finalidad de confirmar si los datos siguen una distribución gaussiana se realizará la prueba de normalidad de datos, como el número de datos es menor a 50 se calculará por medio del test de shapiro-wilk.

Entonces: con un nivel de confianza al 95%.

$H_0$  : La distribución de datos corresponde a una distribución normal.

$H_1$  : la distribución de datos no corresponde a una distribución normal.

**Figura 19:** Prueba de probabilidad de datos



*Nota:* prueba de normalidad, con un 95% de confianza.

En la *figura 19* se puede observar que solo 2 variables son mayores al p-valor de 0.05 (Fe<sub>total</sub> y SiO<sub>2</sub>), y las demás variables se encuentran en la zona de rechazo de la hipótesis nula. Por consiguiente, se asumirá que estamos trabajando con datos no paramétricos.

### 4.3.2 Prueba de correlación de Variables

Se realizó el análisis de 24 muestras, para determinar si existe una relación entre el índice Fe/FeO y el porcentaje de recuperación de hierro, con 95 por ciento de confiabilidad.

$H_0 : \beta_1 = 0$  (no existe relación entre el índice Fe/FeO y el % de recuperación de hierro)

$H_1 : \beta_1 \neq 0$  (existe relación entre el índice Fe/FeO y el % de recuperación de hierro)

**Tabla 20:** Variables de contrastación de hipótesis

Muestras	Fe tot.	FeO	SiO <sub>2</sub>	Magnetita	Recup.	Fe/FeO	S
					<i>variable 1</i>	<i>variable 2</i>	
<b>3 Mina 21</b>	54,6	19,1	2,29	80,4	83,5	2,8	0,19
<b>(007) (100 kg)</b>	40,1	14	3,14	80,6	82,1	2,9	0,135
<b>2 Mina 21</b>	40,2	13,2	2,78	75,9	75,4	3,0	0,13
<b>(006) (100 kg)</b>	33,9	10,6	4,73	72,0	67,5	3,2	0,185
<b>8 Mina 21</b>	33,6	9,7	3,69	66,7	68,8	3,5	0,155
<b>DT 37</b>	38,3	9,4	2,74	56,5	60,8	4,1	0,145
<b>Muestras Control</b>	41,8	9,8	2,31	54,1	68,1	4,3	0,12
<b>DT 56</b>	40,5	8,8	4,03	50,1	67,0	4,6	0,13
<b>1 M. prueba</b>	31,3	7,1	4,34	59,6	60,0	4,4	0,138
<b>3 M. prueba</b>	52,5	10,1	2,14	44,5	64,0	5,2	0,10
<b>009 (100 kg)</b>	41,3	6,4	2,38	35,7	57,1	6,5	0,073
<b>010 (100 kg)</b>	40,2	2,2	2,08	12,6	28,0	18,3	0,028
<b>1 Mina 21</b>	56,8	2,7	2,32	10,9	19,5	21,1	0,035
<b>4 M. Prueba</b>	47,1	2,0	2,53	9,6	18,0	23,9	0,075
<b>011 (100 kg )</b>	42,5	1,6	3,54	8,8	18,6	26,5	0,05
<b>7 bajo OXI</b>	34,9	1,1	2,8	7,0	10,3	32,9	0,11
<b>5 Control Corto</b>	46,2	0,7	2,32	3,5	8,2	64,3	0,055
<b>9 Mina 5</b>	53,8	20,7	0,28	88,6	89,9	2,6	1,78
<b>Planta S1 3/4/5</b>	52,0	19,5	0,37	86,3	85,1	2,7	0,84
<b>6 Mina 14</b>	58,9	21,4	0,24	83,8	85,4	2,7	0,175
<b>Piloto S2 14</b>	58,7	21,9	0,19	85,9	87,0	2,7	0,45
<b>11/14/21 Oxi</b>	42,0	1,9	1,13	10,7	12,9	21,4	0,10
<b>Mina 4+5</b>	62,1	2,2	0,72	8,1	17,9	28,4	0,066

*Nota:* La tabla presenta 7 variables para la prueba de contracción de hipótesis, de las cuales se asume 2 (porcentaje de recuperación e índice Fe/FeO) para confirmar su grado de correlación.

