



**Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión**  
**Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica**  
**Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica**

**Ampliación de circuito de molienda Minera Titán del Perú - Croacia de 220 a  
350 TPD usando herramientas de cálculo metalúrgico, Chala 2024**

**Tesis**

**Para optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico**

**Autor**

**Sergio Andree Yarlaque Roman**

**Asesor**

**Dr. Ronald Luis Ramos Pacheco**



**Huacho – Perú**

**2026**



**Reconocimiento - No Comercial – Sin Derivadas - Sin restricciones adicionales**

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

**Reconocimiento:** Debe otorgar el crédito correspondiente, proporcionar un enlace a la licencia e indicar si se realizaron cambios. Puede hacerlo de cualquier manera razonable, pero no de ninguna manera que sugiera que el licenciante lo respalda a usted o su uso. **No Comercial:** No puede utilizar el material con fines comerciales. **Sin Derivadas:** Si remezcla, transforma o construye sobre el material, no puede distribuir el material modificado. **Sin restricciones adicionales:** No puede aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros de hacer cualquier cosa que permita la licencia.



# UNIVERSIDAD NACIONAL JOSÉ FAUSTINO SÁNCHEZ CARRIÓN

## LICENCIADA

*(Resolución de Consejo Directivo N° 012-2020-SUNEDU/CD de fecha 27/01/2020)*

FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA Y METALURGICA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA

### INFORMACIÓN DE METADATOS

<b>DATOS DEL AUTOR (ES):</b>		
<b>NOMBRES Y APELLIDOS</b>	<b>DNI</b>	<b>FECHA DE SUSTENTACIÓN</b>
Sergio Andree Yarlaque Roman	76645638	23 - 02 - 2026
<b>DATOS DEL ASESOR:</b>		
<b>NOMBRES Y APELLIDOS</b>	<b>DNI</b>	<b>CÓDIGO ORCID</b>
Dr. Ronald Luis Ramos Pacheco	15615274	<a href="https://orcid.org/0000-0003-2036-1068">https://orcid.org/0000-0003-2036-1068</a>
<b>DATOS DE LOS MIEMBROS DE JURADOS – PREGRADO/POSGRADO-MAESTRÍA-DOCTORADO:</b>		
<b>NOMBRES Y APELLIDOS</b>	<b>DNI</b>	<b>CODIGO ORCID</b>
Berardo Beder Ruiz Sánchez	31602007	<a href="https://orcid.org/0000-0002-1822-9204">https://orcid.org/0000-0002-1822-9204</a>
Edwin Guillermo Gálvez Torres	15592688	<a href="https://orcid.org/0000-0002-7421-4453">https://orcid.org/0000-0002-7421-4453</a>
Crisostomo Villanueva Valdivia	42471434	<a href="https://orcid.org/0009-0007-9722-8261">https://orcid.org/0009-0007-9722-8261</a>

# YARLAQUE ROMAN SERGIO ANDREE 2026 - 000754

## AMPLIACIÓN DE CIRCUITO DE MOLIENDA MINERA TITAN DEL PERÚ-CROACIA DE 220 A 350 TPD USANDO HERRAMIENT...

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FIQyM - PREGRADO 2026

Unidad de Investigación de la FIQyM - 2026

Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica

### Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::1:3462672277

Fecha de entrega

22 ene 2026, 11:32 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

22 ene 2026, 11:38 a.m. GMT-5

Nombre del archivo

TPD\_USANDO\_HERRAMIENTAS\_DE\_C\_LCULO\_METAL\_RGICO\_CHALA\_2024.docx

Tamaño del archivo

2.5 MB

89 páginas

15.906 palabras

86.489 caracteres



Página 2 de 94 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega trn:oid::1:3462672277

## 8% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

### Fuentes principales

8% Fuentes de Internet

2% Publicaciones

4% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

### Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

## **DEDICATORIA**

Dedico el presente trabajo a mi familia, quienes han sabido darme el soporte que necesitaba para poder continuar desarrollándome profesionalmente; asimismo dedicarla a mi mascota Negrita quien me ha acompañado y dado el apoyo emocional que he necesitado para desempeñarme satisfactoriamente en la vida.

*Yarlaqué Roman, Sergio Andree*

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero agradecer primeramente al Ing. Jheri Quispe quien supo desarrollar mis habilidades y capacidades dentro del mundo de la metalurgia. Siempre estaré agradecido con usted.

Agradecer a mis amigos de vida, quienes, a través de la alegría, han sabido darme a entender que nunca estaré solo. ¡Muchas gracias!

*Yarlaqué Román, Sergio Andree*

## Contenido

DEDICATORIA .....	V
AGRADECIMIENTO .....	VI
ÍNDICE DE TABLAS .....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XII
RESUMEN .....	XIII
ABSTRACT.....	XIV
INTRODUCCIÓN .....	XV
CAPITULO I .....	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	1
1.1. Descripción de la realidad problemática.....	1
1.2. Formulación del problema .....	2
1.2.1. Problema general.....	2
1.2.2. Problemas específicos.....	2
1.3. Objetivos de la investigación .....	2
1.3.1. Objetivo general.....	2
1.3.2. Objetivos específicos .....	2
1.4. Justificación de la investigación .....	3
1.4.1. Justificación legal.....	3
1.4.2. Justificación teórica.....	3
1.4.3. Justificación económica.....	3
1.4.4. Justificación social.....	4

1.5. Delimitaciones del estudio .....	4
1.5.1. Delimitación temporal .....	4
1.5.2. Delimitación espacial.....	4
1.5.3. Delimitación conceptual .....	4
1.6. Viabilidad del estudio .....	4
CAPÍTULO II.....	6
MARCO TEÓRICO .....	6
2.1. Antecedentes de la investigación.....	6
2.1.1. Investigaciones internacionales .....	6
2.1.2. Investigaciones nacionales.....	8
2.2. Bases teóricas.....	10
2.2.1. Diagrama de flujo, tipos de circuito.....	10
2.2.2. Técnicas de Muestreo .....	11
2.2.3. Preparación mecánica .....	12
2.2.4. Balance de Masa de Molienda .....	13
2.2.5. Simulación de Circuito de Molienda .....	13
2.3. Bases filosóficas .....	18
2.3.1. Pragmatismo y enfoque en resultados .....	19
2.3.2. Ética y sostenibilidad en la optimización .....	19
2.4. Definición de términos básicos.....	19
2.5. Hipótesis de investigación .....	24
2.5.1. Hipótesis general.....	24

2.5.2. Hipótesis específicas.....	24
2.6. Operacionalización de las variables.....	25
CAPÍTULO III.....	26
METODOLOGÍA.....	26
3.1. Diseño metodológico .....	26
3.2. Población .....	26
3.3. Muestra .....	26
3.4. Técnicas de recolección de datos.....	26
3.5. Técnicas de procedimiento de datos .....	27
CAPÍTULO IV .....	28
RESULTADOS .....	28
4.1. Análisis de resultados .....	28
4.1.1. Muestreo de circuito de molienda de 220TPD-16/03/2023.....	28
4.1.2. Proceso de simulación para ampliación de molienda a 350TPD.....	36
4.1.3. Muestreo de circuito de molienda 16/06/2025 .....	48
CAPÍTULO V.....	55
DISCUSIÓN .....	55
5.1 Discusión de resultados.....	55
5.1.1. Primer muestreo-Evaluación del circuito base (16 de marzo de 2023). 55	
5.1.2. Simulación del circuito ampliado (18 de diciembre de 2023).....	56
5.1.3. Segundo muestreo – Validación operativa (16 de junio de 2025).....	58
5.4. Comparación global entre escenarios .....	61

CAPÍTULO VI .....	63
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	63
6.1 Conclusiones.....	63
6.2. Recomendaciones .....	64
ANEXOS .....	65
Matriz de consistencia .....	66

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Balance de masa circuito de molienda 16/03/2023 .....	31
Tabla 2. Análisis granulométrico primer muestreo .....	33
Tabla 3. Potencia nominal y de operación de equipos.....	34
Tabla 4. WI operacional de planta .....	34
Tabla 5. Velocidad crítica en molino.....	35
Tabla 6. Parámetros de operación de hidrociclones .....	36
Tabla 7. Capacidad máxima por molino mediante software Minprosim.....	37
Tabla 8. Collar de bolas para molino 7x7.....	39
Tabla 9. Recarga diaria bolas en molino 7x7.....	40
Tabla 10. Collar de bolas en molino 6x8.....	40
Tabla 11. Recarga diaria en molino 6x8.....	41
Tabla 12. Balance de masa circuito de molienda-simulación.....	46
Tabla 13. Parámetros en molinos-simulación.....	47
Tabla 14. WI circuito de molienda. -simulación .....	47
Tabla 15. Ratio de reducción en molinos -simulación.....	47
Tabla 16. Parámetros de trabajo en ciclones-simulación.....	47
Tabla 17. Balance de masa circuito de molienda.....	50
Tabla 18. Análisis granulométrico segundo muestreo.....	51
Tabla 19. Parámetros de velocidad y potencia en circuito .....	52
Tabla 20. WI operacional de planta .....	52
Tabla 21. Ratio de reducción en molino .....	53
Tabla 22. Parámetros en hidrociclones .....	53
Tabla 23. Comparación global entre escenarios .....	61

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Flowsheet y balance de masa de primer muestreo .....	30
Figura 2. Plantilla de simulación para circuito cerrado directo (Moly-Cop Tools).	41
Figura 3. Plantilla para simulación de circuito inverso (Moly-Cop Tools).....	42
Figura 4. Plantilla funcional para simulación de circuito de molienda 350TPD.....	43
Figura 5. Diagrama de flujo y balance de masa segundo muestreo.....	48
Figura 6. Cálculo de capacidad en molino 7x7-MinProsim .....	67
Figura 7. Cálculo de capacidad en molino 6x8-MinProsim .....	68
Figura 8. Descarga de Underflow en forma de sogá-primer muestreo.....	69
Figura 9. Molino 6x8 antes de implementar .....	70
Figura 10. Mediciones en molino 6x8 .....	71
Figura 11. Molino 7x7 en operación.....	72
Figura 12. Circuito cerrado directo con molino 7x7 .....	73

## RESUMEN

La presente investigación titulada “Ampliación de circuito de molienda Minera Titán del Perú–Croacia de 220 a 350 TPD usando herramientas de cálculo metalúrgico” tuvo como propósito optimizar el rendimiento operativo y metalúrgico del proceso de molienda mediante la aplicación de herramientas de simulación y modelamiento. El estudio se desarrolló en tres etapas principales. En primer lugar, se efectuó un muestreo inicial (marzo de 2023) del circuito de molienda existente, conformado por un solo molino 7x7 y un hidrociclón D-10, determinándose una capacidad de 220 TPD, P80 de 291  $\mu\text{m}$ , Work Index operacional de 21.91 kWh/t y una eficiencia de clasificación del 41.5 %, evidenciando limitaciones en la carga circulante y el tamaño de alimentación.

Posteriormente, se desarrolló una simulación metalúrgica (diciembre de 2023) utilizando los softwares MinProSim y Moly-Cop Tools, con el fin de proyectar la ampliación del circuito a 350 TPD. La simulación propuso un nuevo esquema en doble etapa de molienda, incorporando un molino 6x8 en circuito cerrado inverso junto al molino 7x7 en circuito directo, y un collar de bolas optimizado. El modelo arrojó un P80 final proyectado de 157  $\mu\text{m}$ , un D50c de 221.02  $\mu\text{m}$  en el ciclón secundario y un Work Index global de 24.7 kWh/t, valores que sirvieron de base para la implementación en planta.

Finalmente, en el segundo muestreo (junio de 2025) se validaron los resultados, observándose una capacidad real superior a 370 TPD, un P80 de 147  $\mu\text{m}$ , y un Work Index reducido a 17 kWh/t, evidenciando una mejora significativa en la eficiencia energética y en la liberación de partículas finas. La reducción del F80 a 11100  $\mu\text{m}$  se atribuyó a la incorporación de un nuevo circuito de chancado, que permitió optimizar la alimentación hacia molienda. En conjunto, los resultados confirmaron que la ampliación del circuito y la aplicación de herramientas de simulación metalúrgica constituyen estrategias efectivas para aumentar la capacidad de tratamiento, mejorar la eficiencia operativa y reducir el consumo energético. La investigación demuestra la validez del modelamiento como herramienta predictiva y de soporte técnico para la toma de decisiones en procesos de conminución y clasificación en plantas concentradoras de mediana escala.

**Palabras clave:** Molienda, hidrociclón, simulación, carga circulante, granulometría

## ABSTRACT

The present research entitled “Expansion of the Minera Circuit at Minera Titan of Perú – Croacia from 220 to 350 TPD Using Metallurgical Calculation Tools, aimed to optimize the operational and metallurgical performance of the grinding process through the application of simulation and modeling tools. The study was developed in three main stages. First, a initial sampling was conducted (March 2023) of the existing grinding circuit, which consisted of a single 7x7 mill and D 10 hydrocyclone. The system operated a capacity of 220 TPD, with a P80 of 291  $\mu\text{m}$ , an operational Work Index of 21.91 kWh/t, and a classification efficiency of 41.5%, revealing limitations in circulating load and feed size.

Subsequently, a metallurgical simulation (December 2023) was carried out using MinProSim and Moly-Cop Tools to project the circuit expansion to 350 TPD. The simulation proposed a two-stage grinding configuration, incorporating a 6x8 ball mill in reverse closed circuit alongside the 7x7 mill in direct closed circuit, and implementing an optimized ball charge. The model predicted a final P80 of 157  $\mu\text{m}$ , a D50c of 221.02  $\mu\text{m}$  in the secondary cyclone, and a global Work Index of 24.7 kWh/t, which served as the design basis for the plant modification.

Finally, during the second sampling campaign (June 2025), the simulated scenario was validated under real operating conditions. The circuit achieved an actual capacity above 370 TPD, with a final P80 of 147  $\mu\text{m}$  and a reduced Work Index of 17 kWh/t, demonstrating significant improvements in energy efficiency and fine particle liberation. The feed size (F80) was reduced to 11 100  $\mu\text{m}$  due to the implementation of a new crushing circuit, which enhanced the performance of the grinding stages. Overall, the results confirmed that expanding the grinding circuit and applying metallurgical simulation tools are effective strategies to increase processing capacity, improve operational efficiency, and reduce specific energy consumption. This research validates the use of simulation and modeling as predictive and decision-support tools for process optimization in medium-scale concentrator plants.

**Keywords:** Grinding, hydrocyclone, simulation, circulating load, particle size distribution

## INTRODUCCIÓN

La minería en el Perú se desarrolla en un contexto de creciente demanda de mineral procesado y de una mayor exigencia en cuanto a la eficiencia de los procesos metalúrgicos. En este marco, la planta minera Titan del Perú-Croacia, ubicada en Chala, ha identificado la necesidad de ampliar la capacidad de su circuito de molienda para responder a los requerimientos de producción y competitividad del sector.

El proceso de molienda constituye una etapa fundamental en el beneficio de minerales, pues asegura la liberación de partículas valiosas que luego serán recuperadas en etapas de concentración. Sin embargo, su desempeño está condicionado por diversos factores como la dureza del mineral, la configuración del circuito, la capacidad de los equipos y el control de parámetros operativos. Cuando estos aspectos no se encuentran optimizados, se generan problemas como sobrecarga de equipos, bajo porcentaje de finos, aumento en el consumo energético y reducción de la eficiencia metalúrgica.

Frente a esta situación, se plantea la ampliación del circuito de molienda desde su condición inicial hasta alcanzar las 350 toneladas por día (TPD), empleando herramientas de cálculo y simulación metalúrgica como Moly-Cop Tools y MinProsim. Dichas herramientas permiten analizar distintos escenarios, proyectar ajustes técnicos y garantizar que el aumento de capacidad se realice de manera controlada, manteniendo la calidad del producto y la estabilidad del proceso.

