

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN**

**Facultad de Ingeniería**

**Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales**

**OPTIMIZACIÓN DEL CIRCUITO DE MOLIENDA  
SEMIAUTÓGENA DE LA CONCENTRADORA DE LA  
MINERA LAS BAMBAS USANDO SOFTWARE DE  
SIMULACIÓN METALÚRGICA – 2021**

**TESIS**

**Presentada por:**

**Bach. PAUL HENDERSON LAQUI LOYOLA**

**Para optar el Título Profesional de:**

**INGENIERO METALURGISTA**

**TACNA - PERÚ  
2023**

# UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

## Facultad de Ingeniería

### Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

#### OPTIMIZACIÓN DEL CIRCUITO DE MOLIENDA SEMIAUTÓGENA DE LA CONCENTRADORA DE LA MINERA LAS BAMBAS USANDO SOFTWARE DE SIMULACIÓN METALÚRGICA – 2021

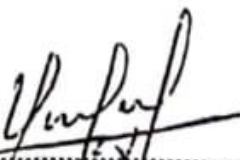
Tesis sustentada el 27 de Noviembre del 2023, estando integrado el jurado calificador por

PRESIDENTE



.....  
Dr. Luis Fortunato Caso Palpa

SECRETARIO



.....  
Dr. Nataniel Mario Linares Gutiérrez

VOCAL



.....  
Mtro. Daniel Jesús Zevallos Ramos

ASESOR




.....  
Dr. Nataniel Mario Linares Gutiérrez

## CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo Dr. Nataniel Mario Linares Gutiérrez en mi condición de asesor acreditado por la Resolución de Facultad N° 07668-2023-FAIN/UNJBG de la tesis titulada: **OPTIMIZACIÓN DEL CIRCUITO DE MOLIENDA SEMIAUTÓGENA DE LA CONCENTRADORA DE LA MINERA LAS BAMBAS USANDO SOFTWARE DE SIMULACIÓN METALÚRGICA – 2021**, presentada por el Bachiller Paul Henderson Laqui Loyola para optar el Título Profesional de Ingeniero Metalurgista.

Habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y de similitud de trabajos de investigación y producción intelectual, considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del software de similitud textual TURNITIN cuenta con el nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es 6 %, por lo que CERTIFICO LA SIMILITUD de la tesis que está de acuerdo al nivel PERMITIDO, para continuar con los trámites correspondientes y para su publicación en el Repositorio Institucional.

Se emite el presente certificado con fines de continuar con los trámites respectivos para su obtención del Título Profesional de Ingeniero Metalurgista.

  
.....  
DNI: 00797389  
Nataniel Mario Linares Gutiérrez



## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mi madre, por su paciencia y amor incondicional, pues sin ello no lo habría logrado, gracias por darme la vida y las enseñanzas de esta, por eso te doy mi trabajo en ofrenda por tu paciencia y amor madre mía.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por haberme permitido llegar hasta aquí y porque está conmigo siempre.

A mi familia, amigos y profesores que me formaron para ser una persona de bien y profesional.

Gracias a mi asesor Dr. Ing. Nataniel Linares Gutiérrez por ser mi modelo profesional a seguir y mi mentor.

Al Ing. Renau Zúñiga por hacerme partícipe del proyecto de mejora de capacidad de molienda SAG, en la minera las Bambas.

A la Ing. Angélica Almeida por haberme dado facilidades para desarrollar el presente trabajo de investigación, y porque la vida es un regalo muy valioso.

## ÍNDICE TEMÁTICO

<b>AGRADECIMIENTO</b>	
<b>RESUMEN</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	<b>2</b>
1.0. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	2
1.1. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA.....	2
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	3
<b>1.3.1. Formulación del problema general</b> .....	<b>3</b>
<b>1.3.2. Formulación de los problemas secundarios</b> .....	<b>3</b>
1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN .....	3
<b>1.4.1. Objetivo general</b> .....	<b>3</b>
<b>1.4.2. Objetivos específicos</b> .....	<b>3</b>
1.5. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN .....	4
<b>1.5.1. Justificación teórica</b> .....	<b>4</b>
<b>1.5.2. Justificación práctica</b> .....	<b>4</b>
<b>1.5.3. Justificación académica</b> .....	<b>4</b>
1.6. LIMITACIONES .....	4
1.7. VIABILIDAD DEL ESTUDIO .....	5
1.8. FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS.....	5
<b>1.8.2. Hipótesis general</b> .....	<b>5</b>
<b>1.8.1. Hipótesis específicas</b> .....	<b>5</b>
1.9. VARIABLES .....	5
<b>1.9.1. Definición conceptual de la variable independiente</b> .....	<b>5</b>
<b>1.9.2. Definición operacional de la variable independiente</b> .....	<b>6</b>
<b>1.9.3. Definición conceptual de la variable dependiente</b> .....	<b>6</b>
<b>1.9.4. Definición operacional de la variable dependiente</b> .....	<b>6</b>
<b>1.10. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES</b> .....	<b>7</b>
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>8</b>

<b>2.0. MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	8
2.1. ANTECEDENTES DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN .....	8
<b>2.1.1. Antecedentes internacionales</b> .....	8
2.1.1.1. Antecedente 1 .....	8
2.1.1.2. Antecedente 2 .....	9
2.1.1.3. Antecedente 3 .....	9
<b>2.1.2. Antecedentes nacionales</b> .....	10
2.1.2.1. Antecedentes 1.....	10
2.1.2.2. Antecedentes 2.....	11
2.1.2.3. Antecedentes 3.....	11
2.2. BASES TEÓRICAS. ....	12
<b>2.2.1. Conminución de minerales</b> .....	12
2.2.1.1. Principios de la conminución .....	12
<b>2.2.2. Chancado</b> .....	14
2.2.2.1. Mecanismo de fractura en chancado.....	15
<b>2.2.3. Molienda SAG</b> .....	15
2.2.3.1. Mecanismos de fractura en molienda SAG .....	20
<b>2.2.4. Características del molino SAG</b> .....	22
2.2.4.1 Diámetro y largo .....	22
2.2.4.2 Granulometría y dureza en la alimentación .....	23
2.2.4.3 Carga de bolas Jb% .....	24
2.2.4.4 Potencia del molino SAG.....	26
2.2.4.5 Tamaño óptimo de bola .....	29
2.2.4.5 Tamaño de transferencia T80.....	29
2.2.4.6 Comportamiento de las rocas en la molienda SAG .....	30
<b>2.2.7 ¿Qué son los Pebbles?</b> .....	30
<b>2.2.8. Tratamiento de Pebbles</b> .....	32
2.2.8.1. Pre-Cribado .....	32
2.2.8.2. Cribado Industrial .....	32
2.2.8.2.1. Fundamentos de operación.....	32

2.2.8.2.2. Zaranda vibratoria.....	33
2.2.8.2.3 Trommel.....	34
2.2.8.3. Pre-Chancado .....	35
2.2.8.4. Chancado de Pebbles .....	37
2.2.9. Modelamiento y simulación en conminución de minerales.....	43
2.2.9.1 Modelamiento de mecanismos de fractura en molienda SAG.....	45
2.2.10. Software de simulación METSIM .....	46
2.2.10.1. Definición de METSIM .....	48
2.2.10.2. Metodología de simulación METSIM .....	48
2.3. DEFINICIONES CONCEPTUALES... ..	48
2.3.1. Definición conceptual de la variable independiente.....	48
2.3.2. Definición operacional de la variable independiente .....	48
2.3.3. Definición conceptual de la variable dependiente.....	48
2.3.4. Definición operacional de la variable dependiente .....	48
<b>CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO .....</b>	<b>50</b>
3.0. MARCO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN .....	50
3.1. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO .....	50
3.1.1. Tipo y nivel de investigación .....	50
3.1.2. Diseño de la investigación .....	50
3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA.....	50
3.3. EQUIPOS Y MATERIALES... ..	50
3.3.1 Equipos.....	50
3.3.2 Materiales .....	50
3.4. PROCEDIMIENTO DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES... ..	51
3.5. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS .....	52
3.6. TÉCNICAS PARA EL PROCESAMIENTO DE DATOS .....	53
<b>CAPÍTULO IV: RESULTADOS. ....</b>	<b>54</b>
4.0. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN... ..	54
4.1. DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES.....	54
4.2. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS... ..	54

4.2.1. Toma de datos del circuito de molienda primaria semiautógena.....	54
4.2.2. Tratamiento de datos previo al balance de masa.....	55
4.2.3. Balance de masa en JKSimMet.....	60
4.2.4. Calibración de equipos en METSIM.....	68
4.2.5. Simulación con cambio de tamaño de abertura del Trommel.....	73
4.3. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS.....	77
4.3.1. Contrastación de hipótesis general.....	77
4.3.2. Contrastación de hipótesis específicas.....	77
<b>CAPÍTULO V: DISCUSIÓN.....</b>	<b>79</b>
5.0. DISCUSIÓN DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	79
5.1. PRUEBAS DE VALIDACIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL.....	79
5.2 APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA ENCONTRADA.....	80
5.3. CONTRASTE CON TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN SIMILARES.....	80
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>82</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>83</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>84</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>86</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Operacionalización de variables.....	7
<b>Tabla 2</b> Información en chancado y molienda SAG en concentradoras .....	18
<b>Tabla 3</b> Molinos SAG en diferentes unidades mineras.....	19
<b>Tabla 4</b> Tamaños de bola disponible en molienda convencional y SAG .....	28
<b>Tabla 5</b> El rol de las rocas.....	29
<b>Tabla 6</b> Tamaños de chancadoras de cono Nordberg y rangos de capacidad... ..	36
<b>Tabla 7</b> Selección en molienda SAG .....	44
<b>Tabla 8</b> Función fractura acumulada Bij en molienda SAG... ..	44
<b>Tabla 9</b> Módulos principales de METSIM... ..	47
<b>Tabla 10</b> Recolección de datos .....	51
<b>Tabla 11</b> Análisis Granulométrico del circuito SAG experimental .....	55
<b>Tabla 12</b> Ajuste Granulométrico del circuito SAG en JKSimMet .....	55
<b>Tabla 13</b> Ajuste granulométrico Doble Weibull para la alimentación.....	56
<b>Tabla 14</b> Ajuste granulométrico Doble Weibull undersize de zaranda .....	57
<b>Tabla 15</b> Ajuste granulométrico Doble Weibull producto final .....	57
<b>Tabla 16</b> Ajuste granulométrico Doble Weibull oversize Trommel.....	58
<b>Tabla 17</b> Ajuste granulométrico Doble Weibull oversize zaranda .....	58
<b>Tabla 18</b> Recalculo de Granulometría en el Trommel.....	62
<b>Tabla 19</b> Recalculo de Granulometría en la zaranda .....	63
<b>Tabla 20</b> Calibración de Molino SAG en METSIM.....	67
<b>Tabla 21</b> Calibración de Trommel en METSIM.....	67
<b>Tabla 22</b> Calibración de Zaranda en METSIM .....	67
<b>Tabla 23</b> Calibración de Chancador de Pebble en METSIM.....	68
<b>Tabla 24</b> Balance de masa circuito calibrado .....	69
<b>Tabla 25</b> Comparación de resultados exp vs sim.....	69
<b>Tabla 26</b> Balance de masa con abertura 16 mm Trommel.....	70
<b>Tabla 27</b> Balance de masa con abertura 18 mm Trommel.....	71

<b>Tabla 28</b> Balance de masa con abertura 20 mm Trommel.....	72
<b>Tabla 29</b> Granulometrías experimentales vs simulada con abertura 18mm del producto SAG .....	73
<b>Tabla 30</b> Base de datos general del circuito de molienda primaria semiautógena de minera Las Bambas.....	82

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Línea 1 SAG minera las Bambas.....	2
<b>Figura 2.</b> Tensión de una red cristalina resultante de la tracción o la compresión de tensiones.....	13
<b>Figura 3.</b> Concentración de estrés en una punta de grieta.....	13
<b>Figura 4.</b> Fractura por chancado. ....	14
<b>Figura 5.</b> Comportamiento de minerales en la reducción de tamaño.....	14
<b>Figura 6.</b> Valores típicos de razón de reducción.....	15
<b>Figura 7.</b> Movimiento de la carga de un molino.....	16
<b>Figura 8.</b> Molinos empleados a diferentes tamaños de partícula.....	17
<b>Figura 9.</b> Medio de molienda bolas, cylpebbs, barras y rocas.....	17
<b>Figura 10.</b> Molino AG/SAG de alto ratio.....	20
<b>Figura 11.</b> Fractura por abrasión y compresión en partículas.....	20
<b>Figura 12.</b> Evento de liberación y microfotografía de fragmentos.....	21
<b>Figura 13.</b> Conminución selectiva, parcialmente selectiva y no selectiva.....	21
<b>Figura 14.</b> Molino SAG Unidad Minera Tintaya Antapaccay.....	22
<b>Figura 15.</b> Diseños de molino SAG.....	22
<b>Figura 16.</b> Dimensiones de molinos SAG en Sudamérica... ..	23
<b>Figura 17</b> Capacidad de molienda a diferentes F80... ..	24
<b>Figura 18</b> Relación entre el volumen de llenado y potencia del molino SAG para bajas .....	25
<b>Figura 19.</b> Simulación DEM de rocas y bolas en el Molino SAG... ..	25
<b>Figura 20.</b> Pebbles en molino SAG.....	30
<b>Figura 21.</b> Tratamientos de Pebbles en circuitos SABC.....	31
<b>Figura 22.</b> Chancador de cono serie HP.....	31
<b>Figura 23.</b> Zaranda vibratoria inclinada de 4 cubiertas.....	33
<b>Figura 24.</b> Criba Trommel.....	34
<b>Figura 25.</b> Diagrama de flujo con instalación de pre-chancador.....	35
<b>Figura 26.</b> Arreglo simple de chancador de Pebble.....	37
<b>Figura 27.</b> Arreglo ideal de chancador de Pebble.....	37

<b>Figura 28.</b> Esquema de un proceso de conminución.....	38
<b>Figura 29.</b> Tamaños retenidos en “n” mallas. ....	40
<b>Figura 30.</b> Fracciones de tamaño a un intervalo de tiempo. ....	41
<b>Figura 31.</b> Representación matricial del modelo cinético de conminución Batch.....	42
<b>Figura 32.</b> Puntos de muestreo del circuito de molienda primaria semiautógena.....	54
<b>Figura 33.</b> Balance de masa del circuito de molienda primaria semiautógena .....	60
<b>Figura 34.</b> Esquema de flujos principales del circuito de molienda primaria semiautógena.....	60
<b>Figura 35.</b> Comprobación de balance del circuito de molienda primaria semiautógena.....	66
<b>Figura 36.</b> Simulación del circuito de molienda primaria semiautógena con calibración .....	68
<b>Figura 37.</b> Simulación con cambio de abertura de Trommel 16mm.....	70
<b>Figura 38.</b> Simulación con cambio de abertura de Trommel 18mm.....	71
<b>Figura 39</b> Simulación con cambio de abertura de Trommel 20mm.....	72
<b>Figura 40.</b> Balance de masa del circuito simulado con abertura de Trommel 18mm .....	75
<b>Figura 41.</b> Plano de fabricación del Trommel Minera las Bambas.....	81

## RESUMEN

El objetivo de la presente tesis es optimizar el chancador de Pebbles, el cual trata una alta recirculación proveniente del Trommel del Molino SAG, durante la operación del circuito de molienda primaria semiautógena con un tratamiento actual de 330 t/h en el chancador de Pebbles, potencia de 396 kW y set de 0,5 “; para optimizar se realizaron simulaciones en el laboratorio de cómputo de la UNJBG. Para las simulaciones se realizó un balance de masa previo, el mismo que arrojó un tonelaje excesivo en el chancador de Pebbles el cual reducía la capacidad del circuito al limitar el tonelaje de alimentación fresca; por tanto, la capacidad del circuito SAG no se ha podido optimizar de manera apropiada debido a la falta de capacidad y potencia disponible de los equipos, siendo la potencia actual del molino SAG de 15 548 kW. Después de varias simulaciones con los equipos calibrados del circuito SAG en el simulador, se concluye que una modificación de la abertura del Trommel puede reducir el tonelaje y aumentar la capacidad del chancador de Pebbles, esta mejora es la más viable, logrando un circuito de molienda primaria semiautógena con mayor capacidad.

**Palabras clave:** Chancador de Pebbles, Trommel, Molino SAG

## ABSTRACT

The objective of this thesis is to optimize the Pebbles crusher, which treats a high recirculation, coming from the SAG mill Trommel, during the operation of the semi-autogenous primary grinding circuit; with a current treatment of 330 t/h in the Pebbles crusher, power of 396 kW and set of 0,5"; to optimize, simulations were performed in the computer laboratory of the UNJBG. For the simulations, a previous mass balance was performed, which showed an excessive tonnage in the Pebbles crusher which reduced the capacity of the circuit by limiting the tonnage of fresh feed; therefore, the capacity of the SAG circuit could not be properly optimized due to the lack of capacity and available power of the equipment, the current power of the SAG mill being 15 548 kW. After several simulations with the calibrated SAG circuit equipment in the simulator, it is concluded that a modification of the Trommel opening can reduce the tonnage and increase the capacity of the Pebbles crusher, this improvement is the most feasible, achieving a semi-autogenous primary grinding circuit with higher capacity.

**Keywords:** Pebbles crusher, Trommel, SAG mill, SAG mill

## INTRODUCCIÓN

La empresa las Bambas del grupo MMG y con 7 años dedicada al rubro de la minería peruana, las Bambas es una mina de tajo abierto, se ubica entre los distritos de Challhuahuacho, Tambobamba y Coyllurqui, provincia de Cotabambas, y el distrito de Progreso, provincia de Grau, en la Región Apurímac.

En esta unidad minera, hay un proyecto de mejora de la capacidad de la primera línea SAG, lo que implica una serie de cambios y mejoras en el circuito.

La molienda primaria semiautógena es fundamental en la liberación inicial del mineral de cobre y es aquí donde se desea optimizar la capacidad para incrementar la producción por día; de acuerdo con los datos de planta la capacidad del chancador de Pebbles es limitada y ya en su capacidad máxima lo cual hace que sea el principal cuello de botella en aumento de la tasa de procesamiento, fue así como surgió la interrogante del presente trabajo ¿Cómo optimizar el circuito de molienda semiautógena de la concentradora de la minera las Bambas usando software de simulación metalúrgica?

Para llevar a cabo el siguiente estudio se ha estructurado 5 capítulos. En el capítulo I se enfoca el problema, la justificación, el objetivo e hipótesis del tema. En el capítulo II se detalla el marco teórico, con precisiones teórico-conceptuales del circuito SAG, operación de molienda primaria.

## CAPÍTULO I

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

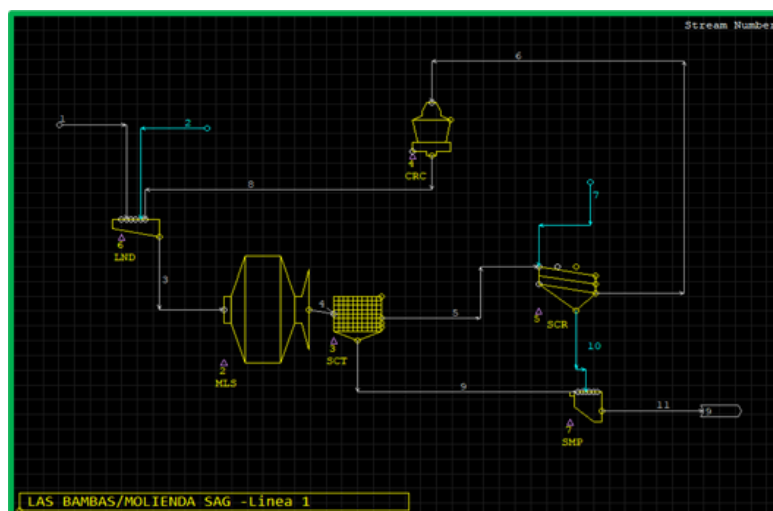
#### 1.0. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

##### 1.1. Antecedentes del problema a investigar

En la etapa de molienda semiautógena (SAG) de la minera Las Bambas intervienen muchos factores a fin de garantizar un correcto control de este, el circuito de la primera línea de molienda SAG se compone por un Molino SAG, un Trommel, una Zaranda y un Chancador de Pebbles, este último presenta problemas normalmente por capacidad, ya que las voladuras en mina y la operación del molino SAG genera gran cantidad de Pebbles, el cual se vuelve un cuello de botella en el proceso, y tiene como resultado una reducción en el tonelaje procesado. Por tal motivo, con este estudio de carácter tecnológico computacional se pretende optimizar el chancador de Pebbles el cual permita un incremento en el tonelaje procesado y reduzca el problema de la capacidad, de esta manera se pretende incidir en el cambio de abertura del Trommel que separa el material scat (Pebbles + bolas rotas) de la pulpa fina, simular el cambio y determinar la abertura correcta, tal como se observa en la Figura 1.

#### Figura 1

*Línea 1 SAG de la minera Las Bambas*



*Nota.* Circuito primario de molienda SAG de la minera Las Bambas.

## **1.2. Descripción del problema**

En el circuito de molienda primaria semiautógena se presenta una alta recirculación de Pebbles por esta razón la tasa de procesamiento se ve limitada impidiendo el aumento en la producción de día. Actualmente las leyes de cobre son cada vez menores, por lo que el aumento de producción es necesario para obtener ganancias económicas sustentables con respecto al proceso de la planta concentradora.

## **1.3. Formulación del problema (general y secundarios)**

### **1.3.1. Formulación del problema principal**

¿Cómo es la optimización del circuito de molienda primaria semiautógena que incremente la capacidad de tratamiento de concentradora Las Bambas usando un simulador?

### **1.3.2. Formulación de los problemas secundarios**

1. ¿Cómo es el funcionamiento operacional del Trommel del molino SAG?
2. ¿Cómo es el trabajo operacional de la chancadora de Pebbles del circuito de molienda primaria?
3. ¿Cuál es el proceso de optimización del circuito de molienda semiautógena mediante un simulador?

## **1.4. Objetivos de la investigación**

### **1.4.1 Objetivo general**

Optimizar el circuito de molienda primaria semiautógena para que incremente la capacidad de tratamiento de Concentradora Las Bambas usando un simulador.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

1. Mejorar el funcionamiento operacional del Trommel del molino SAG.
2. Mejorar el trabajo operacional de la chancadora de Pebbles del circuito de molienda primaria.

3. Simular el proceso de optimización de molienda primaria semiautógena mediante un simulador.

## **1.5. Justificación e importancia de la investigación**

El trabajo de investigación se realiza con el objetivo de optimizar la primera línea de molienda SAG de la planta concentradora de la minera Las Bambas con software METSIM para incrementar la capacidad del chancador de Pebbles, permitiendo tratar un mayor tonelaje de alimentación y así obtener mayores beneficios operacionales y económicos.

### **1.5.1. Justificación teórica**

El trabajo de investigación se sustenta en el modelo de conminución batch el cual modela y representa adecuadamente el proceso de molienda semiautógena.

### **1.5.2. Justificación práctica**

El trabajo se realiza con la ayuda de un software para simulación de procesos metalúrgicos a fin de obtener resultados óptimos y facilitar la investigación.

### **1.5.3. Justificación académica**

El presente trabajo contribuye en la investigación asistida por software de simulación de procesos la cual cada vez tiene mayor alcance y mejoras en la industria metalúrgica.

## **1.6. Limitaciones**

El trabajo fue desarrollado en el circuito de molienda primaria semiautógena, sin tomar en consideración los circuitos posteriores a este como flotación y sus efectos, pero no impide una posible investigación sobre este.

## **1.7. Viabilidad del estudio**

Esta tesis es viable debido a que se consigue el acceso al campo, a causa de que el investigador realizó el trabajo tomando datos en la misma unidad minera Las Bambas por medio de la contratista FLSmidth, y así pudo acceder al circuito de molienda primaria semiautógena. A nivel personal se contó con herramientas para la toma de datos, procesamiento de información, simulación e interpretación de resultados que requiere el proceso investigativo.

## **1.8. Formulación de hipótesis**

### **1.8.1. Hipótesis general**

La optimización del circuito de molienda primaria semiautógena influye en el incremento de la capacidad de tratamiento de Concentradora Las Bambas usando un simulador.

### **1.8.2. Hipótesis específicas**

1. El funcionamiento operacional del Trommel del molino SAG influye en su capacidad de tratamiento.
2. El trabajo operacional de la chancadora de Pebbles influye significativamente en la capacidad de tratamiento del circuito de molienda primaria.
3. El proceso de optimización del circuito de molienda semiautógena se agiliza mediante un simulador computacional.

## **1.9. Variables (Independientes, dependientes y restrictivas).**

### **1.9.1. Definición conceptual de la variable independiente**

**Optimización del circuito primario de molienda:** Se refiere al proceso de mejorar y perfeccionar la eficiencia y el rendimiento de la etapa inicial de molienda en una planta de procesamiento de minerales. Este proceso implica ajustar y afinar los parámetros operativos y las condiciones de trabajo, como la velocidad del molino, la carga de bolas, el tamaño de la alimentación y otros factores relevantes, con el

objetivo de lograr un rendimiento óptimo en términos de reducción de tamaño del mineral y liberación de minerales valiosos.

### 1.9.2. Definición operacional de la variable independiente

**Optimización del circuito primario de molienda:** Consiste en la operación de toma de muestras en los lugares pre-establecidos en el diagrama de flujo del circuito de molienda SAG en estudio y su procesamiento en el laboratorio metalúrgico para la obtención de la data deseada.