**Análisis de componente principal: %Rec. Fe, FeO, SiO<sub>2</sub>, Magnetita e**

**Índice Fe/FeO**

**Análisis de los valores y vectores propios de la matriz de correlación**

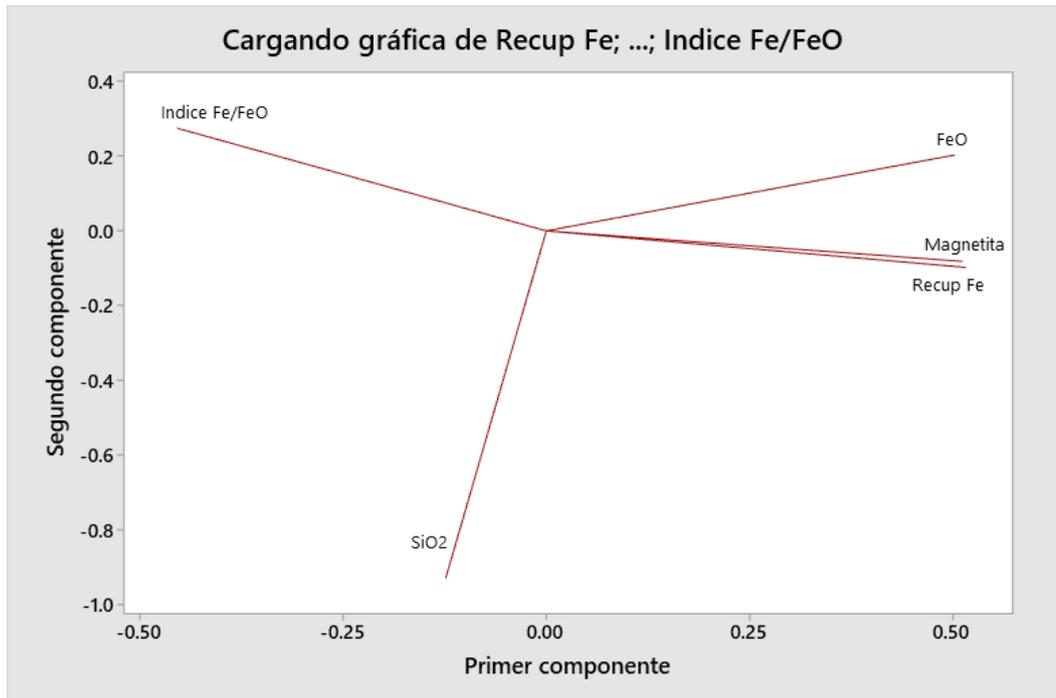
Valor propio	3.6506	1.0681	0.2434	0.0218	0.0160
Proporción	0.730	0.214	0.049	0.004	0.003
Acumulada	0.730	0.944	0.992	0.997	1.000

Variable	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
%Rec Fe	0.515	-0.098	-0.146	-0.808	0.226
Índice Fe/FeO	-0.454	0.275	-0.829	-0.175	-0.009
Magnetita	0.520	-0.082	-0.338	0.184	-0.764
SiO <sub>2</sub>	-0.124	-0.931	-0.270	0.130	0.168
FeO	0.502	0.203	-0.322	0.516	0.580

Dentro de análisis de componentes principales se puede observar que el primer componente tiene más correlación con la variable magnetita (0.520) y el segundo componente con la variable SiO<sub>2</sub> (0.931). Asimismo, la variable % Rec. Fe representa el 73.0 % de varianza de datos, si se considera una segunda variable como el índice Fe/FeO se influenciaría el 94.0%, que son suficientes para predecir las variables respuestas.

Como paso siguiente se presente la *figura 20*, la cual sobrepone las puntuaciones de datos y la influencia de estos sobre un plano en el espacio, la cual nos brindara una perspectiva más detallada de vectores.

**Figura 20:** Gráfica de doble proyección



En la gráfica se evaluar la estructura de los datos y las influencias de los dos primeros componentes en una gráfica. Las puntuaciones del segundo componente principal (Índice Fe/FeO) versus las puntuaciones del primer componente principal (% Rec Fe), así como las influencias de ambos componentes. Estas dos variables están altamente influenciadas inversamente, y se centran en por porcentaje de recuperación de concentrado de hierro.

**Prueba de significancia**

**Tabla 21:** Estadística descriptiva

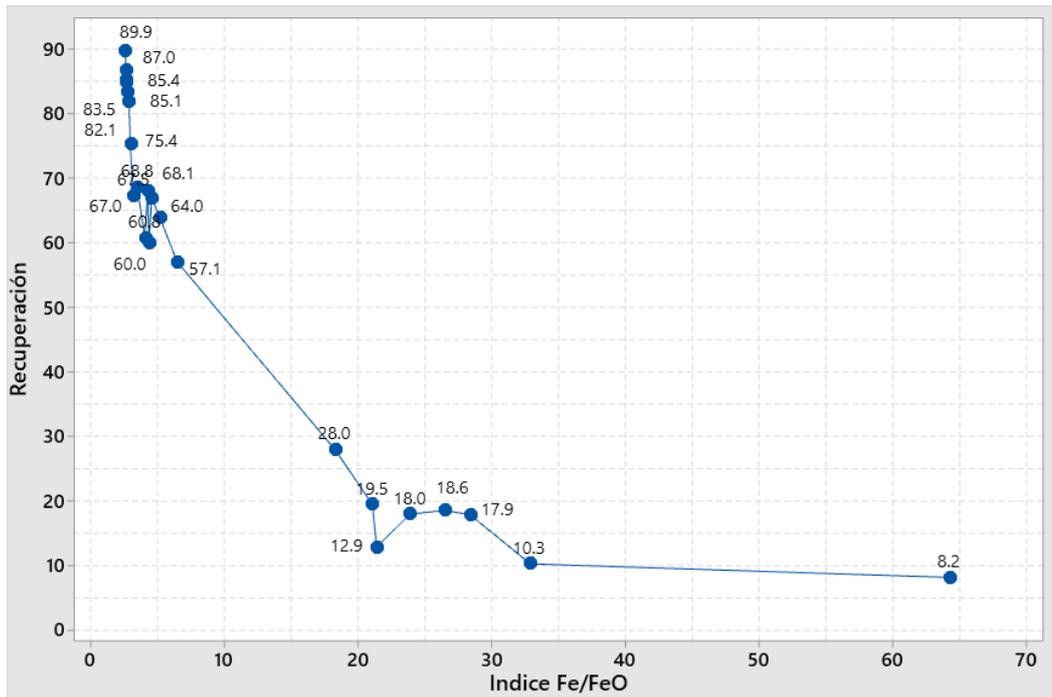
Variable	N	Media	Error estándar	Desv.Est.	Mínimo	Mediana	Máximo
Recup	23	53,70	6,10	29,25	8,20	64,00	89,90
Fe/FeO	23	12,70	3,16	15,15	2,60	4,40	64,30

**Tabla 22:** Resumen del modelo de regresión

Error típico	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)
15,80	<b>72,15 %</b>	<b>70,82 %</b>

*Nota:* Del total de observaciones se puede afirmar que las dos variables presentan una correlación de 72,15 %.