La investigación busca, de este modo, aportar una base técnica sólida para la optimización del circuito de molienda de la planta, integrando la experiencia de campo con el soporte de modelos de simulación, y contribuyendo a mejorar la productividad, eficiencia energética y sostenibilidad de la operación minera.

# CAPITULO I

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### **1.1. Descripción de la realidad problemática**

La planta minera Titán del Perú-Croacia cuenta con un circuito de molienda que, en su configuración inicial, no respondía plenamente a las necesidades de incremento de producción planteadas por la empresa. A pesar de los esfuerzos realizados para mejorar el rendimiento, aún se identificaban limitaciones en la eficiencia de los equipos, cuellos de botella operativos y un consumo energético elevado en relación con los resultados obtenidos.

Estas restricciones generaban efectos adversos como mayor desgaste de componentes, reducción de la eficiencia de clasificación, baja proporción de finos y costos operativos crecientes. De este modo, la capacidad de la planta se veía comprometida frente a la demanda de producción, afectando su competitividad dentro del sector minero.

Ante este panorama, surge la necesidad de ampliar el circuito de molienda a 350 TPD, lo cual implica no solo un aumento en el tonelaje tratado, sino también la implementación de mejoras que aseguren estabilidad operativa, eficiencia energética y sostenibilidad. Para ello, se hace indispensable aplicar herramientas de cálculo metalúrgico como Moly-Cop Tools, que permiten evaluar escenarios y definir estrategias de optimización con respaldo técnico.

En este sentido, la problemática central se resume en cómo lograr que la ampliación del circuito de molienda no se limite únicamente al aumento de capacidad instalada, sino que también garantice eficiencia en el proceso, reducción de costos y sostenibilidad en el tiempo.

## **1.2. Formulación del problema**

### **1.2.1. Problema general**

- ¿Cómo ampliar y optimizar el circuito de molienda de la minera Titán para alcanzar 350 TPD de producción eficiente?

### **1.2.2. Problemas específicos**

- ¿Cuáles son las limitaciones del circuito de molienda actual que deben ser consideradas en el proceso de ampliación?
- ¿Cómo puede la ampliación del circuito de molienda impactar la eficiencia metalúrgica y la capacidad de procesamiento de mineral?
- ¿Qué ajustes operativos y técnicos son necesarios para adaptar el circuito a la nueva capacidad de 350 TPD sin comprometer la calidad del proceso?

## **1.3. Objetivos de la investigación**

### **1.3.1. Objetivo general**

- Ampliar el circuito de molienda de la planta minera Titan del Perú-Croacia de 220 a 350 TPD, utilizando herramientas de simulación metalúrgica, para optimizar el rendimiento metalúrgico y la capacidad operativa del proceso.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Identificar las limitaciones y desafíos del circuito de molienda actual en relación con la ampliación de su capacidad.
- Evaluar el impacto de la ampliación del circuito sobre la eficiencia metalúrgica y la capacidad de procesamiento de mineral.
- Determinar las modificaciones operativas necesarias para adaptar el circuito a la nueva capacidad sin afectar la estabilidad del proceso.

## **1.4. Justificación de la investigación**

### **1.4.1. Justificación legal**

La ampliación del circuito de molienda en minera Titan del Perú-Croacia obedece al cumplimiento de las normativas peruanas e internacionales correspondientes al rubro minero, en donde se considera clave la optimización de los procesos con la finalidad de garantizar seguridad, sostenibilidad y eficiencia operativa. Asimismo, dentro del contexto de la legislación minera peruana, se busca aprovechar al máximo los recursos minerales bajo principios de desarrollo sostenible. Asimismo, al desarrollarse esta ampliación se seguirá las exigencias que antepone el Ministerio de Energía y Minas con respecto al manejo responsable de los recursos naturales y la eficiencia operativa.

### **1.4.2. Justificación teórica**

Los fundamentos correspondientes a esta investigación pertenecen a la ingeniería metalúrgica y procesos de optimización de recursos. De acuerdo con estudios previos acerca de la mejora del circuito de molienda, haciendo uso de simulaciones metalúrgicas y ajustando los parámetros operativos es posible alcanzar el aumento de la eficiencia del proceso, dando oportunidad al aumento de la capacidad de tratamiento de mineral. Asimismo, este estudio se basa en la teoría de mejora continua de procesos, en donde existen propuestas a la implementación de tecnologías nuevas y uso de simulaciones como herramientas imprescindibles para alcanzar la eficiencia operativa.

### **1.4.3. Justificación económica**

Debido a que se pretende ampliar el tonelaje ingresado en el circuito de molienda, ello generará un aumento de la capacidad de procesamiento, lo que se traduce en aumento de volumen de mineral procesado y, por lo tanto, incremento de la recuperación de material valioso. Ello tiene un impacto positivo en los ingresos económicos de la planta minera ya que se adquiere eficiencia en las operaciones y reducción de los costos. Asimismo, al

optimizar el proceso de molienda se conseguirá una mayor competitividad en el mercado debido a que se consiguen ganancias provocadas por la recuperación de metales valiosos.

#### **1.4.4. Justificación social**

Desde el punto de vista social, la ampliación del circuito de molienda se transforma en una oportunidad de mejora en las condiciones laborales y de seguridad de los trabajadores. La optimización del proceso permitirá crear empleos directos e indirectos en la comunidad local, permitiendo mejorar la economía regional y mejorando la calidad de vida de las familias involucradas con el sector minero.

#### **1.5. Delimitaciones del estudio**

Después de presentar la situación problemática del tema, se llegaron a conclusiones metodológicas que indican que la investigación llevada a cabo se limitará a una serie de elementos:

##### **1.5.1. Delimitación temporal**

La investigación se desarrollará en un periodo de seis meses, considerando el muestreo, análisis de datos y propuestas de mejora.

##### **1.5.2. Delimitación espacial**

Se llevará a cabo en el circuito de molienda de la minera Titán, con ensayos complementarios en el laboratorio de la universidad.

##### **1.5.3. Delimitación conceptual**

Los conceptos incluyen circuito de molienda, eficiencia energética, variabilidad granulométrica y capacidad de producción.

#### **1.6. Viabilidad del estudio**

El estudio es viable dado que se cuenta con acceso a los recursos necesarios, incluyendo el circuito de molienda de la minera Titán y el laboratorio universitario. Así

mismo, se dispone del equipo y personal capacitado para realizar el muestreo, análisis de datos y pruebas experimentales.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes de la investigación

##### 2.1.1. Investigaciones internacionales

Bustamante (2020) sustentó una tesis titulada “Optimización del proceso de molienda en la planta 2 de minera Saucito” en donde determina que, antes de realizarse las operaciones en planta, hay un descontrol en las variables de molienda de mineral polimetálico, sobre todo en el clasificador que recibe el producto del molino SAG y también en el consumo descontrolado de energía en remolienda. Asimismo, el objetivo de esta tesis es aumentar el tonelaje del molino disminuyendo la carga circulante, por ello, se vio oportuno reemplazar los clasificadores (ciclones) por cribas Derrick debido a que se consigue una mayor eficiencia en separación de finos-gruesos y con ello garantizar un adecuado tamaño del mineral que será enviado para flotación. En cuanto a los resultados, se pudo conseguir un aumento del tonelaje tratado desde 1824.45 a 1706.6 TPD, además de haberse conseguido el aumento de la eficiencia de los hidrociclones de 58 a 79%.

Evaristo (2020) desarrolló un proyecto denominado “Proyecto para el incremento de capacidad de operación de la planta de beneficio Compañía minera LaNegra” en donde tuvo por objetivo desarrollar modificaciones y mejoras en el circuito de molienda de la planta con el fin de alcanzar mayor capacidad de toneladas procesadas y por lo tanto mayores ingresos económicos para la compañía. El proceso posee hasta ese momento un tratamiento de 1500 TPD y se tiene una visión de conseguir un aumento hasta 2000 TPD, por lo que como primer paso se hizo el levantamiento del diagrama de proceso completamente detallado, por lo que se requirió del conocimiento exacto de cada equipo empleado en el circuito sus principios básicos para su operación. Se pretende emplear la mayor cantidad de equipos que ya se tienen

disponibles en la zona, siendo el primer punto a mantener las quebradores disponibles, las mismas que serán optimizadas para alcanzar la mayor cantidad de minera que puede procesar. No obstante, en el área de molienda si se desarrollaron cambios pues se adquirió un nuevo molino de bolas 10x10 junto con un nido de 6 ciclones D10.

Núñez Et al (2021) desarrollaron una tesis titulada “Determinación de restricciones de capacidad de producción en proceso de obtención de cobre” en la que se desarrolla un trabajo empleando una simulación de eventos discretos para poder determinar los cuellos de botella que existen en el circuito de conminución y mejorar el proceso. Mediante el procedimiento se buscan nuevos escenarios que permitan aliviar zonas en donde no hay un adecuado flujo de mineral, o por otro lado, no existe una clasificación adecuada. Los resultados obtenidos incluyen un modelo DES validado con lo que se pretende reemplazar el circuito que procesa actualmente, en cuanto a cambio de escenario.

Arias y Villacrés (2020) publican una tesis titulada “Reingeniería en el diseño e implementación de un molino tipo bola para una industria minera ubicada en el Naranjal” en la que se tuvo por objetivo diseñar e implementar un molino de bolas para moler mineral similar. Para ello se dio vital importancia al tema de desgaste de elementos del molino, buscando que este valor sea mínimo por ello se desarrolló un plan de mantenimiento preventivo para minimizar los casos que requieran de un mantenimiento correctivo. Asimismo, en el proyecto vienen incluido un estudio de análisis económico y una simulación elaborado en el software SOLIDWORKS teniendo en cuenta los parámetros de molienda a los que el molino se encuentra vinculado.

Calderón (2023) presentó una investigación denominada “Optimización del proceso de molienda-flotación de minerales, mediante el análisis metalúrgico del elemento plata en la planta de Beneficio Ecoluxen S.A.” fue desarrollado de manera detallada para determinar el tiempo óptimo de molienda y el nivel de liberación empleando la microscopía óptica

polarizante de luz reflejada haciendo uso de briquetas. Asimismo, se desarrollaron pruebas de flotación en dos etapas distintas determinadas por el acondicionamiento de la pulpa para poder determinar la cantidad de reactivo que se requiere para una mejor recuperación de plata. Para optimizar la molienda fue importante conocer el tiempo de molienda más conveniente pudiendo evidenciar al finalizar los resultados, que el mejor tiempo para la molienda con un buen porcentaje de malla -200 es de 19 minutos con un porcentaje de 65.5%.

### **2.1.2. Investigaciones nacionales**

Carrión y Luis (2020) desarrollaron una investigación denominada “Optimización del proceso molienda – clasificación, mediante la instalación de una zaranda de alta frecuencia de 5 pisos, en la Concentrada La Inmaculada, Mina El Cofre – CIEMSA” en la que definen el punto de partida en la optimización e incremento de tonelaje para el circuito de molienda, la cual inicia desarrollándose el análisis granulométrico en mallas de laboratorio para los distintos puntos que conforman el circuito que serán evaluadas como variables que afectan el proceso. Mediante el análisis de mallas uno se encuentra en la capacidad de determinar la eficiencia de clasificación que posee la ZAF, el D50 de los hidrociclones, la carga circulante que hay en el circuito, ratio reducción, el porcentaje de sólidos, entre otros. Al desarrollarse una implementación de ZAF de 5 pisos, se pudo lograr aumentar la eficiencia de clasificación del clasificador, el cual antes de ser reemplazado correspondía su nombre al Hidrociclón D12 CREBS, con el que se conseguía una baja recuperación. Al optimizarse el circuito, además de la eficiencia también se pudo reducir la carga circulante, con lo que se vio oportunidad de aumentar tonelaje, justamente el punto al que se quería llegar desarrollando esta investigación.

Pino (2024) desarrolla una investigación denominada “Aumento de capacidad de molienda de 19,600 TPD a 22,000 TPD aplicando técnicas de modelamiento, simulación y

dimensionamiento ” en donde tuvo por objetivo evitar la reducción del impacto económico generado por una baja producción de concentrados, para ello se hizo uso de técnicas de modelos y simulación para determinar adecuadamente el dimensionamiento específico al que se puede llegar con el circuito de molienda y clasificación que se tiene en frente y conseguir el aumento de las toneladas que se procesan diariamente. En una primera etapa se procederá a hacer un muestreo con los equipos que se tienen actualmente, para generar un modelo que servirá como base para la simulación respectiva, en donde se determinará que flujos se podrán mover, o en todo caso, determinar qué otros escenarios se podrán desarrollar.

Rojas (2020) sustentó una investigación que tiene por nombre “Incremento de throughput en la etapa de molienda SAG, para la optimización de las variables de la función selección y fractura, en la Compañía Minera Antamina S.A. - 2019” la cual tuvo por objetivo alcanzar un desempeño mejorado de las operaciones que se desarrollan en molienda, consiguiendo a su vez, la mejora de la calidad del producto final. Mediante este estudio se efectuaron trabajos de muestreo en el circuito de molienda para poder determinar el balance de masa del mismo; cabe resaltar que para esta investigación se hizo uso del software JKSimMet para representar adecuadamente el comportamiento de la Función Selección, Función Fractura y transporte de material de un molino a escala industrial. Al haberse obtenido los datos correspondientes al muestreo, se empleó el JK para representar adecuadamente el circuito mediante los parámetros exactos del molino SAG, reflejando el comportamiento del equipo.

Soto (2021) sustentó la tesis denominada “Configuración del circuito de molienda para incrementar la producción de concentrados en la compañía minera Volcan-Unidad Cerro S.A.C.” que tuvo por objetivo incrementar la producción del circuito de molienda mediante su configuración. Para ello fue necesario desarrollar un análisis, evaluación,

selección y operación de los equipos disponibles. Las técnicas e instrumentos empleados fue la observación y ficha de observación, mientras que la población estuvo conformada por el circuito de molienda correspondiente a la Compañía Minera Volcan Unidad Cerro S.A.C. Gracias a la realización de esta investigación se pudo conocer que del año 2018 al 2019 se incrementó la producción de 5000 a 7000 TPD gracias a la nueva configuración que se hizo, logrando disminuir el tamaño de mineral que se alimentaba al circuito y por lo tanto consiguiendo las condiciones para poder aumentar el tonelaje.

Salazar (2022) desarrolla una investigación titulada “Aptitud en la molienda de minerales mixtos para la liberación de oro a nivel experimental de la empresa MACDESA” en la que tuvo por objetivo desarrollar la evaluación de la carga moledora, velocidad crítica y el tiempo que se requiere para conseguir la liberación del mineral. Esta investigación fue desarrollada en el laboratorio perteneciente a la empresa MACDESA haciendo uso de mineral copiado que sea liberado y ha sido pasado por malla 10 teniendo el 100% de carga pasante. A través de los resultados se pudo conocer que el mejor resultado se logra al tener un 90% de velocidad crítica ya que el porcentaje de malla -200 es de 85.64% con una confiabilidad de 95%, resaltando con tres pruebas más que se hicieron con distintos tiempos y obteniendo una malla más baja.

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. Diagrama de flujo, tipos de circuito**

Según Arias & Villacrés (2020) el diagrama de flujo es la representación gráfica del circuito por donde el mineral hace su recorrido durante todo el proceso de molienda. Es muy importante pues representa el modo en que se opera el circuito, ayudando a entender las interrelaciones que existen en cada etapa con el fin de optimizar mediante configuraciones o cambios en los flujos.