### 1.9.3. Definición conceptual de la variable dependiente

**Incremento de la capacidad de tratamiento:** Se refiere al aumento planificado y efectivo en la capacidad de procesamiento de un circuito de molienda SAG (molino semiautógeno) en una planta de procesamiento de minerales. Esta variable mide el cambio cuantitativo en la cantidad de mineral que puede ser molido y procesado por el molino SAG en un período de tiempo específico el cual se puede lograr mediante diversas estrategias como la modificación del diseño del molino, la optimización de los parámetros de operación, la introducción de equipos adicionales o la mejora de la eficiencia del proceso. Este aumento en la capacidad es fundamental para cumplir con la demanda de producción y para adaptarse a cambios en la producción de mineral o en las metas de la planta de procesamiento.

### 1.9.4. Definición operacional de la variable dependiente

**Incremento de la capacidad de tratamiento:** Se define operacionalmente como el aumento cuantitativo en la cantidad de mineral procesado por un molino SAG en un período de tiempo específico medido en unidades de toneladas por hora (t/h) o cualquier otra unidad de capacidad relevante. Este incremento se determina mediante la comparación de la capacidad de tratamiento actual del molino SAG con la capacidad después de aplicar modificaciones o mejoras planificadas en el circuito de molienda. La fórmula para calcular esta variable operacional se expresa de la siguiente manera:

$$\Delta \text{Capacida SAG} = \text{Capacidad de posmejoras} - \text{Capacidad inicial}$$

Donde:

- ✓ "Capacidad de Tratamiento Posmejoras" representa la cantidad de mineral que el molino SAG puede procesar después de implementar las modificaciones o mejoras planificadas.
- ✓ "Capacidad de Tratamiento Inicial" es la cantidad de mineral que el molino SAG podía procesar antes de realizar las mejoras.

Por lo tanto, el incremento de la capacidad de tratamiento del circuito SAG es una medida cuantitativa que evalúa el éxito de las acciones tomadas para aumentar la eficiencia y la productividad de la etapa de molienda en una planta de procesamiento de minerales, el cual se obtiene mediante el uso del Software METSIM para lograr el objetivo planteado.

#### 1.10. Operacionalización de variables (dimensiones e Indicadores).

La operacionalización de las variables se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1**

*Operacionalización de las variables*

<b>Variable</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Indicador</b>
<b><u>VI</u></b> <b>Optimización del circuito de molienda primaria</b>	• Tonelaje de alimentación	t/h
	• Granulometría	µm
	• Consumo específico de energía (CEE)	kWh/t
	• Nivel de llenado de bola (Jb)	%
	• Abertura de Trommel	mm
	• Abertura de Zaranda	mm
	• CSS (close side setting) de la chancadora	mm
• Work Índice	kWh/t	
<b><u>VD</u></b> <b>Incremento de la capacidad de tratamiento</b>	• Potencia de molino SAG	kW
	• Potencia de chancador de Pebbles.	kW
	• Carga circulante	%
	• T80	Mm
	• Capacidad de tratamiento	t/h

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.0. MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN**

##### **2.1. Antecedentes del trabajo de investigación**

La Línea 1 de molienda primaria semiautógena de la planta concentradora de Las Bambas trata 81 600 toneladas por día (t/d). Sin embargo, su objetivo es aumentar la capacidad, pero tienen una condicionante que es la alta recirculación de Pebbles, el cual se ha logrado identificar como problema principal, que también limita al chancador de Pebbles haciendo que este trabaje a su capacidad máxima con una operación inestable. El contexto del problema planteado en esta tesis significa: Consultar estudios previos realizados a nivel nacional e internacional.

##### **2.1.1. Antecedentes internacionales**

###### **2.1.1.1 Antecedente 1**

Wendelin (2018), con su tesis de investigación “optimización y desempeño de circuitos de molienda: el caso de la mina de oro Buzwagi(bgm), Freiberg, Alemania, 2018”, sustentada en la Universidad Tecnológica Bergakademie Freiberg. El objetivo del estudio fue mejorar la finura del producto para la molienda BGM circuito de xP,80 > 125  $\mu\text{m}$  a xP,80  $\leq$  125  $\mu\text{m}$ . Esto se logrará a través de la evaluación del rendimiento del circuito de molienda, desarrollo de conceptos para mejorar el rendimiento del circuito de molienda por simulación por computadora, Investigación sobre la influencia de la composición del mineral en el consumo de energía específica y liberación de minerales, para lo cual se empleó un diseño experimental, con un nivel aplicado y con un enfoque cuantitativo, se trabajó en el circuito de molienda. Para la recolección de la información se aplicó la técnica de la encuesta que concluye que basado en la simulación y optimización del circuito de molienda BGM existente, se podría lograr una mejora de la finura del producto hasta 327  $\mu\text{m}$ . Esto representa un aumento del 43 % en la finura del producto en comparación con la anterior (570  $\mu\text{m}$ ) y el caso base simulación (579  $\mu\text{m}$ ).

El resultado se logró mediante la modificación de la actual operación en condiciones tales como la reducción de la apertura de la zaranda de descarga del molino SAG, la reducción del diámetro del vortex y ápex, así como el ajuste del contenido de sólidos de alimentación del ciclón. La mejora fue consecuencia de la mejora del producto del molino de descarga SAG. finura de 1,644 mm a 1,240 mm, así como un rendimiento hidrociclónico mejorado con el tamaño de corte. Los cambios en el vórtice, los diámetros del buscador y del ápice indicados están de acuerdo con lo reflejado.

### **2.1.1.2 Antecedente 2**

Delboni y Costa e Silva (2022), con su investigación “Preprocesamiento para aumentar la capacidad de los circuitos del Molino SAG, Sao Paulo, Brasil, 2022”, realizada en la Universidad de Sao Paulo. El objetivo del estudio fue aumentar la capacidad de un circuito de molienda industrial, mediante modelos matemáticos y simulaciones para establecer diferentes configuraciones de circuitos y condiciones de funcionamiento para mejorar la capacidad del circuito. para lo cual se empleó un diseño experimental, con un nivel aplicado y con un enfoque cuantitativo, se trabajó en el circuito de molienda SAG. Para la recolección de la información se aplicó la técnica de la encuesta que concluye que las simulaciones muestran que se lograría un aumento de capacidad del 12 % en la planta de molienda existente, mediante la trituración adicional del 35% de la alimentación fresca del molino SAG. Tales cifras representarían adiciones anuales de 8,3 kt en cobre y 250 kg en oro.

### **2.1.1.3 Antecedente 3**

Asghari, VandGhorbany y Nakhaei (2019), con su tesis de investigación “Relación entre parámetros operativos, características del mineral y propiedades de forma del producto en un molino SAG industrial, Tehran, Iran, 2019”, realizada en la Universidad de Tehran. El objetivo del estudio fue especificar los efectos de las características del mineral y los parámetros operativos en el rendimiento del molino SAG. para lo cual se empleó un diseño experimental, con un nivel aplicado y con un enfoque cuantitativo, se trabajó en el circuito de molienda SAG. Para la recolección de la información se aplicó la técnica de la observación. En conclusión, los resultados mostraron que la relación de

aspecto más alta y la circularidad más baja del producto del molino se logran con mineral blando. A medida que cambia la resistencia del mineral, las diferencias en la forma se pueden atribuir a las diferentes roturas y mecanismos operados en el molino. Además, las características de la forma de las partículas proporcionan una forma conveniente de cuantificar los cambios en el molino SAG en función de las propiedades del mineral y el tipo de acción de rotura utilizada

## **2.1.2. Antecedentes nacionales**

### **2.1.2.1 Antecedente 1**

Aguilar (2017), con su tesis de investigación “Optimización de molinos semi-autogenos, Arequipa, 2017”, sustentada en la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. El objetivo del estudio fue optimizar la mejora de la evacuación de la pulpa del molino SAG para lograr el incremento de tonelaje procesado, para así mejorar la eficiencia de la molienda debido a que el proceso tiene un alto consumo energético en compañía minera las Bambas, por ello se empleó un diseño experimental, con un nivel aplicado y con un enfoque cuantitativo, se trabajó en el circuito de molienda SAG. Para la recolección de la información se aplicó la técnica observación, la optimización del flujo de descarga del molino realizado con la modificación de diseño curvo del descargador de pulpa (pulp discharger), minimizando de esta manera el efecto de recirculación de la carga con eso se logró un aumento del tonelaje procesado de 70 000 t/d a 72 000 t/d, que es un incremento 2000 t/d. Se realizó la mejora del diseño de los levantadores de carga (pulp lifter), que ayuda la capacidad de evacuación de la pulpa hacia el Trommel, con el nuevo diseño más curvo de los levantadores de carga. Se reguló la velocidad crítica gracias al uso de la herramienta DEM para la simulación que nos permite predecir los desgastes acelerados de los forros (liners) del cilindro como también los esfuerzos de tensión que se dan en el cilindro con la restricción de que la catarata de bolas siempre caiga en el pie de carga y de esta manera evitamos el daño a los revestimientos del cilindro. El presente trabajo sirvió para enfocar correctamente el manejo del simulador e interacción con herramientas DEM y las consecuencias que pueden influir en el Molino SAG ante algún cambio al optimizarlo.

### 2.1.2.2 Antecedente 2

Heredia (2016), con su tesis de investigación “Simulación y obtención de parámetros óptimos para la optimización de los revestimientos del molino SAG 36 ft x 26,6 ft de la MINERA CONSTANCIA –HUDBAY, Arequipa, 2016”, sustentada en la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. El objetivo del estudio fue aplicar los Modelos Fenomenológicos para la Molienda Semiautógena (SAG), y así conocer el comportamiento de los medios de molienda dentro del molino SAG, estas ecuaciones son derivados por extensión del modelo tradicionalmente aceptado para la molienda convencional con Molinos de Bolas de la minera Constancia Hudbay. En dicha investigación se empleó un diseño experimental, con un nivel aplicado y con un enfoque cuantitativo, se trabajó en el circuito de molienda SAG. Para la recolección de la información se aplicó la técnica de observación donde se obtuvo como resultado el Modelo Fenomenológico aplicado para sistemas Semiautógenos desarrollado, el cual fue capaz de predecir el comportamiento de las Rocas, Bolas como medio de molienda dentro del Molino con sus respectivos parámetros óptimos de operación: Balls alpha0: 0.003539 alpha1: 0.662 alpha2: 3.8 Dcrít: 83,323 Rocas Alpha 0: 0.000644 alpha1: 0.662 alpha2: 3.6 Dcrít: 14,637 Auto- Fractura de las rocas alpha0: 0.000024 alpha1: 0.662. El uso del DEM (Método de los elementos discretos), sirvió para predecir el desgaste de los revestimientos en la Tapa de Alimentación y Descarga, en el cilindro del Molino, sirvió para predecir el ángulo de Ataque Óptimo de los levantadores (lifters) y mejorar la Trayectoria de las Bolas sin sacrificar el Revestimiento del Cilindro del Molino. El presente trabajo sirvió para emplear correctamente el simulador, ya que este usa modelos matemáticos similares a los empleados en esta investigación, así tener un mejor criterio de optimización.

### 2.1.2.3 Antecedente 3

Rojas (2019), con su tesis de investigación “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., Cerro de Pasco, 2019”, sustentada en la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. El objetivo del estudio fue Incrementar la capacidad (Throughput) en la etapa de molienda SAG, para optimizar las variables de la

función selección y fractura, en la Compañía Minera Antamina S.A. para lo cual se empleó un diseño experimental, con un nivel aplicado y con un enfoque cuantitativo, se trabajó en el circuito de molienda SAG. Para la recolección de la información se aplicó la técnica de observación de las simulaciones realizadas que indican que es posible incrementar la capacidad y optimizar la función selección y función fractura del molino SAG, modificando las variables manipulables del molino SAG: Parrilla con abertura de 2,5”, incrementa +0,4% la capacidad. Al aumentar 1,0% el nivel de bolas, incrementa + 2,7% la capacidad. Al modificar el tamaño de bolas a 5,25”, incrementa +1,8 % la capacidad. Al modificar el tamaño de bolas a 5,5” incrementa +3,6 % la capacidad. La interacción de la abertura de los slots a 100% en 2,5” y usar Bolas de 5,5”, incrementa +4,5 % la capacidad. Trabajar a una mayor velocidad en el SAG (+ 0,4 rpm, incrementa 7,3 % la capacidad). La evaluación realizada a nivel industrial en el molino SAG N°1, confirma que el uso de bolas de 5,5 pulgadas incrementa la capacidad de molienda en 6 %. Este trabajo sirvió para tener noción de las variables a poder cambiar para optimizar el circuito de molienda primaria semiautógena.

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1 Conminución de minerales**

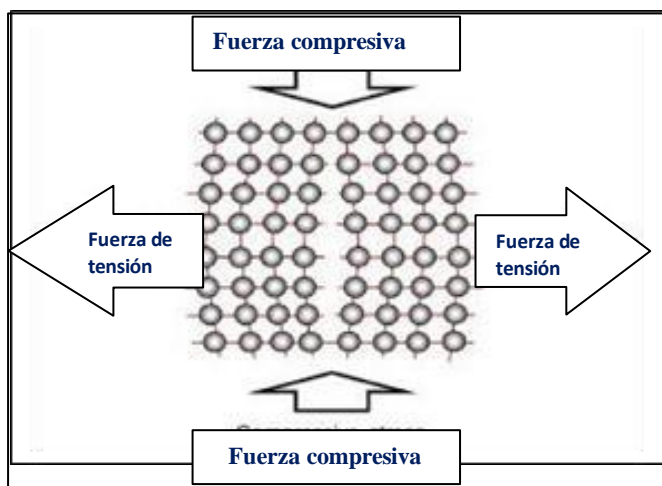
La conminución es el proceso de reducción progresiva del mineral mediante métodos físicos para poder liberar la mena valiosa en el mineral diseminado y así separarlo de la ganga. “Los explosivos se utilizan en la minería para eliminar minerales de sus lechos naturales, y la voladura puede considerarse como la primera etapa en conminución.” (Wills et al, 2015, p.109) La conminución en la planta concentradora se lleva a cabo como una secuencia de procesos de chancado y molienda.

#### **2.2.1.1 Principios de la Conminución**

La mayoría de los minerales son materiales cristalinos en los que los átomos se organizan en matrices tridimensionales. En la red cristalina de minerales, estos enlaces interatómicos y se pueden romper si se extiende por una tensión de tracción (Wills et al, 2015, p. 110).

## Figura 2

*Tensión de una red cristalina resultante de la tracción o la compresión de tensiones.*

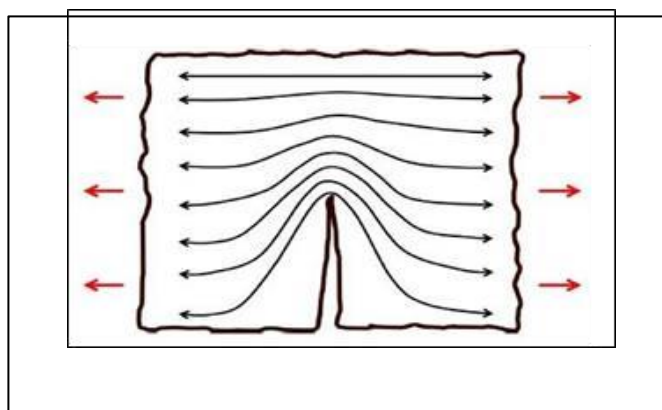


*Nota.* Adaptado de Wills et al, 2015

Incluso cuando las rocas están cargadas uniformemente, “las tensiones en el interior no se distribuyen uniformemente ya que la roca consiste en una variedad de minerales dispersos como granos de varios tamaños” (Wills et al, 2015, p.110).

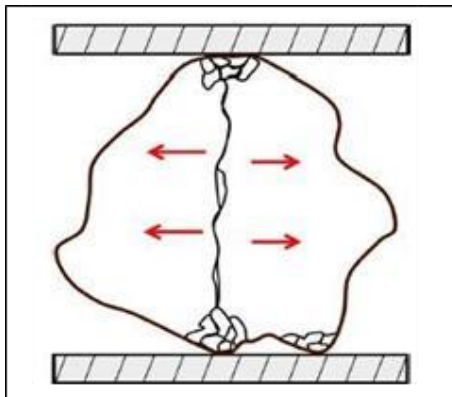
## Figura 3

*Concentración de estrés en una punta de grieta.*



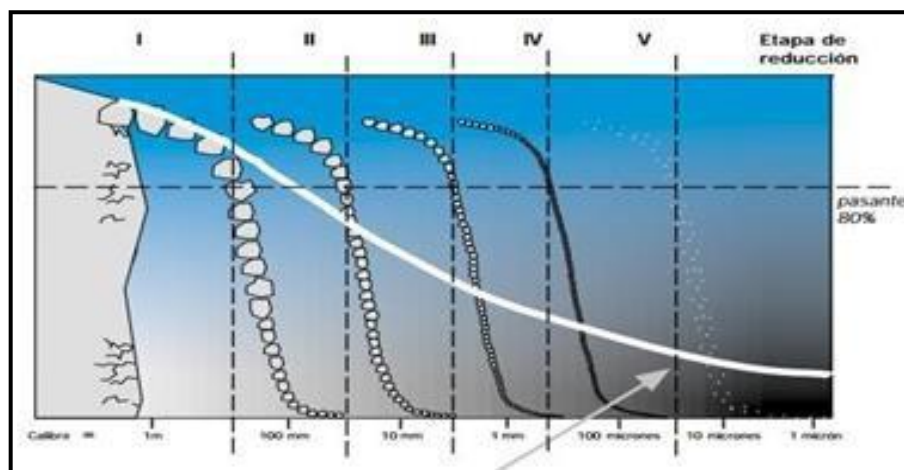
*Nota.* Adaptado de Wills et al, 2015

Tal es así que, “la rotura se logra principalmente por trituración, impacto y desgaste, y los tres modos de fractura (compresivo, tracción y cizallamiento) se puede identificar conociendo la mecánica de rocas y el tipo de carga, es decir, el equipo de conminución.” (Wills et al, 2015, p.111). Ver Figura 4

**Figura 4***Fractura por chancado**Nota.* Adaptado de Wills et al, 2015

### 2.2.2 Chancado

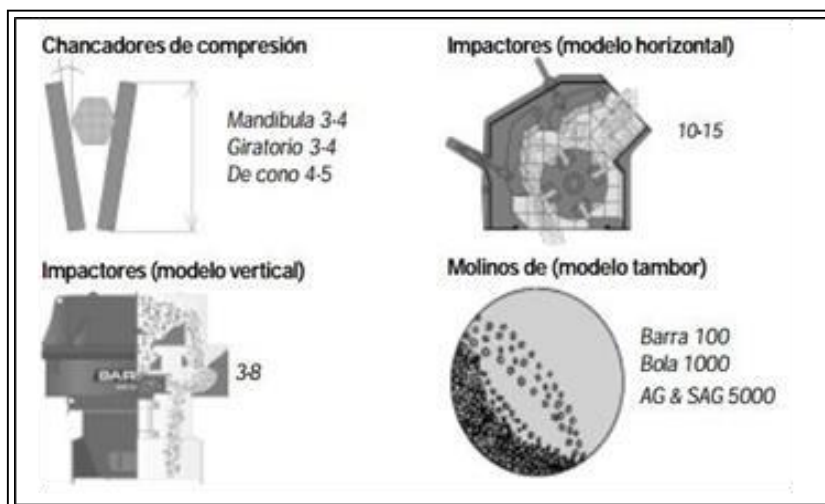
El chancado es la primera etapa de la conminución (liberación de minerales mediante reducción de tamaño), encargada de liberar el mineral valioso o mena (ore) del material estéril o ganga por reducción de tamaño, mediante fuerzas de impacto, abrasión y cizallamiento, siendo la primera, la que mayor aporta a esta etapa, liberando tensiones internas del mineral, provocando la fragmentación en planos axiales a la fuerza aplicada y así romper los enlaces físicos (Van der Waals) que unen a minerales valiosos de minerales estériles.

**Figura 5***Comportamiento de minerales en la reducción de tamaño**Nota.* Adaptado de Metso minerals, 2004

Esta primera etapa se desarrolla en equipos llamados chancadoras, “máquinas robustas usadas para reducir el mineral proveniente de mina ROM (Run of Mine), hasta un tamaño apropiado definido por las operaciones aguas abajo” (Riquelme;2018) y “normalmente están diseñadas para operar 75% del tiempo disponible, principalmente causadas por interrupciones de alimentación insuficiente y detalles mecánicos” (Wills et al, 2015, p. 123), mostrados en la Figura 6.

### Figura 6

*Valores típicos de razón de reducción*



*Nota.* Adaptado de Metso minerals, 2004

#### 2.2.2.1 Mecanismos de fractura en chancado

Para esta parte, “el mecanismo de chancado es aplicando fuerzas de impacto, presión o una combinación de ambos. La trituradora de mandíbulas es principalmente una trituradora de compresión, mientras que las otras operan principalmente por la aplicación de impacto.” (Gupta et al, 2016, p.123).

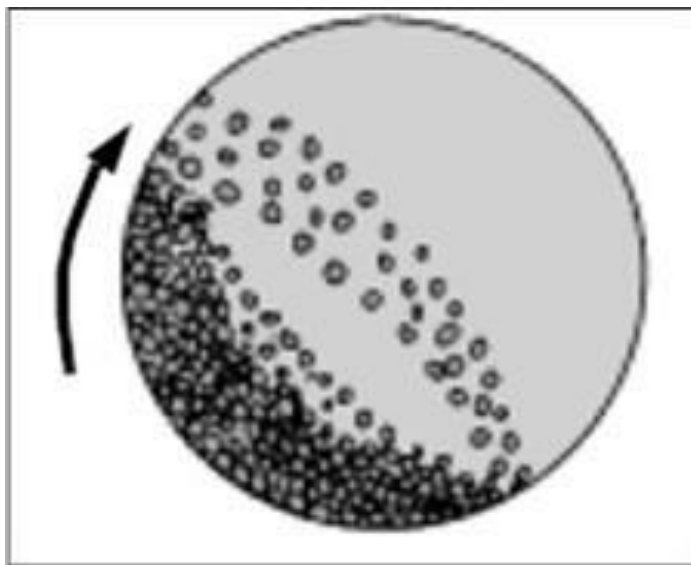
#### 2.2.3 Molienda SAG

“La definición de autógeno es auto generado, el término `autógeno ‘aplicado a un molino fue atribuida por Robinson a Harlow Hardinge quien en 1940 lo usó para referir el sistema de reducción en los molinos de su empresa.” (Moly Cop, 2017), La molienda SAG/AG redujo etapas de chancado convencionales (secundaria y terciaria) con su

aplicación, lo que permitió reducir costos, maximizar el tonelaje de alimentación y tratar minerales con condiciones particulares de mejor forma (de alta humedad y arcillosos), molinos de trituración autógena (AG) o molinos de trituración totalmente autógena (FAG).