**Figura 21:** Recuperación de Fe vs Índice Fe/FeO



*Nota:* Se puede apreciar que existe una buena relación entre los datos de recuperación e índice Fe/FeO, como un valor  $r^2$  de 0,72.

### Prueba t

**Tabla 23:** Prueba t para medias de dos muestras

	Variable 1 (% Recup)	Variable 2 (Índice Fe/FeO)
Media	53,7	12,69
Varianza	855,58	229,51
Observaciones	23	23
Coefficiente de correlación de Pearson	<b>-0,85</b>	

Grados de libertad	22
Estadístico t	<b>4,59</b>
P(T<=t) una cola	7,191E-05
Valor crítico de t (una cola)	1,72
P(T<=t) dos colas	0,00014
Valor crítico de t (dos colas)	<b>2,08</b>

	Coeficientes	Error típico	Estadístico	
			t	Probabilidad
Intercepción	74,52	4,33	17,17	7,6828E-14
Índice Fe/FeO	-1,64	0,22	<b>-7,37</b>	2,9552E-07

Nota: En la tabla de observa el valor de “t” y valor critico “t” para terminar si se acepta o rechaza la hipótesis nula.

De acuerdo a los resultados de la prueba, el valor “t” es mayor al valor critico (**4,59 > 2,08**); en consecuencia, se rechaza la H<sub>0</sub> y se acepta la H<sub>1</sub>.

### Valor estadístico t

g.l. = 22; Alfa = 0,05 (95 %); Colas = 2; Valor critico (tablas) = 2,074

$$t = \frac{r}{\sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}}}$$

r<sup>2</sup> = cuadrado correlación de datos (-0,85)

n = número de observaciones (23)

**t = -7,37**

En los datos, en la relación de variables se observa que existe alta significancia negativa (-7,37), la cual nos indica que a medida que disminuya el valor índice Fe/FeO el grado de recuperación de hierro se incrementara.

Finalmente, podemos afirmar que la correlación entre el grado de recuperación y el índice Fe/FeO es de 0,85, la cual significa una relación alta entre variables. Esto implica que el 72,14 % de casos con altas recuperaciones de hierro, puede ser atribuido a la caracterización del mineral usando la relación Fe/FeO.

#### **4.4 Discusión de Resultados**

Respecto a que los minerales con mayores requerimientos de energía en molienda, estos presentan grado de liberación más bajos, y esto afecta los resultados en la recuperación de concentrados. Asimismo, dependen de factores como: tipo de mineral, la composición química, textura de la roca y tamaño de partículas (Rodrigues y Brandão, 2018). Esta afirmación es correcta en nuestro caso, porque, los minerales con una proporción o índice Fe/FeO menor de 3,5, tienen facilidad para ser sometidos a una molienda más suave. Asimismo, el tamaño de partículas óptimo en la reducción del chancado terciario, tiene que ser 100 % < 30 mm, para no presentar problemas en el producto de las etapas de molienda (P80: #325) y posteriormente en la flotación.

La recuperación de mineral de hierro se inició con la flotación directa de óxidos de hierro usando colectores aniónicos, pero fue reemplazada por la flotación catiónica inversa, y en los últimos años esta fue sustituida por la flotación inversa aniónica.

Este tipo de flotación ofrece una buena oportunidad para reducir costos y al mismo tiempo aumentar la recuperación de hierro, ya que el deslamado no es esencial (Ma, 2 012). La flotación inversa aniónica es efectiva en nuestro proceso, sumada a la limpieza por separadores magnéticos reduce significativamente la presencia de sulfuros, alúmina y sílice en los concentrados de hierro.

En los minerales de hierro existen impurezas como: alúmina, perjudicial para las operaciones de plantas de alto horno y sinterización; el fósforo, se considera una ganga en el mineral de hierro porque hace frágil las propiedades del acero; el azufre, atrae penalizaciones y reduce el margen de beneficio sustancialmente (Valderrama et al., 2 014). El empleo del colector Z-6 para flotar la amplia variedad de sulfuros presentes en la pulpa y la innovación en el uso del ácido oxálico, han demostrado minimizar el contenido de zinc y azufre en el concentrado final.

Debido al procesamiento del mineral por vía húmeda buscando su mejora, los componentes se lixivian hasta en 10 % en peso. Como consecuencia a la recirculación del agua recuperada del proceso una parte de iones se concentran en el agua de procesamiento, principalmente azufre y calcio. Los cambios de temperatura precipitarán nuevamente el yeso y existe altas probabilidades que las tuberías se obstruyan.