### ***2.2.1.1. Tipos de Circuito de Molienda***

- **Circuito Abierto:** Se caracteriza por tener un solo alimento (aquel que ingresa a molino) y un producto final que descarga directamente a otro circuito o etapa, sin que exista recirculación de material. De acuerdo con Pino (2024), este circuito es menos eficiente debido a que no hay un control óptimo del tamaño de partículas.
- **Circuito Cerrado:** Posee mayor eficiencia debido a que hay un clasificador de por medio. La característica principal de este circuito está en que existe recirculación de material ya que el clasificador (en el caso de molienda, un hidrociclón) envía los finos a la siguiente etapa mientras que los gruesos conforman un flujo que regresa al punto de partida (molino) en donde serán triturados nuevamente hasta alcanzar el tamaño adecuado (Rojas Rupay, 2020).

### **2.2.2. Técnicas de Muestreo**

El muestreo es un punto muy importante dentro de la molienda de minerales debido a que significa el punto de partida para la obtención de datos para el análisis granulométrico del circuito. Las técnicas de muestreo permiten llegar a este punto con el fin de determinar la eficiencia de cada equipo y del circuito en general, la distribución de tamaños de partícula y, sobre todo, para desarrollar el balance de masa.

#### ***2.2.2.1. Técnicas comunes de muestreo en molienda***

- **Muestreo en el circuito de alimentación:** La muestra es extraída de cada punto de alimentación en el circuito, empezando por el alimento fresco (mineral proveniente de chancado a molienda) y demás alimentos que ingresan a cada molino. Es extraída con la finalidad de saber el F80, composición de tamaños en porcentajes, humedad, entre otras características.

- Muestreo en el circuito de descarga: Se extrae muestra de las descargas de los molinos con la finalidad de obtener el P80 de cada equipo, el porcentaje de sólidos, la ratio de reducción, etc.
- Muestreo en el ciclón: Se extrae muestra del Overflow y el Underflow para determinar la eficiencia del Hidrociclón, la proporción que va a cada punto, el tamaño de partícula para cada sección, el D50, entre otras características del mineral.

Este muestreo debe ser representativo y para lograr una muestra adecuada será necesario coordinar tiempo de muestreo, hora de arranque e intervalos de tiempo que se requerirá para muestrear.

### **2.2.3. Preparación mecánica**

Corresponde a un proceso importante para obtener una muestra representativa de cada punto muestreado en el circuito, requiere que se haga adecuadamente para obtener resultados confiables. Posee etapas las cuales son:

#### **2.2.3.1. Secado**

Es la etapa en que se emplea el horno de secado para obtener una muestra libre de agua que se pueda manipular. Debido a la cantidad que se extrae se ve necesario seguir al siguiente punto.

#### **2.2.3.2. Cuarteado**

En este punto la muestra seca es repartida en partes iguales y homogéneas hasta obtener una muestra mínima pero representativa.

#### **2.2.3.3. Tamizado**

Se hará uso de un Rotap, el cual es un equipo que sirve para tamizar muestras. Este proceso se encarga de separar o clasificar las partículas de acuerdo al tamaño. Gracias a estos

pesos es que se podrá determinar la proporción de tamaños presentes en los flujos de cada punto que conforma el circuito.

#### **2.2.4. Balance de Masa de Molienda**

El balance de masa es un punto muy importante dentro de la ingeniería debido a que permite determinar adecuadamente la cantidad de flujo, el tamaño de partícula, la proporción, y el material agregado adicionalmente de cada punto del circuito de molienda. Ello permite evaluar la eficiencia de la operación y ajustar los parámetros correspondientes al proceso para alcanzar la optimización (Cerdea, 2013).

##### ***2.2.4.1. Fórmula básica para el balance de masa***

El balance de masa se rige siempre por la expresión “Lo que entra es igual a lo que sale”, y es tal cual pues, mientras el circuito no reciba alimentación de otro punto mas que del punto de partida se cumplirá lo expuesto. No obstante, en el circuito de molienda, aunque si es cierto que se cumple con el alimento seco, existen flujos de agua adicionales que alteran el porcentaje de sólidos, caudal y condiciones que afectan el proceso. Las variables clave que se analizan en un balance de masa son:

- Flujo de alimentación: Cantidad de mineral que ingresa en el molino.
- Flujo de descarga: Mineral procesado que sale del molino.
- Pérdidas o acumulación: Cantidad de material que se pierde durante el proceso.

Al realizarse el balance de masa es posible determinar la eficiencia, carga circulante y optimizar el proceso.

#### **2.2.5. Simulación de Circuito de Molienda**

Laborde (2025) menciona que la simulación del circuito de molienda es un proceso que permite conocer detalladamente el comportamiento que tiene el circuito empleando un software especializado. A través de la simulación es posible predecir el comportamiento que

tendrá el circuito posterior a haberse desarrollado una configuración diferente a la actual o haberse desarrollado modificaciones que permitan obtener nuevos escenarios a desarrollar.

#### ***2.2.5.1. Ventajas de la simulación de circuitos de molienda***

- Optimización de parámetros operativos: Es posible ajustar diversas variables como la carga de bolas, la velocidad de rotación de los molinos, tamaño de equipos y adicionar equipos siempre teniendo en cuenta el tonelaje y la eficiencia energética.
- Pruebas virtuales: Se desarrollan distintos escenarios agregando y quitando componentes sin afectar, en lo absoluto, a la planta.
- Pronóstico de resultados: Determina las condiciones a la que se encontraría el circuito con las modificaciones que se realicen, ello es clave para saber en que estado se encontraría el producto final.

#### ***2.2.5.2. Software utilizado en simulación de molienda***

##### **1. JKSimMet (JKMRC)**

Es un software metalúrgico desarrollado por John M. K. Mineral Research Centre de la Universidad de Queensland. Está diseñada para desarrollar el balance y simulación de procesos metalúrgicos por lo que es ampliamente conocida y empleada en la industria minera para analizar y optimizar los circuitos de molienda.

Características principales:

- Modelado de procesos de molienda: Permite realizar la simulación y optimización del circuito de molienda para determinar el comportamiento que muestra el mineral.
- Optimización de circuitos: Emplea modelos de balance de masa y balance de aguas para poder determinar el rendimiento del circuito de molienda y mejorar su eficiencia.

- Modelos de molienda: Posee modelos de molienda y clasificación empíricos y fundamentales en datos experimentales. Asimismo, es posible realizar ajustes a parámetros de operación para la optimización del consumo de energía y la producción.
- Simulaciones en tiempo real: Importante para desarrollar simulaciones bajo distintos escenarios con la finalidad de evaluar el impacto que ello causaría en el rendimiento del proceso.
- Integración con otros sistemas: Ya que tiene compatibilidad con otras aplicaciones, posee la capacidad de integración a otros softwares de simulación para tener una vista general del circuito completo.

## **2. METSIM**

Software metalúrgico empleado en minería para simular los procesos y optimizar los flujos de mineral. Este programa abarca muchos más procesos que solo molienda, pero ello no quiere decir que sea menos adecuada para esta etapa.

Características principales:

- Simulación de procesos de plantas completas: No solo abarca molienda, la simulación puede ser de la planta completa desde su trituración hasta alcanzar la obtención de concentrado.
- Análisis de flujos de material: Se puede realizar análisis detallado del flujo de material mediante distintas unidades de procesamiento.
- Optimización de eficiencia energética: Al igual que el software JK, también se puede modelar el consumo de energía en distintos puntos pertenecientes a planta, ello abre la posibilidad de mejorar el rendimiento y la eficiencia energética del proceso.

- Base de datos extensa: Debido a que posee una base de datos con diferentes materiales, permite desarrollar simulaciones a circuitos de molienda teniendo en cuenta las propiedades físicas y químicas del mineral.

### **3. Moly-Cop Tools**

Corresponde a un conjunto de herramientas aptas para simulación desarrolladas por Moly-Cop Tools. Está desarrollado para generar la optimización de los circuitos de molienda, pero más allegado al uso de bolas de molienda.

Características principales:

- Optimización del uso de bolas de molienda: Está más enfocado en el uso de bolas de molienda, por lo que se evalúa la eficacia del tamaño y la cantidad de bolas que se usarán dentro de los molinos para una molienda óptima.
- Simulación de consumo de energía: Permite obtener una simulación del consumo de energía en base a las condiciones que muestra la molienda, ello permite mejorar el tema de costos de energía.
- Modelado de desgaste de bolas: Gracias a sus funciones es posible desarrollar un modelo de desgaste de las bolas y crear una base para establecer condiciones que permitan que la vida útil de estos aceros sea mejor.
- Optimización de la distribución de tamaño de bola: Otra de sus funciones es la de establecer una distribución detallada de bolas que serán agregadas a un molino vacío y la recarga diaria que este tendrá cuando se encuentre en funcionamiento.
- Evaluación del rendimiento del molino: Posee herramientas que permiten evaluar el rendimiento de los molinos para establecer una base que permita optimizarlos.

#### 4. MinProsim

Combina principios de la ingeniería metalúrgica (balance de masa, energía y agua) con modelos empíricos y teóricos de reducción de tamaño, ofreciendo una plataforma versátil para el diseño y análisis de plantas concentradoras.

##### Principales características técnicas

- Modelado de circuitos de conminución: Permite crear y conectar diferentes equipos como: Trituradoras, molinos de bolas, molinos SAG, zarandas, clasificadores e hidrociclones.
- Los equipos se configuran con sus parámetros reales: diámetro, longitud, potencia del motor, carga de bolas, velocidad crítica, porcentaje de llenado, etc.
- El usuario puede definir el tipo de circuito (abierto, cerrado directo o inverso) y observar el flujo de material entre ellos.
- Cálculo del balance de masa y agua: Determina automáticamente los flujos de sólidos, agua y pulpa en cada punto del circuito.
- Permite ajustar las densidades, caudales y porcentajes de sólidos según las condiciones de operación.
- Genera diagramas de flujo balanceados que representan visualmente el comportamiento real del proceso.
- Simulación de variables operativas: Evalúa el impacto de velocidad del molino, carga de bolas, potencia, F80, P80 y Wi (Work Index) sobre el rendimiento.
- Calcula la energía específica de molienda (kWh/t) y permite comparar consumos entre configuraciones.
- Se puede proyectar el efecto de cambios en el tamaño de ápex o vórtex de los hidrociclones en la eficiencia de clasificación.

- Optimización de rendimiento: Permite establecer escenarios múltiples (base, simulado y óptimo).
- Calcula automáticamente el ratio de reducción, carga circulante, eficiencia total de ciclones y porcentaje de malla -200.
- Ideal para evaluar ampliaciones de capacidad como tu caso (de 220 a 350 TPD), sin necesidad de detener planta.

Comparación y Usos Comunes:

- JKSimMet está desarrollado para realizar una simulación bien detallada del circuito de molienda y clasificación, por lo que es empleado de forma amplia para lograr la optimización del circuito y mejorar la eficiencia energética.
- METSIM es una herramienta más diversa pues posee base de datos para realizar simulaciones desde que el mineral es recibido en planta hasta obtener su producto final, es ampliamente empleado para empresas que desean hacer una simulación a mayor escala.
- Moly-Cop Tools posee diversas herramientas que van a un punto específico a mejorar en molienda, está más adaptado para optimizar el tema de cuerpos moledores en el molino con el fin de reducir el desgaste de aceros y los costos por insumos.
- MinProsim Es una herramienta para calcular parámetros en planta de manera rápida como collar de bolas, tamaño de bola, nivel de llenado, entre otras funciones.

### **2.3. Bases filosóficas**

Esta investigación se ha desarrollado con la finalidad de alcanzar una mejora continua en los procesos metalúrgicos, ello requiere de una evaluación constante y el ajuste de distintos parámetros para alcanzar el punto adecuado en cuanto a rendimiento y eficiencia.

### **2.3.1. Pragmatismo y enfoque en resultados**

El pragmatismo es una corriente filosófica que enaltece la importancia de las soluciones prácticas y la utilidad inmediata de las teorías. Teniendo en cuenta que se requiere desarrollar una ampliación y optimización del circuito de molienda, el pragmatismo guía un enfoque que permite la mejora tangible de la eficiencia operativa y, a su vez, la reducción de los costos. Mediante este enfoque se considera que la resolución de problemas efectivos de forma eficiente es la medida que se tiene a las soluciones tecnológicas. De acuerdo con William James y John Dewey el valor de una idea o tecnología se mide mediante la capacidad que posee para generar resultados sostenibles en la práctica.

### **2.3.2. Ética y sostenibilidad en la optimización**

Optimizar el circuito de molienda no solo debe enfocarse en el tema de reducción de costos y mejora de los ingresos económicos sino también en su impacto hacia el medio ambiente y la comunidad. En base a la ética de la tecnología, es importante que los avances tecnológicos se encuentren ligados con la responsabilidad ambiental y social. Desarrollar la optimización del circuito de molienda implica la toma de decisiones que permitan alcanzar una mayor eficiencia operática, asimismo es importante la reducción de consumos energéticos y la producción de residuos que afecten el entorno. Mediante esta visión ética se pone en énfasis el desarrollo de tecnología que permitan favorecer el bien común, evitando que se creen problemas que afecten a largo plazo tanto a la comunidad como al medio ambiente.

## **2.4. Definición de términos básicos**

- Circuito de molienda

Estructura conformada por todos los equipos de molienda y clasificación que tienen por función conseguir la liberación de la partícula valiosa.

- Granulometría

Tamaño en que se encuentra el mineral molido en cierto punto del circuito de molienda, constituye una parte clave en la molienda ya que permite determinar el porcentaje de malla retenido y pasante, sobre todo en la malla -200.

- Eficiencia energética

En molienda, tiene que ver con la cantidad de energía que emplean los equipos para poder reducir el tamaño de partícula presente en el mineral. Para una optimización significa un punto importante a tener en cuenta puesto que lo que se requiere es mantener o disminuir la energía empleada aumentando la producción.

- Producción diaria

Es la cantidad de mineral que la planta procesa cada día, esta tiene por unidad las toneladas/día y es muy importante en el proceso de mejora continua de una unidad.

- Molienda en húmedo

Proceso perteneciente a la conminución de minerales que permite obtener la liberación de partículas. El término “húmedo” se refiere a que se emplea agua para mejorar el proceso ya que cada punto requiere de un porcentaje de sólidos distinto para mayor eficiencia y recuperación.

- Pulpa

Se denomina al mineral sólido que se encuentra combinado con agua para formar lodos que tienen esta denominación, forman parte de todo el proceso de molienda.

- Consumo específico de energía

Se refiere a la cantidad de energía que es necesaria para procesar una cantidad específica de mineral, se encuentra expresada en kWh/t. Gracias a este indicador se puede determinar la eficiencia energética presente en el circuito de molienda.

- Capacidad de producción

La cantidad de mineral que es posible procesar con las condiciones actuales que presente el circuito. Ello puede ser determinado mediante los dos métodos más conocidos: Bond y Troughout.

- Rendimiento de molienda

Indica la capacidad que posee el proceso de molienda para reducir el mineral en tamaño, está relacionada con la energía y el tiempo que se requiera. Es muy importante pues es uno de los indicadores que determinan la eficiencia del proceso. Los factores que afectan el rendimiento son: Las características físicas que presenta el mineral, los parámetros operativos en el circuito como velocidad crítica, carga de bolas, tamaño de partícula, y el diseño del molino.

- Desgaste de bolas de acero

Indica la pérdida de material a la que se ven sometidas las bolas que alimentan el molino debido a factores como el esfuerzo mecánico o la fricción. Este desgaste representa parte de los costos operativos que se generan en planta por lo que es importante evaluarlo, para ello se consideran los factores que influyen en las bolas como el tipo de mineral que se procesa, el tiempo de molienda, el tamaño de las bolas de acero y la carga de estas mismas dentro del molino.

- Carga circulante

Se refiere a la cantidad de mineral que ha sido procesado en el molino, pero que no pudo alcanzar el tamaño de partícula deseado por lo que vuelve a su punto de partida. Esta porción de mineral es mezclada con el mineral fresco, por lo que se genera un ciclo de recirculación continua.