### **Figura 7**

*Movimiento de la carga de un molino*

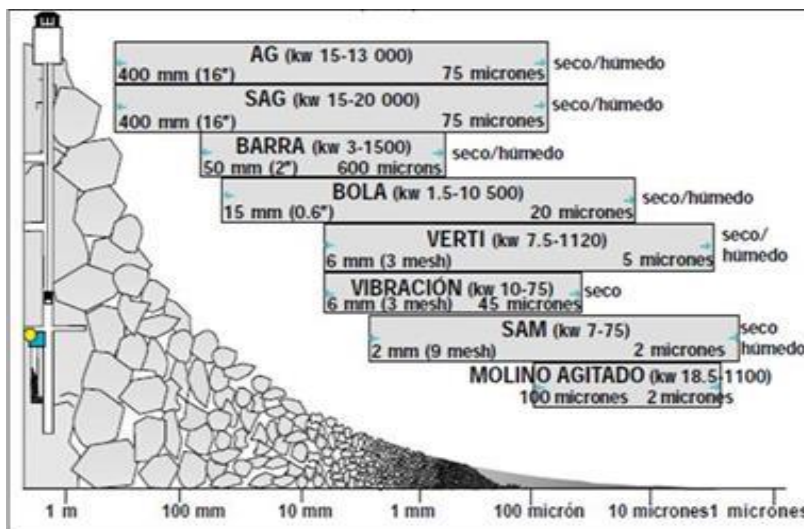


*Nota.* Adaptado de Metso minerals, 2004

Gupta et al, (2016), indica que: “Los molinos que utilizan rocas de tamaño intermedio o los Pebbles como medio de molienda también son molinos autógenos, pero se conocen como molinos de Pebbles. Los molinos que muelen minerales duros con características de fractura que no se prestan a un registro completamente automático se cargan con una pequeña cantidad de bolas de acero para ayudar en la reducción de tamaño. Estos se conocen como molinos de trituración semiautógena (SAG). En la industria minera todos estos tipos de molinos están en uso.” (p.250)

**Figura 8**

*Molinos empleados a diferentes tamaños de partícula*



*Nota.* Adaptado de Metso minerals, 2004

**Figura 9**

*Medios de molienda, bolas, cylpebbs, barras y rocas*



*Nota.* Adaptado de Drzymala, 2007

Schlesinger et al, 2011 indican que: "Los SAG son mucho más comunes. El producto del molino generalmente se pasa sobre una criba vibratoria grande para separar los tamaños grandes y los Pebbles de partículas de tamaño requerido. El material del tamaño indicado se envía a un molino de bolas para su molienda final. Los Pebbles de gran tamaño se recirculan mediante una pequeña chancadora de cono, luego regresan al molino SAG o AG. Este procedimiento maximiza la producción de mineral y minimiza consumo de energía eléctrica." (pág, 215)

**Tabla 2***Información en chancado y molienda SAG en concentradoras*

<i>Concentradora</i>	<i>Candelaria, Chile</i>	<i>El soldado, Chile</i>	<i>Los Bronces, Chile</i>
<b><i>Mineral tratado por año, toneladas</i></b>	25 000 000 (2001)	7 700 000 (2010)	21 000 000 (2010)
<b><i>Ley %Cu</i></b>	0,9 – 1,0	0,63	1,055
<b><i>Chancado</i></b>		<i>Calcopirita</i>	<i>Calcopirita</i>
<i>Chancadora primaria giratoria</i>	<i>Uno</i>	<i>Uno</i>	<i>Uno</i>
<i>Diámetro x altura, m</i>	<i>1,52 x 2,26</i>	<i>1,1 x 1,65</i>	<i>1,4 x 1,9</i>
<i>Potencia, kW</i>	522	300	430
<i>Velocidad rotacional, RPM</i>			6,5
<i>Tamaño de producto, m</i>	<i>0,1 – 0,13</i>	<i>0,2</i>	<i>0,2</i>
<i>Consumo de energía, kWh/ton</i>	<i>0,3 estimado</i>	<i>0,2</i>	<i>0,25</i>
<i>Chancadoras secundarias</i>	<i>Ninguna</i>	<i>4 unidades</i>	<i>Ninguna</i>
<b><i>Primera etapa de molienda</i></b>			
<i>Tipo de molino</i>	<i>Semi-autogeno</i>	<i>Semi-autogeno</i>	<i>Semi-autogeno</i>
<i>Número de molinos</i>	2	1	2
<i>Diámetro x largo, m</i>	<i>11 x 4,6</i>	<i>10,4 x 5,2</i>	<i>8,5 x 4,3</i>
<i>Potencia de cada molino, kWh</i>	12,000	11,300	5590
<i>Velocidad rotacional, RPM</i>	<i>9,4 – 9,8</i>	<i>10,2</i>	<i>11,3</i>
<i>%volumen de acero</i>	<i>12 - 15</i>	<i>15</i>	<i>13 - 15</i>
<i>Tamaño de bola inicial</i>	<i>12,5 cm</i>	<i>12,7 cm</i>	<i>12,7 cm</i>
<i>Consumo de bolas, kg/ton de mineral</i>	<i>0,3</i>	<i>0,32</i>	<i>0,35</i>
<i>Alimento</i>	<i>70% mineral 30% H<sub>2</sub>O</i>	<i>80% mineral 20% H<sub>2</sub>O</i>	<i>70% mineral 30% H<sub>2</sub>O</i>
<i>Tamaño de producto</i>	<i>80% &lt; 140 μm</i>	<i>200 μm</i>	<i>3 cm</i>

Nota. Adaptado de Schlesinger et al, 2011

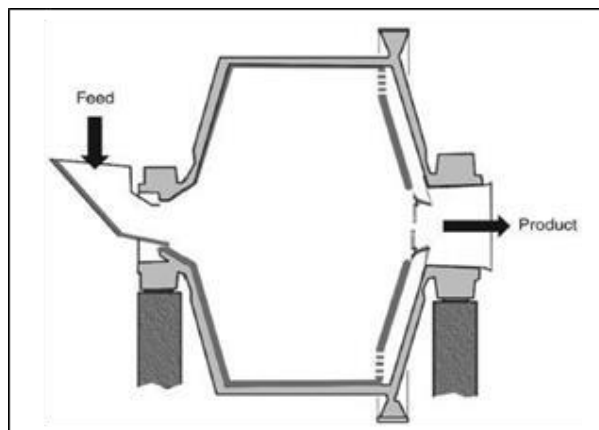
De hecho, “los molinos SAG se han convertido en el método preferido de alimentación a molinos de bolas. Se han instalado molinos SAG en prácticamente todos los circuitos de molienda de procesamiento de minerales construidos en los últimos 20 años.” (Mular et al, 2002, p. 699).

**Tabla 3**

*Molinos SAG de diferentes unidades mineras*

<b>PROPIEDAD</b>	<b>No.</b>	<b>Dia. ft</b>	<b>Largo. ft</b>	<b>EGL, ft</b>	<b>HP</b>	
<i>Robinson</i>	1	32	14,75	13	10 000	
<i>Collahuasi</i>	2	32	15	13,25	10 724	
<i>Huckleberry</i>	1	32	14,5	13	10 000	
<i>Kemess</i>	2	34	17	15,25	12 000	
<i>Ft. Knox</i>	1	34	15,3	13,5	12 000	
<i>Kennecott 1-3</i>	3	34	17	15	12 000	
<i>Olympic Dam</i>	1	34	19	17	13 800	
<i>Ray</i>	1	34	19	17	14 000	
<i>Freeport</i>	118	1	34	17	15,25	14 200
<i>Exp.</i>						
<i>Ernest Henry</i>	1	34	17	15,5	14 800	
<i>Fimiston Exp.</i>	1	36	16	14	16 000	
<i>La candelaria II</i>	1	36	16,7	15	16 000	
<i>Century Zinc</i>	1	36	17	16	16 000	
<i>Kennecott</i>	4	1	36	18,7	17	16 000
<i>Exp.</i>						
<i>Alumbrera</i>	2	36	19	17	18 000	
<i>Escondida Exp.</i>	1	36	19	17,25	18 000	
<i>Batu Hijau</i>	2	36	19	17	18 000	
<i>St. Ives</i>	1	36	19,5	17,75	18 000	
<i>Los pelambres</i>	2	36	19	17	17 000	
<i>Escondida 4</i>	1	38	22,5	20	26 000	
<i>Freeport</i>	190	1	38	20	18	26 000
<i>Exp.</i>						
<i>Olympic Dam</i>	1	38	25	23,5	24 120	
<i>Antamina</i>	1	38	21	19	27 000	
<i>Cadia</i>	1	40	22	20	26 810	

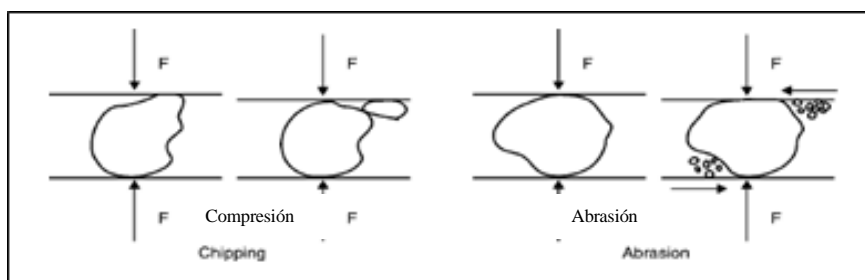
*Nota.* Adaptado de Mular et al, 2002

**Figura 10***Molino AG / SAG de alto ratio**Nota.* Adaptado de Gupta et al, 2016**2.2.3.1 Mecanismos de fractura en Molienda SAG**

Metso minerals, 2004, define que: “La Molienda es el proceso de pulverizar o conminuir utilizando las fuerzas mecánicas de impacto, compresión, corte y fricción de la roca.

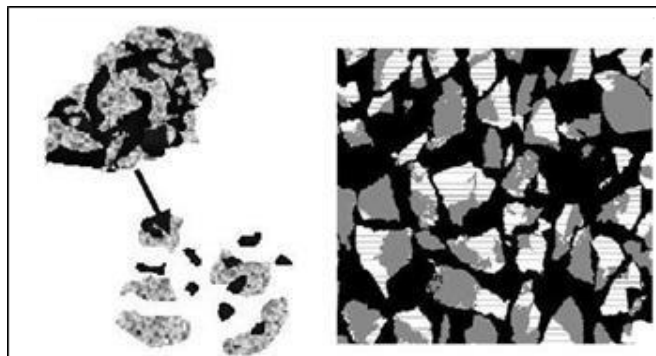
Los dos objetivos principales del proceso de molienda son:

- Liberación de minerales individuales encerrados en cristales de roca (mineral metálico) y procesamiento posterior en forma de separación.
- Producción de finos (o cargas) a partir de fracciones minerales mediante aumento de la superficie específica.”

**Figura 11***Fractura por abrasión y compresión en partículas**Nota.* Adaptado de Fuerstenau et al, 2003

## Figura 12

*Evento de liberación y microfotografía de fragmentos*

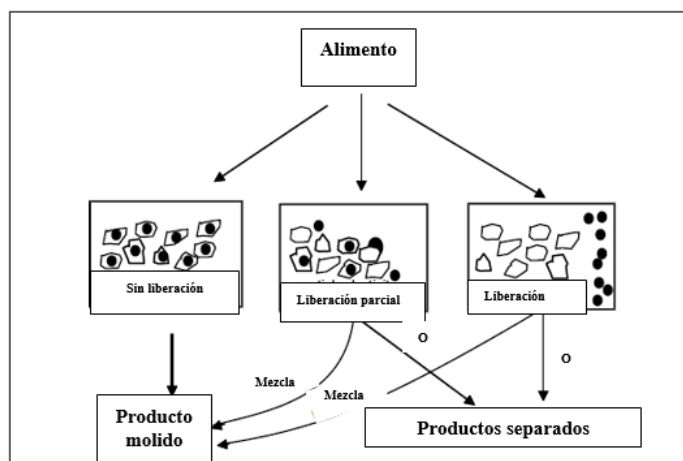


Nota. Adaptado de Fuerstenau et al, 2013

La molienda de minerales puede ser selectiva o no selectiva, “en sentido general, la reducción de tamaño es un proceso de separación similar a cualquier otra separación por concentración.” (Drzymala, 2007, p. 139).

## Figura 13

*Conminución selectiva, parcialmente selectiva y no selectiva*



Nota. Adaptado de Drzymala, 2007

En ese sentido, “la disminución y reducción de tamaño de los minerales en los molinos AG/SAG se produce mediante una combinación de fuerzas de impacto, desgaste y abrasión durante la rotación del molino.” (Gupta et al, 2016, p.263). La caída de la roca (medios de molienda autógenos) y otros medios de molienda (bolas de acero) entregan a

las partículas la máxima fuerza de impacto. Las partículas en el cuerpo de la carga del molino se deslizan desde diferentes alturas y se someten a la abrasión que resulta en una reducción de tamaño.

### Figura 14

*Molino SAG Unidad Minera Tintaya Antapaccay*



*Nota.* Adaptado de Wills et al, 2015

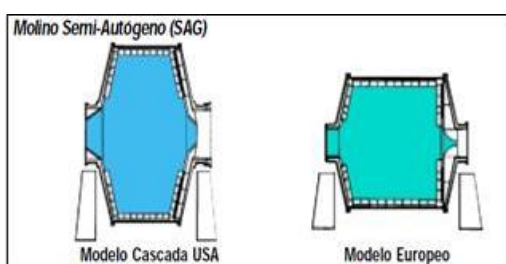
## 2.2.4 Características del molino SAG

### 2.2.4.1 Diámetro y Largo

Wills et al, 2015 definen que: “Los molinos AG o SAG están determinados por la relación de aspecto (D/L) de la forma del cuerpo del molino y el material a producir. La relación de aspecto se define como la relación entre el diámetro y la longitud, generalmente se dividen en tres grupos: molinos de alta relación de aspecto, donde el diámetro es 1,5-3 veces la longitud, "molinos cuadrados" donde el diámetro es aproximadamente igual al largo, y molinos de relación de aspecto baja donde la longitud es 1,5-3 veces mayor que el diámetro.” (p.160)

### Figura 15

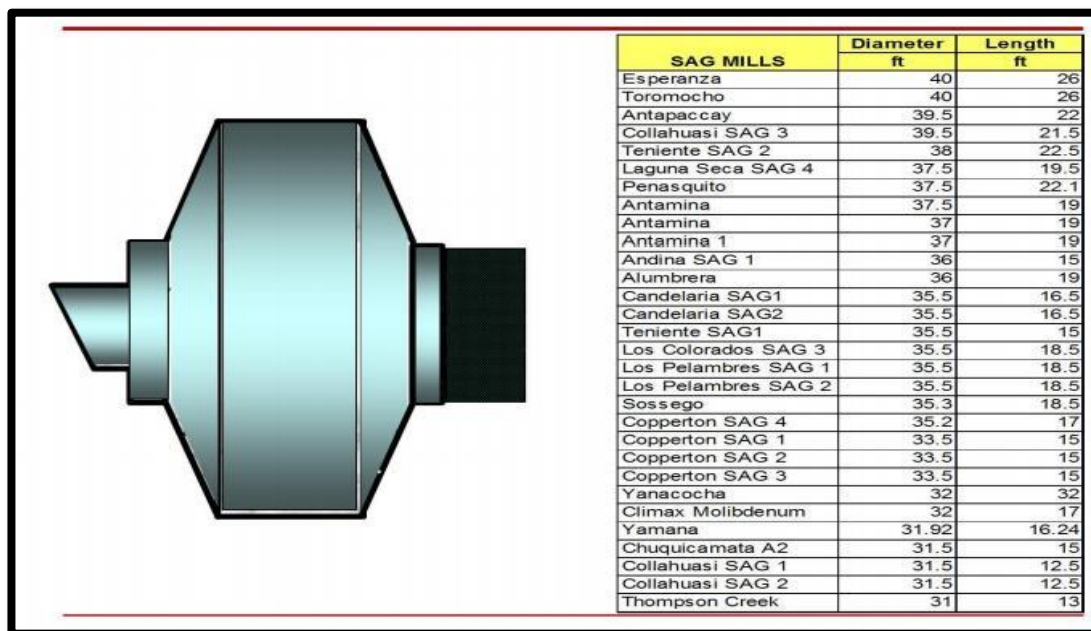
*Diseños de Molinos SAG*



*Nota.* Adaptado de Metso minerals. 2004

**Figura 16**

*Dimensiones de molinos SAG en Sudamérica*



*Nota.* Adaptado de Moly Cop, 2017

Los molinos SAG instalados en diferentes unidades mineras cuyas longitudes pueden variar de 9´ hasta 26´.

#### 2.2.4.2 Granulometría y dureza en la alimentación

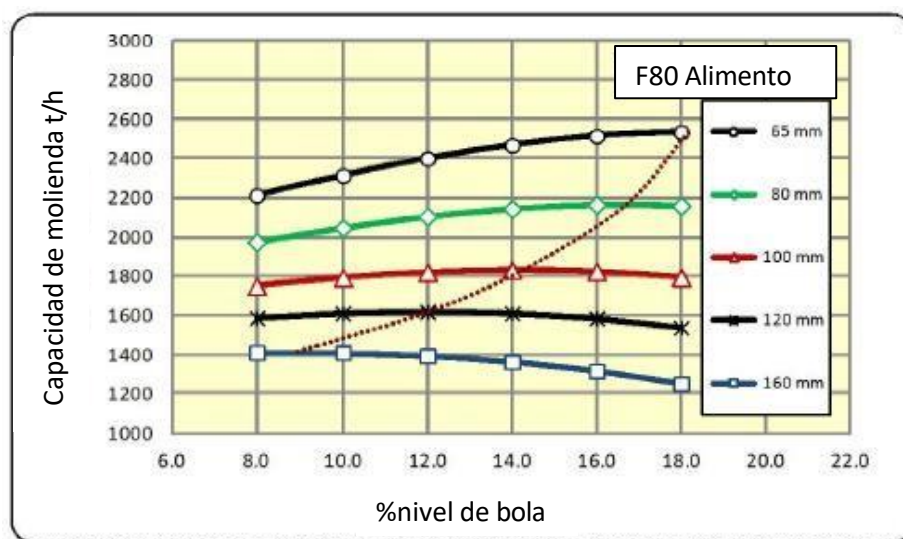
Mular et al. (2002) indica que: “El tamaño máximo de alimentación en la mayoría de los molinos SAG está controlado por el ajuste en la abertura descarga de la chancadora primaria. El tamaño de abertura en la chancadora primaria varía de 150 a 200 mm, lo que resulta en un aumento de tamaño de 300 a 350 mm. El tamaño del producto para la conminución autógena y semiautógena puede estar entre el 80% pasante sobre los 150 micrones para la conminución autógena de una sola etapa sobre minerales duros y entre el 80% y más de 4000 micrones para la conminución semiautógena para minerales “blandos” (4 mm) “(p.703). A su debido tiempo, “la competencia de alimentación de mineral puede cambiar a medida que se extrae mineral más fresco y duro a niveles más profundos.” (Gupta et al, 2016, p.269)

Wills et al. (2015) manifiesta que: “La influencia del tamaño y dureza del alimento en el funcionamiento de un AG o SAG es más significativa que en el funcionamiento de

un molino de barras o de bolas. En los molinos de barras o de bolas, la masa del medio representa aproximadamente el 80% de la carga total y domina tanto el consumo de energía como el rendimiento de la molienda. En los molinos SAG una parte importante del medio de molienda se elabora a partir del mineral cargado. Por lo tanto, cualquier cambio en la distribución del tamaño de las partículas y la dureza del material que ingresa conducirá a un cambio en las características de fractura, y el nivel de carga del molino también cambiará, lo que afectará el consumo de energía del molino. Por lo tanto, las mediciones del consumo de energía de los molinos AG/SAG a menudo fluctúan mucho con el tiempo. Esta es una de las diferencias clave en el funcionamiento de un molino AG/SAG y un molino de barras/bolas.” (página 161)

**Figura 17**

*Capacidad de molienda a diferentes F80*



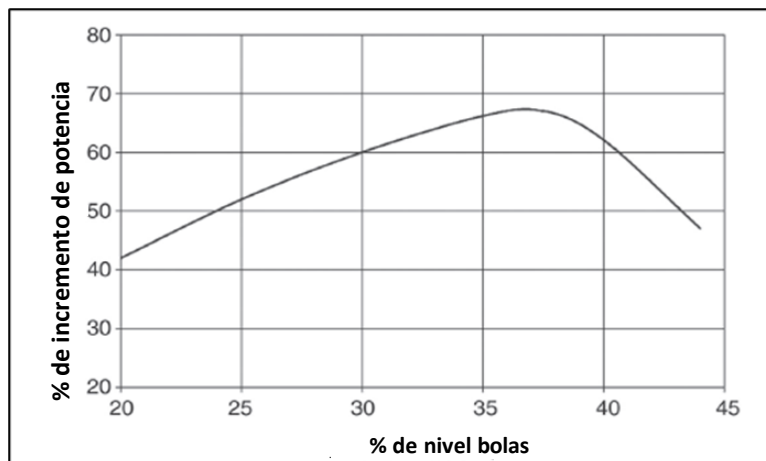
*Nota.* Adaptado de Moly Cop, 2017

### 2.2.4.3 Carga de bolas Jb

Mular et al. (2002) propone que: “La carga de bolas en los molinos primarios varía desde cero en los molinos autógenos hasta el 20 % en los molinos semiautógenos. El rango típico de carga de bolas está entre 8 y 12 %, con porcentajes de carga de bolas más altos típicamente asociados con una operación más inusual del molino SAG. “(p.704)

**Figura 18**

*Relación entre el volumen de llenado y potencia del Molino SAG para bajas cargas de bola y menas suaves*

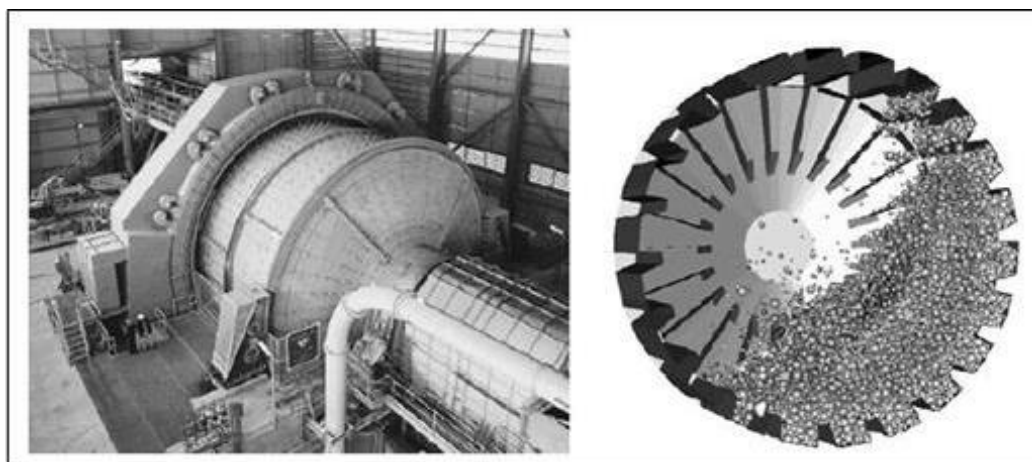


*Nota.* Adaptado Gupta et al, 2016

De otro lado, “utilizando modelos y simulaciones de molinos AG/SAG, Morrison y Morrell demostraron que en la mayoría de los casos la eficiencia energética aumenta con la carga del molino.” (Gupta et al, 2016, p.272). “Normalmente, agregar una carga de bolas aumenta significativamente la capacidad del molino, pero aumenta los costos operativos de las bolas y la energía.” (Fuerstenau et al, 2003) pág. 87.

**Figura 19**

*Simulación DEM de rocas y bolas en Molino SAG*



*Nota.* Adaptado de Fuerstenau et al, 2003

#### 2.2.4.4 Potencia del molino SAG

Gupta et al (2016) indica que: “Austin estudió las energías cinética y potencial asociadas con las partículas siguiendo su movimiento dentro de un molino. El movimiento del molino, que eleva las partículas y el medio de molienda hasta una determinada altura, imparte energía cinética a las partículas. Las partículas y los medios de molienda se deslizan hacia abajo o ruedan hacia la punta de la carga. La energía potencial de las órbitas de las partículas se derivó de trabajos anteriores de Wahl y Kingma y Hogg y Furstenau. Luego, Austin combinó la energía cinética y potencial y desarrolló una expresión para la potencia del molino.” (p.275).

$$P_M = k \sin \alpha \sin^3 \theta \rho_c \phi_c L D^{2.5} (1 + \gamma) \quad [1]$$

PM = potencia del molino (kW)

k = una constante y los ángulos  $\alpha$  y  $\theta$  son indicados en la figura 20

$\alpha$  = ángulo de inclinación de la carga (°)

$\theta$  = ángulo comprendido entre el extremo de la carga y el punto centro de la misma (°)

L = largo del molino (m)

D = Diámetro del molino (m)

$\rho_c$  = Densidad de carga (t/m<sup>3</sup>)

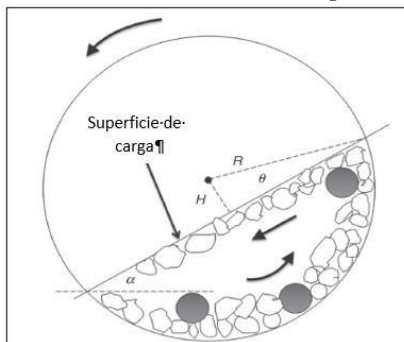
$\phi_c$  = Porcentaje de velocidad crítica

donde:

$$\gamma = 0,188 \left[ \frac{\phi_c^2}{\sin \alpha} \right] \left[ \frac{1 - \cos^4 \theta}{\sin^3 \theta} \right] \quad [2]$$

#### Figura 20

*Movimiento de las partículas en un molino modelado por Hogg y Fuerstenau, y Austin*



*Nota.* Adaptado de Gupta et al, 2016

Este modelo no tiene en cuenta la fricción de las partículas en la superficie, pero se supone que el flujo por la superficie de la carga es suave.