La ley de hierro y la relación Fe/FeO se identificaron como criterios de influencia principal en la recuperación de los concentrados. La contaminación por azufre no se puede considerar como un criterio de calidad para el planeamiento minero a corto plazo, debido que el azufre y el tipo de mineralización dependen más de la distribución regional de mineralización. Del mismo modo, el grado de

contaminación se tiene que definir en los lechos de mezcla, y en base a estos datos, se debe realizar ajustes al proceso de flotación respecto a molienda, densidades y dosificación de reactivos.

Dentro de las leyes más alta de hierro en el yacimiento se destaca 60,0 %, sin embargo, ninguno de estos bloques extraídos alimentará directamente a planta. El suministro de leyes con valores extremos (valores muy altos o bajos) tendrá como consecuencia que el beneficio en planta no sea competente para procesar esta alimentación, con respecto a su capacidad de diseño. Por ejemplo, si el suministro de mineral está dominado por leyes muy baja conduciría a un flujo excesivo en masa de relave, el cual tendrá un impacto negativo en las bombas de relave y espesadores. Por otro lado, si el suministro de mineral cuenta con leyes muy alta conducirá a un flujo excesivo de masa de concentrado, lo cual producirá sobrecarga en las bombas y espesadores de concentrados. Como consecuencia en ambos casos se tendría la pérdida de concentrado y una reducción del ritmo de producción de planta.

## CONCLUSIONES

1. En el presente trabajo se concluye que la ampliación de planta concentradora influye en el incremento de producción de concentrado de hierro. Esto se logró al instalar dos líneas de producción paralelas, de igual configuración y distribución de equipos. El proyecto de ampliación tiene la finalidad de producir 10 millones de toneladas de concentrado por año, durante los primeros meses de prueba y estabilización de operaciones, se alcanzó toneladas de producción de 30 297 toneladas por día de concentrado (*Tabla 24*), con esta capacidad de producción diaria se estaría cumpliendo la meta planificada de producción anual de concentrado.

**Tabla 24:** Balance metalúrgico producción diaria

Balance diario			Leyes				Recuperaciones %		
Producto	TMSPD	% Peso	Fe %	S %	Zn %	Cu %	Fe	Zn	Cu
Cabeza	<b>45 120</b>	100,0	53,27	3,45	0,69	0,07	100,0	100,0	100,0
Conc. Fe	<b>30 297</b>	67,15	<b>70,70</b>	0,11	0,02	0,00	<b>89,13</b>	2,11	1,71
Relave	14 823	32,85	17,63	8,83	2,22	0,27	10,87	84,07	106,4
Cab. Cal.	45 120								

*Nota.* Data obtenida de los reportes de producción.

En el reporte de producción diaria, se ha tratado 45 120 t/d de mineral de cabeza, de los cuales el concentrado representa 30 297 t/d y relave 14 823 t/d, el concentrado obtenido presenta 70,70 % de calidad y una recuperación de 89,13 %.

2. En la tesis se analizó la influencia de las características del mineral en la producción de concentrados de hierro. Lo más relevante fue identificar la relación Fe/FeO, porque esta nos indica el grado de meteorización del mineral, que influye directamente con el grado de recuperación de concentrado. Otro aspecto importante es la identificación de minerales de cobre y zinc, la presencia de estas especies mineralógicas en el concentrado final es penalizable y deben eliminarse en la etapa de flotación.
3. La dosificación de reactivos se realiza en los tanques de acondicionamiento. Se identificó los reactivos para el tratamiento de minerales de hierro como: Colector amil xantato de potasio (Z-6), dowfroth 1012 (espumante) y ácido oxálico (regulador de pH). El empleo del ácido oxálico se realiza cuando los minerales provenientes de mina muestran predominancia de material sulfurado, zinc y cobre. Los concentrados de hierro obtenidos tienen una calidad de 70,70 % de Fe con una recuperación de 89,13 %.

**Tabla 25:** Consumo de reactivos en el área de flotación

Consumo de reactivos	Día			Mes		
	kg	kg/t Conc.	kg/t Conc.	kg	kg/t Conc.	kg/t Conc.
Xantato	4 018	0,162	0,155	31 295	0,170	0,169
Dowfroth	1 312	0,053	0,051	9 963	0,054	0,054
Ácido Oxálico	40 000	1,616	1,541	261 200	1,418	1,411

*Nota.* Data obtenida de reportes de producción.

En la *Tabla 25* se aprecia el consumo de reactivos en la etapa de flotación como el xantato que viene a ser Z6, ácido oxálico, y Dowfroth 1012 como espumante.

## RECOMENDACIONES

1. Es necesario seguir investigando el procesamiento de minerales de hierro, no solamente en el contexto de su caracterización de sus minerales de mena. Es evidente que los minerales de ganga son los que producen considerables inconvenientes como: variación en la competencia del mineral (reducción), circuito de flotación (calidad y recuperación de concentrados), etapa de filtrado, manejo de pulpas (reología), etc.
2. Continuar con la prueba de nuevos reactivos y/o procesos que hagan más rentables el procesamiento de este tipo de minerales. Debido a que mientras se va profundización o avanzando en la explotación del yacimiento, sus características mineralógicas cambian gradualmente y esto afecta a los procesos de producción en planta concentradora. Cabe resaltar que en estos momentos el precio de los minerales es atractivo, para buscar nuevas alternativas de extracción y poner en marcha nuevos proyectos mineros.
3. En la medida de lo posible, seguir usando equipos similares en las líneas del proceso para minimizar el deterioro e inventario de repuestos. En la nueva planta de beneficio, el uso de gravedad para el transporte de agua y pulpas debe ser un criterio importante en la implementación de equipos. Se tendría que identificar puntos donde el flujo por gravedad puede sustituir a las impulsadas mecánicamente, particularmente, este tipo de diseño tiene el potencial de ahorrar capital, gastos operativos y hace agradable la operación.