- Hidrociclón

Equipo de clasificación que se emplea en Molienda para poder separar el material fino del grueso, posee tres partes, una denominada “Inlet” que es la zona por donde recibe su alimento y dos partes opuestas denominadas “ápex” y “vórtex” por donde salen los gruesos y finos, respectivamente.

- Recuperación de finos

Se entiende como la capacidad que posee el proceso de molienda para poder conseguir la obtención de partículas finas de mineral, estas definidas como partículas de tamaño mínimo que poseen mayor probabilidad de ser procesadas para extraer los metales valiosos en adjuntos.

- Tamaño de partícula

Es un factor importante en molienda pues tiene gran influencia en la eficiencia del proceso y la calidad que presenta el producto final. Siempre se busca reducir las partículas al tamaño adecuado para poder facilitar su traslado a la zona de flotación lo lixiviación en donde se podrá extraer el material valioso presente.

- Parámetros operativos

Corresponde a los ajustes y condiciones que determinarán la forma en que trabajan los equipos de molienda y, por lo tanto, el circuito en general. Entre los parámetros de

molienda se encuentra la carga de aceros, la velocidad crítica, porcentaje de sólidos, carga de mineral, entre otros.

- Costo operativo

Son los costos que se encuentran asociados con la operación que se realiza en planta, en este caso para la sección molienda. Se incluyen varios componentes como el consumo de energía, costos de aceros (bolas de acero), mano de obra, costos indirectos y el mantenimiento de cada equipo.

- Circuito cerrado

Es un tipo de circuito en donde el mineral que no alcanza su tamaño ideal es recirculado creando un flujo continuo que regresa a su punto de partida constantemente. Se encuentra conformado por un clasificador que es el que se encarga de separar aquella partícula que no cumple la condición normal de tamaño y es regresada al punto en donde se procesó anteriormente.

- Chancado

Etapa de la conminución que se encarga de disminuir el tamaño de las rocas provenientes de mina, su función principal es crear las condiciones adecuadas en lo que a tamaño se refiere, de las rocas para pasar al punto de molienda sin inconvenientes. Los equipos empleados para disminuir partículas son las chancadoras de distinto tipo mientras que su clasificador es una zaranda vibratoria.

- Molino de bolas

Equipo correspondiente a molienda que es empleado para reducir el tamaño del mineral gracias a la carga moledora que presenta y la rotación a la que va el cilindro. Este tipo de molino es ampliamente empleado en minería gracias a la eficiencia que presenta.

- Operación unitaria

Se refiere a cada punto que forma parte de todo el proceso completo para la extracción de material valioso. Por ejemplo, el chancado constituye una operación unitaria, mientras que la molienda y flotación también conforman una cada una. Cada operación unitaria tiene un fin que viene a ser complementado por su consecuente hasta conseguir el objetivo final del proceso.

## **2.5. Hipótesis de investigación**

### **2.5.1. Hipótesis general**

- La ampliación del circuito de molienda de 220 a 350 TPD en la planta minera Titan del Perú-Croacia, utilizando herramientas metalúrgicas, mejorará la eficiencia operativa y el rendimiento metalúrgico del proceso.

### **2.5.2. Hipótesis específicas**

- La ampliación del circuito de molienda permitirá aumentar la capacidad de procesamiento sin comprometer la eficiencia del proceso.
- La simulación metalúrgica permitirá optimizar el diseño del circuito, incrementando la recuperación de metales durante el proceso de molienda.
- La adaptación del circuito de molienda a la nueva capacidad de 350 TPD mejorará la estabilidad operativa y el rendimiento metalúrgico sin afectar la calidad del producto final

## 2.6. Operacionalización de las variables

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA DE MEDICIÓN	INSTRUMENTO DE MEDICIÓN
<b>Variable Independiente:</b> Ampliación de circuito de molienda	Proceso que permite aumentar la capacidad de procesamiento de mineral, en este caso, sería de 220 a 350 toneladas por día. Ello implica actualización de equipos y optimización del circuito, así como la incorporación de nuevas tecnologías.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacidad de procesamiento</li> <li>• Tecnología implementada</li> <li>• Mejoras operativas</li> <li>• Optimización de procesos</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Incremento de la capacidad de procesamiento (TPD).</li> <li>2. Cantidad de equipos actualizados o adquiridos.</li> <li>3. Porcentaje de mejora en la eficiencia de los procesos operativos.</li> <li>4. Evaluación de la implementación del software metalúrgico.</li> </ol>	<p>Escala nominal</p> <p>Escala de razón</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Informe técnico de ampliación de circuito de molienda.</li> <li>• Software metalúrgico.</li> <li>• Registros operativos.</li> </ul>
<b>Variable Dependiente:</b> Rendimiento de circuito de molienda	El rendimiento está ligado con la eficiencia con la que se logra reducir el tamaño de mineral tras la ampliación del circuito para mejorar la condición en que este flujo va hacia el circuito de flotación. Este rendimiento es medido mediante la eficiencia en la reducción de tamaño del mineral, la calidad de pulpa y la cantidad de energía empleada en el proceso.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eficiencia en la reducción de tamaño</li> <li>• Consumo energético</li> <li>• Tasa de procesamiento</li> <li>• Control de calidad de pulpa</li> <li>• Optimización del flujo de material</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Distribución granulométrica</li> <li>2. Consumo energético</li> <li>3. Tasa de molienda TPD</li> <li>4. Calidad de pulpa</li> <li>5. Eficiencia del proceso de molienda</li> </ol>	<p>Escala de razón</p> <p>Escala ordinal</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Herramientas metalúrgicas</li> <li>• Análisis granulométrico</li> <li>• Registros operativos</li> <li>• Sensores de monitoreo energético</li> </ul>

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA**

#### **3.1. Diseño metodológico**

Debido a que busca solucionar un problema práctico y específico, será de una investigación de tipo aplicada con enfoque cuantitativo, ya que se basa en recopilar y analizar datos mediables relacionados con el rendimiento del circuito de molienda como es el tonelaje, la granulometría, el consumo energético, entre otros. Asimismo, incluye elementos cualitativos puesto que se incorporarán observaciones descriptivas del comportamiento del circuito. El diseño de la investigación es experimental ya que implica la manipulación de variables y la medición de sus efectos, sobre todo cuando se busca comparar el rendimiento del circuito antes y después de haberse desarrollado el proceso de ampliación.

#### **3.2. Población**

La población está conformada por todos los componentes presentes en el circuito de molienda incluyendo las variables operativas involucradas.

#### **3.3. Muestra**

La muestra se encuentra conformada por las muestras de mineral procesado que será extraído del circuito de molienda de la planta Titan del Perú-Croacia antes y después de haberse implementado el nuevo escenario elegido gracias a la simulación del proceso. Las muestras estarán relacionadas con el tamaño de partícula y la distribución granulométrica del mineral.

#### **3.4. Técnicas de recolección de datos**

1. Muestreo del circuito de molienda: Se recolectará muestra de mineral procesado de cada punto que se determine dentro del circuito de molienda, ello para posteriormente ser evaluado por tamaños y pesos.

2. **Análisis granulométrico:** Las muestras serán procesadas en Rotap para poder determinar su distribución en tamaños de partícula. Ello permitirá conocer la eficiencia del proceso.
3. **Simulación metalúrgica:** Haciendo uso de herramientas metalúrgicas (MolyCop Tools) se realizarán simulaciones para modelar el comportamiento del circuito cuando este haya sido ampliado.
4. **Observación directa del circuito:** Clave para determinar las condiciones en que se encuentra el circuito, reconocer los equipos y determinar el flowsheet correspondiente.

### **3.5. Técnicas de procedimiento de datos**

1. **Análisis Granulométrico:** Los datos obtenidos en el análisis granulométrico permitirán conocer la distribución de tamaño de partícula antes y después de haberse establecido la simulación. Se usarán herramientas estadísticas para determinar la existencia de una mejora significativa en la molienda (en variación de tamaño de partícula o eficiencia en reducción).
2. **Simulación y Modelado:** Mediante simulación se podrá anticipar los resultados que se obtendrían al implementar nuevos equipos y ajustes en el circuito de molienda.
3. **Análisis Comparativo:** Se aplicarán pruebas estadísticas para comparar la distribución granulométrica antes y después de ejecutado el proyecto, ello permitirá entender si hay cambios estadísticamente significativos y si la simulación logró optimizar el proceso.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS**

#### **4.1. Análisis de resultados**

##### **4.1.1. Muestreo de circuito de molienda de 220TPD-16/03/2023**

Para el desarrollo del presente estudio, resulta fundamental contar con la data inicial representativa del proceso, ya que esta constituye la base sobre la cual se establecerá el modelo de simulación y se definirán los parámetros de operación del circuito. De esta manera, se asegura una referencia real y verificable desde la cual se podrá proyectar el comportamiento del sistema al realizar la ampliación de capacidad.

En ese sentido, se procedió a realizar un muestreo integral del circuito de molienda y clasificación, con la finalidad de determinar los parámetros operativos reales de planta y validar la condición del circuito previo a cualquier modificación. Este primer muestreo se llevó a cabo entre los días 15 y 19 de marzo del 2023, considerando la toma de muestras en los puntos clave del proceso: alimentación fresca al molino, descarga del molino, y flujos de overflow y underflow del hidrociclón principal. A partir de estas muestras se determinaron las densidades de pulpa, caudales, porcentajes de sólidos, análisis granulométrico por mallas y distribución de flujos, complementados con el balance de masa y energía del circuito correspondiente al flowsheet vigente en esa fecha.

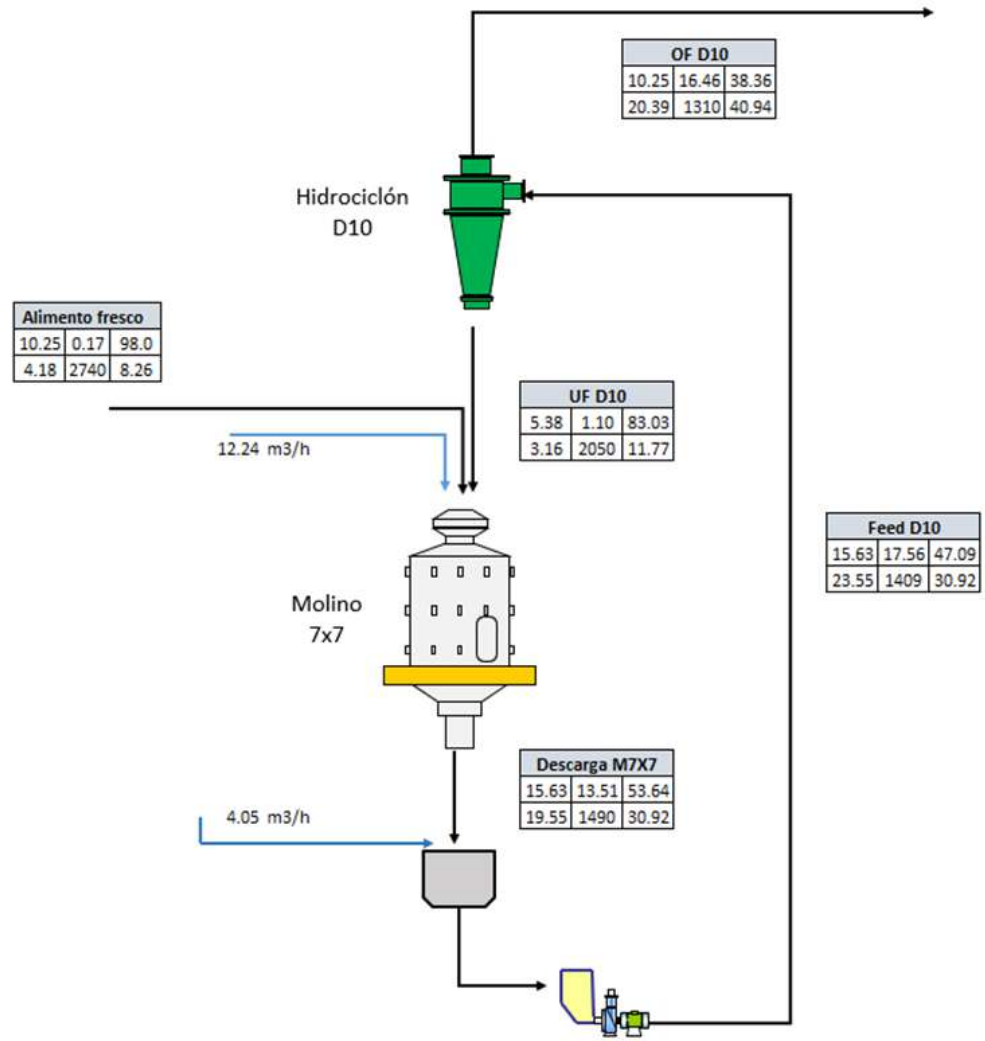
El balance de masa fue elaborado en base a los resultados experimentales, tomando en cuenta la granulometría obtenida mediante análisis en tamices estándar, con el propósito de definir el P80 y F80 de molienda. Además, se registraron los parámetros eléctricos de los

equipos (amperajes, potencias y velocidad de operación), con el fin de correlacionar el consumo energético con la capacidad real de tratamiento.

En base a esta data, se procederá en etapas posteriores a realizar la simulación metalúrgica, ajustando los modelos de molienda y clasificación para establecer el comportamiento del circuito bajo diferentes configuraciones y condiciones operativas, hasta definir el escenario más eficiente y estable para el aumento de tonelaje.

Figura 1. Flowsheet y balance de masa de primer muestreo

Descripción		
Tn (solidos)	Agua	% sólidos
Caudal	Densidad	m-200



De acuerdo con las observaciones realizadas durante el muestreo, se determinó que el circuito de molienda corresponde a un circuito cerrado directo, en el cual existe un único alimento fresco que ingresa mediante la faja transportadora, conformando un flujo combinado con el retorno o underflow proveniente del hidrociclón D-10. Esta configuración permite la recirculación continua del material grueso hacia el molino, garantizando la reducción progresiva del tamaño de partícula hasta alcanzar la granulometría objetivo.

En total se identificaron cinco puntos estratégicos de muestreo dentro del circuito, los cuales resultan esenciales para la elaboración del balance de masa y el análisis granulométrico correspondiente. Dichos puntos comprenden la alimentación fresca al molino, la descarga del molino, el flujo de alimentación al ciclón, y las fracciones de underflow y overflow del hidrociclón. La caracterización de cada uno de estos puntos permite establecer con precisión la distribución de tamaños, densidades de pulpa, porcentajes de sólidos y caudales de operación, datos indispensables para la evaluación integral del rendimiento del circuito.

*Tabla 1. Balance de masa circuito de molienda 16/03/2023*

<b>Parámetro</b>	<b>Alimento fresco</b>	<b>Descarga M7X7</b>	<b>Feed D10</b>	<b>UF D10</b>	<b>OF D10</b>
<b>Tn (sólidos)</b>	10.25	15.63	15.63	5.38	10.25
<b>Agua</b>	0.17	13.51	17.56	1.10	16.46
<b>Densidad</b>	2740	1490	1409	2050	1310
<b>Caudal</b>	4.18	19.55	23.55	3.16	20.39
<b>% Sólidos</b>	98	53.64	47.09	83.03	38.36

El balance presentado muestra una coherencia general entre los flujos del circuito, lo que indica que el muestreo fue representativo y el procesamiento de datos se realizó de manera consistente. Se aprecia que el alimento fresco mantiene un porcentaje de sólidos elevado (98%), lo cual es característico antes del ingreso al molino, mientras que la descarga

del molino (M7x7) evidencia una reducción significativa en la densidad y sólidos debido al agua que alimenta. En conjunto, los valores son razonables y consistentes con un circuito cerrado de molienda en condiciones estables, lo que servirá como una base confiable para el balance de masa detallado y la posterior evaluación de eficiencia del clasificador e índices de molienda.