Gupta et al. (2016): “Austin se dio cuenta de que esta ecuación tenía una estructura similar a la ecuación de capacidad del molino de Bond, para molinos cilíndricos. Con base en esto, Austin sugirió que la energía de los molinos SAG podría generarse mediante la ecuación [3], Austin usó un valor de 1.03 para la constante A en comparación con el valor recomendado por Bond de 0.937, mientras que Gutiérrez y Sepúlveda abogaron por un valor de 1.065” (p.276).

$$P_M = KD^{3.5} J_C (1 - AJ_C) \left( \frac{L}{D} \right) \phi_C \left( 1 - \frac{0,1}{2^{9-10\phi_C}} \right) \rho_C \quad [3]$$

$\rho_C$  es la densidad de carga en el molino SAG, fue desarrollada originalmente por Austin en términos de la fracción másica de la carga en molinos SAG (rocas, bolas y pulpa) y el llenado fraccionado de los molinos como:

$$\rho_C = \frac{(1 - \phi) J_C \left( \frac{\rho_R}{M_R} \right) + 0,6 J_B \left( \rho_b - \frac{\rho_R}{M_R} \right)}{J_C} \quad [4]$$

Dónde:

$\rho_r$ = densidad de la roca (media) (t / m<sup>3</sup>)

$\rho_b$ = densidad de las bolas (t / m<sup>3</sup>) (8.0 para acero)

$\phi$ = porosidad del lecho

$J_C$  = volumen fraccional de la porción cilíndrica del molino lleno con toda la carga (rocas más bolas)

$J_B$  = volumen fraccional de la parte cilíndrica del molino lleno de bolas

$M_r$  = fracción de masa de roca en la carga total (roca más agua)

La constante 0,6 en la ecuación se deriva de suponer una porosidad del lecho de bolas de 0,4 (40 %). Las expresiones para la densidad de carga se modifican y están dadas por Moly-Cop.

$$\rho_C = \frac{((1-\varphi)\rho_b J_B + (1-\varphi)\rho_R (J_C - J_B) + \rho_p U_p \varphi J_C)}{J_C} \quad [5]$$

donde

$\rho_p$  = densidad de la pulpa y

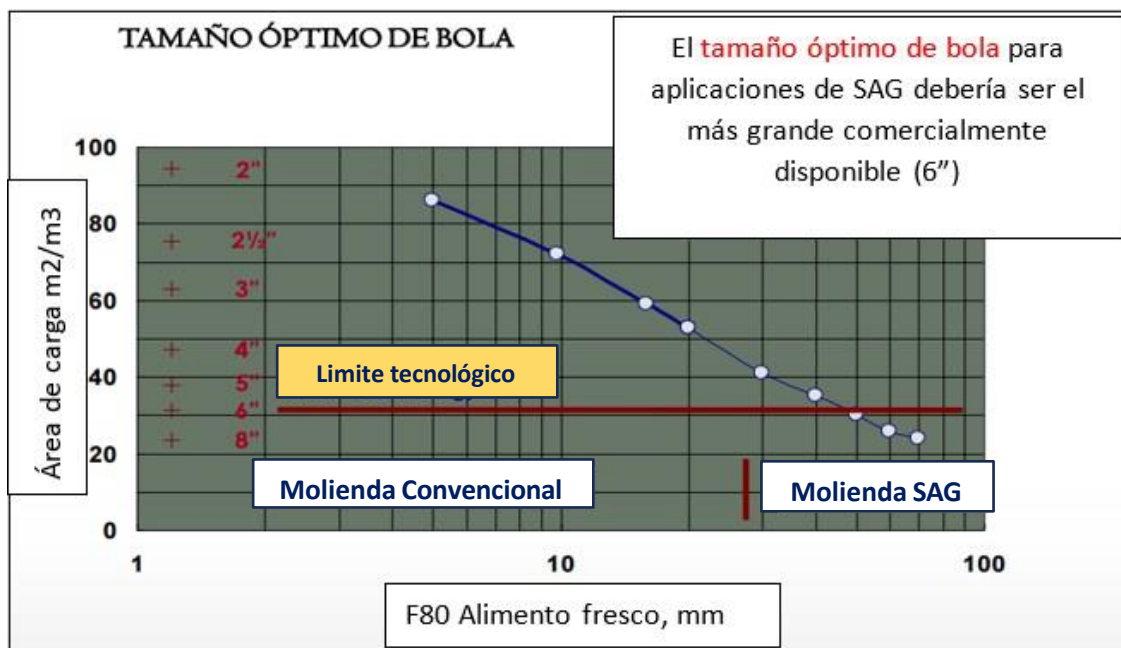
$U_p$  = fracción de los huecos intersticiales entre las bolas y la carga de roca ocupada por la pulpa de partículas más pequeñas.

#### 2.2.4.5 Tamaño óptimo de bola

“El tamaño máximo de bola ha sido tradicionalmente de **4 a 5 pulgadas** de diámetro. Las bolas más grandes, de hasta 6 pulgadas, han estado disponibles en los últimos años se han puesto a disposición bolas más grandes, de hasta **6 pulgadas**, que se utilizan con buenos resultados en algunas aplicaciones.” (Mular et al, 2002, p. 704), por ejemplo, en minerales de mayor dureza se requiere mayor fractura por impacto.

**Tabla 4**

*Tamaños de bola disponible en molienda convencional y SAG*



Nota. Adaptado de Moly Cop, 2017

### 2.2.5 Tamaño de transferencia T80

El tamaño T80 o tamaño de transferencia, es el producto de la etapa de molienda SAG (módulo SAG) que alimenta a la etapa de molienda de bolas (módulo molienda de bolas). Normalmente, en circuitos tipo SABC-1 se encuentran en el rango de 3 mm a 5 mm, y en circuitos tipo SABC-2 de 8 a 12 mm. Aunque los circuitos de tipo SABC-1 o sus modificaciones obtienen T80 más fino, incluyendo alimentaciones más finas. Por tanto, los productos de molienda SAG son más finos (2 mm) que los de molienda convencional (secundario y terciario).

### 2.2.6 Comportamiento de las rocas en la molienda SAG

Moly Cop (2017) sostiene que: “El concepto de molienda SAG nació de la idea de evitar el uso y consumo de bolas de acero, mediante la sustitución de ellas con las mismas rocas contenidas en el mineral de alimentación fresca. Por tanto, se recomienda:

- ✓ Alimentar el molino con grandes rocas (sobre 10” a 12”), evitando así las tradicionales y múltiples etapas de chancado, clasificación y almacenamiento de partículas de tamaño intermedio.
- ✓ Uso de rocas como medio de molienda “costo-cero”: Molienda Autógena
- ✓ Agregar bolas de acero de gran tamaño (sobre 6”): Molienda Semiautógena
- ✓ Teniendo en cuenta que las rocas son más ligeras que las bolas, se suponía equivocadamente, que este tipo de rocas caen desde la posición más alta posible y, por lo tanto, los molinos SAG adoptaron la típica forma de “panqueque”:  $D > L$ ”.

**Tabla 5**

*El rol de las “rocas”*

ROCAS	¿Muelen?	¿Se dejan moler?	¿Se muelen solas?
Grandes (>4”)	Si, menos que las bolas	No	Si
Medianas (2” a 4”)	Muy poco ;	Poco ;requieren grandes bolas	Muy poco ;
Pequeñas (<2”)	No	Si	No

*Nota.* Adaptado de Moly Cop, 2017

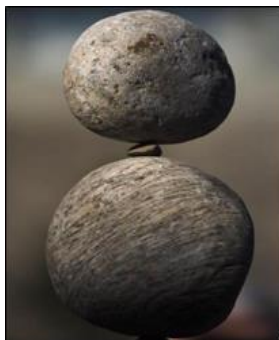
### 2.2.7 ¿Qué son los Pebbles?

Los Pebbles o guijarros son pequeñas rocas del orden 0,5”-3” de alta dureza provenientes de mina (en proporción) y generados en la molienda SAG debido al movimiento de la carga interna.

Moly Cop. (2017) indica que: “Las rocas de tamaño medio, denominados tamaño crítico o Pebbles no actúan como medios de molienda y tampoco permiten ser molidos, incluso por las bolas de mayor tamaño. Ellos utilizan el espacio en la carga, afectando la productividad del molino. Como medida correctiva los Pebbles abandonarán la carga mediante una parrilla”.

#### Figura 20

*Pebbles en molinos SAG*



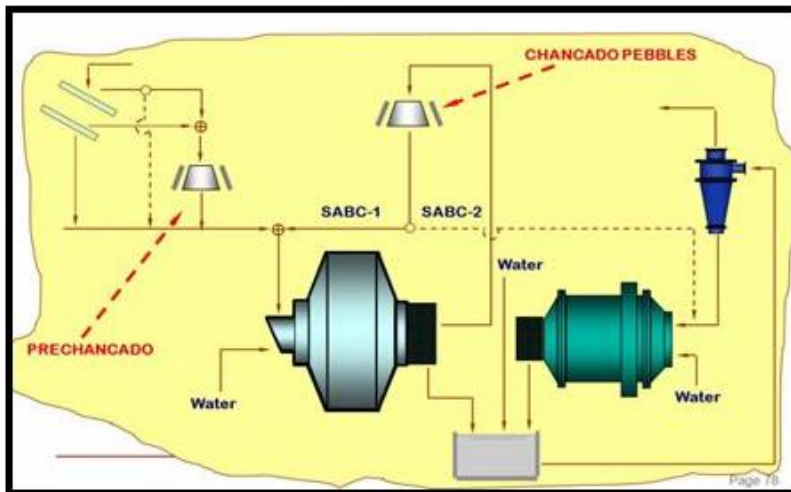
*Nota.* Adaptado de Moly Cop, 2017

### 2.2.8 Tratamientos de Pebbles

Surgen a causa de tratar el tamaño crítico o tamaño Pebble proveniente del chancado primario y generado por los mismos molinos SAG. Estos tratamientos normalmente son el pre-chancado y el chancado convencional, empleando para ello chancadoras de cono tipo standard y cabeza corta (short head). “Las chancadoras de Pebbles cumplen una función única en el diagrama de flujo. La aplicación de chancadoras, en relación con el chancado de material de tamaño crítico, se ha ampliado al chancado de material antes y después del molino primario”. (Mular et al, 2002, p. 628). Asimismo, equipos auxiliares como magnetos, fajas transportadoras, detector de metales y otros son necesarios. Esto permite maximizar el tonelaje y lograr un T<sub>80</sub> más fino.

**Figura 21**

*Tratamientos de Pebbles en circuitos SABC*

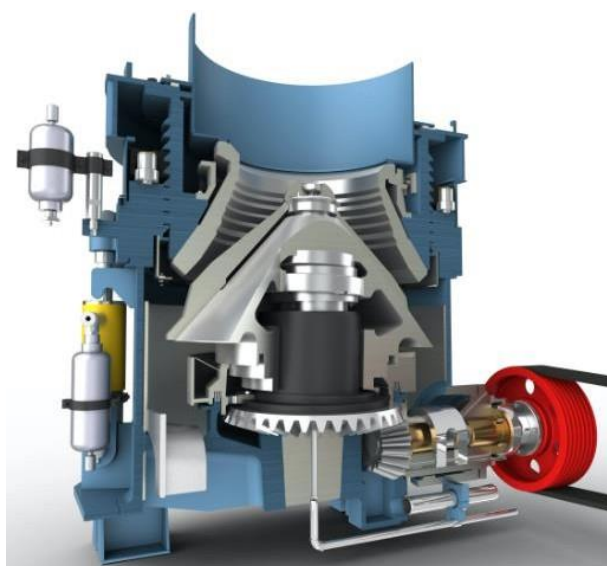


*Nota.* Adaptado de Moly Cop, 2017

“Una Chancadora de Pebbles fractura el material a un ritmo más rápido y eficiente debido a fuerzas de compresión aplicadas por las superficies de aplastamiento”. (Mular et al, 2002, p. 628).

**Figura 22**

*Chancador de cono serie HP*



*Nota.* Adaptado de Mular et al, 2002.

### **2.2.8.1 Pre-Cribado**

El pre-cribado es una operación unitaria utilizada para remover el material crítico o Pebble que proviene del chancado primario, y así incrementar la capacidad, mejorar las condiciones de trabajo y reducir el tonelaje de recirculación al chancador de Pebble, al tratar este flujo de Pebble inicialmente.

### **2.2.8.2 Cribado Industrial**

La reducción de tamaño generada por las etapas de reducción de tamaño, involucran un producto con un porcentaje de partículas finas y gruesas, las partículas finas tienen un impacto negativo en la capacidad y operación de chancadoras por lo cual deben ser clasificadas mediante zarandas o cribas vibratorias, previo a etapas de chancado posteriores. “Estos equipos son los que generalmente están instalados en todas las unidades mineras, para la separación de partículas en un rango de tamaño de “300 mm hasta 40  $\mu\text{m}$ ”, aunque la eficiencia disminuye rápidamente con la fineza” (Wills et al, 2015, p.181).

#### **2.2.8.2.1 Fundamento de Operación**

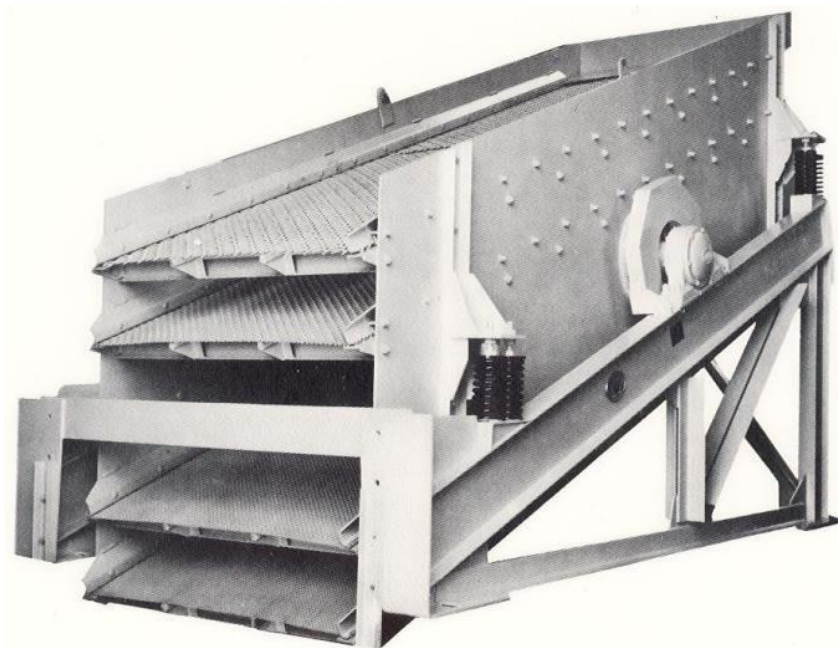
La criba es una superficie que tiene muchas aberturas, usualmente con dimensiones uniformes; las partículas se acercan a la superficie de la criba ya sea para pasar a través de esta o ser retenida (Wills et al, 2015, p. 181).

#### **2.2.8.2.2 Zaranda Vibratoria**

Wills et al. (2015): “Las zarandas vibratorias tienen una superficie de cribado rectangular para la alimentación y oversize (sobre tamaño) de descarga al extremo. Pueden ser usados en una variedad de tamizados, clasificación, escalpación, desaguado, cribado en húmedo y aplicaciones de lavado. Estos realizan separaciones de tamaño bajo 300 mm a 45  $\mu\text{m}$ , Las zarandas vibratorias pueden tener una o más cubiertas para aumentar su capacidad con una pequeña área en su superficie”. (p. 187)

**Figura 23**

*Zaranda vibratoria inclinada de 4 cubiertas*



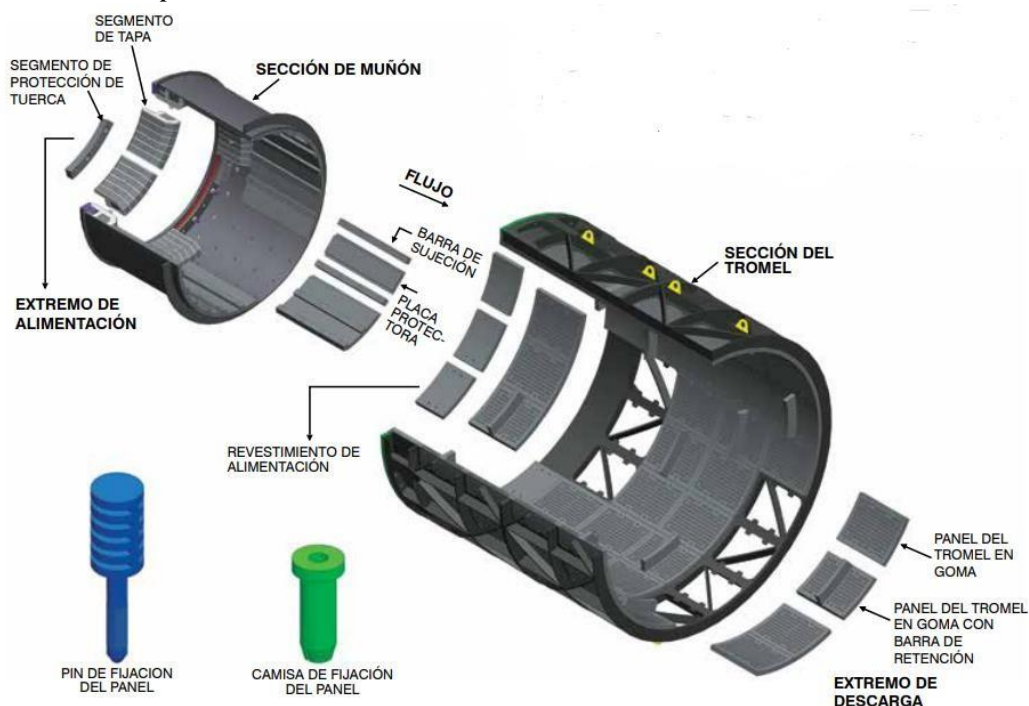
*Nota.* Adaptado de Wills et al, 2015

### **2.2.8.2.3 Trommel**

Wills et al. (2015) sostiene que: “Estas cribas giratorias son uno de los equipos más antiguos, que comprenden una malla cilíndrica típicamente rotando entre 35 % y 45 % de la velocidad crítica. Los trommels se instalan en un ángulo pequeño con respecto a la horizontal, estos pueden entregar productos de varios tamaños, de lo más fino a lo más grueso. Los trommels pueden manipular material de 55 mm hasta 6 mm, e incluso tamaños más pequeños se pueden manipular en condiciones húmedas de cribado. Aunque estos son típicamente más baratos, libres de vibraciones y mecánicamente robustos, generalmente tienen capacidades inferiores a cribas vibratorias ya que solo una parte de la superficie de la criba está en uso en cualquier momento, y pueden ser más propensos a atorarse. Los trommels siguen siendo ampliamente utilizados en algunas plantas de agregados y en corrientes de descarga del molino. Molinos (AG, SAG, molinos de barras y bolas) las corrientes de descarga suelen pasar a través de un tamiz de Trommel unido a la salida del molino para evitar que los residuos de los medios de molienda lleguen a

equipos de procesamiento, y el caso de los molinos AG / SAG para extraer Pebbles para enviarlos a chancar” (p.193)

**Figura 24**  
*Criba Trommel para molino SAG*



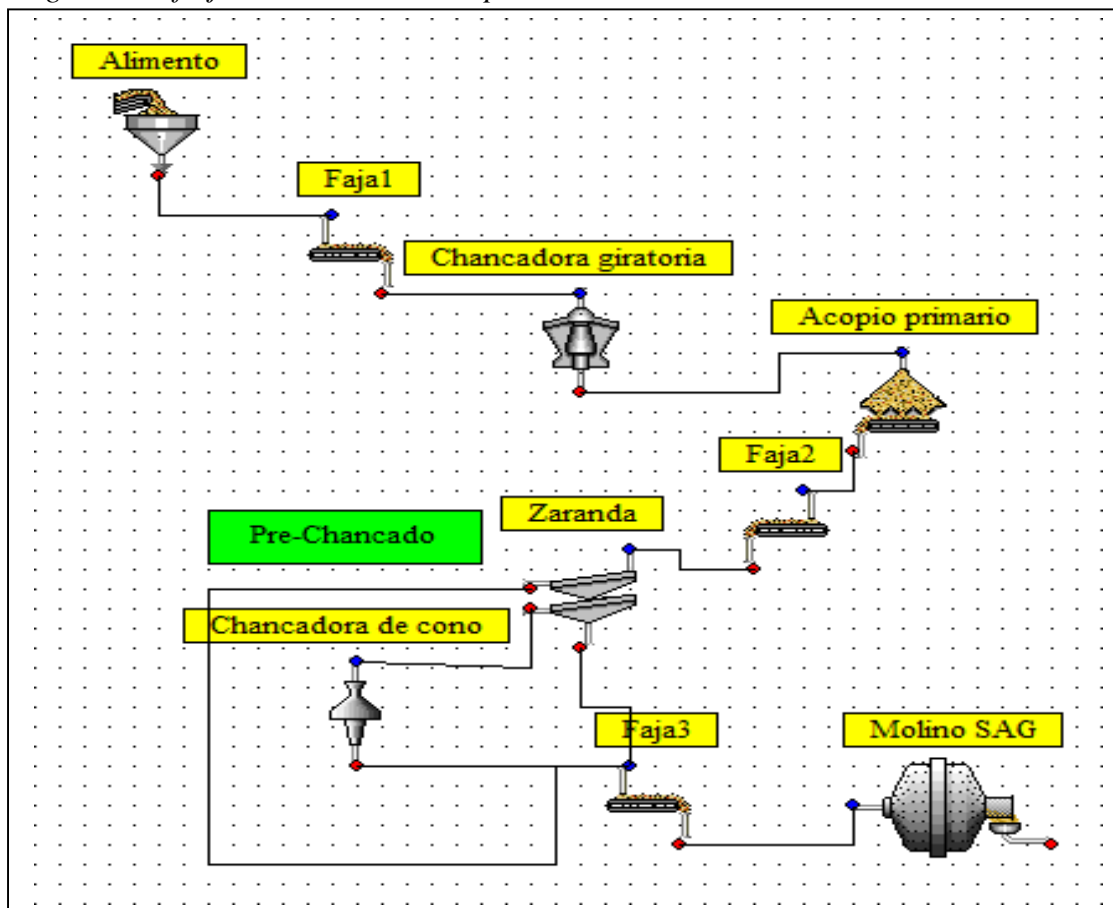
*Nota.* Adaptado de Wills et al, 2015

### 2.2.8.3 Pre-Chancado

El material proveniente de chancado primario (de tal modo por chancadoras de quijada o giratorias) contiene una pequeña cantidad Pebble o tamaño crítico, el tratamiento convencional es “pre-cribarlo” para remover los Pebbles y posterior a eso chancarlo siendo esta etapa definida como “pre-chancado”. “La alimentación inicial al molino primario (SAG) debe consistir predominantemente en material grueso y fino. En el pre-chancado, normalmente el objetivo es convertir el tamaño de fracciones medias a finos.” (Mular et al, 2002, p.629), y así lograr que el mecanismo “autógeno” en la molienda SAG se de en mayor proporción. El pre-chancado “es eficaz para aumentar la productividad de la molienda y reducir costos operativos” (Mular et al, 2002, p. 630).

**Figura 25**

*Diagrama de flujo con instalación de pre-chancador*



*Nota.* Adaptado de Mular et al, 2002

De hecho, “una alimentación controlada a la chancadora puede resultar en una cavidad completa. Una cavidad completa garantiza la máxima eficiencia mecánica y del proceso (máxima capacidad y reducción de tamaño) de la chancadora de cono”, (Mular et al, 2002, p.630).

De ello se entiende que, “la selección del tamaño de la pre-chancadora debe basarse en las necesidades de producción del circuito de molienda. Un factor de utilización típico con las plantas de trituración modernas de hoy en día es del 75 al 80%” (Mular et al, 2002, p.630). Por ejemplo, si la planta procesa 800 t/h, el tonelaje mínimo para dimensionar la chancadora sería de 1000 t/h, el tamaño adecuado para la chancadora estaría definido por el tonelaje y la granulometría del material a chancar.

**Tabla 6***Tamaños de chancadoras de cono Nordberg y rangos de capacidad*

<b>Modelo</b>	<b>Diam. Cabeza</b>	<b>Potencia (kW)</b>	<b>Tamaño máx. alimento (mm)</b>	<b>Capacidad set cerrado a 12 mm, (t/h)</b>	<b>Capacidad set cerrado a 32 mm, (t/h)</b>
HP100	700	75	141	60-80	100-140
HP200	900	150	183	120-150	190-235
HP300	1100	225	210	115-140	250-320
HP400	1300	300	301	140-175	325-430
HP500	1500	375	350	175-220	405-535
HP800	1800	600	353	260-335	545-800
MP800	2100	600	378	495-585	932-1145
MP1000	2400	750	378	615-730	1160-1500

*Nota.* Adaptado de Metso minerals, 2004**2.2.8.4 Chancado de Pebbles**

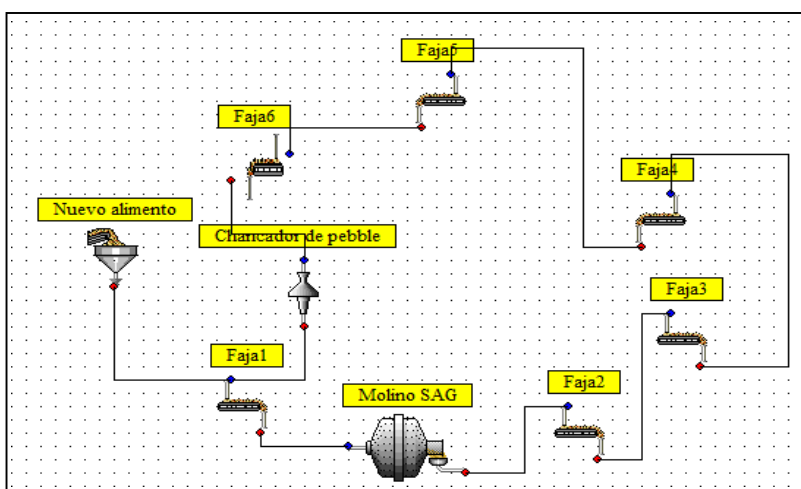
En este caso, Mular et al. (2016) sostienen que el chancado después del molino SAG/AG es una práctica de molienda común en toda la industria minera. Sin embargo, debido a la naturaleza del entorno de molienda, la chancadora enfrenta desafíos mayores que en muchas otras aplicaciones. Algunas soluciones comunes para abordar el problema de material suelto incluyen: - Cribas de desperdicios (Pebbles y objetos de metal), Remoción de acero por imanes, detectores de metal, fajas de corto-circuito. Además, las chancadoras de cono también se ven afectadas negativamente por la humedad excesiva. La humedad excesiva reduce tanto el rendimiento como la capacidad de reducción de tamaño de la chancadora. Esta humedad excesiva es el resultado de una clasificación de tamaño ineficaz después del molino primario.