4. En la metalurgia peruana se trata mayormente minerales polimetálicos o pórfidos de cobre, lo que hace muy común el realizar investigaciones relacionadas al incremento de sus recuperaciones. Lo que no ocurre con la presente investigación, puesto que las plantas concentradoras de tratamiento de minerales de hierro son diferentes y se requiere de equipos no convencionales para la realización de pruebas a pequeña escala.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

1. Almirón C. (2 016). Estudio preliminar para la ampliación de producción de 8 500 a 10 500 t/d día Planta Concentradora Paragsha–Unidad Económica Cerro de Pasco.
2. Ballester, A., Verdeja, L., and Sancho, J. (2 000). Metalurgia extractiva: fundamentos.
3. Ballon, C. (2 015). Informe técnico del proceso de operaciones de los molinos de rodillo de alta presión (HPGR).
4. Basson, E. (2 015). World Steel in Figures. World Steel Association. Brussels. pp. 1–30.
5. Becerra, J. (2 019). Mercado Internacional del Hierro y del Acero. Comisión chilena del cobre. pp. 1–27.
6. Berton, A., Jubinville, M., Hodouin, D., Prévost, C., and Navarra, P. (2 013). Ore storage simulation for planning a concentrator expansion. *Minerals Engineering*, 40. pp. 40-66.
7. Beytia, J. (2 012). Manual de comisionado y puesta en marcha de Proyectos. Lima. SERTEC. pp. 1-47.
8. Castro, D. (1 989). Petrografía Básica: Texturas. Clasificación y nomenclatura de Rocas Madrid.
9. Castroviejo, R., Berrezueta, E., and de Madrid, E. M. (2 003). Mineralogía aplicada para la pequeña minería. XI Reunión de AIESMIN. San Juan-Argentina.
10. Comisión Chilena del Cobre (2 020). Mercado Internacional del Hierro y del Acero. pp. 1–37.

11. De Sales, C. (2012). Vías de beneficio para la recuperación de minerales férricos en el desbordamiento del espesador de la planta de Brucutu. Universidad Federal de Minas Gerais de Brasil.
12. Filippov, O., Severov, V., and Filippova, V. (2014). An overview of the beneficiation of iron ores via reverse cationic flotation. *International journal of mineral processing*, 127. pp. 62-69.
13. García, P. (2018). Impacto productivo de Implementación de un HPGR al circuito de chancado en la Molienda.
14. Hernández A., and Olmos S. (2011). Metodologías de aprendizaje colaborativo a través de la tecnología, 1-454.
15. Huaricalla, M. (2018). Determinación de equipos a corto plazo para el proceso de operación a cielo abierto - Compañía minera Shougang – Marcona. Facultad de Geología, Geofísica y Minas. Universidad Nacional de San Agustín.
16. Inca Cano, J. (2020). Proyecto de optimización y ampliación del tratamiento en una planta concentradora de flotación de cobre arsenical. FIMMG. Universidad Nacional de Ingeniería.
17. Kazerani, R., and Sam, A. (2017). The wear pattern in high pressure grinding rolls. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 126(4), pp. 238-244.
18. Krajewski, J., Ritzman, P., and Malhotra, K. (2011). *Operations management: Processes and supply chains*. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson.
19. Leiva, B., y Carrasco E. (2017). Prueba de Separación Magnética de hierro en Minerales Sulfurados de Cobre.
20. Ma, M. (2012). Froth flotation of iron ores. *International Journal of Mining Engineering and Mineral Processing*, 46-61.

21. Matthews, D., and Toit, T. (2 015). Expansion of iron ore processing plant using a modular design basis as applied to the khumani iron ore mine, South Africa. In IRON ORE 2 011, Proceedings (pp. 491–498).
22. Oyarzún, C. (2 013). Modificaciones del proceso de flotación inversa de hierro en celdas neumáticas de Planta Magnetita. Valparaíso, Chile: Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Facultad de Ingeniería.
23. Quezada, N. (2 016). Metodología de la investigación. Lima-Perú: Empresa Editora MACRO.
24. Rodrigues, R., and Brandão, P. (2 018). Influencia da liberação mineral nas etapas de moagem e flotação do minério de ferro. Universidade Federal de Minas Gerais no Brasil.
25. Rojas, D., y Garay, V. (2 018). Mercado internacional del hierro y el acero.
26. Santamaría, M. (2 017). Diseño de un equipo de separación magnética por vía húmeda para el enriquecimiento de mineral de hierro.
27. Silvestre, I., y Huamán, C. (2 019). Pasos para elaborar la investigación y la redacción de la tesis universitaria.
28. Valderrama, L., Santander, M., Díaz, D., and Meléndez, M. (2 011). Recuperación de hierro de relaves de la concentración magnética. XXIV ENTMMME. pp. 694-701.
29. Valderrama, L., Santander, M., Zazzali, B., and Carmona, M. (2 014). Concentración magnética aplicada a relaves de cobre. HoloS, 30(6), 37.
30. Velandia, P. (2 015). Modelo de simulación dinámica para determinar niveles de capacidad de almacenamiento (Bachelor's thesis).