Tabla 2. Análisis granulométrico primer muestreo

#Malla	Abertura ( $\mu$ )	Alimento fresco	DM 7x7	Feed HD10 % Ac pasante	Under	Over
1"	25400	66.83	100.00	100.00	100.00	100.00
3/4"	19050	56.55	100.00	100.00	100.00	100.00
1/2"	12700	52.01	100.00	100.00	100.00	100.00
3/8"	9500	49.21	100.00	100.00	100.00	100.00
1/4"	6300	42.21	100.00	100.00	100.00	100.00
6	3350	33.12	100.00	100.00	100.00	100.00
8	2360	28.94	99.98	99.98	99.89	100.00
10	2000	27.48	99.85	99.85	99.71	99.98
14	1400	24.01	99.35	99.35	98.59	99.72
20	850	20.01	96.50	96.50	93.02	98.26
25	710	18.62	94.20	94.20	88.83	96.99
35	500	16.38	87.05	87.05	77.06	92.90
50	300	13.65	70.92	70.92	53.90	81.14
80	180	11.25	52.34	52.34	31.88	64.05
100	150	10.73	48.28	48.28	27.63	59.84
140	106	9.38	38.12	38.12	17.69	49.15
170	90	8.78	34.17	34.17	14.21	44.64
200	75	8.26	30.92	30.92	11.77	40.94
270	53	7.34	25.65	25.65	8.40	34.53
325	45	7.15	24.37	24.37	7.83	32.55
-325	-45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>P80</b>		50038.02	405.04	405.04	548.42	290.94

Se observa que el tamaño de partícula P80 disminuye progresivamente desde el alimento fresco (50038  $\mu\text{m}$ ) hasta el overflow del hidrociclón (291  $\mu\text{m}$ ), lo cual indica un adecuado grado de reducción a lo largo del circuito. La mayor eficiencia de molienda se refleja en la diferencia marcada entre el feed al ciclón (405  $\mu\text{m}$ ) y su producto fino (overflow), evidenciando que el clasificador está cumpliendo su función de enviar partículas más finas hacia el siguiente proceso y retornar las gruesas al molino.

*Tabla 3. Potencia nominal y de operación de equipos*

Descripción	Molino 7x7
Marca	Comesa
HP Nominal	200
Amperaje Nominal	247
Amperaje de operación	222
Voltaje	440
Cos ( $\phi$ )	0.83
Potencia consumida, Kw	121.61
%Eficiencia de motor	81.54

Los datos indican que el molino 7x7 COMESA opera con una potencia consumida de 121.61 kW, equivalente a aproximadamente el 81.5% de eficiencia del motor, lo cual refleja un funcionamiento dentro de rangos adecuados para su capacidad nominal (200 HP).

*Tabla 4. WI operacional de planta*

Descripción	Molino 7x7
Proceso TPH	10.25
Amperaje de operación	222
Voltaje	440
Factor de potencia	0.83
Potencia consumida, Kw	121.61
Energía específica, Kw-h/T	11.86
F80, $\mu\text{m}$	50115
P80, $\mu\text{m}$	290.94
Wi Operacional, Kwh/T	21.91

Los resultados muestran que el molino 7x7 opera a un consumo específico de energía de 11.86 kWh/t, valor coherente con un mineral de alta dureza, lo cual se confirma con el Work Index operacional de 21.91 kWh/t. El tamaño de alimentación (F80 = 50115  $\mu\text{m}$ ) y el de producto (P80 = 291  $\mu\text{m}$ ) evidencian una adecuada reducción de tamaño, aunque con una demanda energética elevada. Esto sugiere que el circuito trabaja dentro de parámetros estables, pero con potencial de optimización en la carga moledora o en la eficiencia de clasificación para reducir el consumo energético por tonelada procesada.

*Tabla 5. Velocidad crítica en molino*

Descripción	Unidad	Molino
<b>Diámetro interno</b>	pies	7
<b>Velocidad de Operación</b>	rpm	21
<b>Velocidad crítica</b>	rpm	29.0
<b>Velocidad crítica</b>	%	72.4

El molino de 7 pies de diámetro interno opera a una velocidad de 21 rpm, equivalente al 72.4% de su velocidad crítica. Este valor se encuentra dentro del rango óptimo de operación (70–75%), lo cual favorece un movimiento adecuado de la carga moledora, combinando impacto y fricción sin generar centrifugación. En términos generales, la velocidad es apropiada para garantizar una buena eficiencia de molienda y un desgaste controlado de los medios moledores.

Tabla 6. Parámetros de operación de hidrociclones

Descripción	Descripción	Unidad	HD10
Características	Diámetro inlet	in	3
	Diámetro ápex	in	1/4
	Diámetro Vortex	in	2
Distribución	Feed	%	100
	Underflow	%	34.43
	Overflow	%	65.6
%m200	Feed	%	30.92
	Underflow	%	11.77
Tamaño de corte	Overflow	%	40.9
	D50	μm	433.76
%AC-D50	Feed	%	75.33
	Underflow	%	59.04
Carga circulante	Overflow	%	83.8
	Cc	%	52.51
Bypass de agua	By	%	6.26
	Ef Finos	%	56.7
Ef gruesos	Eg	%	73.2
	Ef total	%	41.5

Los resultados del hidrociclón D10 indican una operación estable, pero con margen de mejora en la clasificación. El D50 de 433.76 μm refleja un corte relativamente grueso, propio de un circuito que busca mantener tonelaje antes que máxima fineza. La eficiencia de finos (56.7%) y de gruesos (73.2%) son aceptables, aunque la eficiencia total (41.5%) evidencia una separación moderada, posiblemente afectada por el bypass de agua de 6.26%. La carga circulante (52.5%) está dentro de un rango normal para este tipo de ciclones, lo que confirma un equilibrio operativo, aunque se podría optimizar la clasificación ajustando la presión o las dimensiones de ápex y vórtex para mejorar la recuperación de finos hacia el overflow.

#### 4.1.2. Proceso de simulación para ampliación de molienda a 350TPD

##### 4.1.2.1. Alcance y supuestos de simulación

El objetivo de simular es conseguir una base para determinar los parámetros de operación de un circuito que tenga capacidad para tratar 350 TPD a más, contando con un

molino más de 6 pies de diámetro por 8 pies de longitud. Para eso, es imprescindible reconocer la capacidad de estos equipos, con el fin de tener la seguridad que la idea va a funcionar, y también establecer el tipo de circuito del que estará compuesta el área de molienda. Con ayuda del software Minprosim, conseguimos esta data, la cual se muestra a continuación:

*Tabla 7. Capacidad máxima por molino mediante software Minprosim*

Molino	Capacidad máxima de la planta- MinProsim								
	F80 fresco	P80 final	Wi	%Vc	%C	%perdida	Kw	Lifter,°	Kw
7X7	50038	405	14	72.4	40	10	35	115.4	<b>393.84</b>
6X8	800	200	14	70	40	10	35	90.78	<b>396.24</b>

Los cálculos de capacidad máxima MinProsim muestran que ambos molinos, en sus condiciones actuales, sostienen 394-396 TPD cada uno (16.4-16.5 tph), con potencias de 115.4 kW (7x7) y 90.78 kW (6x8), ambas dentro de los límites de sus motores (200 HP y 150 HP, respectivamente). El 7x7 opera a 72.4% Vc y 40% de llenado, entregando P80=405  $\mu$ m; el 6x8 trabaja a 70% Vc y 40% de llenado, con P80=200  $\mu$ m y un F80 de 800  $\mu$ m, consistente con un uso como etapa de remolienda (alimento ya clasificado).

Sabiendo que se trabaja con mineral polimetálico, el P80 del 7x7 (405  $\mu$ m) es excesivamente grueso para flotación selectiva; el del 6x8 (200  $\mu$ m) es más cercano. En términos energéticos, los valores implican kWh/t aproximados de 12.5 kWh/t en conjunto, coherente con un Wi supuesto de 14 kWh/t y confirma que la meta de 350 TPD es viable: el cuello de botella no está en potencia/capacidad de molienda sino en clasificación, por ello se establece ideas para iniciar instalación de un segundo hidrociclón.

#### **4.1.2.2. Armado de línea base, circuito de molienda que involucra molino 7x7 y 6x8**

Sabiendo la capacidad de los molinos 7x7 y 6x8 en el software MinProsim, se determinó que ambos equipos poseen una capacidad individual cercana a 395 TPD, lo que evidencia que la limitante del proceso no radica en la potencia instalada, sino en la

configuración y eficiencia del sistema de clasificación. A partir de los análisis de potencia, granulometría y condiciones de operación de cada molino, se propuso una nueva disposición del circuito que permite optimizar el aprovechamiento energético y lograr el P80 requerido para la flotación de minerales polimetálicos, estimado entre 100 y 150  $\mu\text{m}$ .

El molino 7x7 trabajará como molino primario, operando en circuito cerrado directo con su hidrociclón D10 actual. En este sistema, el underflow del ciclón retornará al molino para completar la reducción de las fracciones gruesas, mientras que el overflow representará el producto clasificado más fino, el cual alimentará directamente al segundo circuito. Esta primera etapa permitirá una molienda inicial controlada, con un P80 intermedio cercano a 400  $\mu\text{m}$ , evitando una carga excesiva en el segundo molino y garantizando una alimentación más homogénea y preclasificada.

El segundo circuito estará conformado por el molino 6x8 y un hidrociclón D10 adicional, operando bajo una configuración de circuito cerrado inverso. En este esquema, el overflow del ciclón retornará al molino para continuar el proceso de reducción, mientras que el underflow constituirá el producto final del circuito, destinado a la etapa de flotación. Este tipo de configuración resulta más favorable para el control del tamaño de partícula final, ya que permite mantener una carga circulante reducida y una mejor distribución granulométrica, optimizando la liberación de los sulfuros de cobre, plomo y zinc presentes en el mineral.

La elección de este esquema se fundamenta en el análisis comparativo de varios escenarios de simulación, donde se evaluaron las condiciones de velocidad crítica, nivel de llenado, consumo energético y eficiencia de clasificación para ambos molinos. Los resultados mostraron que la disposición propuesta maximiza la capacidad global del circuito sin incrementar de manera significativa el consumo de energía, además de favorecer la estabilidad hidráulica y la eficiencia de separación de finos en los ciclones.

De esta manera, la configuración 7x7 y su D10 (circuito cerrado directo) seguido de 6x8 y su D10 (circuito cerrado inverso) permitirá alcanzar un equilibrio entre capacidad, eficiencia energética y calidad del producto final, garantizando una molienda más uniforme y adecuada para el proceso metalúrgico de flotación selectiva de minerales polimetálicos. Esta disposición asegura una transición ordenada entre ambas etapas, evitando la sobrecarga de los equipos y optimizando el rendimiento general del circuito de molienda.

#### **4.1.2.3. Cálculo de collar de bolas para molinos**

Cada molino requiere un collar de bolas diseñado de acuerdo con la función específica que cumple dentro del circuito de molienda, de modo que la distribución de tamaños de medios moledores responda a las condiciones de operación y al grado de reducción de tamaño requerido. En este sentido, se han considerado valores estimados de operación que permitan definir el collar de bolas óptimo para cada equipo, tomando en cuenta el tipo de circuito en el que se desempeña y la naturaleza del mineral tratado.

El diseño del collar de bolas para los molinos 7x7 y 6x8 se elaboró aplicando los métodos propuestos por Azzaroni y Allis Chalmers, ampliamente utilizados para estimar la carga y distribución de cuerpos moledores en molinos de bolas a nivel industrial. Mediante estos cálculos se obtuvo la proporción adecuada de tamaños que garantizan una molienda eficiente, minimizando el consumo de energía y asegurando una adecuada liberación de las especies metálicas de interés.

**Tabla 8. Collar de bolas para molino 7x7**

<b>MOLINO 7X7</b>	
Tamaño de bola	% peso
3.0	30.58
2.5	38.61
2.0	28.11
1.5	8.34
1.0	2.70
peso bolas, kg	14189

Se presenta la distribución del collar de bolas propuesto para el molino 7x7, calculado mediante el método de Azzaroni y Allis Chalmers, considerando un F80 reducido de 9000  $\mu\text{m}$ . Este valor fue adoptado debido a que, durante la visita técnica a planta, se observó una mejora progresiva en el área de chancado, lo que permitió obtener una alimentación más fina hacia la molienda primaria.

*Tabla 9. Recarga diaria bolas en molino 7x7*

<b>RECARGA DIARIA</b>	
Tamaño de bola	% peso diario
3.00	100
Total	100

La recarga diaria de bolas para el molino 7x7 se realizará con bolas de 3 pulgadas de diámetro, a fin de mantener la potencia efectiva del equipo y compensar el desgaste natural de los medios moledores, asegurando la estabilidad del proceso y la continuidad del régimen de molienda.

*Tabla 10. Collar de bolas en molino 6x8*

<b>MOLINO 6X8</b>	
Tamaño de bola	% peso
1.5	56.25
1.0	43.75
peso bolas, kg	11914

En la Tabla 10 se muestra la distribución del collar de bolas propuesto para el molino 6x8, calculado mediante los métodos de Azzaroni y Allis Chalmers, considerando su función dentro del circuito como molino secundario o de remolienda. Este equipo recibe el overflow clasificado del molino 7x7, por lo que su alimentación teórica es más fina ( $F80=800 \mu\text{m}$ ), requiriendo un medio molidor de menor diámetro para favorecer la molienda por abrasión y el control del tamaño final de partícula.

Tabla 11. Recarga diaria en molino 6x8

RECARGA DIARIA	
Tamaño de bola	% peso diario
1.50	100
Total	100

#### 4.1.2.3. Simulación usando Molycop Tools

Con el objetivo de validar los resultados obtenidos en MinProsim y estimar el comportamiento real del circuito propuesto, se utilizó la herramienta Moly-Cop Tools, la cual permite evaluar parámetros operacionales y energéticos en sistemas de molienda de bolas bajo diferentes configuraciones

Figura 2. Plantilla de simulación para circuito cerrado directo (Moly-Cop Tools)