Los molinos primarios tienen dos alternativas principales para la clasificación de tamaño, cribas de Trommel unidas al muñón del molino y/o cribas vibratorias ubicadas directamente en la descarga del molino. De las dos opciones, La criba vibratoria es claramente preferible debido a su mayor capacidad y eficiencia. Zarandas de doble piso se prefieren montadas en configuración de perfil bajo u horizontal. Las superficies de cribado son generalmente poliuretano ranurado o caucho. Una vez que se completa el proceso de clasificación por tamaño, los Pebbles extraídos se transportan típicamente a chancadora o en un recipiente de almacenamiento. Durante la fase de transporte los

Pebbles pasarán por debajo de los imanes para quitar las bolas de acero. Una inspección final con un detector de metales confiable es fundamental. Los metales grandes, no eliminados por los imanes deben ser evitados de nuevo al molino o incluso rechazarlo del circuito.

**Figura 26**

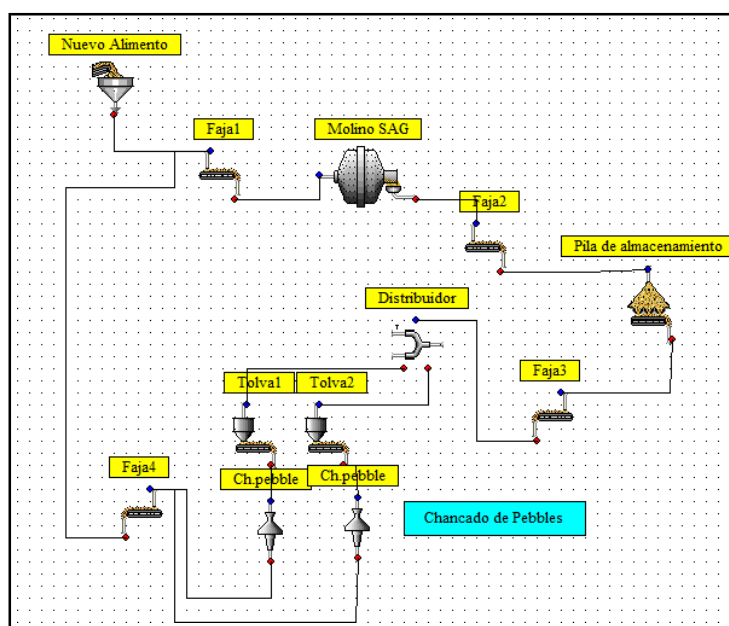
*Arreglo simple de chancador de Pebble*



*Nota.* Adaptado de Mular et al, 2002

**Figura 27**

*Arreglo ideal de chancador de Pebble*



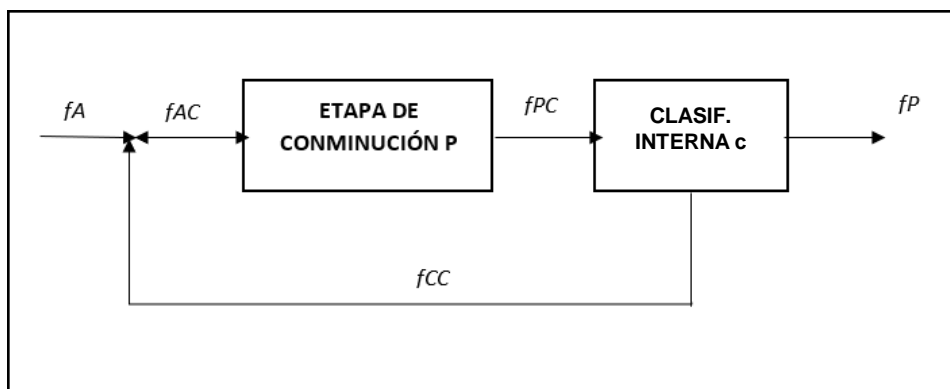
*Nota.* Adaptado de Mular et al, 2002

### 2.2.9 Modelamiento y Simulación en Conminución de minerales

Un proceso de molienda típico se puede expresar matemáticamente a través de una ecuación de equilibrio general, integrando los tres conceptos importantes en la teoría general de la conminución: a) velocidad específica con que las partículas de cada tamaño se fracturan por unidad de tiempo (o por unidad energía); b) la distribución granulométrica obtenida de cada grano fragmentado; y c) un posible escenario que puede ocurrir en el mismo equipo de conminución llamada clasificación de partículas, que puede o no estar presente en cada situación específica. Los conceptos anteriores quedarán representados de forma matemática a través de los siguientes tres conceptos: a) Función de selección (matriz  $s$ ); b) Función de distribución de fractura (matriz  $b$  y  $c$ ). Función de clasificación interna (matriz  $c$ ). El proceso de reducción de tamaño se puede representar a través de este modelo, a través del conjunto de valores de la función de selección ( $S_i(t)$ ;  $i=1, n+1$ ) y función distribución de fractura con tamaños discretos ( $B_{ij}(t)$ ;  $i=1, n+1$ ;  $j=1, i$ ); además elementos correspondientes de la función de clasificación interna ( $C_i(t)$ ;  $i=1, n+1$ ); digamos que esta última característica está integrada en la unidad de conminución (Otro;  $C_i(t)=0 \forall i$ ). En la Figura 28 se muestra esquemáticamente un proceso típico de molienda, considerando una matriz de proceso ( $P$ ) que depende de las matrices  $b$  y  $S$  antes mencionadas y otra matriz de clasificación interna ( $c$ ). Asimismo, asumiremos temporalmente que las matrices  $P$  y  $c$  son invariantes en el tiempo, para simplificar el desarrollo teórico del modelo.

**Figura 28**

*Esquema de un proceso de conminución*



Nota. Adaptado de Sepúlveda et al, 1986

Los significados de los distintos términos que aparecen en la figura son los siguientes:

$P$ =Matriz de proceso (dependiendo de las funciones  $b$  y  $S$ ), utilizada para cuantificar el proceso de molienda efectivo en el equipo. Es una matriz triangular inferior (nivel  $n \times n$ ), cuyos elementos son distintos de cero, excepto los valores por encima de la diagonal principal.

$C$ = Matriz de clasificación interna ordinal ( $n \times n$ ). Es una matriz diagonal cuyos elementos representan la fracción en peso de cada rango de tamaño de partícula del producto molido, recirculado durante el mismo paso de molienda.

$f_A$  = Vector alimentación del equipo de conminución ( $n \times 1$ ). Se trata de un vector de columna cuyos elementos representan la distribución parcial del tamaño de partículas ( $^\circ/1$  en peso retenido) del material apto para el equipo.

$f_P$  = Vector producto del equipo de conminución. Este es el vector columna ( $n \times 1$ ), cuyos elementos representan la distribución parcial del tamaño de partículas del producto molido que sale del equipo.

$f_{AC}$ = Vector de alimentación efectivo de conminución. Es un vector columna de orden ( $n \times 1$ )

$f_{PC}$ = Vector de producto efectivo de conminución. Es un vector columna de orden ( $n \times 1$ )

$f_{CC}$  = Vector carga circulante ( $n \times 1$ ). Es un vector de columna que representa la distribución parcial del tamaño de partículas del material grueso recirculado a la etapa de conminución.

La ecuación que define el “proceso global de conminución” puede desarrollarse como sigue:

$$f_{PC} = P \cdot f_{AC} \quad [6]$$

$$f_{CC} = c \cdot f_{PC} = c \cdot P \cdot f_{AC} \quad [7]$$

$$f_P = (1 - c) \cdot f_{PC} = (1 - c) \cdot P \cdot f_{AC} \quad [8]$$

$$f_{AC} = f_A + f_{CC} = f_A + c \cdot P \cdot f_{AC} \quad [9]$$

Despejando  $f_{AC}$  de (9), se obtiene:

$$(1 - c \cdot P) \cdot f_{AC} = f_A \quad [10]$$

de donde:

$$fAC = (1 - c \cdot P)^{-1} \cdot fA \quad [11]$$

Reemplazando finalmente, se obtiene la relación buscada:

$$fP = (1 - c) \cdot P \cdot (1 - c \cdot P)^{-1} \cdot fA \quad [12]$$

Donde. I = matriz identidad de orden (n x n)

En el caso hipotético en el que el efecto de clasificación interna sea insignificante, la ecuación tomaría la siguiente forma:

$$fP = P \cdot fA \quad [13]$$

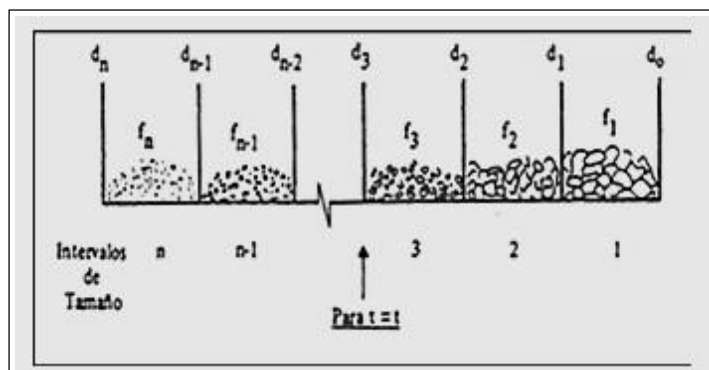
Donde se ha supuesto  $c = 0$  (matriz Nula de orden n x n)

Entonces, la ecuación forma un modelo matemático matricial general, para un proceso de molienda típico, mientras que la ecuación forma un caso especial, suponiendo que el efecto de clasificación interna es insignificante. El problema sería entonces evaluar las matrices P y c por separado para utilizar la ecuación con fines de predicción.

Para un instante "t" cualquiera dentro del equipo de conminución tipo Batch, tendremos la siguiente configuración. (excluyendo la (n+1)ésima cuadrícula, donde  $dn+1=0$ )

### Figura 29

Tamaños retenidos en "n" mallas

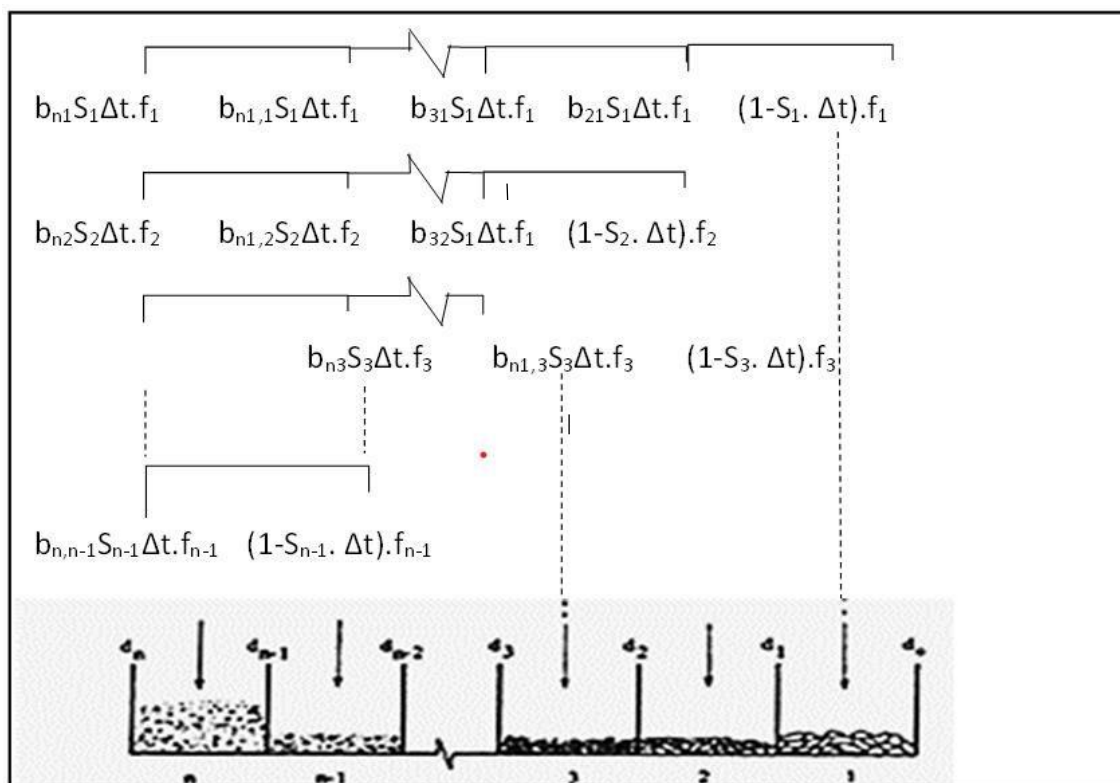


Nota. Adaptado de Sepúlveda et al, 1986

Donde “ $f_i$ ” es la fracción en peso del material contenido en el  $i$ ésimo intervalo de tamaño (o malla “ $i$ ”), es decir, partículas con tamaños entre  $d_{i-1}$  y  $d_i$  (con  $i = 1, n+1$  y  $n+1$   $f_i = 1$ , donde el valor  $f_{n+1}$  corresponde a la fracción en peso del material acumulado bajo la  $n$ ésima malla (es decir, la última malla). Un instante  $\Delta t$  después, se tendrá.

**Figura 30**

*Fracciones de tamaño a un intervalo de tiempo*



*Nota.* Adaptado de Sepúlveda et al, 1986

El cambio en la configuración anterior se puede expresar matemáticamente evaluando la cantidad de material con dimensiones  $d_{j-1}$  a  $d_i$  que existe después de un intervalo de tiempo  $\Delta t$ , de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 f_i(t + \Delta t) = & f_i(t) - S_i(t) \cdot \Delta t \cdot f_i(t) + b_{i1}(t) \cdot S_1(t) \cdot \Delta t \cdot f_1(t) \\
 & + b_{i2}(t) \cdot S_2(t) \cdot \Delta t \cdot f_2(t) + \dots + b_{i,i-1}(t) \cdot S_{i-1}(t) \cdot \Delta t \cdot f_{i-1}(t)
 \end{aligned}
 \quad [14]$$

O bien:

$$\frac{f_i(t + \Delta t) - f_i(t)}{\Delta t} = -S_i(t) \cdot f_i(t) + \sum_{j=1}^i b_{ij}(t) \cdot S_j(t) \cdot f_j(t) \quad [15]$$

Donde el límite superior de la sumatoria está implícita la condición de que  $B_{ij} = 0$   
Tomando el valor límite de la ecuación, en caso de que  $\Delta t$  tienda a 0, obtenemos:

$$\frac{df_i(t)}{dt} = -S_i(t) \cdot f_i(t) + \sum_{j=1}^i b_{ij}(t) \cdot S_j(t) \cdot f_j(t) \quad [16]$$

La ecuación conocida como la Ecuación General del Modelo Cinético de Conminución Batch, es válida para cualquier intervalo de tamaño “n” considerado anteriormente ( $i = 1, n$ ) y todas las ecuaciones diferenciales “n”» pueden representarse mediante una matriz simple, ecuación resultante:

$$\frac{d}{dt} f(t) = -[1 - b(t)] \cdot S(t) \cdot f(t) \quad [17]$$

O bien, más detalladamente:

### Figura 31

*Representación matricial del modelo cinético de conminución Batch*

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ f_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -S_1(t) & 0 & 0 & \vdots & 0 \\ b_{21}(t)S_1(t) & -S_2(t) & 0 & \vdots & 0 \\ b_{31}(t)S_1(t) & b_{32}(t)S_2(t) & -S_3(t) & \vdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & -S_{n-1}(t) & 0 \\ b_{n1}(t)S_1(t) & b_{n2}(t)S_2(t) & \vdots & b_{n,n-1}(t)S_{n-1}(t) & -S_n(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ f_n(t) \end{bmatrix}$$

*Nota.* Adaptado de Sepúlveda et al, 1986

En las ecuaciones anteriores, las funciones Selección y Distribución de Fractura se presentan como variables dependientes del tiempo. Esta es una forma matemática simple

utilizada para mostrar la eventual naturaleza no-lineal de los procesos de conminución, es decir, suponiendo que tales parámetros están influenciados por la distribución granulométrica de la carga interna del equipo, la que a su vez se supone variable en el tiempo. Sin embargo, en muchas situaciones prácticas de interés, se ha observado que la función de distribución de fisuras es casi constante en muchas condiciones experimentales, y la función de elección también puede considerarse invariante en el tiempo para diferentes aplicaciones industriales. En estas condiciones, la ecuación se puede reescribir de la siguiente manera:

$$\frac{df_i(t)}{dt} = -S_i \cdot f_i + \sum_{j=1}^i b_{ij} \cdot S_j \cdot f_j \quad [18]$$

Siendo está la expresión más conocida, para el modelo cinético de conminución Batch.

### 2.2.9.1 Modelamiento de mecanismos de fractura en Molienda SAG

Moly Cop. (2017) indica que: “Al menos 3 mecanismos básicos de fractura deben interactuar en la carga del molino SAG:

- ✓ Impactos de Bolas sobre Partículas: Similar a la molienda convencional.
- ✓ Impactos de Rocas sobre Partículas: Donde las rocas sirven como medio moledor autógeno.
- ✓ Auto-Fractura: De las rocas más grandes, como resultado de su propia acción de caída al interior del molino.” (p.51).

En este contexto, se postula que en “un molino SAG, la función de selección global (Global = Overall) se puede derivar como la media ponderada de las contribuciones independientes de cada uno de los 3 mecanismos indicados” (Moly Cop, 2017, p. 54), y el valor E es el consumo específico de energía en kWh/t correspondiente a estos.

$$[S_i^E]_{global} * E = [S_i^E]_{bolas} * E_{bolas} + [S_i^E]_{rocas} * E_{rocas} + [S_i^E]_{autofractura} * E_{rocas} \quad [19]$$

SiE global = función de selección global

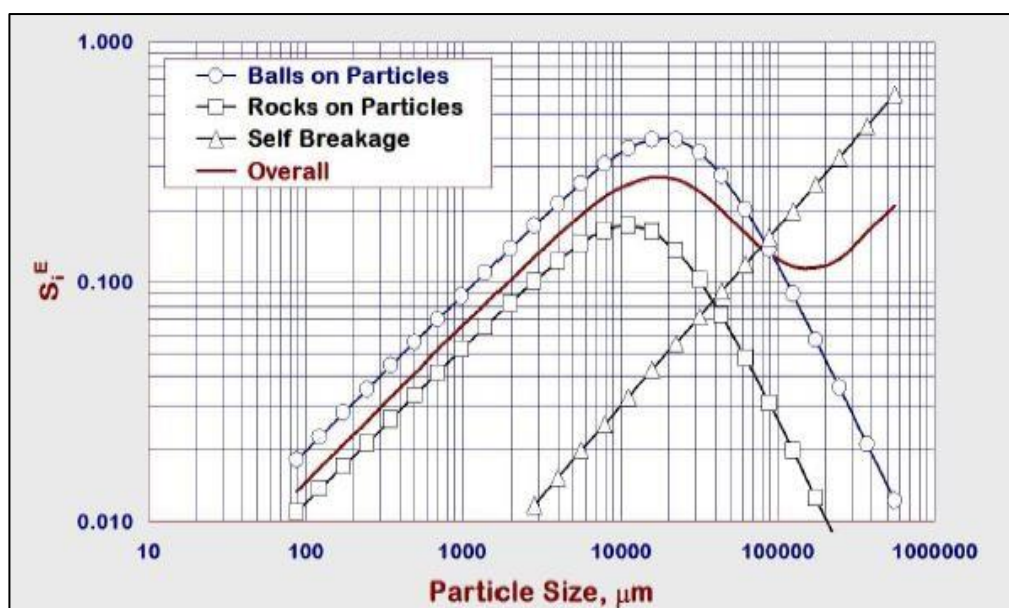
SiE bolas = función de selección de bolas sobre partículas

SiE rocas = función de selección de rocas sobre partículas

SiE autofractura = función de selección de auto-fractura

**Tabla 7**

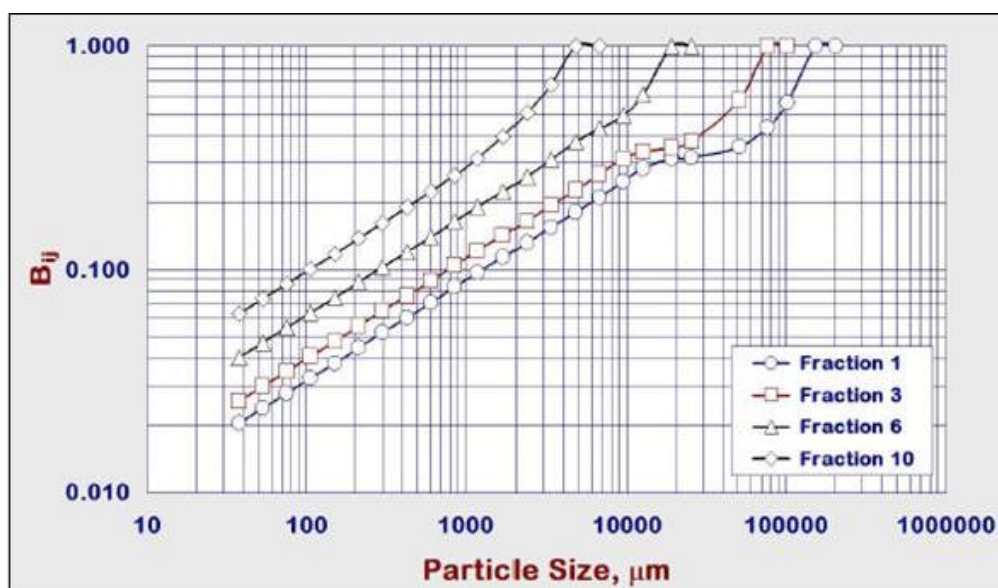
*Funciones de selección en molienda SAG*



Nota. Adaptado de Moly Cop, 2017

**Tabla 8**

*Función fractura acumulada Bij en molienda SAG*



Nota. Adaptado de Moly Cop, 2017

### Moly Cop, 2017. “**Modelo de Circuito Abierto**”

- ✓ La integración de las ecuaciones del modelo SAG es mucho más compleja que en el caso de molienda convencional, ya que el throughput aceptado por el molino es desconocido y por lo tanto la energía específica (kWh/tonelada) es igualmente desconocida.
- ✓ Por esta razón, el algoritmo numérico diseñado emula el procedimiento para estabilizar el molino durante la ejecución de una prueba piloto típica, es decir, iniciando la operación con el molino lleno de mineral de alimentación fresca y continuar reajustando la cantidad necesaria de alimentación fresca necesaria para equilibrar el molino a un nivel de llenado de bolas constante (potencia constante), (p.55).

### **2.2.10 Software de Simulación METSIM**

Hoy en día, los ingenieros metalurgistas deben realizar balances de masa y energía de manera confiable y eficiente en los procesos metalúrgicos. Por lo tanto, se necesita una herramienta de simulación de procesos para evaluar y controlar parámetros metalúrgicos, analizar flujos, operar equipos, modificar circuitos o diagramas de flujo, optimizar o realizar varios tipos de monitoreo de procesos.

Existen diversos softwares para la simulación de procesos metalúrgicos, en el caso de procesamiento de minerales tenemos Modsim, USIMPAC y JkSimMet. En el caso de la pirometalurgia tenemos PyroSim. En el caso de la hidrometalurgia podemos utilizar HSC 6.0 que a diferencia de los módulos anteriores cuenta con un módulo de simulación de procesos. Como se puede ver, existen varios programas de software que simulan el proceso. Es por esto que, John Bartlett creó el METSIM (Simulador Metalúrgico) que reúne todos los módulos necesarios en un solo programa para simular una planta completa de minería y fabricación de metales.

#### **2.2.10.1 Definición de METSIM**

Orquera, 2019, dice: “METSIM es un software de simulación y modelado de procesos metalúrgicos, diseñado para respaldar el balance de materiales y el diseño de operaciones unitarias clave que conforman plantas centralizadas”. METSIM utiliza una

variedad de modelos metalúrgicos, tomados de la literatura o publicaciones técnicamente probadas. El lenguaje de programación es APL y permite revisiones y actualizaciones de su modelo.

Las principales aplicaciones de METSIM son:

- Estudio de prefactibilidad
- Evaluar alternativas de configuración de procesos.
- Evaluar datos experimentales y de laboratorio.
- Calcular y diseñar equipos.
- Investigación de optimización de procesos.

METSIM contiene módulos que constan de subconjuntos de ecuaciones que describen el diseño y las características operativas de varias operaciones unitarias. El sistema utiliza las ecuaciones requeridas por cada modelo o conjunto de modelos, realizando análisis específicos para cada operación unitaria, para un conjunto de ellas o para todo el sistema según los deseos del usuario. Los datos de entrada necesarios para resolver las ecuaciones en cada módulo son requeridos por el programa y almacenados como variables globales, que se pueden cambiar en cualquier momento.

El usuario sólo necesita definir los flujos de entrada en el proceso y para determinar los parámetros de funcionamiento del equipo puede proporcionar datos reales obtenidos de fábrica, pruebas de laboratorio o conocimiento propio. Si una variable ingresada está fuera de alcance, el programa emitirá varias advertencias para indicar el error.

Una vez ingresados los datos de entrada se puede ejecutar el programa arrojando las dimensiones del equipo, la potencia requerida, las curvas de tamaño de partículas y el balance de materiales.

Este software está desarrollado por el Sr. John Bartlett y su licencia se puede obtener de la empresa PROWARE. Como se mencionó, este software es vendido por la empresa PROWARE en diferentes módulos dependiendo de las necesidades del usuario. Los módulos básicos son el módulo de balance de masa y el módulo de balance de energía. La Tabla 9 muestra los módulos disponibles para necesidad de este estudio.

**Tabla 9***Módulos principales de METSIM*

<b>Módulos</b>	<b>Descripción</b>
Dynamic Simulation	Módulo para realizar simulación dinámica
Heap Leach	Módulo de pilas de lixiviación
Operating Cost	Módulo para realizar análisis de costos de operación
Particle size analysis	Módulo para realizar análisis granulométrico
Multicomponent Particle size analysis	Módulo para realizar análisis de tamaños de partícula de sistemas multicomponentes
Solar/Weather	Módulos para condiciones climáticas
Gravity Separation	Módulo para sistemas en que incluyan separación de gravedad

*Nota.* Adaptado de Orquera, 2019.