## BIBLIOGRAFÍA

1. Ballester, A., Verdeja, L., and Sancho, J. (2000). Metalurgia extractiva: fundamentos.
2. Boger, D. (2000). Reología e industria de los minerales. Revisión de procesamiento de minerales y metalurgia extractiva, 20 (1), 1-25.
3. Boger, D. (2013). Rheology of Slurries and Environmental Impacts in the Mining Industry. The Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering, v.4, p.239-257.
4. Castro, D. (1989). Petrografía Básica: Texturas. Clasificación y nomenclatura de Rocas Madrid.
5. Cerpa, A. (2014), Mineral-content and particle size effects on the colloidal properties of concentrate lateritic suspensions. Clays and Clay Minerals, p. 515-521.
6. Connelly, D. (2011). High clay ores a mineral processing nightmare. In Australian Journal of Mining, July / August edition: Mineral Processing - Flotation and Separation, pp. 28-29.
7. Contreras, J. (2020). Efecto de la incorporación de relleno mineral sobre las propiedades reológicas del asfalto en frío (Método Illinois), Huancayo 2019.
8. Curo, N., y Rojas, R. (2017). Obtención de hematita a partir de la precipitación selectiva de hierro presente en el drenaje ácido de mina.

9. Farrokhpay, S. (2012). The importance of rheology in mineral flotation: A review. *Minerals Engineering*, 36, 272-278.
10. Gaitán, P. (2010). Estimación de parámetros reológicos de pulpas minerales a diferentes concentraciones de sólidos.
11. Gallego, F., Isern, I., y Segura, P. (2006). Elaboración y presentación de un proyecto de investigación y una tesina (Vol. 1). Edicions Universitat Barcelona.
12. Hernández, R., y Torres, C. (2018). Metodología de la investigación (Vol. 4). México D. F DF: McGraw-Hill Interamericana.
13. Hernández, R., Fernández, C., and Baptista, P. (2017). Desarrollo de la perspectiva teórica: revisión de la literatura y construcción del marco teórico.
14. Ma, M. (2012). Froth flotation of iron ores. *International Journal of Mining Engineering and Mineral Processing*, 1(2), 56-61.

## **ANEXOS**

## Anexo 01: Instrumentos de Recolección de Datos.

### 01: Registro de pruebas de molindabilidad

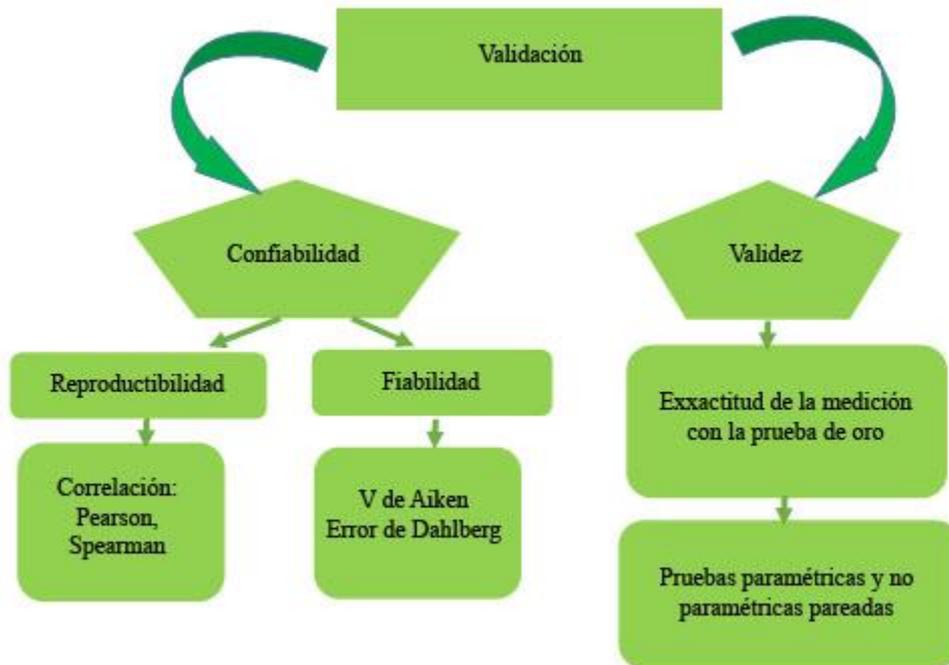
<b>MOLIENDABILIDAD</b> (g/rev).									
CICLO	VUELTAS	W+m100	W-m100	FINOS GENERADOS	MOLIENDABILIDAD	FINOS EN ALIMENTACION FRESCA	FINOS A GENERAR	VUELTAS SIGUIENTES	%CC
0		716.41	535.39			535.39			133.8
1	100	583.28	668.5	133.13	1.3313	285.92	71.73	53.88	87.2
2	54	877.63	374.17	88.25	1.6378	160.03	197.63	120.67	234.6
3	121	897.62	354.2	194.15	1.6089	151.48	206.18	128.14	253.4
4	128	884.58	367.2	215.74	1.6836	157.06	200.60	119.15	240.9
5	119	890.20	361.6	204.54	1.7167	154.65	203.00	118.25	246.2
6	118	893.92	357.9	203.23	1.7185	153.06	204.59	119.05	249.8