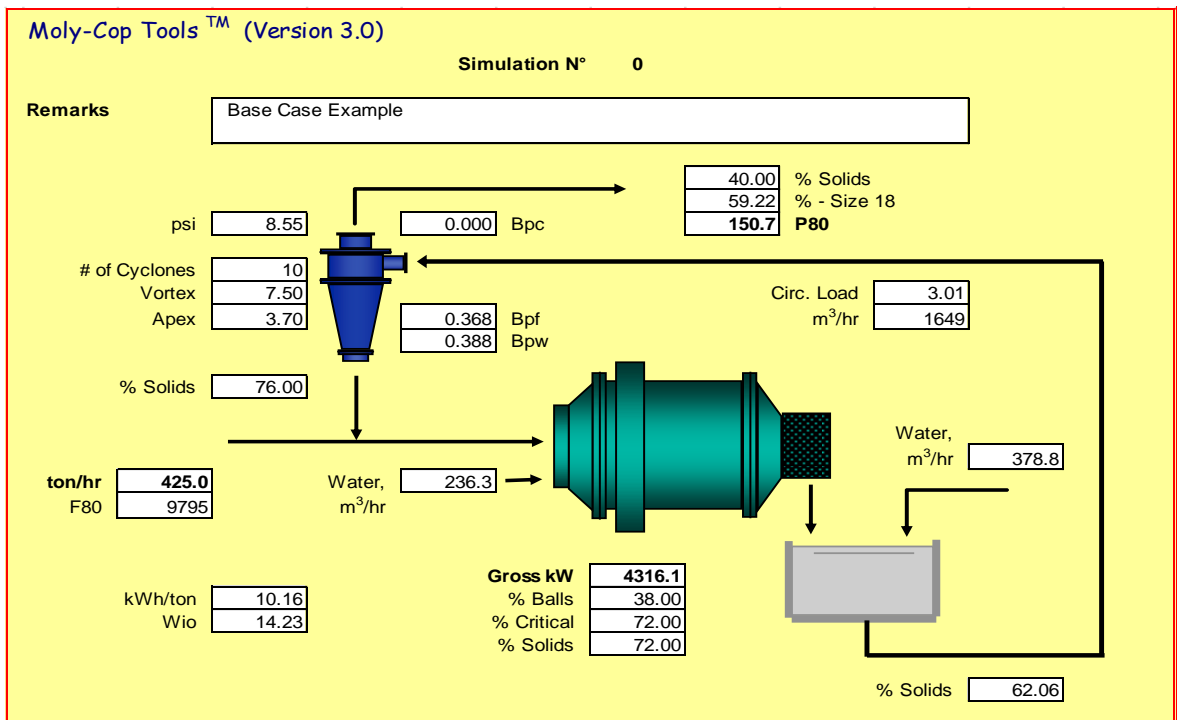
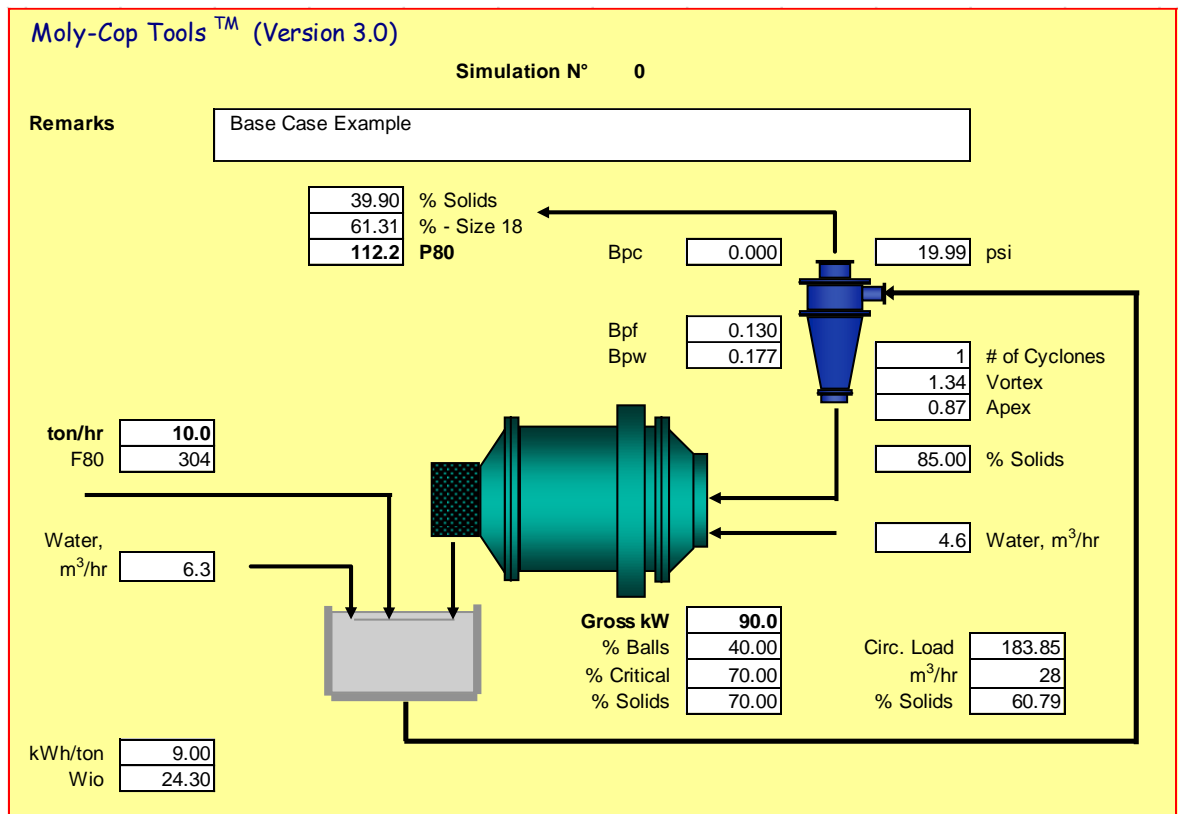


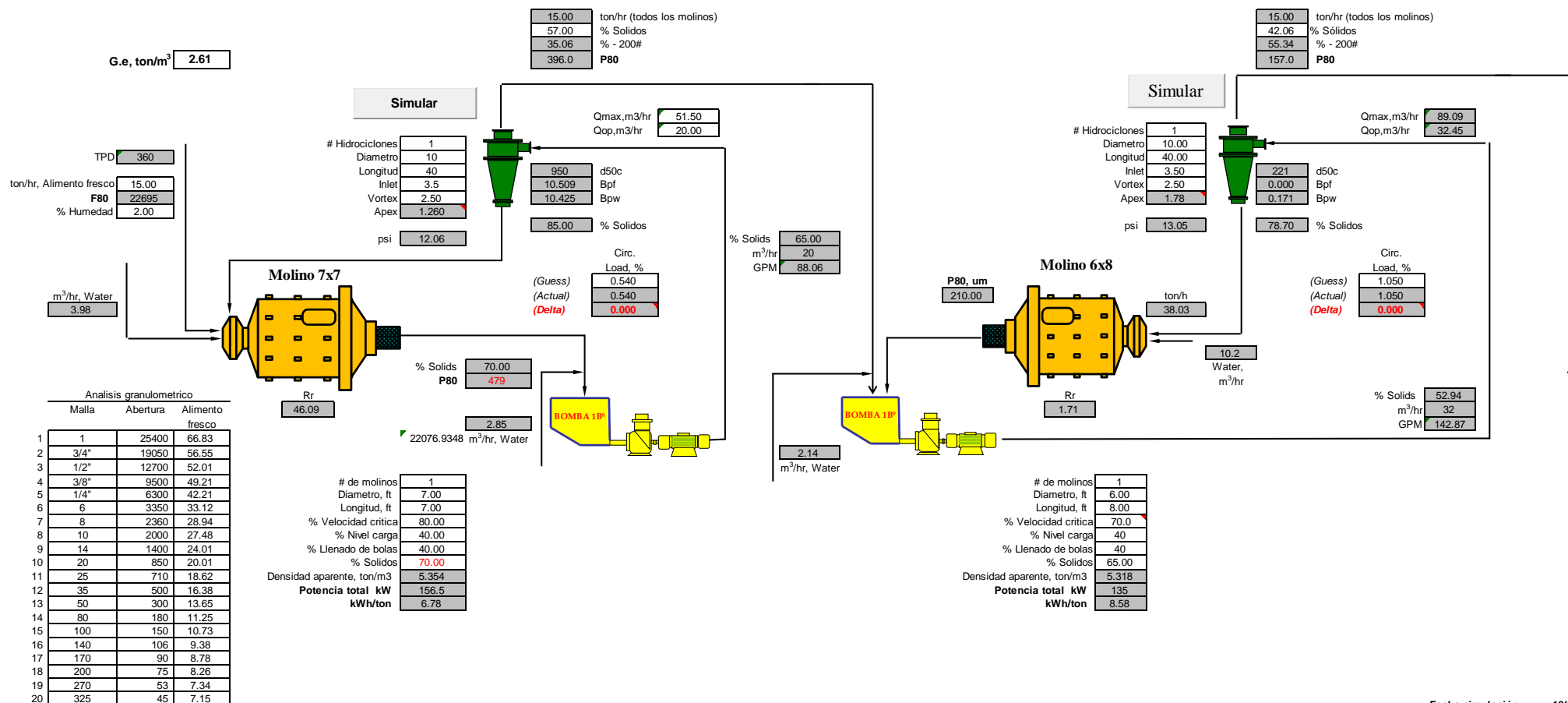
Figura 3. Plantilla para simulación de circuito inverso (Moly-Cop Tools)



Para esta etapa, se desarrolló una plantilla combinada empleando dos modelos base del software: uno correspondiente a un circuito cerrado directo y otro a un circuito cerrado inverso. Ambas plantillas fueron integradas para representar de manera completa el nuevo esquema de molienda planteado, conformado por el molino 7×7 con ciclón D10 (circuito cerrado directo) y el molino 6×8 con ciclón D10 (circuito cerrado inverso).

Figura 4. Plantilla funcional para simulación de circuito de molienda 350TPD

## Minera LBA "Croacia"-Seccion Molienda-Cap 350TPD



La simulación desarrollada en la herramienta Moly-Cop Tools permitió representar de manera integral el comportamiento del nuevo circuito de molienda propuesto para la planta Minera LBA “Croacia”, configurado para una capacidad de tratamiento de 360 TPD. En este modelo se integraron dos sistemas de molienda: el molino 7x7 con hidrociclón D10 en circuito cerrado directo, y el molino 6x8 con hidrociclón D10 en circuito cerrado inverso, reproduciendo el flujo operativo proyectado para la planta una vez implementada la ampliación.

El alimento fresco del circuito presenta un F80 aproximado de 50 000  $\mu\text{m}$ , No obstante, para que los parámetros funcionen será importante rebajar el F80 inicial a aproximadamente 22000  $\mu\text{m}$ , para ello, apropiadamente la empresa viene trabajando en un circuito de chancado que permita tal producto. Este valor fue considerado como punto de partida en la simulación, reflejando las condiciones reales de ingreso del mineral proveniente del área de chancado. Bajo este escenario, el molino 7x7 cumple la función de molienda primaria, operando con una combinación de bolas gruesas y medianas que favorecen la reducción de las fracciones más grandes del mineral. Su producto clasificado por el hidrociclón D10 genera un overflow con una granulometría intermedia, que constituye la alimentación directa al segundo circuito, mientras que el underflow retorna al molino para completar el proceso de conminución.

El molino 6x8, trabajando con su propio ciclón D10 en circuito cerrado inverso, actúa como molino secundario o de remolienda, destinado a afinar el tamaño de partícula proveniente del primer sistema. En este caso, el overflow del ciclón retorna al molino para continuar la molienda, mientras que el underflow constituye el producto final del circuito, con un P80 proyectado entre 120 y 150  $\mu\text{m}$ , valor adecuado para la etapa de flotación de minerales polimetálicos.

Los resultados obtenidos evidencian que ambos molinos operan dentro de un régimen estable, con velocidades críticas y potencias consumidas dentro de rangos óptimos, lo que garantiza una buena eficiencia energética y una reducción progresiva del tamaño de partícula sin generar sobre-molienda. Asimismo, las presiones y caudales de los hidrociclones simulados se mantienen dentro de los valores recomendados, asegurando una adecuada separación entre fracciones finas y gruesas y reduciendo la carga circulante del sistema.

Tabla 12. Balance de masa circuito de molienda-simulación

PARAMETERS	Alimento fresco 7X7	Alimento comp' 7X7	Descarga Mo 7X7	FEED 1' D-10	H1_U/F 1 D-10	H1_O/F 1 D-10	Alimento' 6X8	Descarga Mo 6X8	FEED 2' D-10	H2_U/F 2 D-10	H2_O/F 2 D-10
TPH Solids	15.00	23.1	23.1	23.1	8.1	15.00	15.8	15.8	30.8	15.8	15.0
TPH Water	0.3	1.7	10.0	12.8	1.4	11.32	8.5	8.5	24.9	4.3	20.6
TPH Total	15.31	24.8	33.1	35.9	9.5	26.32	24.2	24.2	55.6	20.0	35.6
Solids SG [t/m <sup>3</sup> ]	2.61	2.61	2.61	2.61	2.61	2.61	2.61	2.61	2.61	2.61	2.61
% Solids	98.0	93.0	69.8	64.4	85.0	56.98	65.0	65.0	55.3	78.7	42.1
Pulp SG [kg/m <sup>3</sup> ]	2528.2	2346.2	1756.4	1659.6	2103.0	1542.00	1669.2	1669.2	1517.4	1944.2	1350.9
Volumetric Flowrate [m <sup>3</sup> /h]	6.1	10.6	18.8	21.6	4.5	17.07	14.5	14.5	36.7	10.3	26.4
% Passing 74 [um]	6.2	9.1	33.6	33.6	18.8	35.06	23.3	41.2	40.4	23.3	55.34
80.000 % passes [um]	22695	22076.93	479.0	609.5	1242.1	396.00	359.1	210.0	257.2	359.1	157.01

El balance de masa obtenido para el circuito de molienda (Tabla 12) permite observar la coherencia operacional entre los flujos de sólidos, agua y pulpa en cada etapa del proceso simulado. El objetivo principal de esta simulación fue definir las condiciones de operación necesarias para alcanzar una mayor capacidad de tratamiento, manteniendo un tamaño de partícula adecuado para la posterior etapa de flotación.

Tabla 13. Parámetros en molinos-simulación

Descripción	Unidad	Molino 7x7	Molino 6x8
Velocidad Operación	rpm	23.2	21.9
Velocidad crítica	%	80	70
Potencia consumida	Kw	156.5	135
Potencia del motor	hp	200	150
Eficiencia operación motor	%	79	81
Nivel de llenado	%	40	40

Tabla 14. WI circuito de molienda. -simulación

Descripción	Unidad	Molino 7x7	Molino 6x8
Consumo de energía	Kw-h/t	9.78	5.614
Work Index por etapas	Kw-h/t	17.05	18.16
Work index molinos	Kw-h/t	26.18	27.42
Work Index por etapas	Kw-h/t		15.89

Tabla 15. Ratio de reducción en molinos -simulación

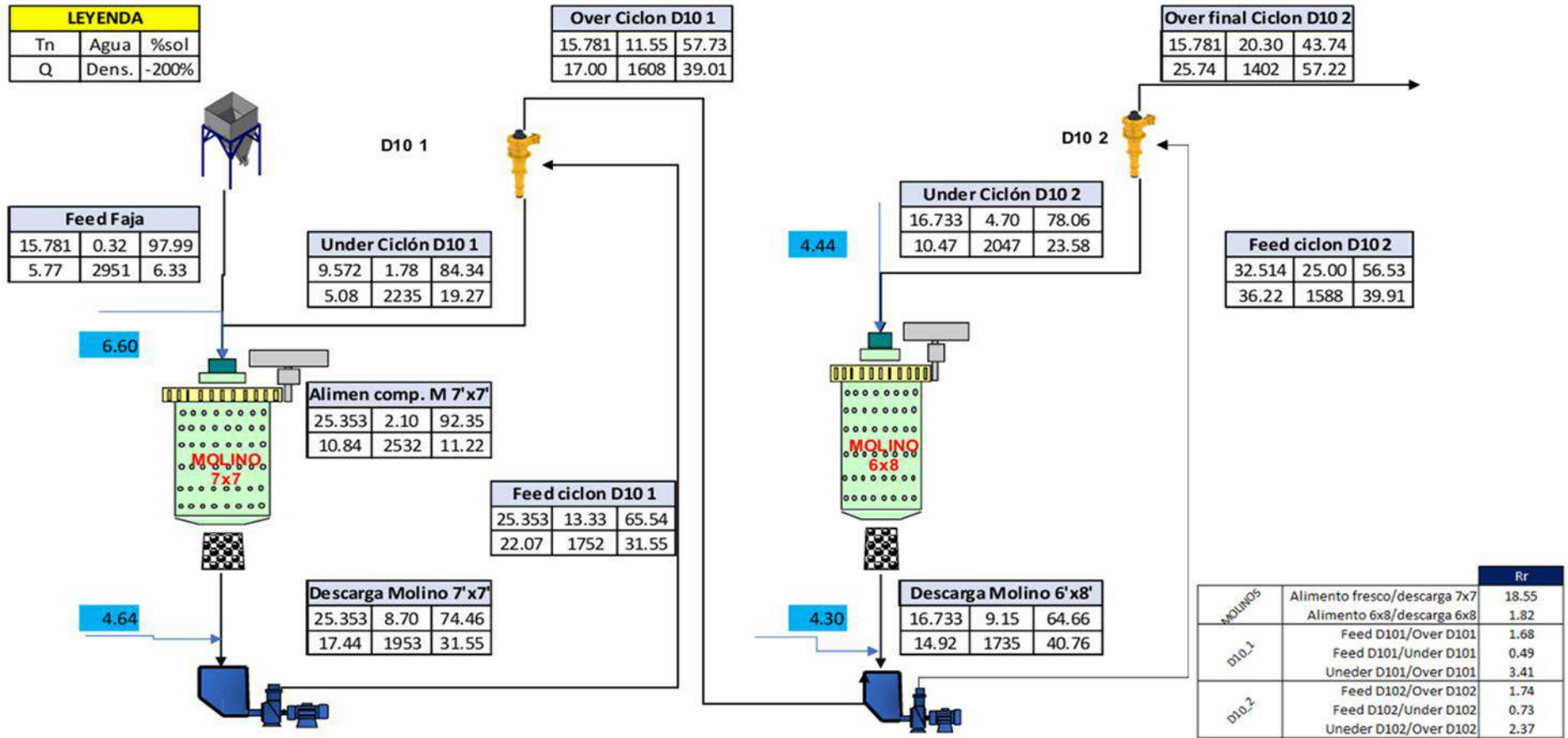
Descripción	Unidad	Molino 7x7	Molino 6x8
F80 Alimento	µm	22076.93	359.1
P80 descarga	µm	479	210
Ratio de reducción	-	46.09	1.71

Tabla 16. Parámetros de trabajo en ciclones-simulación

Variable	Unidad	Hidrociclón D-10 (1)	Hidrociclón D-10 (2)
Cantidad	n	1	1
Diámetro ciclón	Dc	plg	10
Diámetro inlet	Di	plg	3.5
Diámetro apex	Du	plg	2
Diámetro vortex	Do	plg	2.5
Altura	Lc	plg	40
Presión	P	Psi	12.06
	Feed	%	33.6
	Underflow	%	18.8
	Overflow	%	35.06
P80	-	µm	396
Caudal	Alimento	m3/h	17.07
			36.7

### 4.1.3. Muestreo de circuito de molienda 16/06/2025

Figura 5. Diagrama de flujo y balance de masa segundo muestreo



El segundo muestreo se realizó el 16 de junio del 2025, posteriormente a la ejecución de la simulación del circuito de molienda y clasificación. Durante esta evaluación se observó un incremento en el tonelaje tratado, alcanzando un valor promedio de 15.781 toneladas por hora, manteniéndose la configuración estructural planificada en la etapa de modelamiento, así como las condiciones y medidas operativas consideradas en la simulación previa.