### **2.2.10.2 Metodología de Simulación METSIM**

El METSIM es un software que opera según una estrategia computacional basada en interacciones secuenciales, complementada con el algoritmo de aceleración de Weingteins para garantizar tiempos de convergencia relativamente bajos. Como se sabe, cuando se trabaja con esta estrategia se debe establecer un límite de tolerancia para la precisión del mercado sobre nuestros resultados.

## **2.3. Definiciones conceptuales**

### **2.3.1 Definición conceptual de la variable independiente**

Optimización del circuito primario de molienda, es el proceso de recolección de datos que conllevan utilizar un software computacional y mediante ellos simular condiciones de trabajo óptimo.

### **2.3.2 Definición operacional de la variable independiente**

Optimización del circuito primario de molienda, consiste en la identificación de los puntos de toma de muestras en el circuito de molienda primaria en concordancia con su configuración y el procesamiento de dichas muestras en función de la granulometría y los consumos de energía.

### **2.3.3 Definición conceptual de la variable dependiente**

Incremento de la capacidad de tratamiento, es el resultado de la simulación a condiciones de trabajo adecuado en el circuito primario de molienda semiautógena.

### **2.3.4 Definición operacional de la variable dependiente**

Incremento de la capacidad de tratamiento, consiste en el aumento del tonelaje procesado debido al cambio de abertura del Trommel y a las simulaciones que se realicen a diferentes escenarios en base a la configuración del circuito primario de molienda semiautógena.

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

#### **3.0. MARCO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN**

##### **3.1. Planteamiento metodológico (tipo, nivel y diseño de investigación)**

###### **3.1.1. Tipo y nivel de la investigación**

Enfoque de Investigación: Cuantitativo

Nivel de Investigación: Experimental - Explicativo

###### **3.1.2. Diseño de la Investigación**

Se realizó el balance de masa del circuito de la primera Línea de Molienda SAG en software JKSimMet, posterior a eso se realizó la calibración de equipos en software METSIM, luego se procedió a simular el circuito variando la abertura del Trommel a 16mm, 18mm y 20mm. Por lo anterior, los diferentes balances de masa y granulometrías obtenidas serán analizadas en cuanto a la mejora de la capacidad del chancador de Pebbles.

##### **3.2. Población y muestra (si es aplicable)**

Población: Planta concentradora

Muestra: Circuito de molienda Primaria

##### **3.3. Equipos y Materiales**

###### **3.3.1 Equipo**

01 Computadora (software METSIM y JKSimMet)

02 Equipos de laboratorio metalúrgico (Ro Tap, juego de mallas)

03 Bandejas y otros.

### 3.3.2 Materiales

Mineral sulfuro de cobre.

### 3.4. Procedimiento de las pruebas experimentales

- Se recopiló data experimental de los distintos puntos de muestreo del circuito SAG, realizando análisis granulométrico, determinando el % de sólidos de las distintas muestras, así como la densidad del mineral en el laboratorio metalúrgico.
- Se hizo un tratamiento de datos a la granulometría.
- Se hizo un balance de masa en el software JKSimMet, donde se calculó los flujos de sólidos y agua de todo el circuito.
- Posterior a esto se desarrolló el diagrama de flujo de molienda primaria semiautógena, se hizo la simulación inicial del circuito y luego la calibración de los equipos con la herramienta parametrizar.
- Luego se hizo las simulaciones finales cambiando la abertura del Trommel en 16 mm, 18 mm y 20 mm, obteniendo 3 escenarios diferentes, de los cuales se evaluó los resultados en función a la capacidad del chancador de Pebbles.

### 3.5. Técnicas de recolección de datos

Para la recolección de datos se hizo uso del procedimiento mostrado en la Tabla 10.

**Tabla 10**

*Recolección de datos*

<b>Datos</b>	<b>Procedimiento</b>	<b>Actividades</b>
<b>Tonelaje de Alimentación</b>		
<b>Granulometría</b>	Análisis Granulométrico	<b>toma de muestra de fajas y flujos de descarga de equipos</b>
<b>Gravedad Específica</b>	Método de la fiola	<b>toma de muestra de faja</b>
<b>% de Sólidos</b>	Uso de estufas eléctricas y balanza marcy	<b>toma de muestra de faja y pulpa</b>
<b>Dimensiones y Condiciones de Operación del SAG (Diámetro, Largo, %Vc, SPI(CEE), Abertura de parrilla, Ángulo de cono extremo, abertura de alimentación, %Nivel de llenado de bola)</b>	Planos de fabricación y parámetros operativos	<b>recopilación de información</b>
<b>Dimensiones y Condiciones de Operación del Trommel (Ancho, Largo, Abertura real, Slot, eficiencia)</b>	Planos de fabricación y parámetros operativos	<b>recopilación de información</b>
<b>Dimensiones y Condiciones de Operación de la zaranda (Ancho, Largo, Abertura real, Slot, eficiencia)</b>	Planos de fabricación y parámetros operativos	<b>recopilación de información</b>

### **3.6. Técnicas para el procesamiento de datos**

El presente trabajo pretende ver la influencia de las variables independientes en la capacidad del chancador de Pebbles variando la abertura del trommel, y así medir el aumento de capacidad.

Tratamiento:

1. Correcciones de las granulometrías por modelo doble Weibull.
2. Balance de masa en software JKSimMet.
3. Calibración de equipos en METSIM.
4. Simulación de circuito de molienda SAG – Primera Línea.
5. Comparación del circuito real vs el simulado.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS**

#### **4.0. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN**

##### **4.1. Descripción de las pruebas experimentales**

- La data experimental se recopiló con el fin de realizar el balance de masa y analizar el estado actual del circuito primario de molienda semiautógena; la granulometría permite el balance de sólidos y conjuntamente el % de sólidos en el cálculo del balance de agua, dando como resultado un balance másico global, este mismo se desarrolló en el software JKSIMMET.
- Luego se diseñó el circuito y realizamos las simulaciones iniciales del circuito en el programa METSIM, esto para ver si el programa era funcional para nuestro circuito, y que el sistema convergía.
- Después se realizó la calibración de equipos, con información del balance de masa, para poder sintonizar ambos escenarios a las mismas condiciones y que los modelos matemáticos tengan buena precisión en los resultados.
- Finalmente se realizó las simulaciones modificando la abertura del Trommel a 16mm, 18mm y 20mm, para que pueda pasar más material por la abertura de la malla y reducir el tonelaje recirculado al chancador de Pebble, esto de manera controlada en la simulación para no variar demasiado el T80 a molienda de bolas.

##### **4.2. Presentación y análisis de los resultados**

###### **4.2.1 Toma de datos del circuito de molienda primaria semiautógena**

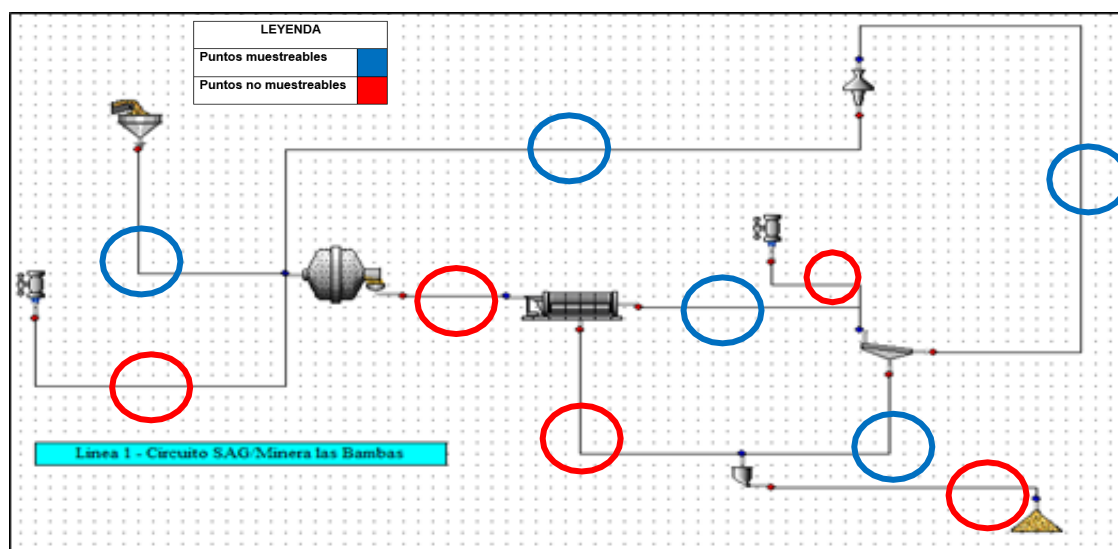
La toma de datos se realizó en distintos puntos del circuito como: Alimento fresco, Sobre-tamaño (Oversize) del trommel, Bajo-tamaño (Undersize) de la zaranda, Sobre-tamaño (Oversize) de la zaranda, Descarga del chancador de pebbles, tal como muestra en la Figura 32.

La descarga del molino SAG y Undersize del Trommel no son puntos muestreables, pero se pueden recalcular mediante el algoritmo de desarrollo de JKSIMMET y una valoración de SD como MISSING.

Las líneas de agua al molino SAG y a la zaranda se calcularán en el balance de masa. El producto final del circuito de molienda primaria en cuanto a granulometría se tuvo que recalcular mediante la herramienta MISSING de JKSimMet donde se asumió que el tonelaje de cabeza es el mismo que la salida final del circuito.

**Figura 32**

*Puntos de muestreo del circuito de molienda primaria semiautógena*



Nota. En el diagrama de flujo se muestra los puntos de muestreo.

#### 4.2.2 Tratamiento de datos previo al balance de masa

El tratamiento de datos se hizo mediante el ajuste granulométrico en el software JKSimMet, el cual **reduciría el % de** error por la toma de muestra, esto dentro de un algoritmo de desarrollo interno que luego se verificara con el modelo de ajuste Doble Weibull para garantizar que el tratamiento de la información haya sido el correcto (reconciliación metalúrgica).

**Tabla 11***Análisis Granulométrico del circuito SAG experimental*

Análisis Granulométrico (%Pasante acumulado)								
Malla	Abertura(mm)	Abertura(μm)	Alimento fresco	Undersize z	Oversize t	Oversize z	Producto final	Producto chancadora de cono
5"	127,00	127000	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
4"	101,600	101600	81,37	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3"	76,200	76200	70,87	100,00	98,80	97,22	100,00	100,00
2"	50,800	50800	56,79	100,00	90,73	78,54	100,00	98,92
1"	25,400	25400	40,57	100,00	79,26	51,96	100,00	83,65
3/4"	19,050	19050	34,87	100,00	71,15	33,16	100,00	64,77
1/2"	12,700	12700	27,89	84,25	48,77	2,07	97,82	27,79
3/8"	9,500	9500	24,18	72,89	41,49	0,15	94,2	20,00
1/4"	6,350	6350	19,51	66,24	37,65	0,01	88,41	16,52
m4	4,750	4750	17,03	62,69	35,63	0,00	83,98	13,16
m6	3,350	3350	14,51	58,48	33,23	0,00	78,4	10,51
m8	2,360	2360	12,20	54,05	30,72	0,00	72,48	8,38
m12	1,700	1700	10,02	50,01	28,42	0,00	67,05	6,70
m16	1,180	1180	8,74	45,96	26,12	0,00	61,62	5,36
m20	0,850	850	7,71	42,00	23,87	0,00	56,31	4,29
m30	0,600	600	6,80	37,97	21,58	0,00	50,92	3,43
m40	0,425	425	5,99	33,81	19,21	0,00	45,34	2,75
m50	0,300	300	5,33	30,30	17,22	0,00	40,63	2,20
m70	0,212	212	4,72	26,64	15,14	0,00	35,72	1,77
m100	0,150	150	4,21	23,62	13,42	0,00	31,67	1,41
m140	0,106	106	3,72	20,22	11,49	0,00	27,12	1,13
m200	0,075	75	3,33	16,96	9,64	0,00	22,73	0,91
m270	0,053	53	3,04	14,59	8,29	0,00	19,56	0,72
m400	0,038	38	2,89	14,59	0,00	0,00	0,00	0,00
z=	zaranda							
t=	trommel							

A continuación, se muestra el ajuste granulométrico de los puntos muestreables, desarrollado en el JKSImMet.

**Tabla 12***Ajuste Granulométrico del circuito SAG en JKSImMet*

Análisis Granulométrico (%Pasante acumulado) en JKSImMet								
Malla	Abertura(mm)	Abertura(μm)	Alimento fresco	Undersize z	Oversize t	Oversize z	Producto final	Producto chancadora de cono
5"	127,00	127000	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
4"	101,600	101600	81,37	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3"	76,200	76200	70,87	100,00	98,80	97,22	100,00	100,00
2"	50,800	50800	56,79	100,00	90,73	78,54	100,00	98,92
1"	25,400	25400	40,57	100,00	79,26	51,96	100,00	83,65
3/4"	19,050	19050	34,87	100,00	71,15	33,16	100,00	64,77
1/2"	12,700	12700	27,89	84,25	48,77	2,07	97,82	27,79
3/8"	9,500	9500	24,18	72,89	41,49	0,15	94,20	20,00
1/4"	6,350	6350	19,51	66,24	37,65	0,01	88,41	16,52
m4	4,750	4750	17,03	62,69	35,63	0,00	83,98	13,16
m6	3,350	3350	14,51	58,48	33,23	0,00	78,40	10,51
m8	2,360	2360	12,20	54,05	30,72	0,00	72,48	8,38
m12	1,700	1700	10,02	50,01	28,42	0,00	67,05	6,70
m16	1,180	1180	8,74	45,96	26,12	0,00	61,62	5,36
m20	0,850	850	7,71	42,00	23,87	0,00	56,31	4,29
m30	0,600	600	6,80	37,98	21,58	0,00	50,92	3,43
m40	0,425	425	5,99	33,81	19,21	0,00	45,34	2,75
m50	0,300	300	5,33	30,30	17,22	0,00	40,63	2,20
m70	0,212	212	4,72	26,64	15,14	0,00	35,72	1,77
m100	0,150	150	4,21	23,62	13,42	0,00	31,67	1,41
m140	0,106	106	3,72	20,23	11,49	0,00	27,12	1,13
m200	0,075	75	3,33	16,96	9,64	0,00	22,73	0,91
m270	0,053	53	3,04	14,59	8,29	0,00	19,56	0,72
m400	0,038	38	2,89	14,18	8,04	0,00	17,06	0,00
z=	zaranda							
t=	trommel							

Ahora procedemos a verificar el ajuste mediante el modelo doble weibull (Doble weibull) en plantillas de cálculo, donde determinamos la diferencia (error) entre el valor pasante obtenido en el JKSimMet y ajustado del modelo doble weibull, calculando así el error por malla y luego la sumatoria de todas, nos dará el error total (<5%); esto con la ayuda de la herramienta SOLVER en MS Excel y determinando las constantes del modelo.

Modelo doble Weibull:

$$Pasante = \left\{ \begin{array}{l} \Delta_0 * [1 - \exp(\ln(0,2) * (\frac{D}{D80})^{\Delta_1})] + \\ (1 - \Delta_0) * [1 - \exp(\ln(0,2) * (D/D80)^{\Delta_2})] \end{array} \right\} * 100 \quad [20]$$

**Donde:**

Delta0 = Factor de ponderación gruesos/finos

Delta1 = Factor de finos

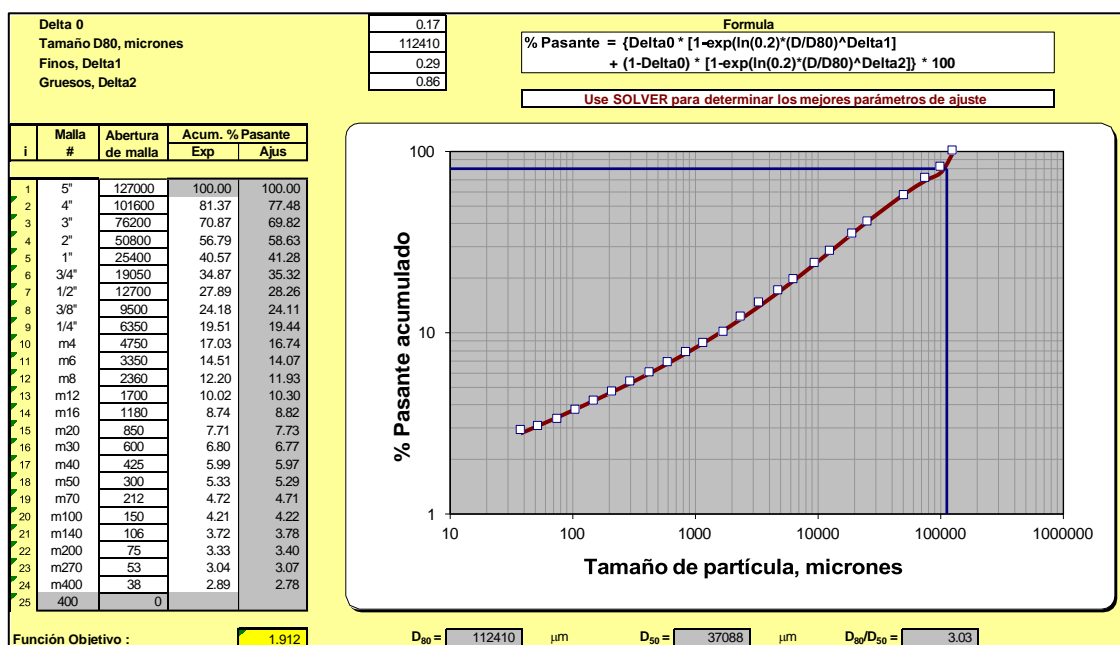
Delta2 = Factor de gruesos

D80 = Tamaño de partícula donde pasa el 80% de material en  $\mu\text{m}$

A continuación, se muestra el ajuste granulométrico con el modelo Doble Weibull

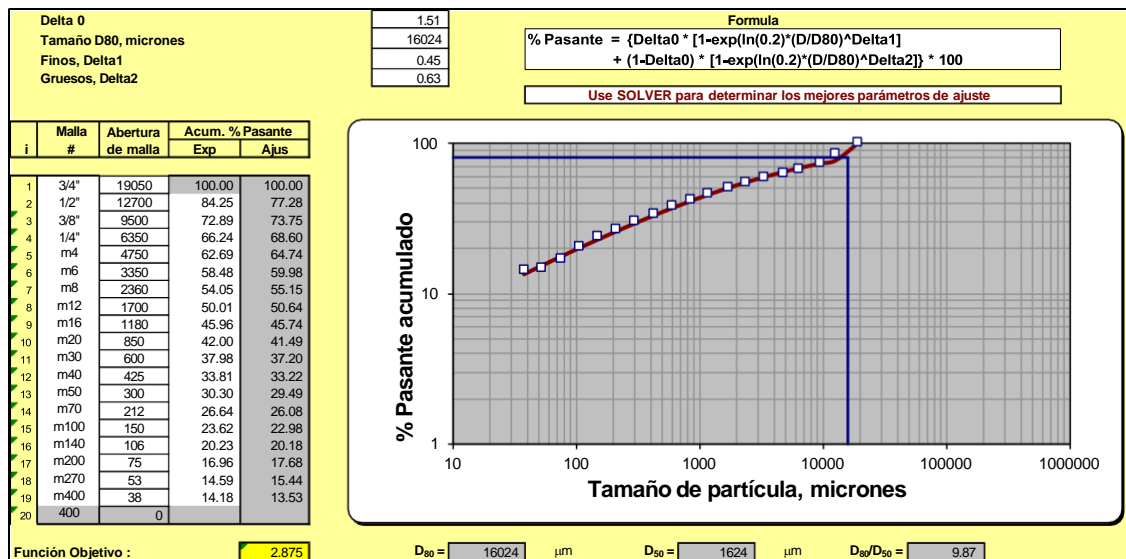
**Tabla 13**

*Ajuste granulométrico Doble Weibull para la alimentación*



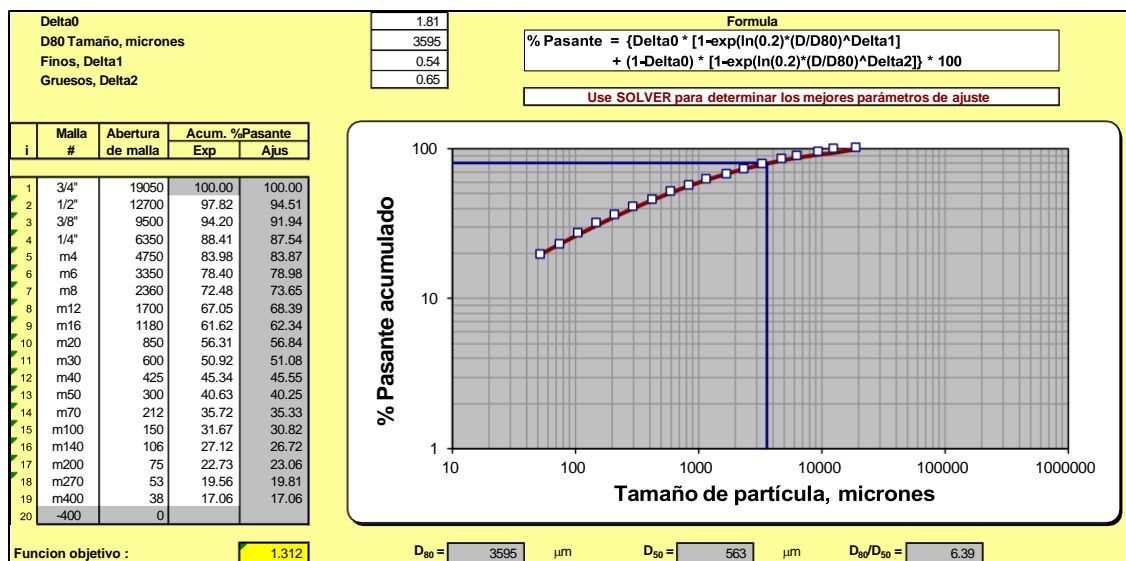
**Tabla 14**

*Ajuste granulométrico Doble Weibull undersize de zaranda*



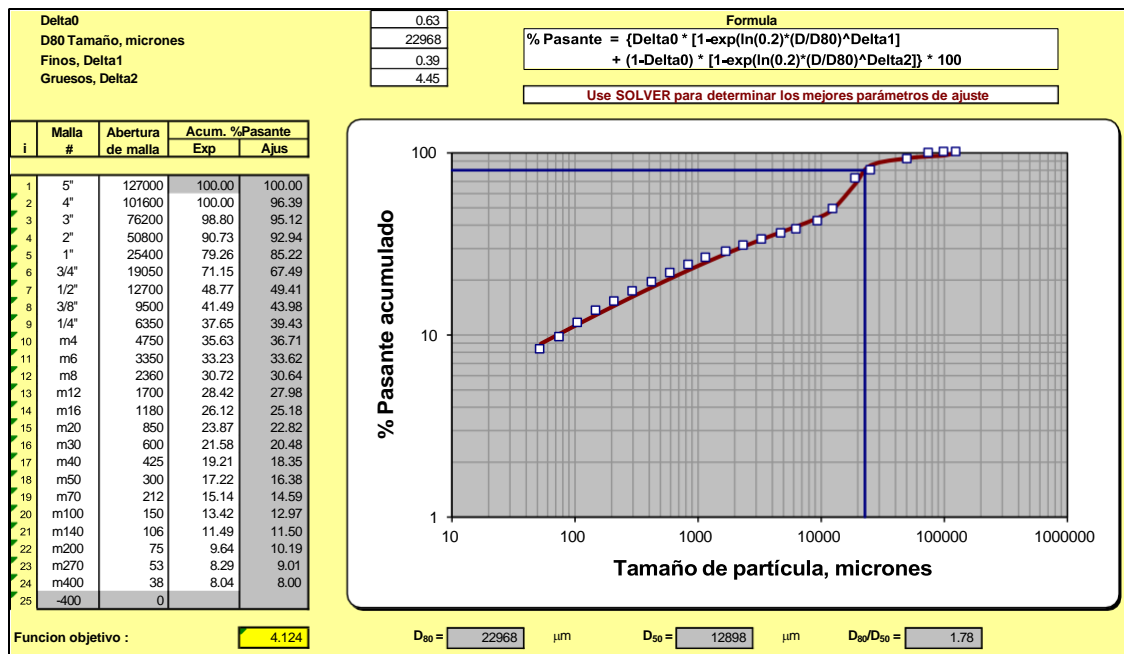
**Tabla 15**

*Ajuste granulométrico Doble Weibull producto final*



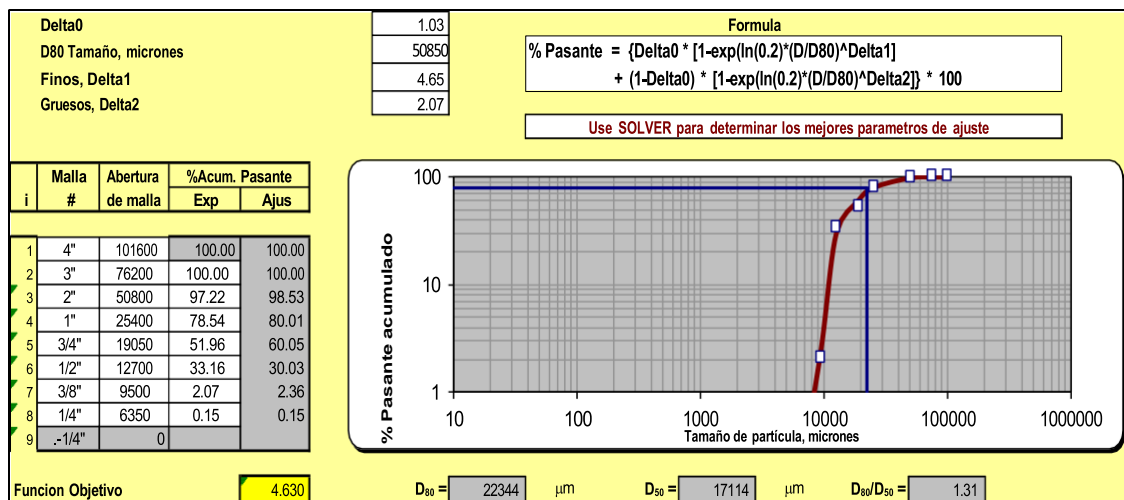
**Tabla 16**

*Ajuste granulométrico Doble Weibull oversize trommel*



**Tabla 17**

*Ajuste granulométrico Doble Weibull oversize zaranda*



Con este tratamiento que se le ha dado a la información experimental recién se puede obtener un balance de masa confiable.