### 02: Registro de pruebas de separación magnética

Mina 21				LIMS Concentrado					Feed HIMS		HIMS Concentrado					LIMS + HIMS Concentrado				
Sample	Feed	Indice	d80	W	Fe	Fe rec	SiO 2	S	Fe	W	Fe	Fe rec	SiO2	S	W	Fe	Fe Rec	SiO2	S	
	Fe%	.mm		%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
S. N°2	41.8	4.3	<25	39.9	68.3	64.5	2.04	0.13	25.0	9.8	47.5	10.9	15.9	2.43	49.7	64.2	78.4	4.77	0.58	
S. N°1	31.3	4.4	26	28.8	67.1	59.0	3.77	0.18	18.9	6.6	43.5	6.9	20.1	1.53	35.4	62.7	65.9	6.8	0.43	
S. N°3	52.6	5.2	<25	49.0	69.0	63.7	1.71	0.07	37.5	19.8	56.9	19.5	9.3	3.98	68.8	65.5	83.2	3.89	1.12	
Full N9	41.3	6.4	26	28.6	68.9	47.6	1.55	0.04	31.7	16.3	59.5	22.6	7.3	0.38	44.9	65.5	70.2	3.64	0.17	
Full N10	40.2	18.3	27	8.3	68.4	14.1	1.92	0.03	38.0	27.4	64.3	43.1	4.35	0.13	35.7	65.3	57.2	3.78	0.10	
Test N1	56.8	23.5	(80)	20.3	67.2	24.0	2.61	0.03	54.2	40.8	64.6	46.0	4.2	0.09	62.1	65.5	70.5	3.7	0.07	
S. N°4	47.1	23.9	26	12.0	67.4	17.2	2.3	0.09	44.7	35.0	65.5	46.9	3.64	0.12	47.0	66.0	64.1	3.3	0.11	
Test N°7	34.9	32.9	<38	4.3	67.8	8.5	2.22	0.09	32.7	12.4	65.2	22.1	3.64	0.14	16.7	65.9	30.6	3.27	0.13	
S. N°5	46.2	64.3	<25	2.3	67.3	3.2	2.9	0.24	48.1	31.7	64.6	42.7	3.64	0.29	34.0	64.8	45.9	3.59	0.29	
Mina 11 / 14																				
Test N4+5	62.1	28.4	(80)	21.7	69.2	24.2	0.7	0.05	60.2	36.1	66.4	38.5	2.08	0.11	57.8	67.5	62.7	1.56	0.09	
Mine 11 / 14 / 21																				
Oxi Pilot P. S. 1																				
L Test1			48	8.0	69.1	12.6	0.84	0.35	37.7	34.5	63.4	50.1	5.53	0.16	42.5	64.5	62.7	4.65	0.16	
L Test2			58	11.3	68.6	17.6	1.46	0.14	36.6	31.2	63.2	45.5	6.0	0.17	42.6	64.5	63.1	4.87	0.16	
P. T. 1			35	11.2	68.6	17.2	1.33	0.14	36.6	21.0	63.8	29.9	5.21	0.18	32.2	65.5	47.1	3.86	0.16	
P. T. 2	40.2	21.4		42	10.9	69.3	17.0	1.05	0.1	36.6	18.2	63.7	26.1	5.2	29.1	65.8	43.1	3.65	0.15	
P. T. 3			36	10.5	69.1	16.5	1.1	0.09	36.8	20.8	64.3	30.4	4.68	0.15	31.3	65.9	46.7	3.5	0.13	
P. T. 4			35	10.8	69.4	16.7	1.0	0.1	36.7	31.2	62.3	43.4	6.34	0.17	42.0	64.1	60.1	5.0	0.15	

### 03: Registro de análisis de malla

	ALIMENTO L-1	ALIMENTO L-2	Descarga MOL. L-1	Descarga MOL. L-2	Gruesos de ZAF.
3					
3/2	1.8	1.7	0.3		0.5
5	75.6	60.1	0.8	1.0	5.5
8	374.7	288.1	14.3	13.6	44.5
10	89.4	76.2	6.2	6.1	21.2
16	241.2	217.2	31.2	30.0	115.7
20	112.8	110.2	32.5	32.3	129.4
45	290.6	298.1	211.9	209.8	567.5
60	118.7	123.5	136.4	138.3	109.0
100	168.0	173.1	233.9	231.5	97.4
140	83.5	85.4	133.1	127.4	41.1
200	62.4	63.1	106.0	99.3	31.9
270	51.6	53.4	104.8	96.8	29.6
325	21.0	20.8	43.2	39.2	13.1
400	13.3	14.0	29.3	28.8	10.0
Peso.	1876.1	1745.6	1413.8	1336.8	1352.4



## Anexo 02: Procedimiento de validación y confiabilidad

### Hoja de Evaluación de Instrumento

#### I. DATOS GENERALES

**Apellidos y Nombres del Informante:** Freddy Loyola Povez

**Cargo o Institución donde labora:** Metalurgista – Minera Raura

**Nombre del Instrumento de Evaluación:** Test de tubo Davis

**Título:** Análisis del proyecto de ampliación de planta concentradora para incrementar la producción de concentrado de hierro en Yacimientos