El levantamiento de información permitió verificar la estabilidad del nuevo escenario operativo, evidenciando que el circuito conserva su distribución de flujos y niveles de carga establecidos. En función de ello, se procedió al registro y análisis de las variables principales de operación, cuyos resultados se detallan a continuación.

Tabla 17. Balance de masa circuito de molienda

PARAMETERS	Alimento fresco 7X7	Alimento comp 7X7	Descarga Mo 7X7	FEED 1' D-10	H1_U/F 1 D-10	H1_O/F 1 D-10	Descarga Mo 6X8	FEED 2' D-10	H2_U/F 2 D-10	H2_O/F 2 D-10
TPH Solids	15.80	20.6	20.6	20.6	4.8	15.80	15.4	31.2	15.4	15.8
TPH Water	0.3	0.9	5.4	10.5	0.6	9.97	7.0	21.4	3.2	18.2
TPH Total	16.12	21.4	26.0	31.1	5.3	25.77	22.4	52.5	18.5	34.0
Solids SG [t/m <sup>3</sup> ]	2.61	2.61	2.61	2.61	2.61	2.61	2.61	2.61	2.61	2.61
% Solids	98.0	95.9	79.1	66.2	89.6	61.32	68.7	59.3	82.9	46.5
%Volumen	94.9	90.0	59.2	42.8	76.7	37.78	45.7	35.8	65.0	24.9
Pulp SG [t/m <sup>3</sup> ]	2528.2	2448.5	1952.5	1689.4	2235.0	1608.33	1735.0	1577.0	2046.7	1401.7
Volumetric Flowrate [m <sup>3</sup> /h]	6.4	8.8	13.3	18.4	2.4	16.02	12.9	33.3	9.1	24.3
% Passing 74 [mm]	6.2	9.1	33.6	33.6	18.8	38.13	41.2	40.4	23.3	57.0
80.000 % passes [mm]	11170.1	10020.8	537.1	537.1	1242.1	392.88	192.2	257.2	354.0	149.1

Se presenta el balance de masa del circuito de molienda, correspondiente al segundo muestreo realizado el 16 de junio del 2025. En esta se muestran los principales parámetros operativos obtenidos en cada punto del circuito, desde el alimento fresco hasta los productos del sistema de clasificación. Se aprecia la distribución de sólidos, agua y pulpa en cada etapa, así como los porcentajes de sólidos, densidades y caudales volumétricos determinados experimentalmente. Los datos obtenidos reflejan el comportamiento general del circuito bajo las condiciones actuales de operación, sirviendo como base para el análisis comparativo y la posterior discusión técnica

Tabla 18. Análisis granulométrico segundo muestreo

#Malla	Abertura ( $\mu$ )	Alimento fresco	Descarga Mo 7X7 A.	Alimento 6x8	Descarga Mo 6X8 A.	FEED 1 D-10	FEED 1 D-10 (comp)	H1_U/F 1 D-10 A.	H1_O/F 1 D-10 A.	H2_U/F 2 D-10 A.	H2-O/F 2 D-10 A.
		A. Pasante	Pasante	A. Pasante	Pasante	A. Pasante	A. Pasante	Pasante	Pasante	Pasante	Pasante
1/2"	12700	87.6	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
3/8"	9500	72.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.5	98.9	100.0	100.0	100.0
1/4"	6300	55.8	100.0	100.0	100.0	100.0	99.5	98.9	100.0	100.0	100.0
4	4750	46.3	99.8	100.0	100.0	99.8	99.0	97.5	100.0	100.0	100.0
8	2380	33.0	98.2	100.0	100.0	98.2	97.0	92.8	100.0	100.0	100.0
10	2000	30.1	97.3	100.0	100.0	97.3	96.0	90.3	100.0	100.0	100.0
14	1400	23.3	94.9	100.0	100.0	94.9	93.4	84.1	100.0	100.0	100.0
20	850	18.9	88.0	98.6	99.9	88.0	86.2	70.3	97.5	98.6	99.9
30	600	16.1	80.1	94.6	99.4	80.1	78.2	58.8	91.9	94.6	99.7
40	425	13.9	72.1	88.1	98.5	72.1	70.1	49.6	84.7	88.1	99.4
50	300	11.9	61.1	76.1	92.6	61.1	60.0	40.2	74.0	76.1	96.7
70	212	10.2	51.9	60.6	83.0	51.9	51.1	33.0	63.9	60.6	90.8
100	150	8.8	43.9	45.3	69.8	43.9	43.4	27.3	54.8	45.3	80.7
140	106	7.4	36.9	31.7	54.4	36.9	36.7	22.8	46.5	31.7	67.7
200	75	6.3	31.4	22.8	41.6	31.4	31.4	19.3	39.9	22.8	56.5
270	53	5.3	26.7	16.6	31.7	26.7	26.8	16.6	34.0	16.6	46.1
325	45	4.9	24.0	13.9	27.2	24.0	24.4	15.0	31.1	13.9	41.6
400	38	4.8	22.95	13.1	25.5	23.0	23.4	14.6	29.7	13.1	38.9
Bandeja	-38	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
P80		11100	597	338	197	597	669	1244	367	338	147

Los resultados muestran los porcentajes acumulados pasantes para cada fracción de malla, tanto en los molinos como en los hidrociclones. Se observa la progresiva reducción del tamaño de partícula desde el alimento fresco hasta los productos finales del circuito, reflejando el comportamiento general del proceso bajo las condiciones actuales de operación. Estos datos servirán de base para el análisis comparativo con el primer muestreo y la posterior discusión sobre la eficiencia de molienda y clasificación.

*Tabla 19. Parámetros de velocidad y potencia en circuito*

Descripción	Unidad	Molino 7x7	Molino 6x8
<b>Velocidad Operación</b>	rpm	23.6	22.6
<b>Velocidad crítica</b>	%	79.12	70.45
<b>Potencia consumida</b>	Kw	110.12	84.21
<b>Potencia del motor</b>	hp	200	150
<b>Eficiencia operación motor</b>	%	73.84	75.29
<b>Nivel de llenado</b>	%	36	42.26

Se presentan los principales parámetros de velocidad y potencia correspondientes a los molinos 7x7 y 6x8 que conforman el circuito de molienda. Los valores obtenidos permiten tener una referencia del comportamiento operativo de cada equipo, considerando su velocidad de rotación, potencia consumida, eficiencia motriz y nivel de llenado. Estos datos sirven como base para la evaluación energética del sistema y la verificación del desempeño de los molinos bajo las condiciones de carga actuales, manteniendo el mismo criterio de operación establecido durante la simulación del circuito.

*Tabla 20. WI operacional de planta*

Descripción	Unidad	Molino 7x7	Molino 6x8
<b>Consumo de energía</b>	Kw-h/t	6.98	5.03
<b>Work Index por etapas</b>	Kw-h/t	16.04	18.16
<b>Work Index molinos</b>	Kw-h/t	23.13	27.42
<b>Work Index por etapas</b>	Kw-h/t	16.89	

Se muestra el Work Index operacional de planta, determinado a partir del consumo específico de energía y los valores obtenidos en cada etapa de molienda. Los resultados reflejan el comportamiento energético de los molinos 7x7 y 6x8, evidenciando las diferencias propias de su diseño y carga de trabajo. Estos datos permiten establecer una referencia general sobre la dureza del mineral procesado y la eficiencia del sistema bajo las condiciones actuales de operación.

*Tabla 21. Ratio de reducción en molino*

Descripción	Unidad	Molino 7x7	Molino 6x8
<b>F80 Alimento</b>	μm	8630	350
<b>P80 descarga</b>	μm	598	194
<b>Ratio de reducción</b>	-	14.44	1.8

Se presentan los valores de F80 y P80 correspondientes a los molinos 7x7 y 6x8, a partir de los cuales se determinó el ratio de reducción alcanzado en cada equipo. Los resultados evidencian la disminución progresiva del tamaño de partícula entre la alimentación y la descarga, permitiendo apreciar la capacidad de conminución de cada molino bajo las condiciones actuales de operación.

*Tabla 22. Parámetros en hidrociclones*

Variable		Unidad	Hidrociclón D-10 (1)	Hidrociclón D-10 (2)
<b>Cantidad</b>		n	1	1
<b>Diámetro ciclón</b>	<b>Dc</b>	plg	10	10
<b>Diámetro inlet</b>	<b>Di</b>	plg	3.5	3.5
<b>Diámetro ápex</b>	<b>Du</b>	plg	1.5	2
<b>Diámetro Vortex</b>	<b>Do</b>	plg	2.5	2.5
<b>Altura</b>	<b>Lc</b>	plg	45	45
<b>Presión</b>	<b>P</b>	Psi	6	6
	<b>Feed</b>	%	31.55	39.91
<b>%-m200</b>	<b>Underflow</b>	%	19.27	23.58
	<b>Overflow</b>	%	39.01	57.22
<b>P80</b>	-	μm	355	147.3
<b>Caudal</b>	<b>Alimento</b>	m3/h	22	36
<b>Carga circulante</b>	<b>Cc</b>	%	61	106
<b>Corto circuito</b>	<b>By</b>	%	13.33	19

Se presentan los principales parámetros operativos de los hidrociclones D-10 (1) y D-10 (2), obtenidos durante el segundo muestreo. Los valores permiten identificar las condiciones de operación y desempeño de cada unidad, considerando variables como presión, caudal de alimentación, carga circulante y corto circuito. Asimismo, se muestran las proporciones de sólidos finos y gruesos en los flujos de overflow y underflow, que servirán como base para el análisis comparativo de eficiencia en la etapa de clasificación.

## CAPÍTULO V

### DISCUSIÓN

#### 5.1 Discusión de resultados

##### 5.1.1. Primer muestreo-Evaluación del circuito base (16 de marzo de 2023)

El primer muestreo, realizado entre los días 15 y 19 de marzo del 2023, representó el punto de partida del estudio, al reflejar las condiciones iniciales del circuito de molienda de 220 TPD correspondiente a la planta Titán del Perú–Croacia. Este levantamiento tuvo como finalidad conocer el comportamiento real del sistema de molienda-clasificación antes de cualquier modificación o simulación, con el propósito de disponer de una base experimental confiable para el modelamiento posterior.

Durante este muestreo se ejecutaron tomas de muestra en cinco puntos estratégicos del circuito: alimentación fresca al molino 7x7, descarga del molino, alimentación al hidrociclón D-10, y sus flujos de underflow y overflow. Se determinaron parámetros operativos, densidades de pulpa, caudales, porcentajes de sólidos y granulometrías para elaborar el balance de masa completo.

Los resultados mostraron que el circuito trabajaba en configuración cerrada directa, con una carga circulante del 52.5 %, eficiencia total de clasificación de 41.5 % y un D50 de 433  $\mu\text{m}$ , evidenciando un corte grueso y un grado de separación moderado. El P80 del overflow del ciclón fue de 291  $\mu\text{m}$ , mientras que el F80 del alimento fresco alcanzó 50 038  $\mu\text{m}$ , confirmando un alto requerimiento energético para lograr una molienda adecuada.

En cuanto al consumo energético, el molino 7x7 COMESA (200 HP) operaba con una potencia de 121.61 kW (81.5 % de eficiencia), presentando un Work Index operacional de 21.91 kWh/t, indicador propio de un mineral duro. La velocidad de operación del molino

(72.4 % de la velocidad crítica) se consideró adecuada, aunque el rendimiento global se veía limitado por la eficiencia del clasificador.

En resumen, el circuito original operaba dentro de parámetros estables pero subóptimos, priorizando la estabilidad hidráulica y el tonelaje sobre la fineza del producto. Estos resultados justificaron el uso de herramientas de simulación para rediseñar el sistema y alcanzar las 350 TPD proyectadas.

### **5.1.2. Simulación del circuito ampliado (18 de diciembre de 2023)**

Con base en los resultados del primer muestreo, el 18 de diciembre de 2023 se desarrolló la simulación metalúrgica integral utilizando los softwares MinProSim y Moly-Cop Tools, con el objetivo de proyectar la ampliación del circuito de molienda de 220 a 350 TPD, asegurando eficiencia y estabilidad energética.

#### **5.1.2.1. Diseño propuesto**

El modelamiento planteó un nuevo esquema de doble molienda, conformado por:

- Molino 7x7 con ciclón D10 (circuito cerrado directo) para molienda primaria.
- Molino 6x8 con ciclón D10 (circuito cerrado inverso) para molienda secundaria o de remolienda.

Esta disposición buscaba equilibrar el trabajo de ambos molinos, mejorando la distribución granulométrica y reduciendo la carga circulante general del sistema.

#### **5.1.2.2. Resultados técnicos**

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- Ambos molinos mostraron capacidades individuales cercanas a 395 TPD, con potencias consumidas de 156.5 kW (7x7) y 135 kW (6x8), ambas dentro de los límites seguros de sus motores nominales.

- El consumo energético combinado se estimó en 15.4 kWh/t, con un Work Index promedio de 26–27 kWh/t por etapa.
- El P80 final proyectado fue de 157.01  $\mu\text{m}$ , valor óptimo para flotación de polimetálicos.

En la clasificación, el hidrociclón primario (D10-1) mostró un corte de 396  $\mu\text{m}$ , mientras que el secundario (D10-2) alcanzó 221.02  $\mu\text{m}$ , evidenciando un escalonamiento adecuado entre molienda gruesa y fina.