#### 4.2.3 Balance de masa en JKSimMet

El balance de masa fue elaborado siguiendo una serie de pasos, tales como:

➤ ***La elaboración del flowsheet***

El flowsheet fue desarrollado en JKSimMet en base al circuito de la línea 1 de molienda primaria semiautógena de la minera Las Bambas.

➤ ***Ingreso de mallas***

El set de 24 mallas que se emplea en la minera Las Bambas son:

5",4",3",2",1",3/4",1/2",3/8",1/4", m4, m6, m8, nm12, m16, m20, m30, m40, m50, m70, m100, m140, m200, m270, m400.

➤ ***Gravedad específica***

Esta tiene un valor de 2,9.

➤ ***Tonelajes de cabeza.***

El tonelaje de alimento fresco húmedo es de 3,425 TM/h.

El tonelaje de alimento fresco seco es de 3,324 TM/h.

La humedad es del 3%.

➤ ***Granulometrías de los puntos de muestreo.***

Las granulometrías fueron están referenciadas en la tabla 13.

➤ ***Valoración de SD (desviación estándar) según los datos experimentales.***

La valoración SD es la variación del error en la toma de datos que afecta al balance de masa; cada ítem a determinar cómo tonelajes de sólidos, de agua, % de sólidos y granulometrías dependen de que tan bueno haya sido la toma de datos experimentales.

➤ ***Designación del tipo flujo mayor (major), menor (minor) o ausentes (missing).***

Los flujos mayores en denominación son aquellos flujos de tonelaje de sólidos conocido.

Los flujos menores son aquellos que solo se dispone información como granulometrías, leyes y % de sólidos (opcional).

Los flujos ausentes son aquellos que no se conoce información alguna ya que no son muestreables.

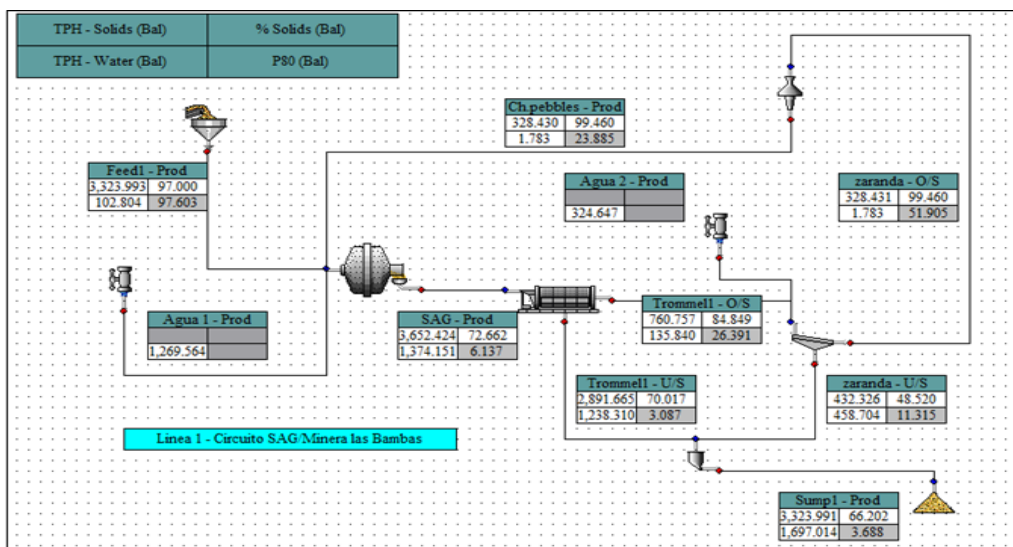
➤ ***Balance de sólidos y posterior balance de agua.***

La licencia empleada para el uso del JKSimMet (PH009pwr009<@ó|éMwd000)

El balance del circuito de molienda primaria semiautógena se muestra en la figura 33.

**Figura 33**

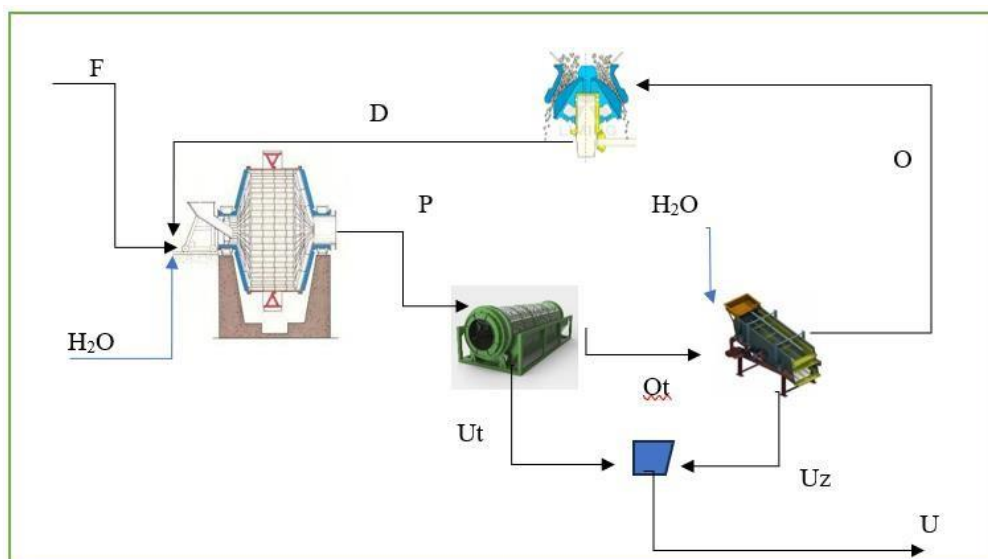
*Balance de masa del circuito de molienda primaria semiautógena*



Para poder comprobar los resultados del balance de masa dado por JKSimMet realizamos un recalcu de toneladas para comprobar si los tonelajes internos calculados satisfacen el balance final.

**Figura 34**

*Esquema de flujos principales del circuito de molienda primaria semiautógena*



Donde:

F= Alimento fresco.

D= Descarga del chancado de Pebbles.

P= Producto de molino SAG.

H<sub>2</sub>O= Línea de agua.

U<sub>z</sub>= Undersize de la zaranda.

U<sub>t</sub>= Undersize del trommel.

U= Undersize final.

O= Oversize de la zaranda.

Los tonelajes secos determinados por JKSimMet fueron:

O= 328,43 TM/h

O<sub>t</sub>= 760,757 TM/h

U<sub>t</sub>= 2 891,665 TM/h

U<sub>z</sub>= 432,33 TM/h

P= 3 652,42 TM/h

-Se empezó comprobando el balance de masa en el Trommel

Cálculo de tonelaje

$$P = O_t + U_t \quad [21]$$

$$P = 760,757 + 2\,891,665 = 3\,652,42 \text{ t/h} \quad [22]$$

recálculo de granulometría

$$\%F(P) = \frac{[\%F(O_t) \cdot O_t + \%F(U_t) \cdot U_t]}{O_t + U_t} \quad [23]$$

Donde:

%F(P) = porcentaje pasante acumulado en el producto del molino SAG.

%F(O<sub>t</sub>)= porcentaje pasante acumulado en el Oversize del Trommel.

%F(U<sub>t</sub>)= porcentaje pasante acumulado en el Undersize del Trommel.

Ot= tonelaje seco del Oversize del trommel

Ut= tonelaje seco del Undersize del trommel

A continuación, se muestran los resultados en hoja de cálculo

**Tabla 18**

*Recalculo de Granulometría en el trommel*

Ajuste Granulométrico en JKSimMet						
Malla	Abertura(mm)	Abertura(um)	Undersize t	Oversize t	Producto SAG jk	Producto SAG cal
5"	127.000	127000	100.00	100.00	100.00	100.00
4"	101.600	101600	100.00	100.00	100.00	100.00
3"	76.200	76200	100.00	98.80	99.75	99.75
2"	50.800	50800	100.00	90.73	98.07	98.07
1"	25.400	25400	100.00	79.26	95.68	95.68
3/4"	19.050	19050	100.00	71.15	93.99	93.99
1/2"	12.700	12700	99.85	48.77	89.21	89.21
3/8"	9.500	9500	97.38	41.49	85.74	85.74
1/4"	6.350	6350	91.72	37.65	80.46	80.46
m4	4.750	4750	87.17	35.63	76.43	76.43
m6	3.350	3350	81.38	33.23	71.35	71.35
m8	2.360	2360	75.23	30.72	65.96	65.96
m12	1.700	1700	69.60	28.42	61.02	61.02
m16	1.180	1180	63.96	26.12	56.08	56.08
m20	0.850	850	58.45	23.87	51.25	51.25
m30	0.600	600	52.85	21.58	46.34	46.34
m40	0.425	425	47.06	19.21	41.26	41.26
m50	0.300	300	42.18	17.22	36.98	36.98
m70	0.212	212	37.08	15.14	32.51	32.51
m100	0.150	150	32.87	13.42	28.82	28.82
m140	0.106	106	28.15	11.49	24.68	24.68
m200	0.075	75	23.60	9.64	20.69	20.69
m270	0.053	53	20.30	8.29	17.80	17.80
m400	0.038	38	0.00	8.04	0.75	1.68
			Ut=	2891.67		
			Ot=	760.76		
	calculado					
	experimental					

A partir de esta data mostrada en la Tabla 18, se comprueba el balance de masa en la zaranda

Cálculo de tonelaje

$$O + Uz = Ot \quad [24]$$

$$328,431 + 432,326 = 760,757 \text{ t/h} \quad [25]$$

recálculo de granulometría

$$\%F(Ot) = \frac{[(\%F(O)*O+\%F(Uz)*Uz)]}{O + Uz} \quad [26]$$



$$H_2O = F * \%Humedad \quad [27]$$

$$H_2O = 3\,425 * 0,03 = 102,77 \text{ t/h} \quad [28]$$

$$\%Sólidos = 1 - \% Humedad \quad [29]$$

$$\%Sólidos = 1 - 0,03 = 0,97 \quad [30]$$

Para el producto del SAG:

$$P = 3\,632,8 \text{ t/h}$$

$$H_2O = \left( \frac{P}{\%Sólidos} \right) - P \quad [31]$$

$$H_2O = \left( \frac{3\,632,8}{0,7266} \right) - 3\,632,8 = 1\,365,8 \text{ t/h} \quad [32]$$

$$\%Sólidos = 72,66$$

Para el oversize de la zaranda:

$$Oz = 308,8 \text{ t/h}$$

$$H_2O = \left( \frac{Oz}{\%Sólidos} \right) - Oz \quad [33]$$

$$H_2O = \left( \frac{308,8}{0,9946} \right) - 308,8 = 1,67 \text{ t/h} \quad [34]$$

$$\%Sólidos = 99,46$$

Para el undersize de la zaranda:

$$Uz = 432,3 \text{ t/h}$$

$$H_2O = \left( \frac{Uz}{\%Sólidos} \right) - Uz \quad [35]$$

$$H_2O = \left( \frac{432,3}{0,4852} \right) - 432,3 = 458,67 \text{ t/h} \quad [36]$$

$$\%Sólidos = 48,52$$

Para la descarga del chancador de Pebbles:

$$D = 308,8 \text{ t/h}$$

$$H_2O = \left( \frac{D}{\%Sólidos} \right) - D \quad [37]$$

$$H_2O = \left( \frac{308,8}{0,9946} \right) - 308,8 = 1,67 \text{ t/h} \quad [38]$$

$$\% \text{ Sólidos} = 99,46$$

Para el oversize del trommel:

$$O_t = F \quad [39]$$

$$O_t = 760,757 \text{ t/h}$$

$$H_2O = \left( \frac{O_t}{\% \text{ Sólidos}} \right) - O_t \quad [40]$$

$$H_2O = \left( \frac{760,757}{0,84849} \right) - 760,757 = 135,84 \text{ t/h} \quad [41]$$

$$\% \text{ Sólidos} = 84,84$$

Para el undersize del Trommel:

$$U_t = 2\,891,665 \text{ t/h}$$

$$H_2O = \left( \frac{U_t}{\% \text{ Sólidos}} \right) - U_t \quad [42]$$

$$H_2O = \left( \frac{2\,891,665}{0,70017} \right) - 2\,891,665 = 1\,238,69 \text{ t/h} \quad [43]$$

$$\% \text{ Sólidos} = 70,01$$

Para el undersize final:

$$U = F \quad [44]$$

$$U = 3\,324 \text{ t/h}$$

$$H_2O = \left( \frac{U}{\% \text{ Sólidos}} \right) - U \quad [45]$$

$$H_2O = \left( \frac{3\,324}{0,662} \right) - 3\,324 = 1\,697,1 \text{ t/h} \quad [46]$$

$$\% \text{ Sólidos} = 66,2$$

Para la línea de agua al SAG

$$H_2O = P - (F + D) \quad [47]$$

$$H_2O = 1\,365,8 - (102,77 + 1,67) = 1\,261,4 \text{ t/h} \quad [48]$$

Para la línea de agua a la zaranda

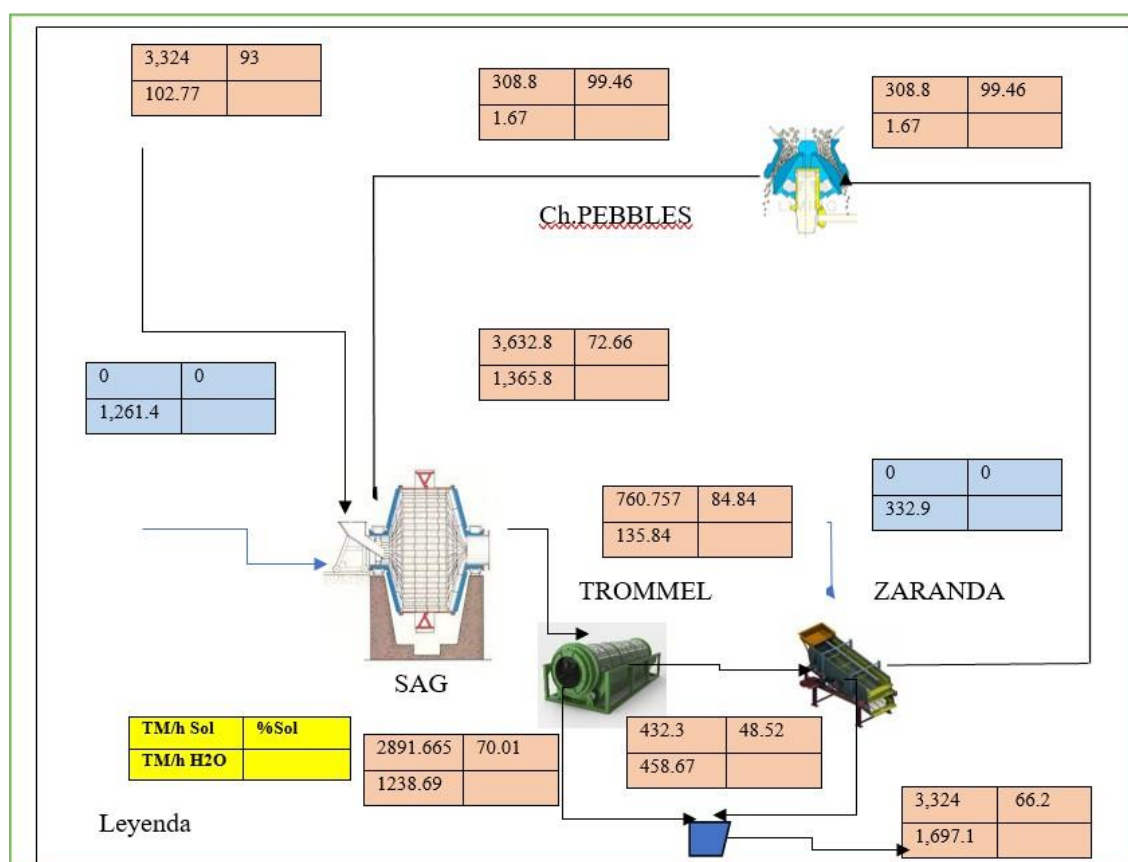
$$H_2O = (O_z + U_z) - O_t \quad [49]$$

$$H_2O = (1,67 + 458,76) - 135,84 = 324,6 \text{ t/h} \quad [50]$$

El balance global se muestra en la figura 35.

**Figura 35**

*Comprobación de balance del circuito de molienda primaria semiautógena*



#### 4.2.4 Calibración de equipos en METSIM

Antes de realizar la simulación para poder optimizar la capacidad del circuito de molienda semiautógena, se calibraron los equipos para generar el modelo matemático de predicción y que el mismo posea un bajo grado de error.

A continuación, en la tabla 20 se muestra la calibración de todos los equipos del circuito.

**Tabla 20***Calibración de Molino SAG en METSIM*

<i>Datos del Molino SAG</i>	
Consumo específico de energía kWh/ton m	4,26
Diámetro interno del molino, ft	39
Largo interno del molino, ft	24
Abertura de alimentación, ft	12,92
ángulo del cono del extremo del molino, °	12
RPM del molino	9,78
% de llenado de bolas	19,02
Abertura de parrilla, “	3,5
Cantidad	01

**Tabla 21***Calibración de Trommel en METSIM*

Trommel	
% de Eficiencia	84,1
Ancho, m	5,812
Largo, m	3,363
Abertura, mm	13
Ratio Slot	3
Cantidad	01

**Tabla 22***Calibración de Zaranda en METSIM*

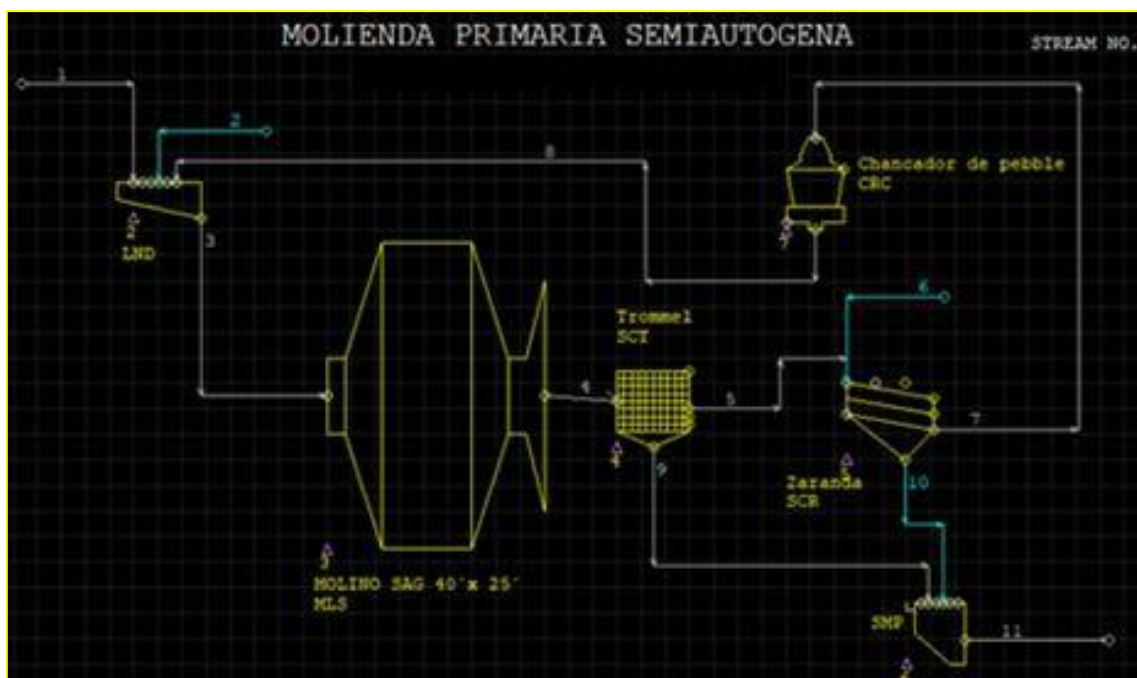
Zaranda	
% de Eficiencia	91
Ancho, m	3,66
Largo, m	7,31
Abertura, mm	14,5
Ratio Slot	1
Cantidad	01

**Tabla 23***Calibración de Chancador de Pebble en METSIM*

Chancador de Pebbles	
Ajuste de lado cerrado, mm	13
Excentricidad, mm	32
Ajuste de lado abierto, mm	45
Consumo específico de energía kWh/t	1,2
Cantidad	01

La calibración que se hizo, es básicamente una retroalimentación de información a los equipos de METSIM, para que genere un modelo matemático que prediga los mismos resultados del circuito real imitando en primera instancia al mismo para garantizar que la simulación es representativa.

Luego se hizo la primera simulación con los equipos ajustados, se procede a comparar circuito real vs circuito simulado. La licencia empleada para el uso del software es la #3531

**Figura 36***Simulación del circuito de molienda primaria semiautógena con calibración*

El balance de masa del circuito calibrado se muestra en la Tabla 26.

**Tabla 24***Balance de masa circuito calibrado*

Flujo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Flujo total TM/h	3427	1269	5027	5027	896.6	324.8	330.2	330.2	4130	891.1	5021
Flujo solidos TM/h	3324	0	3652	3652	760.8	0	328.4	328.4	2892	432.3	3324
Flujo agua TM/h	102.8	1269	1374	1374	135.8	324.8	1.79	1.79	1238	458.8	1697
%Solidos	97	0	72.66	72.66	84.85	0	99.46	99.46	70.02	48.52	66.2
p80 micras	97857	0	92700	6145	26562	0	52439	24027	3110	11404	3713
p80-malla 200	3.343	0	3.125	20.82	9.695	0	0	0.919	23.75	17.06	22.88

La comparación de resultados experimental vs simulado se muestra en la Tabla 25

**Tabla 25***Comparación de resultados exp vs sim*

	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11	
Numero de flujo	Exp	Sim	Exp	Sim	Exp	Sim	Exp	Sim	Exp	Sim	Exp	Sim	Exp	Sim	Exp	Sim	Exp	Sim	Exp	Sim	Exp	Sim
MTIHR Solidos	3323.996	3323.996	0	0	3652.424	3652.431	3652.424	3652.431	760.757	760.7623	0	0	328.431	328.435	328.431	328.435	2891.665	2891.668	432.326	432.3273	3323.991	3323.996
MTIHR Agua	102.804	102.804	1269.564	1269.497	1374.151	1374.091	1374.151	1374.091	135.84	135.8133	324.647	324.75	1.783	1.790	1.783	1.790	1283.31	1238.278	458.704	458.7735	1697.014	1697.051
% de solidos	97	97	0	0	72.662	72.663	72.662	72.663	84.849	84.852	0	0	99.46	99.458	99.46	99.458	70.017	70.0171	48.52	48.5161	66.202	66.20125
P80 micras	97603	97857	0	0	92221	92700	6137	6145	26331	26562	0	0	51905	52439	23885	24027	3087	3110	11315	11404	3688	3713
Flujo 1	Alimentación																					
Flujo 2	Agua al molino SAG																					
Flujo 3	Alimento compuesto al SAG																					
Flujo 4	Descarga del SAG																					
Flujo 5	Oversize del Trommel																					
Flujo 6	Agua a la zaranda																					
Flujo 7	Oversize de la zaranda																					
Flujo 8	Descarga del chancador de pebbles																					
Flujo 9	Undersize del Trommel																					
Flujo 10	Undersize de la zaranda																					
Flujo 11	Producto final etapa SAG																					

Los modelos matemáticos son aceptables, por tanto, se procedió a realizar la simulación de optimización.