#### II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN:

INDICADORES	CRITERIOS	Deficiente				Regular				Bueno				Muy bueno				Excelente			
		0 - 20				21 – 40				41 - 60				61 - 80				81 - 100			
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
1. TITULO	Hace referencia al problema mencionado en las variables																			X	
2. CLARIDAD	Está formulado con lenguaje apropiado																			X	
3. OBJETIVIDAD	Está expresado en conductas observables																				X
4. ACTUALIDAD	Está acorde a los cambios en la Administración Moderna																	X			
5. ORGANIZACIÓN	Existe una organización Lógica																				X
6. SUFICIENCIA	Comprende los aspectos en cantidad y calidad																				X
7. INTENCIONALIDAD	Adecuado para valorar los aspectos de la gestión en procesos mineros																	X			
8. CONSISTENCIA	Basados en aspectos teóricos científicos.																			X	
9. COHERENCIA	Entre los indicadores y las dimensiones																				X
10. METODOLOGIA	La estrategia responde al propósito del diagnóstico																	X			

**III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD:**

El instrumento en mención cumple con las características necesarias para ser usada en esta investigación, uno de los aspectos a considerar es su uso a granulometría inferiores a 200 micras de tamaño de partícula. -----  
-----  
-----  
-----

**IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN:**

El resultado de la valoración es de 95-----  
-----  
-----  
-----

Cerro de Pasco, 01 de Julio 2022

**Lugar y fecha**

41204300

**DNI Numero**

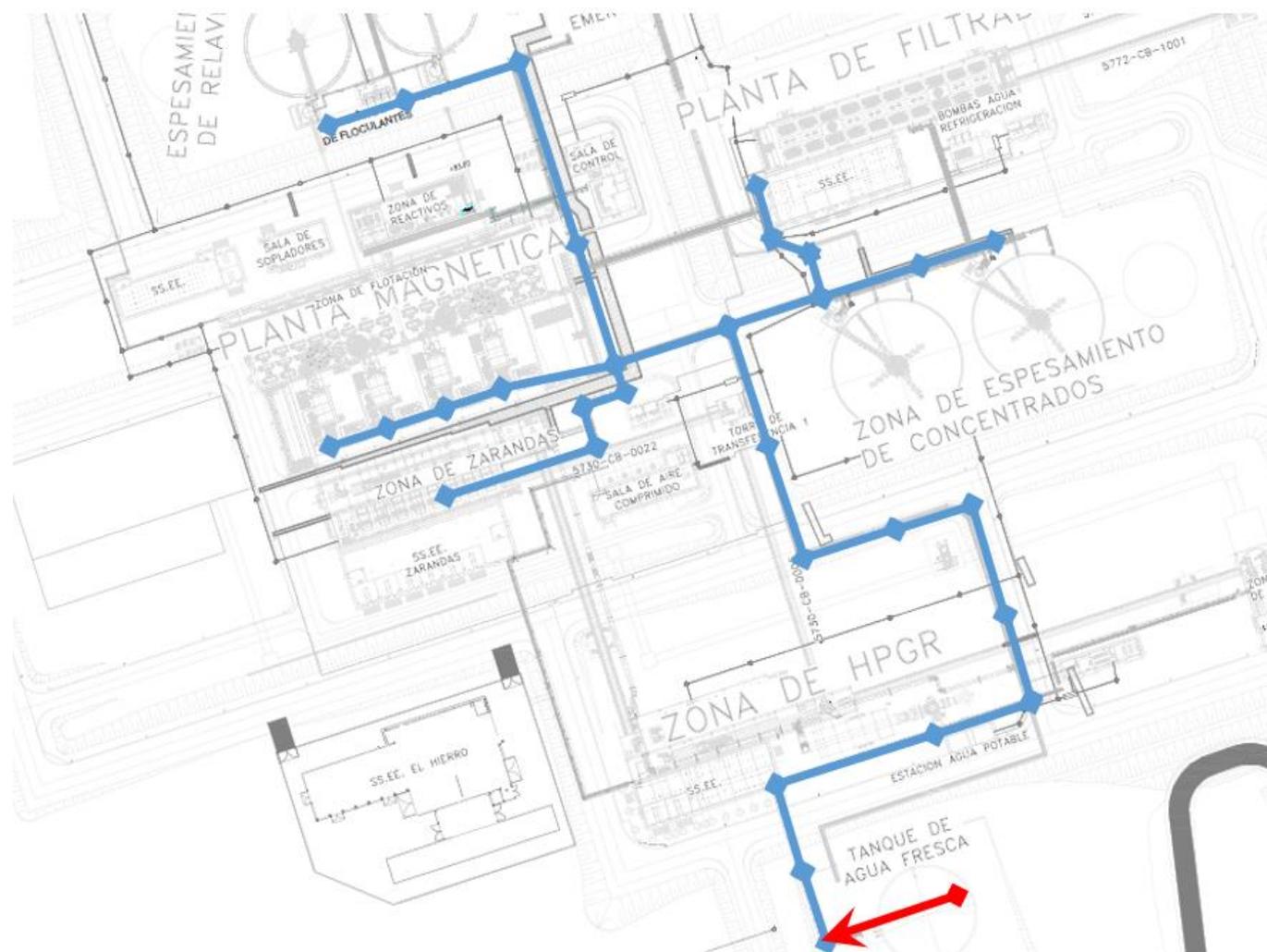


**Firma del experto**

963933409

**Teléfono N<sup>o</sup>**

### Anexo 05: Sistema de agua de refrigeración



Anexo 06: Sistema de agua de proceso