En cuestión del collar de bolas, se dieron estos resultados:

**Molino 7×7 (molienda primaria):**

- Carga total aproximada: 14.19 t.
- Distribución: 3.0" (30.58%), 2.5" (38.61%), 2.0" (28.11%), con pequeñas fracciones de bolas menores para mejorar el empaque interno.
- Recarga diaria: únicamente con bolas de 3.0" para mantener la energía de impacto y compensar el desgaste.

**Molino 6×8 (remolienda):**

- Carga total aproximada: 11.91 t.
- Distribución: 1.5" (56.25%) y 1.0" (43.75%), priorizando la molienda por fricción y abrasión.
- Recarga diaria: con bolas de 1.5", manteniendo el efecto abrasivo y el control del tamaño fino.

Los resultados de simulación demostraron que la limitante del proceso no radicaba en la potencia instalada, sino en la configuración hidráulica y eficiencia de clasificación. Con la nueva disposición, se proyectó una disminución significativa de la carga circulante y un

incremento de la eficiencia global, optimizando el uso de energía y asegurando una producción total de 350 TPD o superior con granulometría controlada.

### **5.1.3. Segundo muestreo – Validación operativa (16 de junio de 2025)**

El segundo muestreo, ejecutado el 16 de junio del 2025, tuvo como finalidad validar experimentalmente el comportamiento del circuito de molienda luego de implementarse las modificaciones propuestas en la simulación del 18 de diciembre de 2023.

En esta etapa, la planta ya operaba con la configuración ampliada, compuesta por el molino 7×7 (circuito cerrado directo) y el molino 6×8 (circuito cerrado inverso), junto con sus respectivos hidrociclones D10.

El levantamiento de datos permitió verificar el rendimiento real de la operación, la consistencia de los parámetros simulados y los efectos de la optimización sobre la capacidad y eficiencia global del sistema.

#### **5.1.3.1. Condiciones generales y parámetros medidos**

El circuito mantuvo una distribución de flujos estable, con una alimentación fresca de 15.80 t/h y un tratamiento global promedio de 15.781 t/h, equivalente a 370 TPD, superando la meta inicial de 350 TPD establecida en la simulación.

Los registros de campo evidenciaron un buen control del porcentaje de sólidos (66–68 %) y de la densidad de pulpa, lo que contribuyó a mantener la carga circulante dentro de valores aceptables y a estabilizar la presión de los ciclones.

En términos de consumo energético, los molinos 7x7 y 6x8 presentaron potencias promedio de 110.12 kW y 84.21 kW, respectivamente, valores inferiores a los proyectados en simulación debido a un mejor aprovechamiento de la energía interna y una menor resistencia a la molienda producto del ajuste de carga de bolas.

El Work Index operacional total disminuyó desde 21.91 kWh/t (2023) hasta un rango de 16–18 kWh/t, reflejando la mayor eficiencia del nuevo esquema.

#### **5.1.3.2. Resultados granulométricos y de clasificación**

Los análisis granulométricos del segundo muestreo mostraron una disminución progresiva del tamaño de partícula a lo largo del circuito:

- F80 promedio de alimentación fresca: 11 100  $\mu\text{m}$ .
- P80 descarga molino 7x7: 598  $\mu\text{m}$ .
- P80 descarga molino 6x8: 194  $\mu\text{m}$ .
- P80 final (producto overflow D10 secundario): 147  $\mu\text{m}$ .

Estos valores demuestran que el nuevo arreglo de molienda cumplió con el objetivo de alcanzar una granulometría apta para flotación, con una reducción gradual de tamaño en cada etapa y una liberación adecuada de las especies metálicas.

En clasificación, ambos ciclones D10 operaron con presiones estables (6 psi) y mantuvieron cortes eficientes: el primario (asociado al 7x7) con un corte alrededor de 355  $\mu\text{m}$ , y el secundario (asociado al 6x8) con un D50c de 147  $\mu\text{m}$ , confirmando la consistencia con el modelo proyectado.

La eficiencia total de clasificación mejoró de 41.5 % (2023) a valores cercanos al 57 %, validando la influencia positiva del doble sistema de separación.

#### **5.1.3.3. Evaluación de consumo energético y razón de reducción**

Los resultados evidenciaron una reducción significativa del consumo específico de energía, manteniendo o incluso incrementando la capacidad de tratamiento.

El molino 7x7 alcanzó un ratio de reducción de 14.4, mientras que el molino 6x8 registró 1.8, confirmando que la molienda secundaria actúa principalmente como etapa de refinamiento del tamaño, no de trituración intensiva.

Estos valores se encuentran dentro del rango óptimo para un circuito de doble molienda con clasificación en serie, donde la mayor parte del trabajo de conminución se realiza en la etapa primaria y el segundo molino solo afina el producto para cumplir la especificación granulométrica final.

#### ***5.1.3.4. Interpretación global de resultados***

El segundo muestreo demostró que el circuito superó la proyección inicial de simulación, tanto en capacidad de tratamiento como en eficiencia energética.

El collar de bolas diseñado en la etapa de modelamiento se mantuvo sin modificaciones, mostrando un comportamiento estable y un desgaste controlado, lo que evidencia que la configuración planteada fue la adecuada para las condiciones reales de operación.

El corte fino obtenido en el ciclón secundario ( $D_{50c} = 147 \mu\text{m}$ ) y el P80 final logrado validan que la simulación de 2023 fue acertada en su proyección.

Los resultados reales confirman que la optimización hidráulica y de carga moledora fueron los factores determinantes para aumentar la producción sin comprometer la calidad del producto ni la estabilidad del proceso.

## 5.4. Comparación global entre escenarios

La siguiente tabla resume los principales indicadores de los tres momentos evaluados (muestreo inicial, simulación y validación operativa):

Tabla 23. Comparación global entre escenarios

Parámetro/Variable	1er Muestreo (16/03/2023)	Simulación (18/12/2023)	2do Muestreo (16/06/2025)
Tipo de circuito	7×7+D10 (cerrado directo)	7×7+D10 (directo) 6×8+D10 (inverso)	7×7+D10 (directo) 6×8+D10 (inverso)
Capacidad tratada (TPD)	220	350-360 (proyectada)	370-380 (real)
F80 (µm)	50 115	22 000 (ajustado en modelo)	11 100 (por mejora del circuito de chancado)
P80 final (µm)	290.94	157	147
Ratio de reducción (F80/P80)	172.2	7×7 → 46.1 6×8 → 1.7	7×7 → 14.4 6×8 → 1.8
Velocidad crítica (Vc %)	72.4 %	7×7 → 80 % 6×8 → 70 %	7×7 → 79.1 % 6×8 → 70.4 %
Nivel de llenado (%)	40	40 (ambos molinos)	7×7 → 36% 6×8 → 42%
Carga circulante (%)	52.5 (único D10)	H1 = 52.5 H2 = 45	H1 = 61 H2 = 106
Eficiencia total de clasificación (%)	41.5	55-60	57.2
D50c ciclón secundario (µm)	-	221.02	147
Work Index operacional (kWh/t)	21.91	24.7	16-18
Potencia consumida (kW)	121.61 (7×7)	7×7 → 156.5 6×8 → 135	7×7 → 110.1 6×8 → 84.2

Ratio de reducción: Aunque el primer muestreo presentó un valor alto (172), ello no implica mayor eficiencia. Dicho valor reflejó una alimentación demasiado gruesa (F80= 50 mm) y una clasificación deficiente. En cambio, la reducción escalonada en dos etapas -

propuesta en la simulación-permitió controlar el proceso, evitando sobrecarga y desgaste excesivo.

- F80 y chancado: Antes del segundo muestreo, se incorporó un nuevo circuito de chancado que redujo el tamaño de alimentación hasta 11 mm (F80=11100  $\mu$ m), lo que mejoró el rendimiento global del sistema y favoreció la eficiencia de los molinos sin aumentar la energía consumida.
- Collar de bolas: El cambio de un collar de 4" (deficiente) a una distribución multidiámetro optimizada (3"-2.5"-2" en el molino 7x7 y 1.5"-1" en el 6x8) fue determinante para mejorar el impacto, la abrasión y el control granulométrico.
- Energía y Work Index: El Work Index operacional global se redujo de 21.9  $\rightarrow$  24.7 (simulación) a 17 kWh/t (2025), evidenciando una mejor eficiencia energética real que la teórica.
- El consumo específico de energía bajó drásticamente gracias a la mayor fineza de alimentación y al control de densidades del sistema.
- Velocidad crítica y nivel de llenado: Las velocidades de operación (70–80 %  $V_c$ ) y llenados entre 36–42 % permitieron mantener una acción de catarata óptima en la molienda primaria y una fricción controlada en la secundaria, garantizando un equilibrio entre capacidad y desgaste

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1 Conclusiones

La ampliación del circuito de molienda de 220 a 350 TPD fue técnica y operacionalmente viable, logrando una capacidad real superior de 370-380 TPD, gracias al rediseño del sistema en dos etapas de molienda (7x7 y 6x8) con sus respectivos hidrociclones D10. Este nuevo arreglo permitió una mejor distribución hidráulica, manejo de carga circulante y control del tamaño de partícula, validando la hipótesis principal de la investigación.

El P80 final disminuyó de 291  $\mu\text{m}$  (2023) a 147  $\mu\text{m}$  (2025), alcanzando el tamaño óptimo para la etapa de flotación. Este resultado confirma que la simulación del 18/12/2023 predijo correctamente el comportamiento del sistema, con un corte fino de  $D_{50c}=221.02 \mu\text{m}$  en el ciclón secundario, valor que sirvió como referencia para el diseño real.

El Work Index operacional global se redujo de 21.91 kWh/t a aproximadamente 17 kWh/t, evidenciando una mejor eficiencia energética y un uso más racional de la potencia instalada (110.1 kW en el molino 7x7 y 84.2 kW en el 6x8), lo cual confirma que el aumento de capacidad no generó un incremento proporcional de consumo de energía, sino una optimización de la misma.

La implementación del nuevo collar de bolas (3"-2.5" en el molino 7x7 y 1.5"-1" en el molino 6x8) reemplazó al collar deficiente de 4" del circuito inicial, mejorando la acción combinada de impacto y abrasión. Esto permitió aumentar la eficiencia de molienda, disminuir el desgaste irregular y contribuir directamente a la disminución del consumo energético específico.

## **6.2. Recomendaciones**

Mantener el esquema de doble molienda (7x7-6x8) con doble D 10, realizando monitoreos de presión, carga circulante y corte D50c, para garantizar que el sistema mantenga su eficiencia en clasificación y granulométrica.

Verificar la granulometría del alimento de chancado antes de ingresar a molienda. Un control adecuado del F80 mantiene el circuito en condiciones óptimas y evita incrementos en el consumo energético o pérdida de eficiencia.

Implementar un programa de seguimiento del Work Index operacional, comparando valores reales con los proyectados (17 kWh/t). Esta práctica permitirá detectar variaciones en la dureza del mineral y ajustar parámetros de molienda en tiempo real.

Reforzar la supervisión de los hidrociclones D-10 (apex, vórtex y presión de entrada) mediante mediciones semanales. La estabilidad del corte de clasificación es esencial para conservar el P80 final y el balance de carga circulante entre etapas.

Realizar una nueva simulación anual usando datos actualizados de planta (densidades, presiones, caudales y potencias) para validar que las condiciones operativas continúan dentro de los márgenes de diseño y proyectar posibles mejoras futuras.

# **ANEXOS**

## Matriz de consistencia

TÍTULO	PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	METODOLOGÍA
<p style="text-align: center;"><b>AMPLIACIÓN DE CIRCUITO DE MOLIENDA MINERA TITAN DEL PERU-CROACIA DE 220 A 350TPD USANDO HERRAMIENTAS DE CÁLCULO METALÚRGICO, CHALA 2024</b></p>	<p><b>PROBLEMA GENERAL</b> ¿Cómo ampliar y optimizar el circuito de molienda de la minera Titán para alcanzar 400 TPD de producción eficiente?</p> <p><b>PROBLEMAS ESPECÍFICOS</b> ¿Cuáles son las limitaciones del circuito de molienda actual que deben ser consideradas en el proceso de ampliación? ¿Cómo puede la ampliación del circuito de molienda impactar la eficiencia metalúrgica y la capacidad de procesamiento de mineral? ¿Qué ajustes operativos y técnicos son necesarios para adaptar el circuito a la nueva capacidad de 350 TPD sin comprometer la calidad del proceso?</p>	<p><b>OBJETIVO GENERAL</b> Ampliar el circuito de molienda de la planta minera Titan del Perú-Croacia de 220 a 350 TPD, utilizando herramientas de herramientas metalúrgicas, para optimizar el rendimiento metalúrgico y la capacidad operativa del proceso.</p> <p><b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> Identificar las limitaciones y desafíos del circuito de molienda actual en relación con la ampliación de su capacidad. Evaluar el impacto de la ampliación del circuito sobre la eficiencia metalúrgica y la capacidad de procesamiento de mineral. Determinar las modificaciones operativas necesarias para adaptar el circuito a la nueva capacidad sin afectar la estabilidad del proceso.</p>	<p><b>HIPÓTESIS GENERAL</b> La ampliación del circuito de molienda de 220 a 350 TPD en la planta minera Titan del Perú-Croacia, utilizando herramientas metalúrgicas, mejorará la eficiencia operativa y el rendimiento metalúrgico del proceso.</p> <p><b>HIPÓTESIS ESPECIFICAS</b> La ampliación del circuito de molienda permitirá aumentar la capacidad de procesamiento sin comprometer la eficiencia del proceso. La simulación metalúrgica permitirá optimizar el diseño del circuito, incrementando la recuperación de metales durante el proceso de molienda. La adaptación del circuito de molienda a la nueva capacidad de 350 TPD mejorará la estabilidad operativa y el rendimiento metalúrgico sin afectar la calidad del producto final.</p>	<p>Debido a que busca solucionar un problema práctico y específico, será de una investigación de tipo aplicada con enfoque cuantitativo, ya que se basa en recopilar y analizar datos medibles relacionados con el rendimiento del circuito de molienda como es el tonelaje, la granulometría, el consumo energético, entre otros. Asimismo, incluye elementos cualitativos puesto que se incorporarán observaciones descriptivas del comportamiento del circuito. El diseño de la investigación es experimental ya que implica la manipulación de variables y la medición de sus efectos, sobre todo cuando se busca comparar el rendimiento del circuito antes y después de haberse desarrollado el proceso de ampliación.</p>

Figura 6. Cálculo de capacidad en molino 7x7-MinProsim

Bond's Law

Grinding Capacity | Operational Work Index

**Design**

Internal Diameter (m)

Internal Length (m)

Number of Mills

**Operating Conditions**

% of Critical Speed

Total Charge Level (%)

Lift Angle (°)

rpm

**Charge**

% Solids in the mill (%)

Ore Density (t/m3)

Balls Density (t/m3)

Slurry Density (t/m3)

**Grinding Required**

Wi (kWh/t)

Feed Size (F80) (microns)

Product Size (P80) (microns)

Power Lost (%)

Total Power (Kw)

Power per mill (Kw)

Throughput (ton/h)

Figura 7. Cálculo de capacidad en molino 6x8-MinProsim

Bond's Law

Grinding Capacity | Operational Work Index

**Design**

Internal Diameter (m)

Internal Length (m)

Number of Mills

**Operating Conditions**

% of Critical Speed

Total Charge Level (%)

Lift Angle (°)

rpm

**Charge**

% Solids in the mill (%)

Ore Density (t/m3)

Balls Density (t/m3)

Slurry Density (t/m3)

**Grinding Required**

Wi (kWh/t)

Feed Size (F80) (microns)

Product Size (P80) (microns)

Power Lost (%)

Total Power (Kw)

Power per mill (Kw)

Throughput (ton/h)

*Figura 8. Descarga de Underflow en forma de soga-primer muestreo*



*Figura 9. Molino 6x8 antes de implementar*



*Figura 10. Mediciones en molino 6x8*



*Figura 11. Molino 7x7 en operación*



*Figura 12. Circuito cerrado directo con molino 7x7*