#### 4.2.5. Simulación con cambio de tamaño de abertura del Trommel

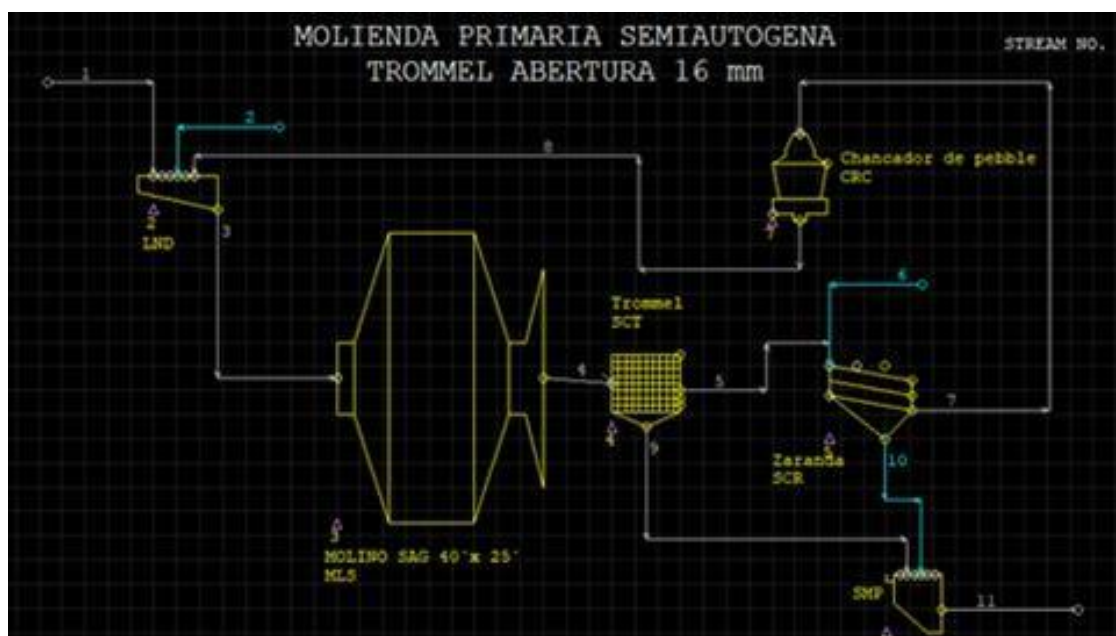
Esta es la etapa final de optimización en simulación, en este caso, simulación en molienda semiautógena, aquí buscamos mejorar la capacidad en función al cambio de abertura del Trommel, el cual dejará pasar más tonelaje al aumentar y reducirá la carga circulante al chancador de Pebble; por ende, podremos tratar más tonelaje fresco.

La selección de tamaños de abertura se tomó con base a las recomendaciones y asesoría del fabricante del Trommel (FLSmidth).

La simulación en METSIM permitirá cuantificar estos datos y precisar los escenarios posibles que se darán, con gran seguridad de la calidad de los resultados. Primero simulamos a un tamaño de abertura de 16 mm, cabe recalcar que el original está en 13 mm.

**Figura 37**

*Simulación con cambio de abertura de Trommel 16mm*



El balance de masa con cambio de abertura de Trommel a 16 mm se muestra en la tabla 26.

**Tabla 26**

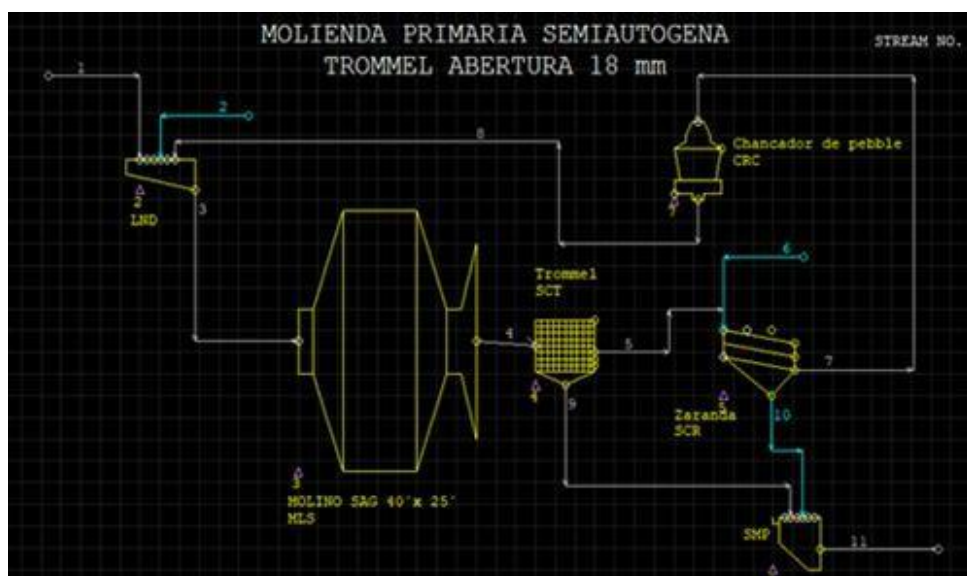
*Balance de masa con abertura 16 mm Trommel*

Flujo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Flujo total TM/h	3427	1269	4982	4982	786.7	324.8	285.9	285.9	4195	825.6	5021
Flujo solidos TM/h	3324	0	3608	3608	667.6	0	284.4	284.4	2941	383.2	3324
Flujo agua TM/h	102.8	1269	1374	1374	119.2	324.8	1.55	1.55	1255	442.4	1697
%Solidos	97	0	72.42	72.42	84.85	0	99.46	99.46	70.09	46.42	66.2
p80 micras	97857	0	93376	6145	30403	0	55330	25298	3563	9886	3946
%-malla 200	3.343	0	3.153	20.82	10.92	0	0	0.938	23.07	19.02	22.6

Estos resultados muestran que se pudo reducir la carga circulante en un 13,42 %, pasando de 330.2 t/h a 285.9 t/h, una reducción efectiva de 44.3 t/h o 1063.2 t/d; la potencia disminuyó de 396 kW a 341 kW, mostrando una clara mejora, en la disponibilidad de la capacidad del circuito de molienda primaria semiautógena, asimismo la potencia del molino SAG disminuyó de 15 548 kW a 15 360 kW. El P<sub>80</sub> se incrementó de 3713  $\mu$ m a 3946  $\mu$ m, una diferencia de 233  $\mu$ m, este incrementó en el circuito de molienda primaria no posee una gran influencia ya que se trabaja con granulometrías muy altas y esta variación suele ser habitual debido a la segregación del mineral de cabeza. Normalmente maneja un límite de variación máxima de 400  $\mu$ m para no afectar al circuito de molienda de bolas. Luego se simuló a un tamaño de abertura de Trommel de 18 mm.

**Figura 38**

*Simulación con cambio de abertura de Trommel 18mm*



El balance de masa con cambio de abertura de Trommel a 18mm se muestra en la Tabla 27.

**Tabla 27**

*Balance de masa con abertura 18 mm Trommel*

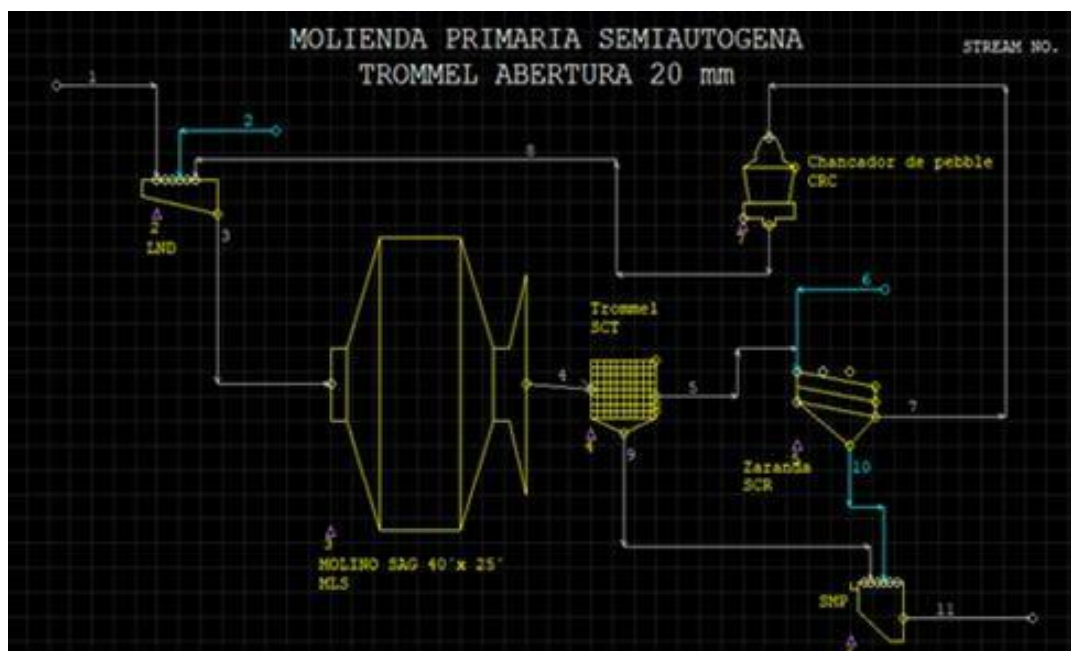
Flujo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Flujo total TM/h	3427	1269	4955	4955	723.2	324.8	258.4	258.4	4231	789.6	5021
Flujo solidos TM/h	3324	0	3581	3581	613.7	0	257	257	2967	356.7	3324
Flujo agua TM/h	102.8	1269	1374	1374	109.6	324.8	1.4	1.4	1264	432.9	1697
%Solidos	97	0	72.27	72.27	84.85	0	99.46	99.46	70.12	45.17	66.2
p80 micras	97857	0	93798	6145	32905	0	57244	27654	3870	7145	4102
%-malla 200	3.343	0	3.171	20.82	11.78	0	0	0.956	22.69	20.27	22.43

Los resultados mostrados en la Tabla 27, indican que se pudo reducir la carga circulante en un 21,74 %, pasando de 330,2 t/h a 258,4 t/h, una reducción efectiva de 71,8 t/h o 1 723,2 t/d, la potencia disminuyó de 396 kW a 308 kW; denotando una mejora más satisfactoria, en la disponibilidad de la capacidad del circuito de molienda primaria semiautógena, asimismo la potencia del molino SAG disminuyó de 15 548 kW a 15 241 kW. El P<sub>80</sub> (tamaño 80% pasante en  $\mu\text{m}$  del producto final del circuito) se incrementó de 3713  $\mu\text{m}$  a 4102  $\mu\text{m}$ , una diferencia de 389  $\mu\text{m}$ , este incrementó en este circuito, aún sigue estando dentro de los límites operativos.

Finalmente simulamos a un tamaño de abertura de 20 mm y analizamos los resultados.

### Figura 39

*Simulación con cambio de abertura de Trommel 20mm.*



El balance de masa con cambio de abertura de trommel a 20mm es el siguiente:

### Tabla 28

*Balance de masa con abertura 20 mm Trommel*

Flujo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Flujo total TM/h	3427	1269	4933	4933	678.8	324.8	236.8	236.8	4254	766.8	5021
Flujo solidos TM/h	3324	0	3559	3559	576	0	235.5	235.5	2983	340.5	3324
Flujo agua TM/h	102.8	1269	1374	1374	102.8	324.8	1.283	1.283	1271	426.3	1697
%Solidos	97	0	72.16	72.16	84.85	0	99.46	99.46	70.13	44.41	66.2
p80 micras	97857	0	94131	6145	34779	0	58813	29746	4101	5672	4230
%-malla 200	3.343	0	3.186	20.82	12.48	0	0	0.973	22.43	21.11	22.29

Los resultados mostrados en la Tabla 28, indican que se pudo reducir la carga circulante en un 28,29%, pasando de 330,2 t/h a 236,8 t/h, una reducción efectiva de 93,4 t/h o 2241.6 t/d, la potencia disminuyó de 396 kW a 282 kW; denotando una mejora excepcional, en la disponibilidad de la capacidad del circuito de molienda primaria semiautógena, asimismo la potencia del molino SAG disminuyó de 15 548 kW a 15 152 kW.

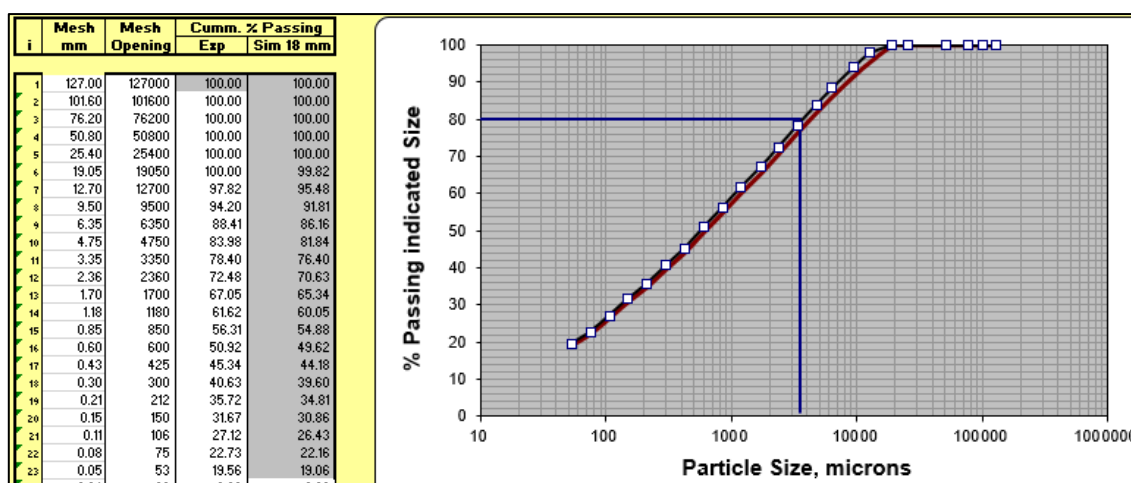
Pero el p80 se incrementó de 3713  $\mu\text{m}$  a 4230  $\mu\text{m}$ , una diferencia de 517  $\mu\text{m}$ , este incremento en este circuito, no está dentro de los límites operativos y podría incrementar en gran cantidad la carga circulante del circuito de molienda de bolas y generar un P80 a flotación demasiado elevado, afectando a este proceso.

Sin embargo, podría plantearse alternativas de mejora en nuevo estudio, sobre el circuito de molienda de bolas, para poder tratar un mayor tonelaje teniendo como referencia este estudio.

En el siguiente gráfico se puede ver la diferencia entre granulometrías del producto original de la etapa SAG vs el producto simulado con abertura de Trommel de 18 mm.

**Tabla 29**

*Granulometrías experimentales vs simulada con abertura 18mm del producto SAG*



Por tanto, seleccionamos la abertura de 18 mm como la más indicada para poder optimizar la capacidad del circuito de molienda primaria semiautógena sin afectar los procesos aguas abajo.

### **4.3. Contrastación de hipótesis**

#### **4.3.1 Contrastación de hipótesis general**

La optimización del circuito de molienda primaria semiautógena si influye en el incremento de capacidad de tratamiento de Concentradora Las Bambas empleando el simulador METSIM, el cual mediante sus modelos matemáticos de predicción ayudó a la optimización de esta investigación.

#### **4.3.2 Contrastación de hipótesis específicas**

1. El funcionamiento operacional del Trommel del molino SAG si influye en su capacidad de tratamiento, esto relacionado a las características que posee como el tamaño de abertura el cual regula el tonelaje pasante y de rechazo
2. El trabajo operacional de la chancadora de Pebbles no causa influencia en gran medida en el circuito de molienda primaria semiautógena, si bien se puede regular el set de la descarga para obtener un producto más fino y con esto reducir la carga circulante, más depende de la misma dureza y granulometría del mineral con el cual se alimentará a esta unidad.
3. El proceso de optimización del circuito de molienda semiautógena si se agiliza mediante un simulador computacional, este ofrece para ello un método de solución rápida a distintos escenarios a un costo cero, pudiendo incluso derivar en nuevas propuestas de mejora del proceso.

## CAPÍTULO V DISCUSIÓN

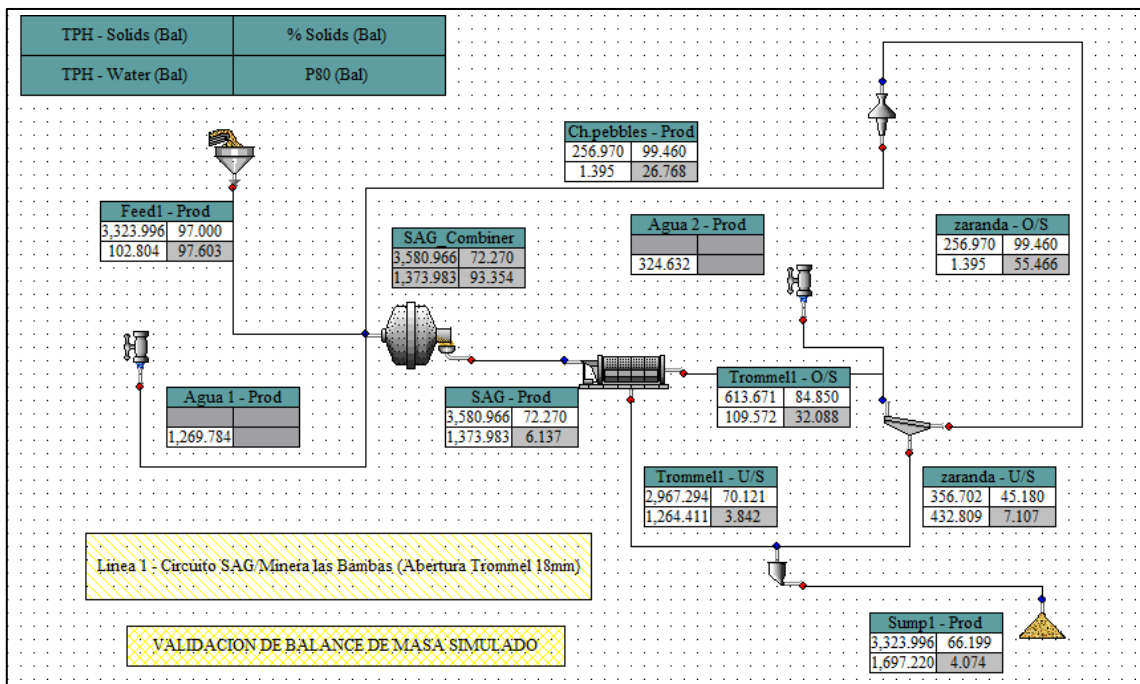
### 5.0. DISCUSIÓN DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

#### 5.1. Pruebas de validación del modelo experimental

En este caso, la presente investigación es básicamente la simulación y propuesta de mejora para la optimización de la capacidad del circuito de molienda primaria semiautógena, la prueba de validación es el balance de la simulación que se obtuvo en el mejor escenario, de abertura 18 mm. Para ello se empleará el software JKSimMet como herramienta de balance, cabe recalcar en trabajos de simulación como propuesta de mejora usualmente se comprueba por calculo manual o mediante herramientas computacionales que permitan verificar si el balance de masa es correcto y cierto. A continuación, se muestra el balance de la simulación en el software JKSimMet:

**Figura 40**

*Balance de masa del circuito simulado con abertura de Trommel 18mm*



Como se puede ver, los resultados son los mismos que la simulación en cuanto al balance de masa, por tanto, se pudo verificar que efectivamente el balance de masa de la simulación con abertura 18mm es correcta, con sustento en el JKSimMet.

## **5.2. Aplicación de la tecnología encontrada**

La simulación que se ha realizado con éxito podrá ser aplicada realizando el respectivo cambio de malla del Trommel, con la nueva abertura determinada en Minera Las Bambas.

El plan de implementación es básicamente, esperar una parada de planta en la cual se pueda montar esta nueva malla con la abertura 18mm, arrancar la operación, y esperar un periodo de 1 mes como mínimo para muestrear y comparar los resultados simulados vs experimentales.

El presente trabajo fue entregado a FLSmitdh (empresa contratista) para la revisión final e implementación del mismo. Incluyéndose también una simulación con herramientas DEM en el software ROCKY, el cual corroboró la mejora del mismo, dejándose a este la responsabilidad de los resultados a esperar en la capacidad del circuito de molienda primaria semiautógena.

## **5.3. Contraste con trabajos de investigación similares**

El contraste se relaciona con las investigaciones de los antecedentes que se mencionaron en el marco teórico, podemos mencionar que el antecedente 1 de estudio, es semejante, debido a que se modificó el diseño del pulp lifter para la mejora y reducción de carga circulante, mejorando la evacuación de la pulpa hacia el Trommel, de igual forma en este estudio nos enfocamos en alguna característica del molino SAG en este caso del Trommel y se cambió el tamaño de abertura para una evacuación mayor por el undersize y reducción de carga circulante.

En el antecedente número 2 de estudio, se emplearon modelos matemáticos de predicción, los mismo que emplea en simulador METSIM para darnos los resultados representativos.

En el antecedente número 3 de estudio también se enfoca en el incremento de capacidad en función de variables de selección y fractura, la cual también empleamos en el simulador, además de la modificación de variables manipulables en el molino SAG.

En el antecedente número 4 de estudio, tenemos una referencia clara del manejo de variables manipulables y su aplicación en los programas de simulación por computadora, lo cual empleamos también como metodología en nuestro estudio.

En el antecedente número 5 de estudio, señala que el preprocesamiento del mineral puede ofrecernos un aumento de capacidad sin necesidad de hacer una modificación notable en el circuito de molienda SAG esto podría complementar nuestro estudio en un futuro como programas MINE TO MILL esto para poder dar solución a problemas de minerales que contienen baja ley.

En el antecedente número 6 de estudio, se basa en la relación de mineral, equipo y condiciones de trabajo de un molino SAG industrial, de igual forma en la simulación, engloba todo esto, siendo una herramienta que cada día gana mayor aceptación en su uso de mejoras de procesos metalúrgicos en procesamiento de minerales.

## CONCLUSIONES

1. Podemos afirmar que una abertura de 18mm es óptima para poder optimizar la capacidad del circuito de molienda primaria semiautógena.
2. La carga circulante se pudo reducir efectivamente en un 21,74% y con esto mejoró la disposición del chancador de Pebbles ante posibles incrementos de capacidad o recuperación de producción.
3. El tamaño t80 o producto p80 de la etapa de molienda SAG se incrementó de 3713  $\mu\text{m}$  a 4102  $\mu\text{m}$ , una diferencia de 390  $\mu\text{m}$  aproximadamente que no afecta en gran medida al circuito y que se compensa con el incremento en la producción estimada a futuro después de la implementación.
4. La combinación de programas como JKSimMet y METSIM nos da resultados más confiables en estudios de simulación de procesos.
5. La simulación en estado estacionario nos da una vista general del proceso.
6. Este estudio está sujeto a unas características propias del mineral como granulometría, mineralogía, dureza, entre otros. Y no prevé cambios en el mineral, pero se pueden tomar estas consideraciones con modelos y caracterizaciones geo metalúrgicas acompañadas de simulación.

## RECOMENDACIONES

1. Esta investigación fue realizada sobre el circuito SAG de minera Las Bambas, en la cual no se involucra el circuito de molienda de bolas e influencia en el circuito de flotación, pero no implica que se hagan investigaciones posteriormente.
2. Se puede emplear otros programas para poder realizar un mejor tratamiento de datos o comparar diferentes resultados para mejor fiabilidad de los resultados de la simulación.
3. Es recomendado retroalimentar los modelos matemáticos generados con data histórica de planta, esto ayuda a confiar más en el modelo y las pruebas en laboratorio pueden permitir realizar escalamientos como otra alternativa de simulación, en la modificación de variables manipulables.
4. Se prefiere realizar estos estudios con la asesoría de expertos para poder puntualizar y darle un mejor enfoque e interpretación de los resultados esperados.
5. Se pueden recurrir a elaborar balances globales en caso de que algún flujo no se pueda muestrear, pero se pueda recalcular en un balance consistente.
6. También se pueden emplear programas como Moly Cop Tools para evaluar el error de la data y balance global en tipo de circuitos SAG SABC-1 o únicamente modulo SAG con chancador de Pebbles.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Drzymala, J. 1 Edition. (2007). *Mineral Processing Foundations of theory and practice of minerallurgy*. Polonia: Wroclaw University of Technology.
- Fuerstenau, M.C. (2003). *Principles of Mineral Processing*. United States: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Gupta, A. 2 Edition. (2016). *Mineral Processing Design and Operations*. United States: Elsevier.
- Jaico, J.E. 3 Edición. (2009). *Problemas de procesamiento de minerales*. Perú: Universidad Nacional de Trujillo.
- Metso. 1 edición (2004). *Conocimientos Básicos en Procesamiento de Minerales*: Finlandia.
- Moly Cop. (2017). SAG. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/535096597/SAG>.
- Mular, A.L. (2002). *Mineral Processing Plant Design, Practice, and Control proceedings*. United States: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Orquera, W. (2019). *Manual Metsim v2.0 Año 2019*. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/535098492/Manual-Metsim-v2-0-Ano-2019>.
- Riquelme, C. (2018). *Chancadores primarios*. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/535274666/P2-Chancadores-Primarios>.
- Schlesinger, M.E. (2011). *Extractive Metallurgy of Copper*. United Kingdom. 5 Edition: Elsevier.
- Sepúlveda, J.E. (1986). *Dimensionamiento y Optimización de Plantas Concentradoras mediante Técnicas de Modelación Matemática*. Chile: Impresos Verman.
- Wills, B.A. (2015). *Wills' Mineral Processing Technology*. United States. 8 Edition: Elsevier.



**Tabla 30**

*Base de Datos General del circuito de molienda primaria semiautógena de minera Las Bambas*

<b>Circuito de Molienda SAG</b>	<b>Und</b>	<b>Línea 1</b>	<b>Línea 2</b>
<b>Molienda SAG</b>			
Tonelaje fresco	ton/hr	3426.8	3176
Potencia	kW	18648	18407
Velocidad de giro	%Vc	79.7	79.7
<b>Trombol</b>			
Abertura de malla	mm	13x48	13x48
<b>Zoronda</b>			
Abertura de malla	mm	14.5x14.5	14.5x14.5
<b>Poblos</b>			
CSS	mm	13	13
Potencia	kW	396.016	419.00